

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Título: Diseño de un proceso de eliminación de cianuro de sodio para la empresa gestora de residuos peligrosos Wastech Costa Rica.

PROYECTO DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA COMO REQUISITO FINAL PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

CECILIO STEPHEN COLEMAN WILSON

SEDE DEL CARIBE
LÍMON, COSTA RICA
2021

HOJA DE APROBACIÓN



Lic. José Alberto Castillo Benavidez

Presidente del tribunal



Lic. Carlos Enrique Rojas Sánchez

Director del proyecto




MBA. Santiago Ureña Altamirano

Lector del proyecto



Lic. Lesmes Miranda Alvarado

Lector del proyecto



M.Sc Federico Chavez Di Luca

Representante de la Escuela de Ingeniería
Química



Cecilio Stephen Coleman Wilson

Postulante

La suerte para triunfar en la vida se llama “Crear en ti”.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre Estebana Wilson González y a mi hermana Margareth Coleman Wilson, quienes siempre han estado para apoyarme y me han dado la oportunidad de estudiar y crecer como persona.

A mis amigos Meylin, Pablo, Yader, Eddy, Tatiana, por todo el apoyo y la amistad que me brindaron en mi etapa universitaria.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por todo el apoyo brindado, su ayuda ha sido incondicional e inmensurable. A mis amigos de la universidad por siempre estar ahí cuando los necesité. Agradezco a Carlos por ser el mejor profesor que he tenido y por su guía en este proyecto. A Santiago, Lesmes y Diego por abrir las puertas de su empresa para desarrollarme como profesional.

Agradezco a Mónica, Mariela, Evelyn, Daniela, Silvia y todo el equipo de trabajo de Greener Group por ayudarme durante mi práctica profesional y porque se han convertido en buenas amigas.

Me siento sumamente agradecido con todos los profesores que han aportado a mi desarrollo como profesional durante mis años universitarios.

Resumen

El objetivo principal del proyecto fue el diseño de un proceso que permitiera la eliminación eficiente de cianuro de sodio, en donde, primeramente, se propusieron tres rutas químicas la electrólisis, la cloración alcalina y el proceso INCO SO₂/Aire, con el objetivo de lograr la descomposición del cianuro en productos menos tóxicos y peligrosos, en donde, se evaluaron distintos parámetros como la tecnología necesaria, la disponibilidad de materias primas y equipos, la facilidad del proceso y el costo para decidir la ruta que mejor se adaptara a las condiciones de la empresa en cuestión.

Elegido el proceso, se procedió a determinar la velocidad de consumo del cianuro utilizando el proceso seleccionado, esto con el objetivo de fijar los parámetros para el escalamiento y diseño del proceso en cuestión. Seguidamente se realizó la etapa de diseño, en donde se establecieron los equipos y accesorios requeridos para llevar a cabo la ruta de eliminación de cianuro, el proceso de disposición final de los subproductos generados y el costo de capital del diseño. Todo lo anterior tomando en cuenta los insumos que poseía la empresa de antemano y el personal disponible para llevar a cabo la operación.

Por último, se realizó un análisis de los riesgos asociados a la ejecución del proceso mediante un Análisis Preliminar de Riesgos, en el cual se identificaron los peligros y de acuerdo a su nivel de significancia se establecieron medidas preventivas y/o correctivas para asegurar la salud de todos los involucrados en la ejecución de las actividades relacionadas al proceso propuesto.

De la evaluación realizada se concluyó que el proceso que mejor se adapta a la empresa es el de cloración alcalina, por lo cual fue el que se eligió para su diseño. Por otro lado, se determinó que el tiempo de reacción óptimo para disminuir la concentración de cianuro es de aproximadamente 20 minutos, puesto que se observó una tendencia a la estabilización de la concentración de cianuro pasado este tiempo. La implementación del proceso en la empresa supone la adquisición de nuevos equipos de trabajo como un reactor, instrumentación para la medición de variables como el pH y temperatura y un agitador mecánico, además de la incorporación de nuevos procedimientos los cuales tienen asociados riesgos significativos hacia la seguridad del trabajador como el contacto, inhalación o ingesta de sustancias peligrosas.

Se recomienda la evaluación del equipo diseñado para ser utilizado en procesos que ocurren con mayor frecuencia en el área operativa de Wastech, para así aprovechar de manera eficiente la inversión.

Índice general

Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vi
Índice general.....	viii
Índice de figuras.....	xii
Índice de cuadros.....	xiii
Introducción.....	1
CAPITULO 1.....	2
1. Cianuro, aplicaciones en la industria minera y métodos de eliminación.....	2
1.1 Cianuro.....	2
1.2 Legislación vigente en residuos peligrosos.....	5
1.3 Disposición final de residuos peligrosos.....	7
1.4 Proceso de extracción de oro con cianuro.....	7
1.5 Métodos tradicionales de eliminación del cianuro.....	7
1.5.1 Efecto del pH sobre los procesos de eliminación de cianuro.....	8
1.6 La electrólisis como método alternativo de eliminación de cianuro.....	9
1.7 Cloración alcalina.....	12
1.8 Proceso INCO SO ₂ /Aire.....	16
1.9 Selección del proceso de estudio.....	22
CAPITULO 2.....	26
2. Cinéticas de reacción, diseño y ejecución del análisis experimental para la determinación de la cinética de reacción.....	26
2.1 Cinéticas de reacción.....	26

2.2	Obtención y análisis de datos de velocidad.....	26
2.3	Determinación de cianuro libre.....	30
2.3.1	Cianuro libre por volumetría.	30
2.3.2	Cianuro libre por electrodo específico de cianuro.....	31
2.4	Diseño del experimento de obtención de la cinética de reacción.	31
2.4.1	Determinación de la pureza del cianuro de sodio.....	31
2.4.2	Sistema de reacción a nivel experimental.....	32
2.4.3	Ejecución de las corridas experimentales.....	34
2.5	Ajuste de los datos experimentales.....	35
2.6	Determinación de la constante de velocidad, planteamiento de la cinética de reacción y tiempo de reacción.	37
CAPÍTULO 3		39
3.	Diseño del sistema de reacción.....	39
3.1	Propuesta del sistema de reacción.	39
3.2	Selección y dimensionamiento de equipos.	41
3.2.1	Reactor.....	41
3.2.2	Escalamiento del sistema de agitación y mezclado.....	47
3.2.3	Selección de la bomba.	51
3.2.4	Accesorios.	57
3.2.5.1	Reactor y agitador mecánico.	59
3.2.5.2	Motor.	60
3.2.5.3	Bomba.....	60
3.3	Medidor de pH y temperatura.....	60
CAPÍTULO 4		62
4.	Disposición final de subproductos.....	62

4.1	Coprocesamiento.	62
4.1.1	Tecnología necesaria.	63
4.1.2	Procedimiento de la operación.	64
4.1.3	Costo.....	65
4.2	Encapsulamiento/solidificación.	66
4.2.1	Tecnología necesaria.	68
4.2.2	Procedimiento de la operación.	69
4.2.3	Costo.....	69
4.3	Neutralización y evaporación.	71
4.3.1	Tecnología necesaria.	71
4.3.2	Procedimiento de la operación.	72
4.3.3	Costo.....	73
4.4	Selección del proceso de disposición final	74
CAPÍTULO 5		79
5.	Identificación de riesgos.....	79
5.1	Metodología APR (Análisis preliminar de riesgos).....	79
5.1.1	Etapas del APR ejecutado en Wastech Costa Rica.....	79
5.1.2	Elaboración de medidas de prevención de riesgos.	80
Conclusiones y recomendaciones.....		91
Conclusiones.....		91
Recomendaciones		92
Bibliografía.....		93
Nomenclatura.....		97
APÉNDICES		98
A. Datos experimentales.....		99

B. Resultados intermedios	99
C. Muestra de cálculo	100
C.1 Cálculo de la pureza del NaCN.....	100
C.2 Cálculo de la concentración de NaCN en el tiempo	101
C.3 Cálculo de las dimensiones del reactor	101
C.4 Cálculo del número de Reynolds	101
C.5 Cálculo de la potencia específica consumida.....	102
C.6 Cálculo de el volumen de aguas residuales especiales	102
C.7 Cálculo de la masa de matriz sólida requerida.....	102
C.8 Cálculo de la masa de cemento, piedrilla y arena requeridas para la matriz sólida	103
C.9 Cálculo del costo de materiales para la matriz sólida	103
C.10 Cálculo de la masa requerida de HCl para neutralización	104
C.11 Balances de masa.	104
C.11.1 Balance de cianuro de sodio.	104
C.11.2 Balance de hipoclorito de sodio.....	104
C.11.3 Balance de bicarbonato de sodio.....	105
C.11.4 Balance de nitrógeno.....	105
C.11.5 Balance de cloruro de sodio.....	105
ANEXOS	106
Cotizaciones	107
Informe de Análisis APR.....	115

Índice de figuras

Figura 1.1. Distribución de la producción mundial de cianuro. (Sacher, 2010).....	3
Figura 1.2. Aplicaciones del cianuro de sodio en la industria. (Sacher, 2010)	3
Figura 1.3. Representación esquemática del ciclo del cianuro. (Logsdon, Hagelstein, & Mudder, 2009)	5
Figura 1.4. Equilibrio de CN^-/HCN con el pH (Logsdon, Hagelstein, & Mudder, 2009).....	9
Figura 1.5. Tipos de electrólisis. (Universidad de Antioquía)	9
Figura 1.6. Curvas de remoción de cianuro con distintos oxidantes (Ascuña, y otros, 2018).	14
Figura 1.7. Diagrama de flujo del proceso INCO SO_2/Aire . (Elaboración propia)	16
Figura 1.8. Efecto de la concentración de cobre sobre la degradación de cianuro en el proceso INCO (Guy, 2012).....	17
Figura 1.9. Efecto del pH sobre la degradación de cianuro en el proceso INCO (Muuder, Botz, & Smith, 2001).....	18
Figura 2.1. Reacción de orden cero. (Fogler, 2001).....	28
Figura 2.2. Reacción de orden uno. (Fogler, 2001).....	29
Figura 2.3. Reacción de segundo orden. (Fogler, 2001)	29
Figura 2.4. Punto final de las valoraciones de cianuro de sodio realizadas en el laboratorio.	32
Figura 2.5. Sistema de reacción de cloración alcalina.....	33
Figura 2.6. Micropipeta (a) y sistema de valoración de alícuotas (b).	34
Figura 2.7. Datos para la determinación del orden de cinética de reacción asumiendo orden 0.	35
Figura 2.8. Datos para la determinación del orden de cinética de reacción asumiendo orden 1.	36
Figura 2.9. Datos para la determinación del orden de cinética de reacción asumiendo orden 2.	36
Figura 4.1. Diagrama de flujo de la operación de solidificación de residuos.	69

Índice de cuadros

Cuadro 1.1 Clasificación de los distintos tipos de cianuro según la EPA.....	4
Cuadro 1.2 Ejemplos de tratamiento de contaminantes con electrólisis	10
Cuadro 1.3 Registros históricos de la eficiencia del proceso INCO SO ₂ /Aire en lodos.	18
Cuadro 1.4 Registros históricos de la eficiencia del proceso INCO SO ₂ /Aire en disoluciones.	19
Cuadro 1.5 Matriz de comparación de los procesos estudiados.....	22
Cuadro 3.1. Comparación de la composición del Acero AISI 304 Y 316L.....	45
Cuadro 3.2. Especificaciones de construcción del agitador de turbina de 6 paletas.	51
Cuadro 3.3 Características del motor eléctrico disponible en las bodegas industriales de Wastech.	51
Cuadro 3.4. Información técnica de la bomba AQUOR AQG9-168F	52
Cuadro 3.5. Información técnica de la bomba Modelo AL8M.....	53
Cuadro 3.6. Información técnica de la bomba Modelo 12M.	54
Cuadro 3.7. Información técnica de la bomba Modelo Wilden 3" (76 mm).	55
Cuadro 3.8 .Resumen de los costos asociados al diseño del sistema de eliminación de cianuro de sodio.....	61
Cuadro 4.1 Lista de materiales coprocesables y no coprocesables	63
Cuadro 4.2 Ventajas y desventajas asociadas al proceso de encapsulamiento con cemento Portland.....	68
Cuadro 4.3 Propiedades de materiales para la producción de la matriz sólida utilizada en el proceso de solidificación de subproductos.	70
Cuadro 4.4. Matriz de comparación de los procesos propuestos para la disposición final de los residuos generado	74
Cuadro 5.1. Actividades involucradas en el proceso de eliminación de cianuro de sodio..	82
Cuadro 5.2. Riesgos asociados a las actividades del proceso de eliminación de cianuro de sodio.	84
Cuadro 5.3. Matriz de clasificación de riesgos según su severidad y probabilidad.....	85
Cuadro 5.4. Criterios de evaluación para el parámetro de severidad.....	85
Cuadro 5.5. Criterios de evaluación para la variable probabilidad.	86

Cuadro 5.6. Clasificación de los riesgos asociados a las actividades según su severidad y probabilidad.....	86
Cuadro 5.7. Resumen del Análisis Preliminar de Riesgos.....	90
Cuadro A.1. Datos relacionados a la determinación de la pureza del cianuro de sodio.	99
Cuadro A.2. Datos experimentales obtenidos para la corrida 1 de eliminación de cianuro de sodio.	99
Cuadro A.3. Datos experimentales obtenidos para la corrida 2 de eliminación de cianuro de sodio.	99
Cuadro B.1. Pureza de las muestras analizadas de cianuro de sodio.	99
Cuadro B.2. Concentración de NaCN en el tiempo durante la determinación de la cinética de reacción.....	100
Cuadro B.3. Resultados de escalamiento del sistema de agitación y mezclado.....	100
Cuadro B.4. Costos asociados a la gestión de procesos de disposición final propuestos.	100

Introducción

La constante extracción ilegal de oro en el país ha conllevado al ingreso ilícito de diversos productos con contenido de cianuro, siendo el principal, el cianuro de sodio. Eventos recientes por parte de las autoridades nacionales han llevado a la recuperación de dichos compuestos peligrosos. No obstante, el reto yace en la incapacidad de tanto el estado como la empresa privada de proveer una debida gestión a compuestos de este tipo, por lo que, solo se cuenta con la exportación de residuos peligrosos como medio para el tratamiento de productos de esta naturaleza.

Existe una variedad de procesos químicos y físicos que son utilizados actualmente alrededor del mundo para eliminar compuestos del cianuro, sin embargo, como en el país no existe una necesidad constante para dar tratamiento a dichos compuestos, no resulta factible la implementación de un proceso específico para la eliminación de cianuro, de ahí, que se pretende diseñar un proceso el cual involucre facilidad en la operación, eficiencia, versatilidad y adaptabilidad, tomando en cuenta factores como la protección al ambiente y a los trabajadores involucrados en el proceso, asegurando a su vez, la correcta disposición final del residuo peligroso.

Para llevar a cabo lo anterior, se estudiarán distintos procesos químicos para determinar el que mejor se adapte tanto al contexto local como a las posibilidades de la empresa Wastech Costa Rica y se realizará un estudio sobre los parámetros que inciden en la eficiencia del proceso seleccionado y como estos afectan su velocidad de reacción, y a partir de ello diseñar un sistema de reacción que aproveche los recursos disponibles dentro de la empresa. Además, con el objetivo de garantizar la seguridad, se realizará un estudio de identificación de riesgos, con el cual se plantearán medidas de prevención, mitigación y/o corrección que permitan una operación segura

CAPITULO 1

1. Cianuro, aplicaciones en la industria minera y métodos de eliminación.

1.1 Cianuro.

El cianuro de sodio es la sal sódica del ácido cianhídrico (HCN), a la vista es un compuesto incoloro y sólido el cual puede ser hidrolizado fácilmente en presencia de agua y dióxido de carbono para obtener carbonato de sodio y ácido cianhídrico. Este además puede descomponerse en gases tóxicos de cianuro y óxidos de nitrógeno cuando se calienta hasta su descomposición. (Razanamahandry, Onwordi, Saban, & Bashir, 2019)

El cianuro se puede producir industrialmente de dos maneras: como subproducto de la fabricación de fibras acrílicas o mediante la combinación de gas natural con amoniaco a muy altas temperaturas y presiones para producir HCN gaseoso el cual puede ser tratado con NaOH para producir NaCN y agua.

La industria minera es un gran consumidor de este compuesto tóxico, puesto que absorbe el 18 % de la producción anual del cianuro lo que a escala mundial representa 252000 toneladas de cianuro por año, siendo las mayores productoras las empresas Químicas Dupont, ICI y Degussa Corp. Del cianuro producido una porción es utilizado en la minería como lo ilustra la Figura 1.1 y 1.2. El restante del cianuro producido es utilizado en productos farmacéuticos como el laetril, el cual es utilizado para combatir el cáncer y el nitroprusiato, una droga que ayuda en la reducción de la presión arterial. También es utilizado en vendas quirúrgicas que promueven la cicatrización y reducen las cicatrices (Sacher, 2010).

Producción de cianuro mundial

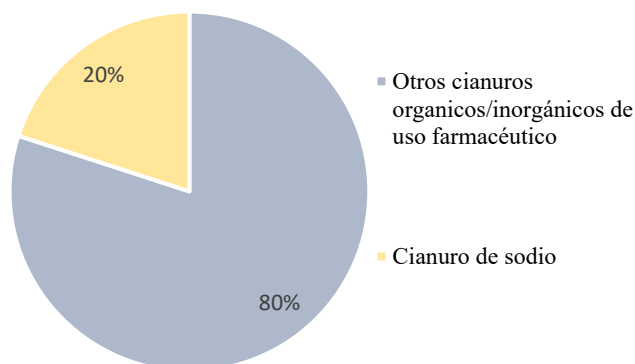


Figura 1.1. Distribución de la producción mundial de cianuro. (Sacher, 2010)

Usos del cianuro de sodio

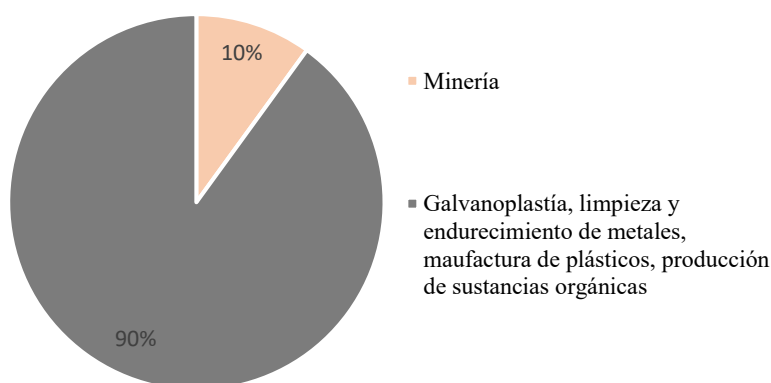


Figura 1.2. Aplicaciones del cianuro de sodio en la industria. (Sacher, 2010)

Ingerir entre 200-300 mg de alguna sal proveniente del cianuro es fatal si no se recibe algún tipo de tratamiento, los síntomas podrían causar la muerte hasta en el plazo de una hora, ahora bien, en su forma gaseosa, si este es inhalado, puede causar la muerte en pocos minutos. (Vale, 2016)

A pesar de su toxicidad, el cianuro de sodio es normalmente utilizado para extraer el oro y plata de minerales, formando sales solubles como $\text{NaAu}(\text{CN})_2$ de las cuales luego el oro es precipitado, también es utilizado para la producción de productos petroquímicos, en la

galvanoplastia de metales y manufactura de aceros. (Brady, Clauser, & Vaccari, 2002) (Logsdon, Hagelstein, & Mudder, 2009)

Debido a las propiedades químicas del ion cianuro este resulta de gran importancia tanto para la industria como para el ambiente. En la industria minera, el cianuro destaca por su capacidad de formar complejos con metales de transición y sus vecinos de la tabla periódica (Zn, Cd, Hg), además de los anteriormente mencionados, 28 elementos en distintos estados de oxidación pueden formar hasta 72 estructuras complejas con el ion cianuro. Pero en esta industria, la característica más explotada es su capacidad de formar complejos estables con el oro y plata.

El cianuro puede encontrarse en diversas formas en muchas clases de residuos y son clasificados de acuerdo con la dificultad de su digestión en el método de determinación calorimétrica establecido por el EPA (Environmental Protection Agency). La clasificación se muestra en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1 Clasificación de los distintos tipos de cianuro según la EPA.

Clasificación	Compuestos
Cianuro libre	CN ⁻ , HCN
Compuestos simples de cianuro	NaCN, KCN, Ca(CN) ₂ , Hg(CN) ₂ los cuales son solubles y los relativamente no solubles Zn(CN) ₂ , CuCN, Ni(CN) ₂ , AgCN
Cianuros de metales débiles	Zn(CN) ₄ ²⁻ , Cd(CN) ₃ ⁻ y Cd(CN) ₄ ²⁻
Cianuros moderadamente fuertes	Cu(CN) ₂ ⁻ , Cu(CN) ₃ ⁻ , Ni(CN) ₄ ²⁻ y Ag(CN) ₂ ⁻
Cianuros de metales fuertes	Fe(CN) ₆ ³⁻ , Fe(CN) ₆ ⁴⁻ , Co(CN) ₆ ⁴⁻ , Au(CN) ₂ ⁻ y Hg(CN) ₄ ²⁻

El cianuro tiene varias vías de transformación, las cuales pueden ocurrir ya sea de manera natural o en instalaciones creadas para dicho fin. La Figura 1.3 muestra una representación esquemática de las relaciones entre las formas del cianuro y los procesos que la controlan. En donde si se hace énfasis en la ruta que contiene el compuesto más tóxico del cianuro, el HCN, se observa que dicho compuesto puede ser transformado a especies menos tóxicas por procesos de hidrólisis, difusión/dispersión u oxidaciones.

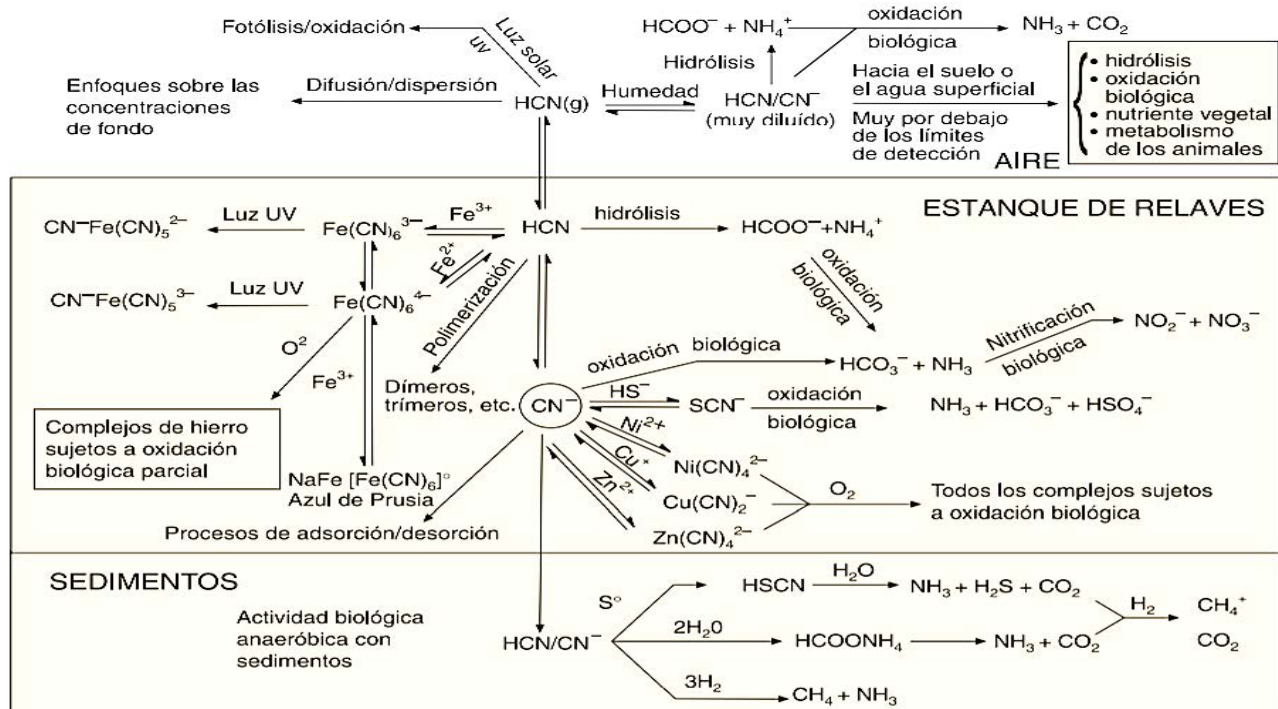


Figura 1.3. Representación esquemática del ciclo del cianuro. (Logsdon, Hagelestein, & Mudder, 2009)

1.2 Legislación vigente en residuos peligrosos.

El cianuro de sodio es clasificado como un residuo peligroso según el Decreto N°41527-S-MINAE “Reglamento para la clasificación y manejo de residuos peligrosos”, en el mismo, se establecen las normas y procedimientos para la gestión de este, desde una perspectiva sanitaria y ambientalmente sostenible. Este reglamento aplica para todo el territorio nacional, para todas las personas físicas o jurídicas que generen, acumulen, traten, manipulen, transporten y realicen la disposición final de cualquier residuo peligroso. (Procuraduría General de la República de Costa Rica, 2019)

El almacenamiento de residuos peligrosos está normado por el Decreto Ejecutivo N°41052-S del 1 de junio de 2018 “Reglamento de Centros de Recuperación de Residuos valorizables”. Además, las instalaciones de tratamiento de residuos deben cumplir con lo establecido en el artículo 13 del Decreto Ejecutivo N°27001 de 29 de abril de 1998 “Reglamento para el manejo de los desechos peligrosos industriales”. (Procuraduría General de la República de Costa Rica, 2019)

Las medidas que deben ser acatadas en la etapa de transporte de un residuo peligroso, son las dictadas en el Decreto Ejecutivo N°24715-MOPT-MEIC-S de 6 de octubre de 1995 “Reglamento para el Transporte Terrestre de Productos Peligrosos”, el Decreto Ejecutivo N°27008-MOPT-MEIC de 20 de marzo de 1998 “Señalización Transporte Terrestre Productos Peligrosos”, Decreto Ejecutivo N°35505-MOPT-S-MEIC-MINAET de 24 de abril de 2009 “Oficialización de Guía de Respuesta en caso de Emergencia para el Transporte de Materiales Peligrosos 2008” y el Decreto Ejecutivo N°27001 de 29 de abril de 1998 “Reglamento para el manejo de los desechos peligrosos industriales” (Procuraduría General de la República de Costa Rica, 2019).

En la misma línea del transporte de materiales peligrosos, se debe recalcar también la legislación que aplica para la actividad en la cual el cianuro de sodio es mayormente utilizado, la minería, en donde, mediante una modificación en el año 2004 al Código de Minería en su artículo 141, se establece la pena de prisión de 3 meses a 5 años a quienes realicen actividades mineras de reconocimiento, exploración, extracción o explotación sin contar con un debido permiso de concesión, pena que aplica también a quien transporte materiales producto de actividades mineras sin estar amparadas a un permiso o concesión. De ahí, las constantes denuncias que se reportan en la zona norte de Costa Rica, en donde se han encontrado grandes cargamentos de cianuro de sodio que estaban siendo utilizados para la explotación de la zona con el fin de sustraer oro. (Asamblea Legislativa, 2015)

Los métodos permitidos y que se consideran apropiados para la disposición final de un residuo peligroso, están definidos en la sección B del anexo IV de la Ley N°7438 del 6 de octubre de 1994 “Convenio Basilea sobre el Control Fronterizo de Residuos Peligrosos y su Eliminación”, además de los señalados en el Apéndice 5.B de la decisión C (2001) 107 final de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) (Procuraduría General de la República de Costa Rica, 2019).

En cuanto a los residuos que se generan en los procesos de tratamiento de residuos peligrosos, estos deberán ser tratados según los establecido en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales, en el cual se establecen los parámetros que deberán cumplir las aguas residuales tratadas para poder ser vertidas en un cuerpo receptor.

1.3 Disposición final de residuos peligrosos.

Los gestores de residuos peligrosos, al momento de diseñar un sistema de tratamiento o acondicionamiento de residuos peligrosos, deben evaluar los potenciales efectos y riesgos de las diferentes alternativas, ya que en algunos casos puede llegar a generarse nuevos residuos o emisiones que puedan representar un importante riesgo para la salud o el ambiente.

Un método adecuado de tratamiento o acondicionamiento es todo aquel que conduzca a la recuperación de recursos, el reciclado, la regeneración o la reutilización directa del material. (Ministerio de Salud, 2016)

1.4 Proceso de extracción de oro con cianuro.

El cianuro se utiliza para la extracción de oro en minerales cuando este no puede ser recuperado por métodos como la trituración y la separación por gravedad. El proceso de uso de soluciones acuosas para extraer minerales como el oro se denomina hidrometalurgia. Las operaciones de minería de oro utilizan disoluciones de NaCN a bajas concentraciones (100-500 ppm), el fin de esta disolución es disolver el oro presente en los minerales mediante un proceso de lixiviación. (Logsdon, Hagelstein, & Mudder, 2009)

Las etapas del proceso consisten en la disolución del mineral de oro en agua la cual contiene concentraciones bajas de NaCN, una vez disuelto el oro, la disolución es mezclada con zinc o carbón activado para recuperar el oro extrayéndolo de la disolución mediante una precipitación, mientras que la disolución restante es recirculada para ser reutilizada o bien puede ser enviada directo a la planta de tratamiento de aguas residuales. (Paniagua, 2019)

La industria moderna del oro utiliza casi única y exclusivamente cianuro como agente lixivador, esto porque otros agentes como los cloruros, la tiourea y otros haluros presentan problemas particulares para el ambiente y la salud, además, de que estos no son rentables económicamente. Por otro lado, el cianuro es un compuesto más estable y eficiente como agente lixivador y no necesita de otras sustancias químicas agresivas para realizar la recuperación de oro. (Jiménez, 2018)

1.5 Métodos tradicionales de eliminación del cianuro.

Los métodos para tratar residuos que contienen cianuro van desde la combustión o incineración de ellos hasta tratamientos químicos. La principal desventaja de la incineración

radica en que el producto final puede aún contener algunos materiales peligrosos, mientras que el proceso químico reemplaza el cianuro por compuestos que son menos tóxicos (Martínez, 2011).

Los métodos químicos pueden ser divididos en dos grupos:

- Métodos que destruyen el ion cianuro en compuestos más simples como dióxido de carbono y nitrógeno gaseoso por medio de una oxidación o una descomposición electrolítica.
- Métodos que disminuyen el volumen de cianuro por evaporación, ósmosis inversa o intercambio iónico (Tapia, Bourgois, Carrillo, & F, 2007).

La oxidación ha sido utilizada para descomponer el cianuro en dióxido de carbono y nitrógeno, el proceso es generalmente efectivo cuando se trata de cianuros “simples” y algunos cianuros “complejos”. El proceso consiste en añadir algún compuesto clorado como el hipoclorito de sodio, ozono o peróxido en condiciones de pH alcalinas a temperaturas y presiones elevadas. Por otro lado, la descomposición electrolítica consiste en pasar una corriente eléctrica a través de la disolución para romper el ion cianuro, no obstante, este proceso puede ser muy caro debido a la alta demanda de energía necesaria para llevar poder ser llevado a cabo y el costo de capital asociado también es alto (United States of America Patente n° US 6,596,916 B1, 2003).

1.5.1 Efecto del pH sobre los procesos de eliminación de cianuro.

Los procesos que se plantean a continuación para el tratamiento de eliminación de cianuro siguen una regla general de reacción, en la cual, la especie de cianuro que propicia las reacciones es su forma básica (CN^-). De ahí que, el efecto del pH para todos los procesos que se plantean es fundamental para el desarrollo de la reacción química, requiriéndose de pH's que rondan entre 9 y 10 para asegurar que efectivamente la especie de cianuro que predomine en el sistema de tratamiento sea CN^- como se muestra en la Figura 1.4, logrando así mejores porcentajes de remoción del mismo.

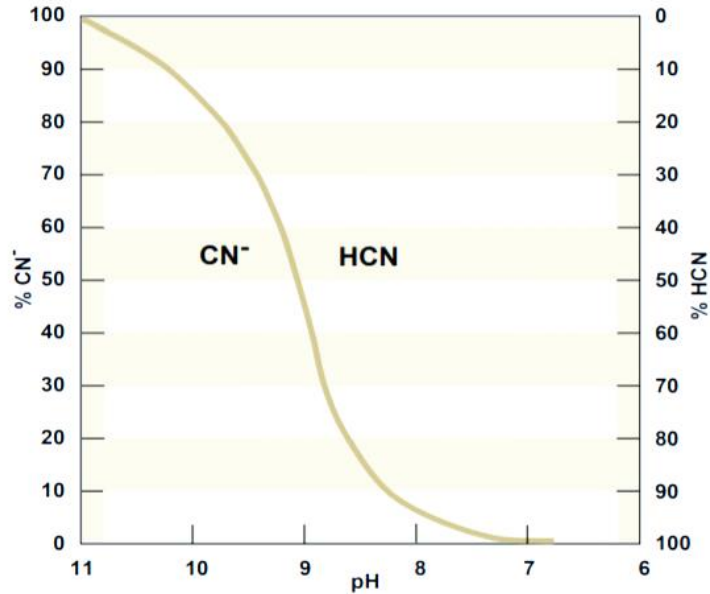


Figura 1.4. Equilibrio de CN⁻/HCN con el pH (Logsdon, Hagelstein, & Mudder, 2009).

1.6 La electrólisis como método alternativo de eliminación de cianuro.

Al igual que otro tipo de actividades industriales, algunos procesos electroquímicos son grandes generadores de contaminantes, entre los cuales se incluyen procesos como el de la producción de cloro (proceso cloro-soda) y la electrodeposición. No obstante, este mismo principio puede ser utilizado como un método de eliminación de contaminantes debido a que los tratamientos electroquímicos implican una etapa de electrólisis, la cual puede ocurrir de distintas formas y se clasifica como se muestra en la Figura 1.5.

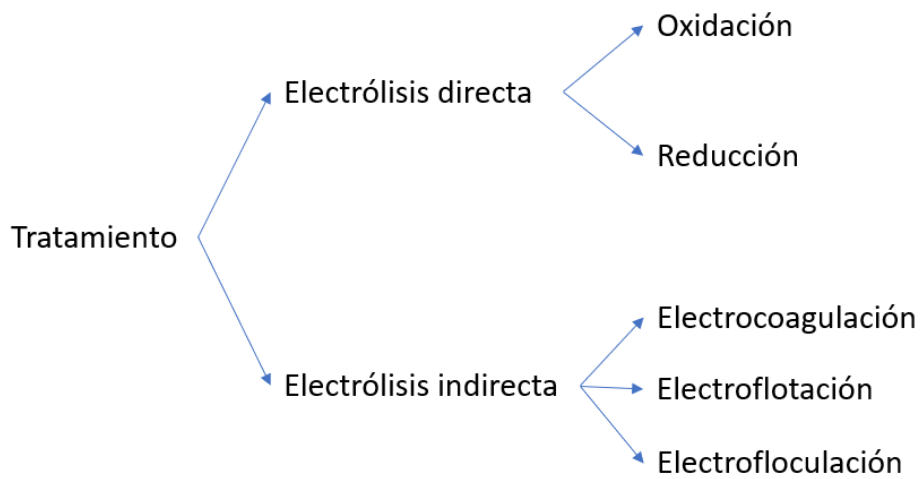


Figura 1.5. Tipos de electrólisis. (Universidad de Antioquía, 2005)

La electrólisis puede ser utilizada para tratar una variedad de contaminantes, en el Cuadro 1.2 se muestra algunos de ellos.

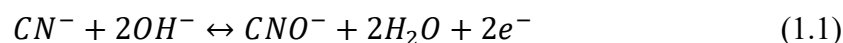
Cuadro 1.2. Ejemplos de tratamiento de contaminantes con electrólisis

Contaminante	Producto del tratamiento	Comentarios
Cianuro	NH_4^+ , CO_3^{2-} ; o CO_2 y N_2 , Cianato	Los productos dependen del pH
Colorantes	Productos incoloros	Utilizado conjuntamente con adsorción sobre carbón activado produce una alta eficiencia de decoloración
Cr(III)	Cr(IV)	Producto más tóxico que el material de partida, pero puede ser reutilizado.

1.6.1 Proceso y reacciones involucradas.

El proceso de electrólisis inicia con la preparación del cianuro, para lo cual se prefiere trabajar con disoluciones alcalinas concentradas con pH mayores a 11 debido al efecto del pH.

Una vez iniciado el proceso de electrólisis la reacción que ocurre se muestra en la Ecuación 1.1.



Como consecuencia de esta reacción, se produce una especie mucho menos tóxica que el cianuro. Por otro lado, si se añade a la disolución a tratar NaCl, este puede aumentar la conductividad de la disolución, lo cual colabora con la eliminación del cianuro puesto que permite un mecanismo indirecto de oxidación por la acción del Cl_2 formado.

1.6.2 Eficiencia de remoción de cianuro de electrólisis.

La eficiencia del proceso en cuanto a remoción de cianuro estará dada por la combinación de parámetros que se fijen en el proceso. Entre las variables que influirán en la eficiencia se encuentran:

- Concentración del ion metálico.
- Área superficial y tipo de cátodo.
- Densidad de corriente.

- Especies de iones metálicos.
- Temperatura. (Jácome, 2013)

Tanto los factores anteriores como el material empleado para la construcción y la geometría del reactor serán función de la eficiencia del proceso.

El desafío a la hora de utilizar procesos de electrólisis radica en que para que este sea eficiente, debe existir concentraciones bajas de contaminante, además, que con el tiempo la superficie del cátodo puede cambiar sus propiedades y disminuir su actividad, la presencia de otras sustancias que pueden venir de las impurezas del cianuro pueden interferir en el proceso.

Actualmente no se encuentran registros disponibles que evidencien la eficiencia de la remoción de cianuro de sodio utilizando este proceso, por lo tanto, este aspecto convierte a la electrólisis en una especie de “inversión a ciegas”, puesto que se desconoce la relación exacta que existe entre su costo y eficiencia.

1.6.3 Insumos para la electrólisis.

Para el proceso es indispensable el uso de electrodos, los cuales tomarán el papel de agentes oxidantes. Generalmente se utilizan electrodos de $\text{RuO}_2 + \text{TiO}_2$ con un depósito de PbO_2 en la superficie (Pérez Domínguez & Higuera Cobos, 2008).

El sistema de reacción donde ocurre la electrólisis se denomina celda electrolítica, la cual estará conformada por:

- Contenedor.
- Electrodos (ánodo y cátodo).
- Electrolito.

El proceso de electrólisis de cianuro de sodio no requiere de reactivos extras, puesto que la reacción de eliminación ocurre directamente sobre el electrodo.

1.6.4 Subproductos generados de la electrólisis del cianuro.

Uno de los mayores atractivos de la utilización de la electrolisis es que este proceso no produce lodos que impliquen tratamientos posteriores para dar debida disposición final. Por lo tanto, el resultado del proceso consistirá en una mezcla de cianato de sodio que

dependiendo de la conversión del proceso tendrá algún contenido de cianuro de sodio remanente.

1.7 Cloración alcalina.

La oxidación de cianuros consiste en un proceso en el cual se transforma el cianuro en compuestos menos tóxicos como cianatos o logra su descomposición hasta sus elementos base. Para ello se puede utilizar una alta gama de agentes oxidantes entre los cuales se encuentra el peróxido, ozono, hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio y demás. En este apartado se evaluará la oxidación de cianuros utilizando hipoclorito de sodio en un proceso conocido como cloración alcalina.

1.7.1 Proceso y reacciones involucradas.

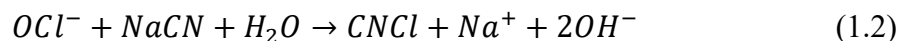
La cloración alcalina consiste en la oxidación y destrucción de formas de cianuro libre y cianuro disociable en ácido débil, el proceso ocurre en un rango de pH de entre 10,5 y 11,5 y la tasa de oxidación no es sensible a la temperatura entre los 20 y 60 °C. (Padilla Camacho, Vargas Aya, & Colpas Castillo, 2010)

La operación del proceso puede ser tan sencilla como utilizar un reactor batch agitado en el cual se agrega la disolución de cianuro de sodio, se regula el pH de la disolución agregando sosa caustica y el agente oxidante (hipoclorito de sodio) y dejando que ocurra la reacción de oxidación por aproximadamente 15-30 minutos; hasta procesos más elaborados en los que se puede utilizar reactores de flujo continuo y bombeo de materias primas en dosis especificadas.

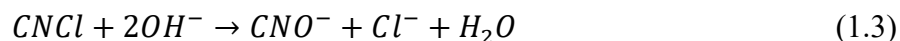
La relación teórica establece que, se requiere de 2,73 gramos de Cl_2 para oxidar un gramo de CN^- a cianato, no obstante, en la práctica se utiliza de 3 a 8 gramos de Cl_2 por gramo de cianuro oxidado e incluso se pueden utilizar relaciones más altas que permiten que el cloro actúe como catalizador para obtener una descomposición de cianuro que genere dióxido de carbono y nitrógeno gaseoso. (Leiva, 2012)

El método de oxidación es el más utilizado debido a su alta eficiencia y facilidad de ejecución. En general, el proceso de oxidación ocurre en las siguientes etapas de reacción.

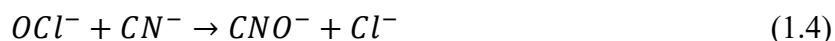
En la primera etapa, el cianuro es oxidado a cloruro de cianógeno en la presencia del ion hipoclorito:



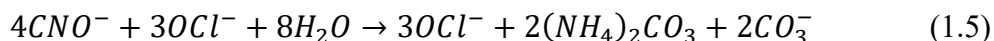
La reacción anterior ocurre independientemente del pH y es una reacción muy rápida. Ahora bien, controlando el pH arriba de 8 y preferiblemente de 10 a 11 debido al efecto del pH, el CNCl se convierte en un compuesto menos volátil y más estable:



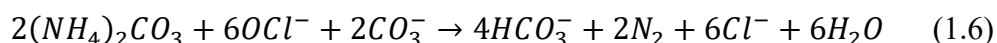
La reacción general para la oxidación de cianuro libre en la primera etapa de reacción es:



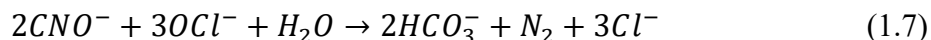
En la segunda etapa de reacción, los cianatos son nuevamente oxidados en amonio y carbonatos de sodio en presencia de un exceso de hipoclorito de sodio el cual sirve como catalizador de las siguientes reacciones:



Los carbonatos de amonio resultantes son rápidamente oxidados para formar nitrógeno gaseoso y los carbonatos son transformados en bicarbonatos:



La reacción general para esta segunda etapa es:



1.7.2 Eficiencia de remoción de cianuro de la cloración alcalina.

En lo que respecta a la eficiencia del proceso para la remoción de cianuro, datos de plantas que utilizan procesos de oxidación para la eliminación reportan porcentajes de remoción de entre un 90-97 % utilizando relaciones de oxidante:cianuro de 4,6:1 (Camacho, Vargas, & Colpas, 2011).

Otros procedimientos a escala de laboratorio, reportan experimentos en los cuales se utilizaron concentraciones iniciales de cianuro libre de 100 ppm y relaciones oxidante:cianuro de 12 para lo cual se obtuvo una concentración final de cianuro de 0,8 ppm

al cabo de 35 minutos de reacción a 25 °C, lo que indica un 99,2 % de remoción (Ascuña, y otros, 2018).

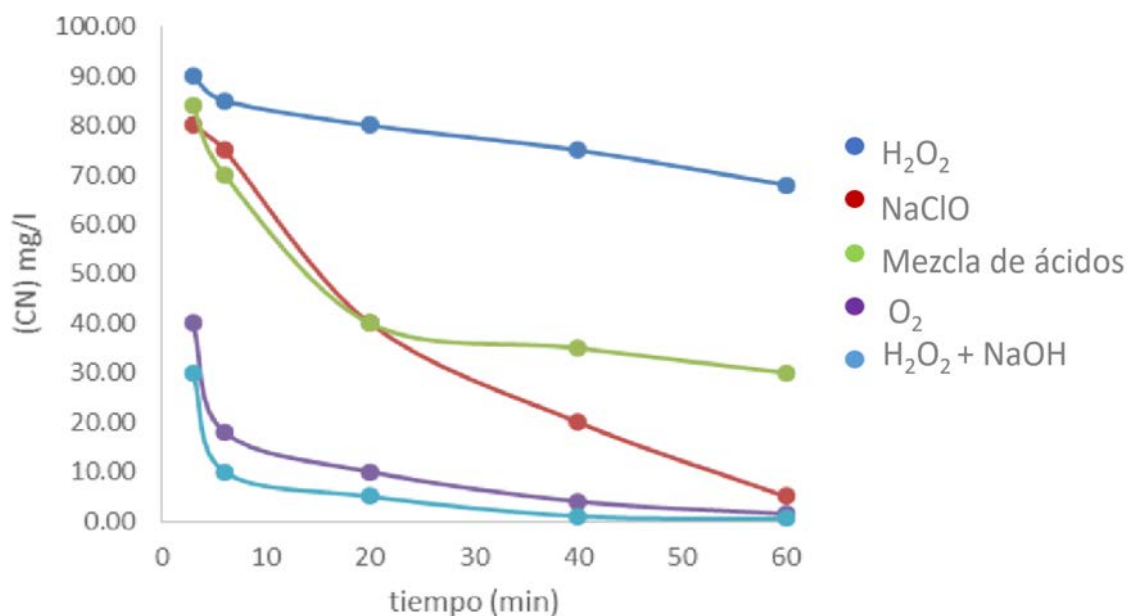


Figura 1.6. Curvas de remoción de cianuro con distintos oxidantes (Ascuña, y otros, 2018).

La figura anterior muestra las curvas de remoción al utilizar distintos oxidantes. De ella se puede concluir que la remoción de cianuro con compuestos como el hipoclorito de sodio, peróxido y soda caustica y oxígeno son excelentes oxidantes del cianuro, logrando concentraciones finales de cianuro menores a 10 mg/L en períodos aproximados de una hora.

Ahora bien, si comparamos dichos valores con el parámetro establecido por la ley para el vertido de aguas de proceso en donde se indica un límite de 2 mg/L de cianuro, lo reportado se encuentra bastante cerca de dicho límite, por lo tanto, en caso de que el vertido de las aguas residuales fuese el escenario de disposición final, la planta de tratamiento tendría que disminuir el nivel de concentración de cianuro solamente entre 5 a 8 mg/L para cumplir con la ley de vertido.

1.7.3 Insumos para la cloración alcalina.

El proceso de oxidación alcalina con hipoclorito se centra en el sistema de reacción utilizado, en el cual se puede utilizar reactores CSTR, PFR o por batchs. Generalmente utilizado el sistema por batch puesto que su empleo puede hacer de la operación un proceso sencillo y

que no requiere de gran inversión. Además, el reactor puede ser cargado manualmente sin necesidad de bombeo, u otros equipos que faciliten el trasiego de fluidos.

En cuanto a las materias primas necesarias para el proceso, se encuentran las siguientes:

Hipoclorito de sodio: El hipoclorito de sodio aportará al sistema el Cl_2 necesario para llevar a cabo la oxidación, este puede ser reemplazado por hipoclorito de calcio, lo cual tendrá un resultado similar.

Hidróxido de sodio (sosa cáustica): Dicho reactivo servirá para alcalinizar el sistema de reacción, en casos su adición no es requerida, puesto que el hipoclorito de sodio tendrá un pH básico y este no fluctuará con la adición del cianuro.

En el caso de la cloración alcalina, donde las materias primas principales requeridas son el hipoclorito de sodio y el hidróxido de sodio y que además el hipoclorito de sodio puede ser también reemplazado por hipoclorito de calcio lo cual da una alternativa más en caso de no contar con una oferta suficiente del reactivo necesario, se puede mencionar empresas proveedoras al por mayor como Dynatroler y GTM Costa Rica. Ofreciendo la última el hipoclorito de calcio en ₡1006 el kilogramo de producto puesto en bodega. Mientras que el hidróxido de sodio es ofrecido por la empresa GTM Costa Rica por ₡650 el kilogramo.

1.7.4 Subproductos generados de la cloración alcalina de cianuro.

La cloración alcalina puede generar distintos subproductos dependiendo de la cantidad de agente oxidante que se utilice, puesto que este actúa como catalizador de la reacción general mostrada en la Ecuación 1.7 dependiendo del exceso presente en disolución. Es por esto que se tienden a utilizar grandes excesos de hipoclorito para generar un resultado mucho menos tóxico es decir, con menor contenido del cianuro inicial y además, fácil de tratar.

El resultado de la cloración alcalina con exceso de hipoclorito es una disolución de bicarbonato de sodio en pH alcalino, mientras que el nitrógeno formado es liberado al ambiente en forma gaseosa. Una vez neutralizada la disolución resultante, se obtendrá una sustancia lechosa de bicarbonato de sodio y cloruro de sodio. Por otro lado, debido a la eficiencia del proceso es posible que existan remanentes de cianuro libre, por lo que su presencia debe ser cuantificada previo a la neutralización, esto porque, el cianuro emana vapores tóxicos cuando se encuentra en disoluciones con pH menor a 9.

1.8 Proceso INCO SO₂/Aire

1.8.1 Proceso y reacciones involucradas.

El proceso INCO es relativamente sencillo de operar, el sistema se basa en un reactor central tipo CSTR en el cual se bombean flujos de sulfato de cobre, la corriente de cianuro de sodio o el agua residual contaminada con cianuro de sodio, dióxido de azufre y aire. En el proceso mostrado en la Figura 1.7 se indica un diagrama de flujo del proceso.

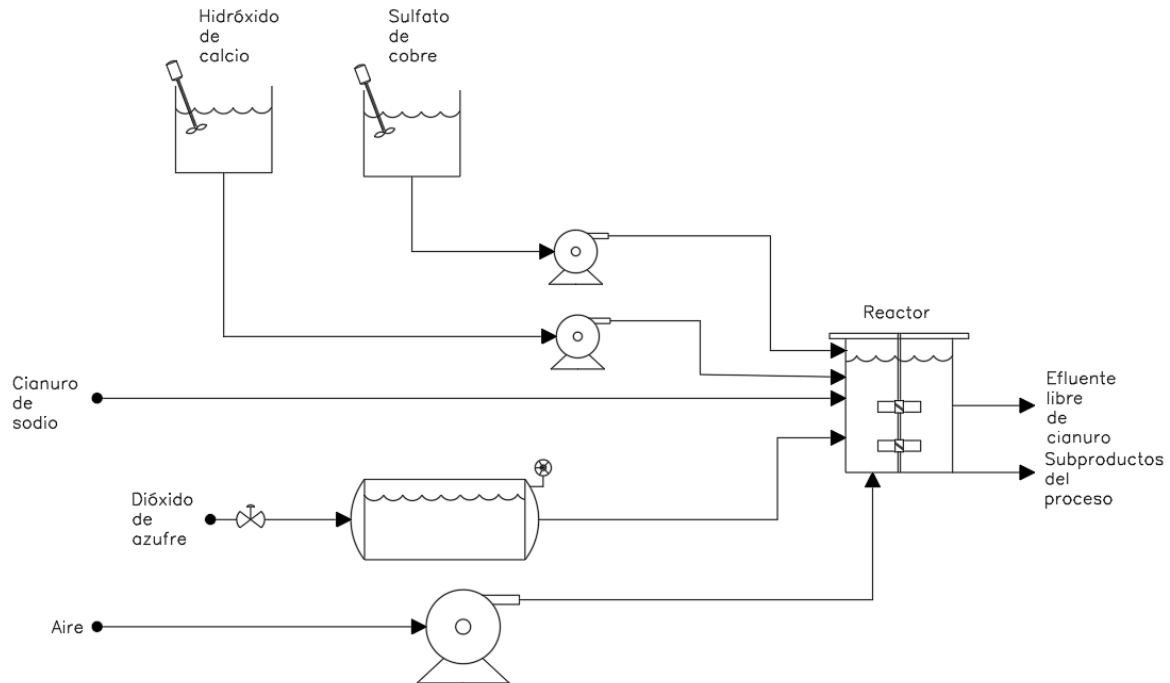
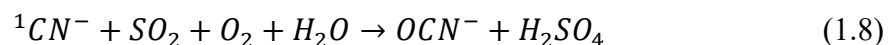


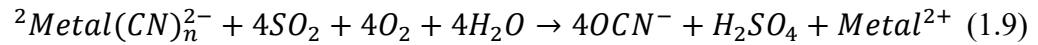
Figura 1.7. Diagrama de flujo del proceso INCO SO₂/Aire. (Elaboración propia)

En el proceso mostrado en la Figura 1.6 se degrada el cianuro libre y el cianuro acomplejado a cianato, el cual es entre 3000 y 5000 veces menos tóxico que el cianuro, mientras que los metales pesados precipitan como hidróxidos metálicos. El proceso es aplicable tanto a lodos con contenido de cianuro como a disoluciones y el tiempo de activación es relativamente corto.

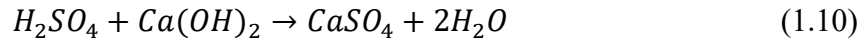
Las reacciones fundamentales involucradas en el proceso INCO SO₂/Aire se describen a continuación. El proceso consta de 3 etapas:

Oxidación.

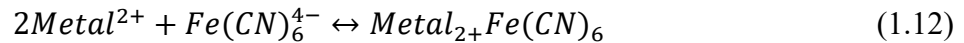
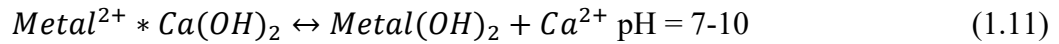




Neutralización.



Precipitación.



Dónde:

Metal²⁺: Zn²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, Cd²⁺, etc.

1: indica cianuro libre.

2: n puede ser 3 o 4.

1.8.2 Eficiencia de remoción de cianuro del proceso INCO SO₂/Aire.

La eliminación de cianuro dependerá tanto de la concentración de catalizador utilizado (sulfato de cobre) como del pH al que se mantenga el sistema de reacción, los niveles de eliminación se encuentran en la Figura 1.8 y Figura 1.9.

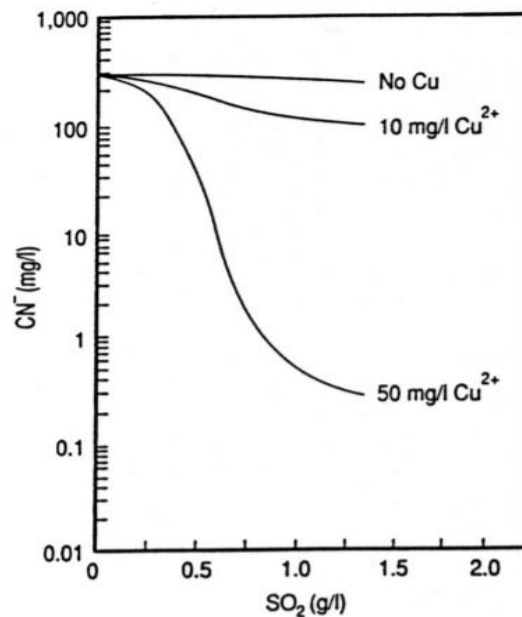


Figura 1.8. Efecto de la concentración de cobre sobre la degradación de cianuro en el proceso INCO (Guy, 2012).

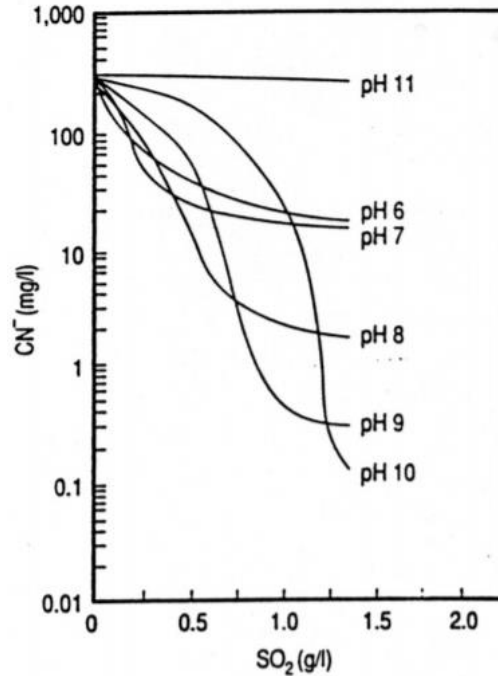


Figura 1.9. Efecto del pH sobre la degradación de cianuro en el proceso INCO (Muuder, Botz, & Smith, 2001).

Algunos registros históricos del proceso INCO muestran los niveles de degradación que se pueden lograr con la implementación de esta metodología de eliminación de cianuro de sodio tanto en lodos como en disoluciones, estos se encuentran en el Cuadro 1.3 y Cuadro 1.4.

Cuadro 1.3. Registros históricos de la eficiencia del proceso INCO SO₂/Aire en lodos entre los años 1989 y 1991 (Muuder, Botz, & Smith, 2001).

Mina	CN _{TOT} Muestra (mg/l)			Relación de reactivos (g/gCN _{TOT})		
	Antes	Después	Remoción (%)	SO ₂	Hidróxido de calcio	Cu ²⁺
Colosseum	364	0,4	0.999	4,6	0,12	0,04
Ketza River	150	5,0	0.967	6,0	0	0,30
Equity	175	2,3	0.987	3,4	0	0,03
Casa Berardi	150	1,0	0.993	4,5	--	0,10
Westmin Premier	150	<0,2	0.999	5,8	--	0,12
Golden Bear	205	0,3	0.999	2,8	--	--

Cuadro 1.4. Registros históricos de la eficiencia del proceso INCO SO₂/Aire en disoluciones entre los años 1989 y 1991 (Muuder, Botz, & Smith, 2001).

Mina	CN _{TOT} Muestra (mg/l)			Relación de reactivos (g/gCN _{TOT})		
	Antes	Después	Remoción (%)	SO ₂	Hidróxido de calcio	Cu ²⁺
Mc Bean	370	0,2	0.999	4,0	4,0	0
Lynngold	106	0,6	0.994	7,0	9,0	0,12
Mineral Hill	350	0,5	0.999	6,0	9,0	0
Lac Short	10	0,5	0.950	5,0	--	0
Citadel	350	5,0	0.986	4,0	--	0
St. Andrew	15	1,0	0.933	5,0	--	0,10

De los cuadros previos se puede observar el porcentaje de remoción de la reacción del proceso INCO puede variar desde el 95 % y ascender hasta el 99,9 % en condiciones óptimas. Analizando los datos y comparando con los límites establecidos por el Decreto N°33601 Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales el cual indica que el límite máximo permitido de cianuro en aguas de descarga de proceso es de 2 mg/L, se concluye que el proceso puede lograr dichos parámetros como se aprecia en varios casos de los Cuadros 1.3 y 1.4, siempre y cuando se utilicen las proporciones adecuadas de dióxido de azufre, hidróxido de calcio y Cu²⁺ adecuadas, ahora bien, en caso de que no se lograra cumplir dicho límite, se debe considerar el proceso de disposición final que se utilizará, el cual podría aceptar valores mayores de concentración de cianuro para ser utilizado.

Algunas ventajas que vuelven eficiente este proceso radican en su capacidad de ser utilizado tanto para lodos contaminados con cianuro como para disoluciones acuosas de cianuro. Además, elimina tanto cianuros libres como una alta variedad de complejos. El proceso ha sido aplicado en un alto rango de escalas y en la mayoría ha dado resultados positivos, por otro lado, la operación puede ser llevada a cabo tanto en batchs como en un proceso continuo y los costos operativos son muy parecidos a los costos asociados a otros procesos de eliminación de cianuro.

Las desventajas del proceso son el alto costo de tratar afluentes con concentraciones muy altas de cianuro, ya que se disparan los costos de materia prima y consumo eléctrico, además, dado a las cantidades de sulfato requerido para el proceso, puede que el agua residual

contenga niveles de sulfato que se salgan de los parámetros establecidos para el vertido de aguas, lo que ocasiona que se necesite un segundo proceso para separar los sulfatos de las aguas de proceso residuales.

1.8.3 Insumos para el proceso INCO SO₂/Aire.

La operación principal del proceso ocurre en un reactor CSTR, en el cual se mezclan todos los reactivos necesarios con ayuda de un agitador con motor. Por otro lado, se requiere de los siguientes equipos complementarios para el proceso:

- Para introducir el aire al sistema de reacción se requiere de un compresor de aire o un soplador con tuberías asociadas.
- Un sistema de inyección de sulfato de cobre.
- Un tanque de almacenamiento de la disolución de hidróxido de calcio.
- Una bomba para entregar la disolución al reactor.

En cuanto a materia prima, se requiere de lo siguiente:

Sulfato de cobre: Cumple la función de catalizador de las reacciones involucradas. Se agrega como una disolución de sulfato de cobre pentahidratado, en una concentración de entre 10 % a 20 % de la concentración inicial de cianuro libre. La concentración de cobre en el sistema de reacción incidirá en el grado de degradación del cianuro como se muestra en la Figura 1.2.

Hidróxido de calcio: Agente neutralizante del ácido sulfúrico formado en la etapa de oxidación. La formación de ácido sulfúrico debe ser neutralizada de inmediato para que el proceso ocurra de manera eficiente, ya que al tener un pH menor a 9, el cianuro se encuentra en su forma ácida (HCN) como lo muestra la Figura 1.4, lo cual inhibe la reacción. (Guy, 2012)

Dióxido de azufre: Agente reductor involucrado en el proceso de oxidación. No obstante, el poder reductor de este producto puede ser sustituido por otros agentes reductores que contienen SO₂ como predecesor en su proceso de fabricación y que además pueden ser menos peligrosos de manipular que este. Entre algunos sustitutos del dióxido de azufre se puede encontrar: bisulfito de amonio, bisulfito de sodio, metabisulfito de sodio, sulfito de sodio, tiosulfato de amonio.

Aire: Utilizado como aporte de oxígeno y para favorecer el proceso de agitación y mezclado ya que es introducido al sistema a presión mediante burbujeo.

Agua: Se introduce al sistema en pequeñas dosis para lograr las concentraciones óptimas de los reactivos.

Entre las materias primas necesarias, se debe controlar la proporción de SO_2/CN_T , la cual se debe mantener mayor o igual a 2,46 para lograr la eliminación de todo el cianuro presente, generalmente en la práctica se utilizan relaciones de 3-5 (Guy, 2012).

Para el proceso INCO, las materias primas requeridas como se menciona anteriormente, incluyen sulfato de cobre, hidróxido de calcio y dióxido de azufre. Por otro lado, es necesario aire y agua sin embargo estos no es necesario comprarlos externamente. En el caso del sulfato de cobre, las empresas Agrotico, Agro Pro Centroamérica S.A y GTM Costa Rica proveen el producto, con un precio de venta de ₡1900 por 25 kg, mientras que el hidróxido de calcio (cal apagada) es ofrecido por la empresa Sur en presentación de 20 kg por ₡4103. Por último, el dióxido de azufre el cual puede ser reemplazado por metabisulfito de sodio, es ofrecido por la empresa Sonntag & Rote.

1.8.4 Subproductos generados del proceso INCO SO_2 /Aire.

Aunque la eficiencia del proceso INCO sea tan elevada y logre disminuir concentraciones de cianuro a los límites permisibles, los efluentes resultantes tienden a tener elevadas concentraciones de subproductos que los hacen tóxicos para los seres vivos. En el proceso se genera una gran cantidad de subproductos entre los que se encuentran: cianato, tiocianato, sulfato, amonio, nitrato, restos mínimos de cianuro libre y una elevada concentración de cobre. De los productos anteriores, se sabe que los nitratos son solubles en agua, lo cual puede llegar a ocasionar altas concentraciones del mismo en ríos o lechos profundos, este compuesto disminuye los niveles de oxígeno disuelto, causando la muerte en los especímenes acuáticos que requieren mayor cantidad de oxígeno. Además de los mencionados anteriormente, se forman grandes volúmenes de lodos ricos en sulfato de calcio que encarecen el proceso. (Bolaños Alfaro, Cordero Castro, & Segura Araya, 2017).

1.9 Selección del proceso de estudio.

El Cuadro 1.5 muestra un resumen de los parámetros que se evaluaron anteriormente para la selección del proceso a diseñar mientras que en el Cuadro 1.6 se definen los criterios para cada parámetro evaluado.

Cuadro 1.5. Matriz de comparación de los procesos estudiados.

Proceso	Parámetros				
	Información disponible	Disponibilidad de tecnología necesaria y materia prima	Dificultad de la operación	Eficiencia	Costo
Electrólisis	Baja	Baja	Media	Alta	Alto
Cloración alcalina	Alta	Alta	Alta	Alta	Medio
Proceso INCO/SO ₂	Alta	Media	Media	Alta	Medio

Cuadro 1.6. Definición de los niveles de los parámetros utilizados para la evaluación de procesos de eliminación de NaCN.

Parámetros	Nivel		
	Bajo	Medio	Alto
Información disponible	Se cuenta con información que respalda la eficacia del proceso.	Se cuenta con al menos un registro de eficiencia del proceso a nivel de laboratorio.	Se cuenta con registros de eficiencia del proceso en plantas industriales.
Disponibilidad de tecnología necesaria y materia prima	Los insumos del proceso pueden estar disponibles en el país si la empresa (Wastech) gestiona su importación al país	Los insumos del proceso pueden estar disponibles en el país a través de un proveedor que los importa	Los insumos del proceso están disponibles en el país y pueden ser adquiridos a través de proveedores locales
Dificultad de la operación	No se requiere supervisión por parte de un trabajador profesional para ejecutar el proceso.	Se requiere de supervisión por parte de un trabajador profesional al menos en las primeras etapas del proceso.	Se requiere supervisión por parte de un trabajador profesional durante todo el desarrollo del proceso.
	Se requiere solamente un operador para llevar a cabo el proceso.	Se requiere de dos operadores para llevar a cabo el proceso.	
Dificultad de la operación	La ejecución del proceso es relativamente rápida con respecto a la cantidad de residuo tratado.	La ejecución del proceso es moderada en aspectos de consumo de tiempo con respecto a la cantidad de residuo tratado.	Se requiere más de dos operadores para ejecutar el proceso.
	La ejecución del proceso requiere de maniobras simples como la operación de equipos sencillos como herramientas (palas, mezcladoras, instrumentos de medición).	La ejecución del proceso requiere de maniobras avanzadas como la operación de equipos como bombas, montacargas, minicargador.	La ejecución del proceso es relativamente lenta con respecto a la cantidad de residuo tratado.
Eficiencia	Los porcentajes de remoción se estiman entre un 0 y 70 %.	Los porcentajes de remoción se estiman entre un 71 y 90 %.	Los porcentajes de remoción se estiman entre un 91 y 100 %.
Costo	El costo asociado a la inversión de capital y materia prima para lograr una eficiencia alta es bajo.	El costo asociado a la inversión de capital y materia prima para lograr una eficiencia alta es medio.	El costo asociado a la inversión de capital y materia prima para lograr una eficiencia alta es alto.

Al analizar desde distintos puntos de vista los procesos que se seleccionaron para su evaluación, se llega a la conclusión de que el proceso de electrólisis no es el que mejor se adapta al contexto de la empresa, esto porque el proceso no cuenta con el respaldo técnico suficiente debido a la escasa información disponible, además, carece de evidencia comprobable sobre su eficiencia de remoción de cianuro, de la cual se menciona está ligada al costo, es decir, si se quiere una eficiencia alta se requerirá de mucha energía para alimentar el proceso, y dado que el material a tratar tiene una alta toxicidad, una alta eficiencia es indispensable, resultando en costos elevados para alcanzar los niveles de eliminación de cianuro requeridos. Aunado a lo anterior, pese a que el proceso solo requiere como materia prima un electrodo $\text{RuO} + \text{TiO}_2$ con un depósito de PbO_2 a nivel país este no es de fácil acceso puesto que el Rutenio es un elemento poco abundante, por ello, crecería el riesgo de paro de la operación en caso de algún posible daño en el electrodo empleado.

De lo previamente expuesto, solo queda por analizar entre el proceso INCO/ SO_2 y la cloración alcalina. En términos de respaldo técnico y eficiencia, ambos procesos son confiables para llegar hasta los niveles de descomposición de cianuro requeridos con una relación costo/eficiencia favorable. La diferencia entre los procesos radica en la dificultad de la operación y la disponibilidad de materia prima, por lo que este será el parámetro fundamental para la selección del proceso a diseñar.

A pesar de que la relación costo/eficiencia de los procesos INCO/ SO_2 y la cloración alcalina no muestre una diferencia muy significativa, la tecnología que requiere el proceso de cloración es mucho más accesible, fácil de instalar, desinstalar y posee la versatilidad necesaria para ser utilizada en otros procesos que ya se realizan en la empresa como la neutralización y el bombeo de aguas.

Otra ventaja que tiene la cloración alcalina es que en la mayoría de los casos solo es necesario como materia prima el agente oxidante, para el cual se tienen proveedores que pueden suministrar las cantidades requeridas para llevar a cabo el proceso, y estos se encuentran en las cercanías de la empresa, lo cual abarata los costos de transporte. Por otro lado, fue difícil encontrar proveedores de los sustitutos del dióxido de azufre para el proceso INCO/ SO_2 , y el uso de dióxido de azufre como tal para el proceso involucra el uso de gases, lo cual aumenta

la dificultad de la operación tanto en procedimiento como en el diseño de los equipos que se requerirían.

Por lo que se especificó anteriormente es que se tomó la ruta de descomposición de cianuro de sodio “cloración alcalina” como proceso de estudio y diseño para ser propuesta de implementación en la empresa Wastech.

CAPITULO 2

2. Cinéticas de reacción, diseño y ejecución del análisis experimental para la determinación de la cinética de reacción.

Los procesos que involucran reacciones químicas en las cuales las materias primas o insumos del proceso sufren cambios en su estructura para ser transformados en productos como los estudiados en el Capítulo 1, tienen asociados una velocidad de reacción. Dicha velocidad de reacción se le conoce como cinética de reacción y esta podrá estar influenciada por parámetros como la temperatura, la presión, el pH, la presencia de catalizadores, la concentración y otros factores que pueden ser específicos para una determinada reacción.

2.1 Cinéticas de reacción.

La cinética de una reacción indica la rapidez con que se desarrolla una reacción en particular, tomando en cuenta condiciones variables y que eventos moleculares se efectúan durante el desarrollo (difusión, reacción superficial, catálisis).

El resultado de la velocidad de una reacción se puede expresar a partir de las concentraciones de los elementos o compuestos involucrados y una constante de reacción, no obstante, en algunos casos puede utilizarse también expresiones en términos de presiones parciales de las especies.

Para la determinación de una cinética de reacción se debe establecer una metodología de cuantificación de las especies a lo largo del tiempo o en distintos puntos determinados, seguidamente se analizan los datos obtenidos mediante métodos ya establecidos, la selección del método dependerá del tipo de reacción que se tiene y la cantidad de compuestos que toman parte en la reacción. En el paso anterior se determinará el orden de reacción y la constante de reacción, con los cuales se tiene como resultado la cinética de reacción.

2.2 Obtención y análisis de datos de velocidad.

Para la obtención de datos de velocidad suelen utilizarse dos tipos de reactores, el reactor batch se utiliza primordialmente en el caso de reacciones homogéneas y el reactor diferencial, que se utiliza para reacciones heterogéneas sólido/fluido. Dentro de las variables de importancia para la mayoría de los experimentos en reactores batch se encuentran la concentración, presión y volumen, las cuales deben monitorearse durante el transcurso de la

reacción. Mientras que en un reactor batch los datos se miden cuando este se encuentra en un estado no estacionario, en los reactores diferenciales se trabajan midiendo la concentración de los productos utilizando distintas condiciones de alimentación (Fogler, 2001).

Dado que el proceso que se requiere diseñar se basa en una reacción homogénea, en los siguientes apartados se estudiará los métodos de análisis de datos para reactores batch, los cuales regularmente consisten en la medición de la concentración en función del tiempo y mediante uno de los métodos se determina el orden de reacción y la constante de velocidad específica. (Levenspiel, 2004)

El reactor batch se opera a volumen constante para facilitar la interpretación de los datos obtenidos en tales condiciones, este reactor es un dispositivo relativamente sencillo, adaptable a proyectos en pequeña escala y no requiere de muchos instrumentos auxiliares para llevar a cabo su función. (Smith, 1992)

2.2.1 Método diferencial de análisis de velocidad.

En caso de tener una reacción irreversible, es posible determinar el orden reacción y la constante de velocidad específica mediante una diferenciación numérica de datos de concentración contra tiempo. El método diferencial aplica cuando las condiciones de velocidad son tales que dependen mayoritariamente de la concentración de un solo reactivo. Es decir, que se tendrá una velocidad de reacción de la forma:

$$-r_A = kC_A^\alpha \quad (2.1)$$

No obstante, si la reacción dependiera de la concentración de dos o más reactivos, es posible utilizar una variación de este método, el cual consiste en utilizar excesos para determinar la relación entre $-r_A$ y la concentración de otros reactivos.

Puesto que este método se efectúa en reactores batch, cuando se aplica un balance de masa sobre dicho reactor, se obtiene lo siguiente:

$$-\frac{dC_A}{dt} = k_A C_A^\alpha \quad (2.2)$$

Y al aplicar logaritmos a ambos lados de la expresión anterior se tiene que:

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \ln(k_A) + \alpha \ln(C_A) \quad (2.3)$$

De lo anterior, se puede graficar la ecuación de forma que se obtenga una línea recta, donde la pendiente corresponderá al orden de reacción y luego mediante un despeje del intercepto se obtendrá la constante de velocidad específica de la reacción estudiada.

2.2.2 Método integral.

El método integral se utiliza con mayor frecuencia cuando ya se conoce el orden de reacción y se requiere evaluar las constantes específicas de velocidad a distintas temperaturas para así determinar la energía de activación de una reacción.

Para el análisis de datos de velocidad, se busca una función apropiada de la concentración que corresponda a una ley de velocidad específica que sea lineal con respecto al tiempo, por lo tanto, es necesario conocer al menos los gráficos que se obtienen al utilizar este método al tener reacciones de orden 0,1 y 2. Dónde, los balances de masa resultantes y gráficas se muestran a continuación.

Para una reacción de orden cero (Levenspiel, 2004):

$$C_A = C_{A0} - kt \quad (2.4)$$

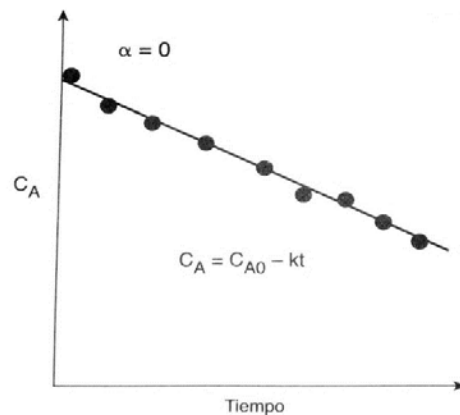


Figura 2.1. Reacción de orden cero. (Fogler, 2001)

Para una reacción de primer orden (Levenspiel, 2004):

$$\ln\left(\frac{C_{A0}}{C_A}\right) = kt \quad (2.5)$$

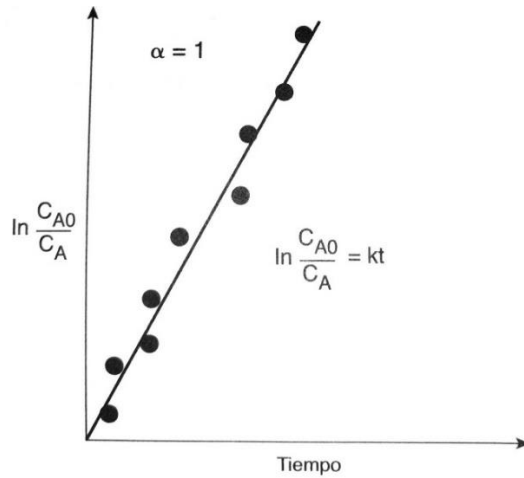


Figura 2.2. Reacción de orden uno. (Fogler, 2001)

Para una reacción de segundo orden (Levenspiel, 2004):

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kt \quad (2.6)$$

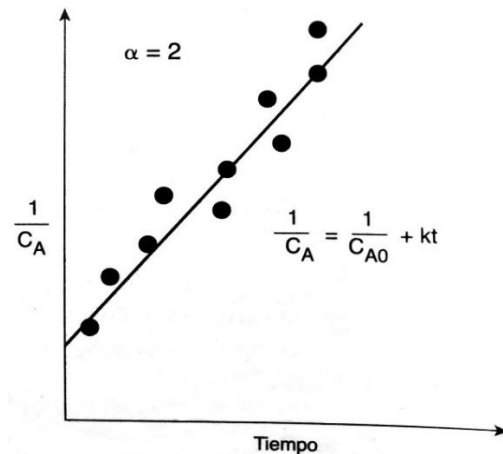


Figura 2.3. Reacción de segundo orden. (Fogler, 2001)

Las tres figuras anteriores se pueden utilizar para analizar los resultados del método, si las gráficas obtenidas son lineales y similares a las mostradas, se concluye que las reacciones son de orden cero, uno y dos, sin embargo, en caso de que los gráficos obtenidos no fuesen lineales, se concluiría que el orden de reacción propuesto no concuerda con los datos y se debe reiniciar el análisis planteando un orden de reacción distinto.

2.2.3 Método de velocidades iniciales.

El método de velocidades iniciales se vuelve de gran importancia cuando se requiere obtener la velocidad de una reacción reversible, puesto que los otros métodos se vuelven ineficaces para dicha determinación.

El método consiste en realizar varios experimentos en los cuales la variación será la concentración inicial del reactivo de estudio y se determina la velocidad inicial en cada experimento, en donde, esta se puede determinar diferenciando los datos y extrapolando hasta el tiempo cero. (Fogler, 2001)

2.2.4 Método de vidas medias.

Para obtener velocidades de reacción con este método, se debe determinar la vida media de una reacción, la cual está definida como el tiempo que transcurre hasta que la concentración del reactivo baje hasta la mitad de su concentración inicial. Si esto se logra, se puede calcular el orden de reacción y la velocidad de reacción específica. (Fogler, 2001)

Como en casos anteriores, es posible que la velocidad de reacción dependa de dos reactivos, por lo tanto, de existir esta situación, el método de vidas medias se debe combinar junto con el método de excesos.

Una vez obtenidos los tiempos de vida media, se puede graficar los datos de los logaritmos del tiempo contra el logaritmo de la concentración inicial utilizada.

$$\ln(t_{1/2}) = \ln\left(\frac{2^{\alpha-1}-1}{(\alpha-1)k}\right) + (1-\alpha)\ln(C_{A0}) \quad (2.7)$$

Con los datos linealizados y la ecuación anterior, se procede a extraer los datos de orden de reacción y constante de velocidad específica.

2.3 Determinación de cianuro libre.

2.3.1 Cianuro libre por volumetría.

Este método este utilizado para concentraciones de cianuro mayores a los 5 mg/L y en soluciones claras, consiste en un método fácil y rápido que se basa en la reacción del nitrato de plata con el ion cianuro para formar un complejo soluble según la siguiente reacción:

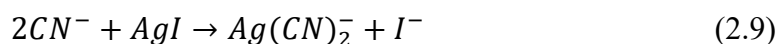


Una vez no existe más cianuro en disolución, el exceso de plata se precipita como AgCN o este reacciona con el indicador de KI para formar AgI, con lo cual se puede observar el punto final caracterizado por una turbidez permanente o un color amarillo opaco (Elorza, Nava, Uribe, & Pérez, 2007).

2.3.2 Cianuro libre por electrodo específico de cianuro.

Este método se utiliza para medir concentraciones bajas de cianuro, es una técnica muy precisa y funciona tanto para disoluciones claras como en disoluciones con color (Elorza, Nava, Uribe, & Pérez, 2007).

El electrodo para medir cianuro tiene una membrana de sulfuro de plata y yoduro de plata que reacciona con el cianuro de la disolución y libera una cantidad proporcional de ion yoduro, la reacción que ocurre es la siguiente:



El yoduro libre es detectado por el electrodo. Para utilizar este método se debe realizar una curva de calibración de concentraciones de disoluciones estándar contra el voltaje del potenciómetro.

El método no se ve afectado por la presencia de oxidantes, sin embargo, es muy importante tener el mismo valor de pH tanto en las soluciones estándar preparadas como en las soluciones que se requieran identificar, también es importante mantener la misma temperatura y que esta sea menor a los 80°C (Elorza, Nava, Uribe, & Pérez, 2007).

2.4 Diseño del experimento de obtención de la cinética de reacción.

2.4.1 Determinación de la pureza del cianuro de sodio.

El método de cuantificación de cianuro de sodio se basó en la reacción mostrada en la Ecuación 2.8 y 2.9., las cuales se desarrollan formando un complejo de cianuro que en presencia de KI presenta una coloración amarillenta. Como fuente de Ag⁺ se preparó una disolución de AgNO₃ 0.01600 mol/L.

Por otro lado, se pesaron tres muestras de cianuro de aproximadamente 0,0500 g y se disolvieron en 10 mL de agua destilada. A dichas muestras, se les agregó tres gotas de una disolución de KI 0,317 mol/L.

Seguidamente se valoraron las muestras con el nitrato de plata hasta observar una coloración amarilla tenue y se registraron los volúmenes consumidos. Los puntos finales de las valoraciones se pueden apreciar en la Figura 2.4.

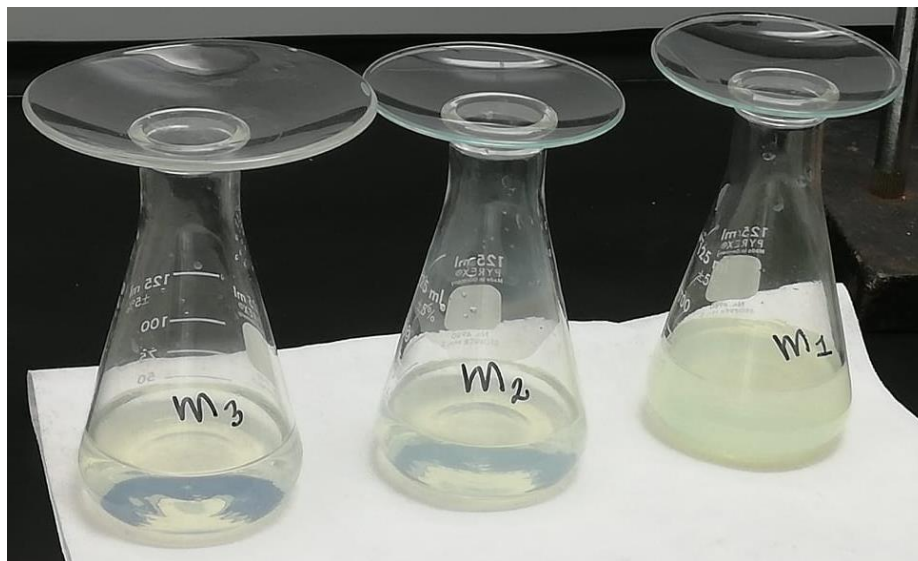


Figura 2.4. Punto final de las valoraciones de cianuro de sodio realizadas en el laboratorio.

No se realizó una medición de un blanco puesto que se asumió que el agua destilada, el valorante y el indicador no contenían trazas de cianuro.

Los datos experimentales requeridos para la determinación de la pureza se encuentran en el Cuadro A.2. A partir de la Ecuación C.1 se determinó la pureza del cianuro de sodio. Y los resultados se encuentran en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Pureza de las muestras analizadas de cianuro de sodio.

Muestra	Pureza (%)
1	92,02
2	92,63
3	92,56
Promedio	92,41

2.4.2 Sistema de reacción a nivel experimental.

El sistema de laboratorio que se utilizó para llevar a cabo el proceso de cloración alcalina, consistió en un beaker de vidrio de 600 mL, el cual fue utilizado para simular un reactor batch. A este se le colocó un agitador mecánico marca Heidolph, el impulsor de turbina de 6 paletas se ubicó a 2/3 de la profundidad del beaker, la velocidad de agitación se fijó en 250

rpm con el objetivo de asegurar un patrón de flujo turbulento que beneficiara la interacción molecular y por ende la velocidad de reacción. En la Figura 2.5 se muestra los componentes básicos del sistema de reacción (reactor, motor, agitador).

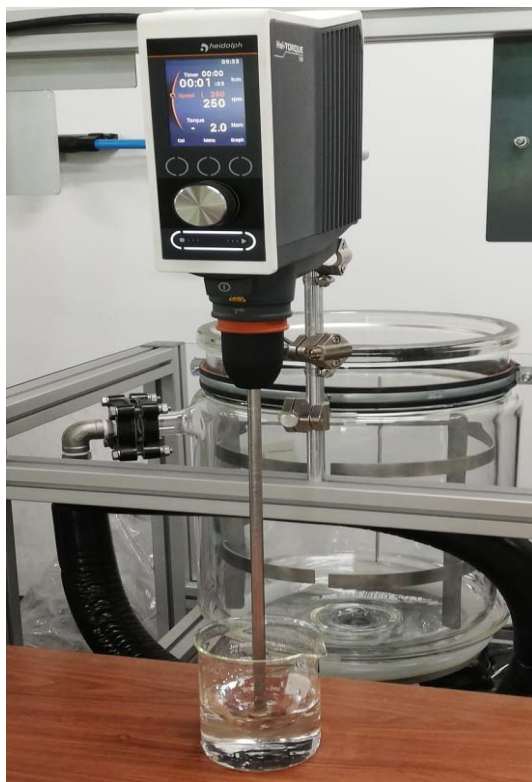


Figura 2.5. Sistema de reacción de cloración alcalina.

El monitoreo de parámetros relevantes como el pH y temperatura, se llevó a cabo con un pHmetro digital. Los parámetros se midieron durante el desarrollo de la reacción para verificar que estos se mantuvieran en rangos aceptables ($T = 20-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) ($\text{pH} = 9-14$) que garantizaran la seguridad puesto que en pH's básicos el cianuro se mantiene en su forma menos volátil y no emana vapores tóxicos y además se promueve la eficiencia de la reacción.

A lo largo de la reacción se tomaron alícuotas de 1,000 mL utilizando una micropipeta y posteriormente se valoraron utilizando el sistema mostrado en la Figura 2.6.

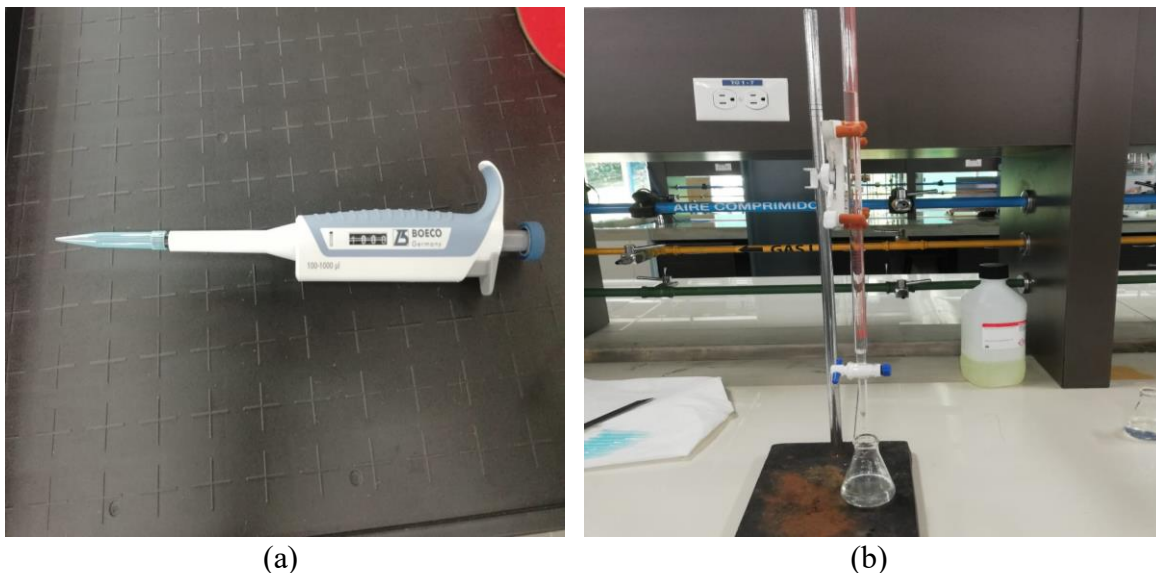


Figura 2.6. Micropipeta (a) y sistema de valoración de alícuotas (b).

2.4.3 Ejecución de las corridas experimentales.

Tomando en cuenta que la relación estequiométrica entre el cianuro de sodio y el hipoclorito de sodio para el proceso de cloración alcalina es de 1:2,73, y considerando que debía existir un exceso de hipoclorito para favorecer la oxidación completa del cianuro se estableció que las proporciones iniciales de cianuro/hipoclorito fuesen de 1:3, minimizando el exceso utilizado, puesto que se debe considerar que a pesar de que excesos mayores puedan agilizar la reacción, la relación costo beneficio de ello no es tan favorable. De lo anterior que, se prepararon muestras de aproximadamente 2,8 g de cianuro de sodio, para las cuales se agregó 8,4 g de hipoclorito de sodio. El cianuro fue previamente disuelto en 250 mL de agua destilada y se agitó durante 1 minuto antes de adicionar el hipoclorito de sodio a 250 rpm.

Dado que se esperaba un mayor decrecimiento de la concentración de cianuro en los primeros minutos de la reacción, se tomó la primera muestra a los 30 segundos de iniciada la reacción, y luego a los 2, 4, 6, 8 y 10 minutos, seguidamente se tomaron alícuotas en el minuto 16 y minuto 20 para ambas corridas, las cuales no pudieron ser replicadas una mayor cantidad de veces debido a la limitación de reactivos en el laboratorio, no obstante, al observar las tendencias que se obtuvieron en los datos y al ser estas similares, se concluyó que los datos eran suficientes para continuar con la determinación de la cinética. Las valoraciones se hicieron en paralelo con el desarrollo de las corridas experimentales.

2.5 Ajuste de los datos experimentales.

A partir de las corridas experimentales realizadas, se obtuvo los datos de concentración de cianuro en el tiempo, los cuales se muestran en el Cuadro A.3 y A.4. Las concentraciones de cianuro se calcularon a partir de la Ecuación C.2 y los datos se encuentran en el Cuadro B.2. Los datos de las corridas se pueden visualizar en la Figura 2.7, donde se muestra el decrecimiento de la concentración de cianuro en el tiempo.

Asumiendo que la reacción tiene una cinética de orden 0, la Ecuación 2.4 sería el resultado del balance de masa, y graficando la variación de la concentración de cianuro contra el tiempo se tiene lo siguiente:

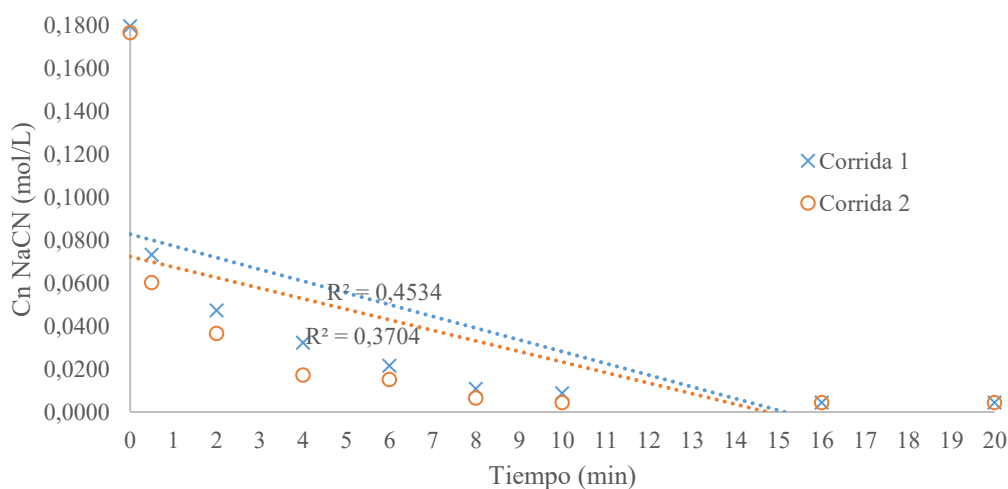


Figura 2.7. Datos para la determinación del orden de cinética de reacción asumiendo orden 0.

De la figura anterior, se determinó que el parámetro R^2 para ambas corridas es de 0,453 y 0,370 respectivamente, por lo que se concluye que la reacción no es de orden cero.

Por lo anterior, se procedió a asumir una cinética de reacción de orden 1, para lo cual el balance de masa se muestra en la Ecuación 2.5, la cual, se grafica y se obtiene lo siguiente:

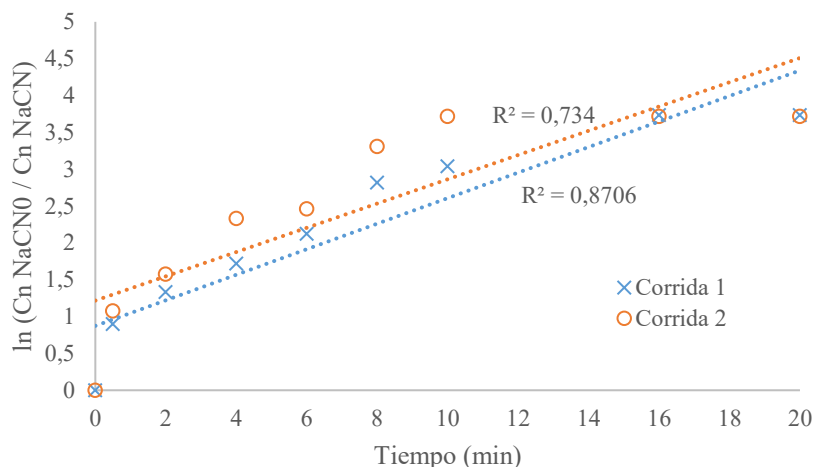


Figura 2.8. Datos para la determinación del orden de cinética de reacción asumiendo orden 1.

De la figura anterior, se determinó el parámetro R^2 para ambas corridas y es de 0,871 y 0,734 respectivamente, por lo que se concluye que la reacción no es de orden 1.

Ahora, asumiendo que la cinética de reacción es de orden 2, el balance de masa es el mostrado en la Ecuación 2.6, la cual se graficó y se obtuvo lo siguiente:

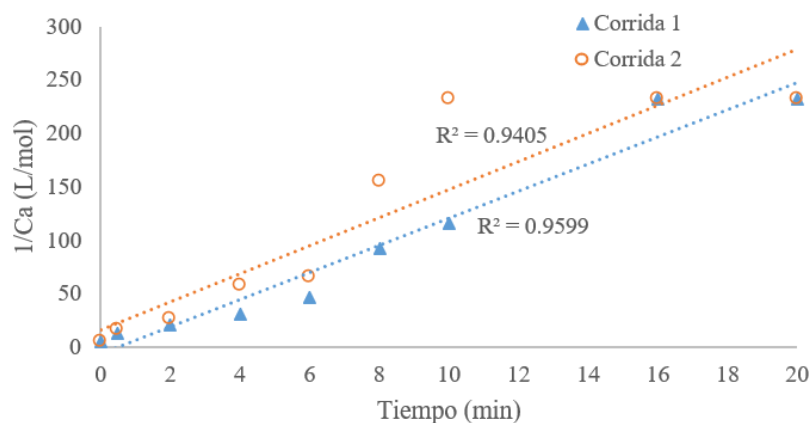


Figura 2.9. Datos para la determinación del orden de cinética de reacción asumiendo orden 2.

Para el cálculo del parámetro de correlación R^2 de la segunda corrida (indicada en anaranjado en la Figura 2.9) se omitió el punto que corresponde al par ordenado (10 , 232) puesto que se trata de un valor anómalo que no se ajusta al mismo comportamiento del resto de datos. Es muy probable que dicho punto haya sido generado debido a un error humano, puesto que

debemos tomar en cuenta que el método de cuantificación se basa en un cambio de color para determinar el punto final de la valoración, el cual pudo ser erróneamente visualizado por el analista, o bien se pudo originar al realizarse la lectura del volumen en la bureta del valorante.

De la figura anterior, se determinó el parámetro R^2 para ambas corridas y es de 0,960 y 0,940 respectivamente, los cuales son valores lo suficientemente cercanos a 1 para concluir que el orden de reacción es 2.

2.6 Determinación de la constante de velocidad, planteamiento de la cinética de reacción y tiempo de reacción.

De la sección anterior, se concluyó que el orden de reacción para la eliminación de cianuro es de 2. Ahora bien, a partir de la ecuación inicial se procede a determinar la constante específica de velocidad:

$$\frac{1}{C_{NaCN}} = 12,667t - 5,585 \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{C_{NaCN}} = 13,104t + 17,248 \quad (2.11)$$

Para las dos ecuaciones anteriores, si se realiza la analogía con la Ecuación 2.6, se determina que los valores de la constante específica de velocidad son $12,667 \text{ Lmol}^{-1}\text{min}^{-1}$ y $13,104 \text{ Lmol}^{-1}\text{min}^{-1}$ respectivamente.

Por lo que, se toma el promedio de ambos valores, puesto que este representaría una medida de tendencia central adecuada en vista que solo se realizaron dos corridas, de ahí que la constante específica de reacción es $12,885 \text{ Lmol}^{-1}\text{min}^{-1}$, y de ahí que la Ecuación 2.12 se torne en la Ecuación 2.13.

$$-\frac{dC_{NaCN}}{dt} = kC_{NaCN}^2 \quad (2.12)$$

$$-r_{NaCN} = 12,885C_{NaCN}^2 \quad (2.13)$$

Las condiciones para las cuales se cumple la cinética anterior son para proporciones iniciales de cianuro:hipoclorito 1:3, $\text{pH} \approx 11$ y temperatura de $25\text{-}60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Por último, si analizamos la Figura 2.7, en donde muestra el comportamiento de la concentración del cianuro en el tiempo se puede apreciar como desde el tiempo 0 hasta el

minuto 8 ocurre aproximadamente el 90% de la reducción del cianuro total en disolución, mientras que si seguimos analizando los valores posteriores, se determinará que la tasa de descomposición de cianuro disminuye luego de los 8 minutos, no obstante, es en el trayecto de los 16 a 20 minutos que se podría decir que el cianuro presente es básicamente constante, por lo que se concluye que la reacción ha terminado al llegar el minuto 16. A pesar de lo anterior, para contar con un factor de cobertura que me asegure que el proceso de eliminación ha terminado no se tomará los 16 minutos como el tiempo final de reacción, sino que se establecerá un tiempo de 20 minutos para contemplar cualquier eventualidad o irregularidad durante el proceso.

CAPÍTULO 3

3. Diseño del sistema de reacción.

3.1 Propuesta del sistema de reacción.

Wastech es una organización dedicada a la gestión integral de excedentes industriales y residuos peligrosos, para ello, desarrolla dentro de sus instalaciones procesos como la trituración, operaciones de mezclado de lodos y aguas oleaginosas, compactación de filtros, bombeo de aguas, perforación de aerosoles, acopio de materiales reciclables y otros que se llevan a cabo en menor proporción. Con el paso del tiempo Wastech ha invertido en la optimización de sus procesos con la compra de nuevas tecnologías que faciliten la operación y teniendo en cuenta procesos que se planean implementar a futuro, es por lo anterior que para el diseño del sistema de reacción se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Facilidad de transporte.
- Espacio requerido en bodega.
- Versatilidad del sistema para ser utilizado en otras operaciones.
- Costo.
- Facilidad de operación.
- Aprovechamiento de activos de la empresa.

El sistema entonces, estará conformado por un reactor batch el cual estará dimensionado para poder ser transportado en camiones tipo Furgón marca General Motor Company Modelo 2000, con los que actualmente cuenta la empresa para el transporte de maquinaria, el reactor, además, deberá tener una coraza hueca en sus alrededores que permita el acople del agitador y que facilite el transporte y carga del reactor dentro de la empresa y a los camiones con ayuda de un montacargas. El reactor deberá contar con acoples para la colocación de sondas para medir el pH y temperatura, esto para obtener un monitoreo constante mientras se lleva a cabo la reacción. El recipiente deberá ser completamente hermético, para evitar el derrame de líquidos peligrosos, no obstante, no operará completamente cerrado en su parte superior para evitar la acumulación de vapores en el transcurso de la reacción que puedan ocasionar algún incidente. Para lograr satisfacer todos los criterios previamente mencionados y obtener un reactor que cumpla con la mayoría de las características planteadas, el diseño realizado se entregará a un taller mecánico especializado para la construcción del mismo.

Tanto para la carga como la descarga del reactor se deberá acoplar una bomba, la cual se seleccionará para poder trasegar los productos del proceso hacia los camiones cisternas, los cuales llevarán los subproductos a ser dispuestos por un ente externo o bien para almacenar el producto residual en tanquetas para su próximo tratamiento dentro de la empresa.

En aras del aprovechamiento de activos de la empresa, se utilizará como base para la agitación el motor que ya se encuentra disponible, adaptando entonces el agitador para lograr las condiciones óptimas determinadas a partir del escalamiento de la fase experimental, esto para asegurar que se obtenga la misma eficiencia del proceso. Para facilidad de transporte, limpieza y versatilidad del equipo, el agitador se podrá remover del reactor. El mismo, cuando esté en uso estará sujeto por una estructura metálica sostenida por tornillos.

En resumen, el sistema de reacción tendrá los siguientes componentes:

- Reactor batch con coraza metálica.
- Motor y agitador.
- pHmetro.
- Termómetro.
- Bomba.
- Accesorios (mangueras, acoples PVC).

En la Figura 3.1 se muestra un diagrama que ilustra la operación que se propone que realice la empresa para llevar a cabo la eliminación del cianuro de sodio.

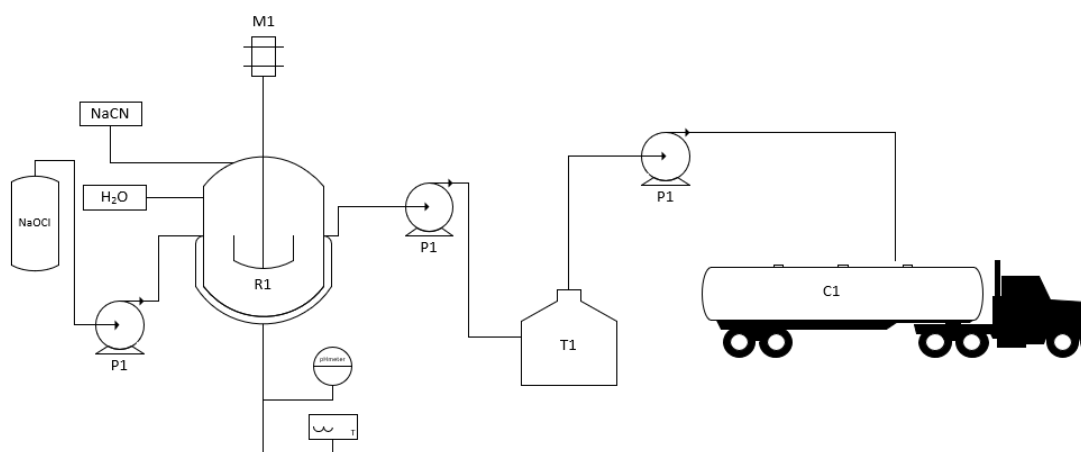


Figura 3.1. Ilustración del procedimiento de eliminación de cianuro de sodio.

En resumen, la operación inicia con la carga del reactor R1, primeramente, se deberá añadir el cianuro en su forma sólida, seguidamente se agregará suficiente agua para disolver el cianuro, esta cantidad estará determinada por la solubilidad del compuesto en agua (0,58 g/mL) a la cual se le deberá agregar 7 veces la cantidad de agua requerida para hacer una disolución insaturada, lo anterior, para favorecer la disolución del mismo, este exceso de agua se determinó mediante pruebas realizadas en bodega, en donde se observó la dificultad de disolver el cianuro, de ahí que el exceso de agua utilizado fue medido y registrado para replicarse en pruebas posteriores y en el proceso como tal. Seguidamente se enciende el agitador para preparar la disolución de cianuro de sodio, al cabo de 5 minutos de agitación se deberá agregar el hipoclorito de sodio al 12 % el cual es la presentación más concentrada en que se encuentra en el mercado, en una relación masa de 3:1 NaOCl:NaCN y se deja reaccionar por 20 minutos mientras se monitorea que la temperatura se mantenga entre 20 °C – 60 °C y el pH entre 9-14. Terminada la reacción se bombea el contenido del reactor hacia la cisterna o bien a una serie de tanquetas en caso de que la cisterna no se encuentre disponible.

3.2 Selección y dimensionamiento de equipos.

3.2.1 Reactor.

3.2.1.1 Tipo de reactor.

La primera etapa de diseño del reactor en este caso consta de la selección del tipo de reactor que se utilizará para llevar a cabo el proceso. Para iniciar se consideraron los reactores típicos (batch, PFR, CSTR) y se analizaron dos factores que tienen influencia sobre el proceso: la cinética de reacción y la facilidad de operación.

Considerando primeramente la cinética, específicamente el orden de reacción el cual corresponde a segundo orden, este nos indica que los tipos de reactores que más nos favorecen son el batch y el PFR, puesto que los órdenes de reacción altos se ven beneficiados al tener concentraciones altas del reactivo, caso que no es característico de un reactor CSTR.

Ahora bien, con lo que respecta a la facilidad de operación y considerando las condiciones que se tienen en las bodegas de la empresa como el espacio y cantidad de operadores disponibles, es evidente que el reactor batch representa el reactor que tiene la mayor facilidad de uso. Lo anterior debido a que, los reactores tipo PFR y CSTR necesitan de un bombeo

constante y de mayor precisión a la hora de alimentar el reactor con los reactivos (flujo) al momento de realizar las operaciones para poder evitar derrames que pueden ocasionarse por flujos dispares, mientras que los reactores batch pueden ser cargados y descargados por gravedad (maniobra que ya es realizada por la empresa en otras operaciones cotidianas) y en caso de uso de bombas no se requiere mantenerlas en operación por largos períodos de tiempo, además de que la etapa de llenado es sumamente sencilla.

Por otro lado, cualquier disconformidad en las cantidades agregadas al reactor puede ser fácilmente compensado ajustando los tiempos de reacción hasta cumplir los parámetros requeridos.

3.2.1.2 Geometría del reactor.

Se consideraron dos geometrías para el reactor: cilíndrica y esférica, geometrías que son generalmente utilizadas para reactores tipo batch, esto porque permiten condiciones de agitación favorables. El factor determinante para la selección se basó en la forma con la cual se aprovechará de mejor forma el espacio, resultando la geometría cilíndrica en la que provee un mayor volumen de reactor para dimensiones similares en comparación con la esférica como se ve en la Ecuación 3.1 y 3.2 en donde para un radio de 2 m se tienen los siguientes volúmenes de reactor:

$$V_{cilindro} = \pi r^2 h = \pi r^2 (2 * r) = \pi * 2^2 * (2 * 2) = 50,24 m^3 \quad (3.1)$$

$$V_{esfera} = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} * \pi * 2^3 = 33,49 m^3 \quad (3.2)$$

También se consideró el costo de construcción, en donde, un reactor de geometría cilíndrica tiene un costo menor de construcción en comparación con uno esférico puesto que este último tiene una complejidad mayor de construcción.

3.2.1.3 Volumen del reactor.

Información de las pruebas que se han realizado previamente en Wastech, indican que uno de los desafíos del proceso radica en el tiempo que se requiere para ejecutar el procedimiento completo de eliminación de cianuro contra la cantidad de cianuro tratada, esto debido a que los recipientes utilizados son de apenas 1 m³, lo que hace que la cantidad de contaminante que se pueda tratar sea de apenas entre los 25 y 35 kg por batch, de ahí, que el volumen del

reactor deberá maximizarse con el objetivo de lograr procesar una mayor cantidad de cianuro en cada batch.

Para determinar el volumen máximo del reactor que se puede diseñar para Wastech, se pueden tomar aspectos en consideración como el costo de construcción y el espacio en bodega, no obstante, dado que por petición de la alta gerencia se requiere que el reactor sea transportable en los medios que posee la empresa esto para dar una mayor versatilidad de uso al equipo, el reactor se dimensionó de forma tal que este se pudiera introducir en la parte trasera de un camión General Motor Company T6500 modelo 2000, siempre considerando que el volumen debe ser lo más grande posible.

Las dimensiones del contenedor que poseen los camiones son de 2,40 metros de altura y 2,40 metros de ancho, ahora bien, se consideró un espacio de entre 10-15 centímetros en la parte baja del reactor para colocar una estructura metálica que permita a un montacargas o minicargador transportar el reactor dentro de las instalaciones, además, un espacio de entre 3 y 5 centímetros en la parte superior del reactor para la tapa del mismo. Dado que el agitador se debe acoplar al reactor, se tomó en cuenta el espacio que se requiere para la estructura metálica que estará sujeta al reactor y servirá de soporte para el agitador, para ello se consideraron 8 centímetros a lo ancho del reactor (4 centímetros a cada lado). Por último, se dejaron 8 centímetros de altura y anchura libre para tener espacio suficiente para mover el reactor dentro del contenedor del camión.

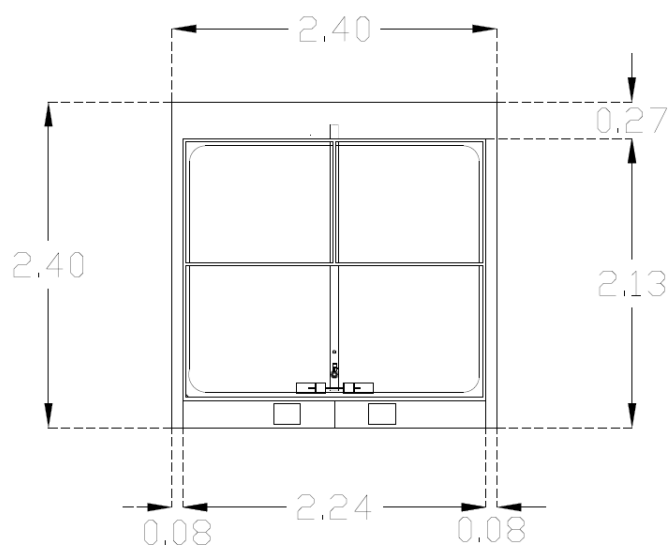


Figura 3.2. Diagrama de acomodo del reactor en el vehículo de transporte.

Por lo anterior, se determinó que las dimensiones del reactor serán de 2,13 m de altura (h) y 1,12 m de radio (r), resultando entonces, el volumen (V) del reactor en 8,39 m³.

Determinado el volumen, se calculó la masa de cianuro de sodio que se puede tratar por batch utilizando dicho reactor, para ello se consideró que este opere utilizando solamente el 75% de su capacidad para evitar derrames debido a la agitación que se requiere durante el proceso. De lo anterior, se tiene aproximadamente 6,29 m³ de capacidad para trabajar, ahora bien, considerando lo difícil que se torna disolver el cianuro sólido en el agua, se utilizará un exceso del 700 % de agua para facilitar dicho paso, además, el agua en exceso ayudará a disipar el calor que puede generarse durante la reacción, así como ayudar en el proceso de solvatación como se explicó anteriormente. De ahí que la cantidad de cianuro de sodio que se puede tratar por batch con las consideraciones anteriores es de 200 kg (4081,6 mol NaCN) aproximadamente considerando la Ecuación 3.3.

$$m_{NaCN,batch} = \frac{(V_{reactor} * 0,75 - V_{NaOCl})}{700 \%} * S_{NaCN} \quad (3.3)$$

Ahora, para determinar la conversión del sistema se tiene el siguiente balance de masa para el reactor batch:

$$V(-r_A) = N_{A0} \frac{dX_A}{dt} \quad (3.4)$$

Tomando en cuenta que en el Capítulo 2 previamente se definió un tiempo de reacción de 20 min y la cinética de reacción, además de que el volumen efectivo del reactor que se utilizará es de 6,29 m³, se tiene que la resolución del balance de masa es la siguiente:

$$\frac{N_{A0} * k}{V} \int_0^{20} dt = \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(1-X_A)^2} \quad (3.5)$$

Resolviendo las integrales y sustituyendo los valores:

$$\frac{4081,6 \text{ mol} * 12,885 \frac{L}{\text{mol} * \text{min}} * (20 - 0) \text{ min}}{6290 L} = \frac{1}{(1 - X_A)} - \frac{1}{(1 - 0)}$$

Y despejando la conversión:

$$X_A = 0,994$$

3.2.1.4 Material de construcción.

La principal característica que deben poseer los materiales de construcción es resistencia a la corrosión, no obstante, para agregar versatilidad al equipo, se consideró la resistencia a las altas temperaturas y presiones, para que el mismo pueda ser utilizado en operaciones de neutralización altamente exotérmicas.

De lo anterior se consideraron dos materiales que son altamente utilizados en la industria: AISI 304 y acero inoxidable 316L.

AISI 304: Es un acero de propósito general por su ductibilidad y buenas características de maleabilidad y resistencia a la corrosión. Por sus características químicas, al incorporar Níquel, permite lograr productos más complejos (ya sea por procesos de soldado o formado), en comparación con otros aceros como el AISI 430 este presenta un espectro mayor de resistencia frente a ciertos agentes en determinadas condiciones de temperatura y pH.

316L: El acero inoxidable 316L es más resistente a la corrosión que el 304, además, es muy resistente a ambientes clorados. Su estructura austenítica le da una gran dureza. Puede soportar temperaturas constantes en un rango de 425-860 °C. El material presenta una buena soldabilidad, por lo que es fácilmente manipulable para fabricar equipos.

Cuando se compara los componentes de los dos aceros en cuestión, el AISI 316L obtiene una ventaja debido a la adición de molibdeno (Mo) en su composición, el cual le otorga mayor resistencia a la corrosión y resistencia a temperaturas altas, este logra soportar temperaturas de hasta 1200 °C. (GoodFellow, 2020)

Cuadro 3.1. Comparación de la composición del Acero AISI 304 y 316L

Acero	Elemento							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
AISI 304	0,08	2,00	0,04	0,03	0,75	18-20	8-11	-
316L	0,03	2,00	0,45	0,03	1,00	16-18	10-14	2-3

A pesar de que el acero inoxidable 316L presenta mejores características en general que el AISI 304, ambos materiales brindan las características necesarias para llevar a cabo la operación, por lo que se utilizará el AISI 304 como material de construcción del reactor ya que este tiene un precio de venta más barato y tiene más proveedores a nivel país. Dicho

material se puede encontrar en distintas empresas costarricenses como Aceros Cartago S.A y Equinoxcr.

3.2.1.5 Detalles de construcción del reactor.

Para un mejor manejo y transporte del reactor, la base del mismo posee 8 aberturas de 15 cm de alto y 20 cm de ancho espaciadas 50 cm, para permitir su traslado con montacargas.

A la altura de 10 cm se tiene una válvula de bola que permitirá la salida de líquidos del reactor. Ahora bien, para la adaptación del sistema de medición de pH y temperatura, se tendrá una rosca de ½” a una altura de 50 cm.

La estructura mostrada en la parte superior del reactor corresponde al soporte del motor de agitación, sobre el cual se arma el sistema entero mediante la colocación del eje metálico y el agitador diseñado en la Sección 3.2.2.

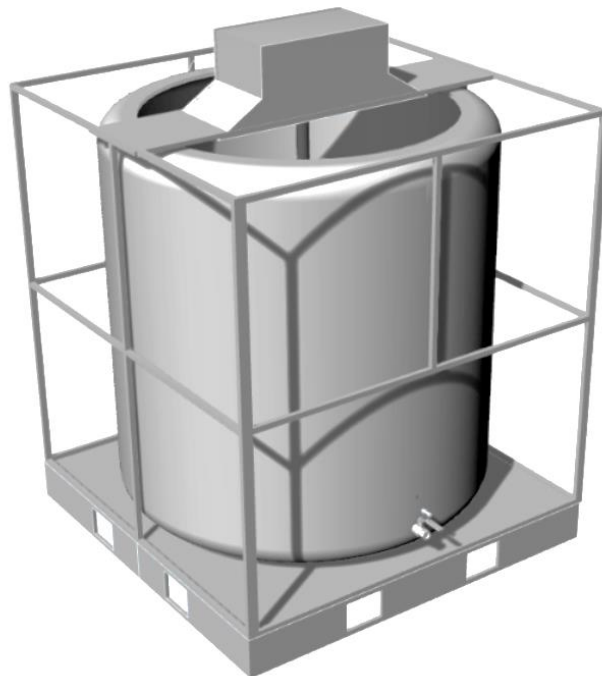


Figura 3.3. Modelo sólido 3D del reactor diseñado.

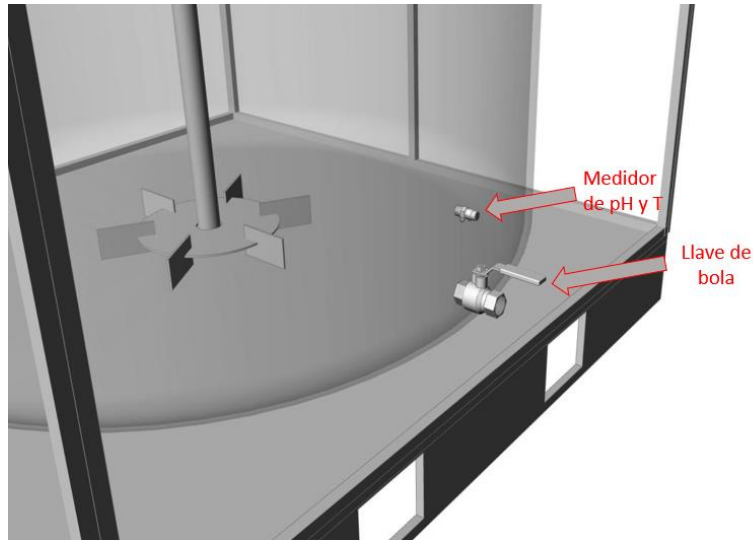


Figura 3.4. Acercamiento al área de la llave de bola y medidor de pH y temperatura.

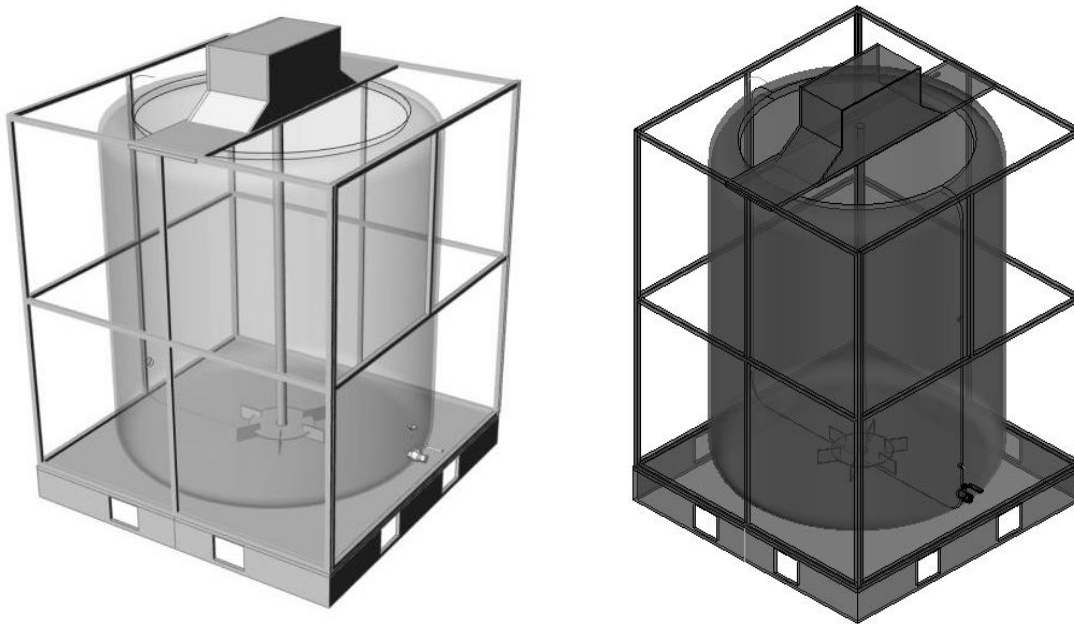


Figura 3.5. Modelo 3D "X-ray" del reactor diseñado.

3.2.2 Escalamiento del sistema de agitación y mezclado.

Las herramientas que son mayormente utilizadas para el escalamiento de sistemas de agitación y mezclado son el análisis dimensional y la teoría de escalamiento, ambos son utilizados tradicionalmente en forma combinada, no obstante, existen otras técnicas como la similitud geométrica, cinemática y dinámica, la cual plantea que para dos sistemas definidos se deben conservar los factores de escala. Para esta última técnica es difícil lograr que se cumplan simultáneamente todas las igualdades, sin embargo, basta con determinar cuál de

las igualdades posee un efecto significativo sobre el proceso que se quiere desarrollar y escalar en base a uno o dos factores de escala (Briceño & Cobos, 2004).

El objetivo de escalar las condiciones de mezclado utilizadas en la sección experimental, es lograr que el proceso se desarrolle con la misma velocidad de reacción para así lograr un proceso rápido y eficiente. Es por ello que los parámetros considerados como factores significativos de escalamiento son el número de Reynolds (Ecuación 3.6) y la potencia específica consumida (Ecuación 3.7).

$$Re = \frac{\rho \tilde{N} D^2}{\mu} \quad (3.6)$$

$$P_M = N_p \frac{\rho \tilde{N}^3 D^5}{m} \quad (3.7)$$

Una vez definidos los parámetros, se debe considerar sobre cuales factores se tendrá control a la hora de realizar el escalamiento. Al analizar la Ecuación 3.6, la viscosidad y la densidad del fluido serán factores determinados por las condiciones establecidas en el procedimiento de eliminación del cianuro, por lo tanto, no pueden ser calculados a partir de otras variables, dejando así, el diámetro del impulsor y la velocidad de giro del agitador como los factores que se podrán variar para mantener la igualdad del número de Reynolds del sistema experimental con el sistema escalado. Lo mismo sucede a la hora de analizar la Ecuación 3.7, en donde la masa del fluido y la densidad estarán definidas por condiciones propias de las disoluciones a tratar, mientras que el diámetro del impulsador, número de potencia y velocidad de giro del agitador son factores que si podrán ser variados con el fin de mantener la similitud de parámetros.

Para iniciar con el escalamiento del sistema se calcularon los parámetros indicados anteriormente utilizando las condiciones de la sección experimental. Para el cálculo del número de potencia se utilizó la Figura 3.6, para la cual se tomaron los datos de la curva señalada con “2” que pertenece a un agitador de turbina de 6 paletas.

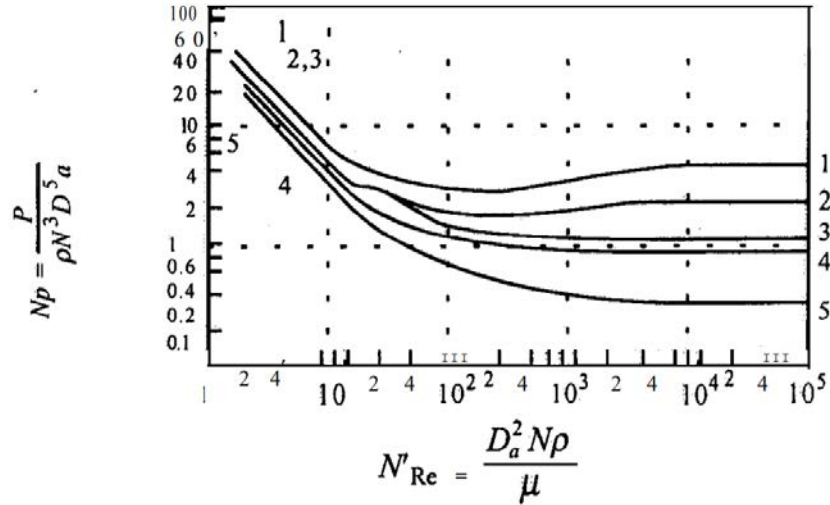


Figura 3.6. Correlación de potencia de diversos impulsores y deflectores (*Geankoplis, 1998*).

Los resultados de los parámetros experimentales se muestran en el Cuadro B.3, donde el número de Reynolds indica que el sistema se encontraba en un régimen turbulento (2×10^4), por lo que, al realizar el escalamiento, esta condición también se deberá cumplir. Por otro lado, la potencia media consumida será el factor que se deberá igualar para el sistema escalado (0,745 W/kg).

Como se mencionó anteriormente, para determinar las condiciones de operación y diseño del sistema de agitación, se podrá modificar la velocidad de agitación y el diámetro del impulsor para obtener una potencia media similar a la entregada experimentalmente.

Tomando en cuenta los recursos con los que cuenta Wastech, se tiene un motor con el que se puede obtener una velocidad de giro de 1710 rpm (Cuadro 3.3). No obstante, puesto que el proceso involucra especies peligrosas y de toxicidad aguda, para disminuir el riesgo de salpicadura o derrame accidental se utilizará la velocidad más baja, para ello el motor cuenta con un regulador de frecuencia que permite operarlo a 855 rpm. Una vez definida esta variable, se ajustó el diámetro del agitador de forma que la potencia media se igualara a la reportada en el Cuadro B.3 (0,745 W/kg), resultando en un diámetro de agitador de 23 cm, no obstante, se fijará el diámetro del agitador en 30 cm para asegurar que la potencia entregada sea la misma que la experimental o mayor.

Tomando en cuenta la puesta en marcha del proceso, se debe considerar que al momento de preparar la disolución de cianuro a tratar, la fase de dilución del cianuro en el agua se puede

realizar con el impulsor ligeramente inclinado, esto para maximizar el efecto del patrón de flujo característico de los impulsores de turbina (radial), tal que logre levantar los sólidos del fondo del reactor, y así tanto facilitar como agilizar dicha fase del proceso, no obstante, cuando se inicie el proceso de cloración, el agitador deberá estar colocado en su forma original (recta) puesto que por un tema de seguridad, esta posición logrará una agitación efectiva sin arriesgar algún posible derrame o salpicadura ya que el reactor no operará completamente sellado. A continuación, se muestra una representación gráfica del diseño del agitador, así como sus especificaciones de construcción.

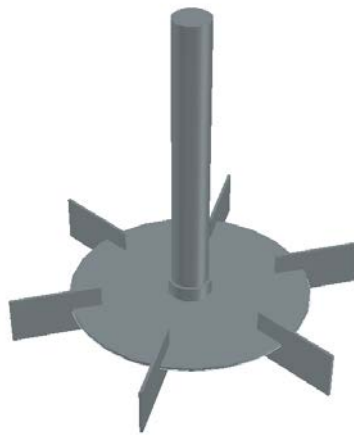


Figura 3.7. Ilustración gráfica en 3D del agitador de turbina de 6 paletas diseñado.

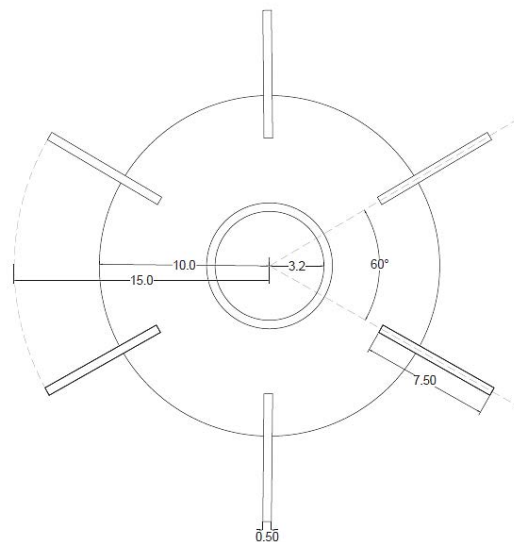


Figura 3.8. Vista superior del agitador de turbina de 6 paletas diseñado.

Cuadro 3.2 Especificaciones de construcción del agitador de turbina de 6 paletas.

Especificación	Dimensión (cm)
Diámetro del disco	20,0
Diámetro del agitador	30,0
Largo de las paletas	7,5
Altura de las paletas	8,0
Distancia del centro del disco hasta las paletas	7,5
Diámetro del eje	6,4

Otras señas:

El agitador puede ser ajustado a distintas alturas del eje, este se sujeta con dos tornillos tarlack de punta fina ½”.

Cuadro 3.3. Características del motor eléctrico disponible en las bodegas industriales de Wastech.

Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)	Potencia (HP)	Potencia (kW)	Velocidad (rpm)	Amperaje (A)
YY 230	60	1.5	1.1	1710	4.6
Y 460	60	1.5	1.1	1710	2.3

3.2.3 Selección de la bomba.

El papel que cumplirá la bomba en el proceso será para el llenado y vaciado del reactor. No obstante, debido a que el hipoclorito de sodio que se utilizará se obtiene embalado en estañones, la carga del reactor se realizará por gravedad con ayuda de un montacargas, sin embargo, la descarga, al tratarse de un reactor de más de 8 m³ si requerirá de la bomba, por lo que para la selección de la bomba se consideró el material de diseño, para que esta fuese resistente a sustancias oxidantes y que permitiera la descarga en un periodo no mayor a 15 minutos, esto para agilizar el tiempo del ciclo del proceso.

Para el proceso se prefirió una bomba de combustión en lugar de una eléctrica, puesto que a futuro se quiere considerar la realización de la operación de eliminación de cianuro en el sitio donde se encuentre dicho contaminante, y dependiendo del lugar donde se quiera llevar a cabo el proceso puede que no exista una conexión viable para poner a funcionar el equipo, además, el costo de las bombas que funcionan con gasolina tiende a ser menor. A continuación, se muestran las bombas consideradas para llevar a cabo el proceso.

El primer equipo propuesto es la bomba centrífuga autocebante a gasolina AQUOR AQQ9-168F (Figura 3.9). que permitiría la descarga del reactor hacia la cisterna en un tiempo aproximado de 15 minutos al igual que las que se proponen y se muestran en las Figuras 3.11

y 3.13. Las propiedades técnicas de las bombas analizadas se muestran en los Cuadros 3.4, 3.5 y 3.6.



Figura 3.9. Bomba centrífuga autocebante a gasolina AQUOR AQG9-168F.

Cuadro 3.4 Información técnica de la bomba AQUOR AQG9-168F

Característica	Descripción
Capacidad nominal	0,5 m ³ /min
Material de construcción	Carcasa de aluminio Cuerpo y flecha de acero inoxidable Sello mecánico de carbón-cerámica
Temperaturas	Hasta 70 °C
Succión y descarga	2 pulgadas
Motor	Gasolina, 4 tiempos, consumo 0,41 gal/hora
Potencia	6,5 HP
Costo	€161000 / \$280

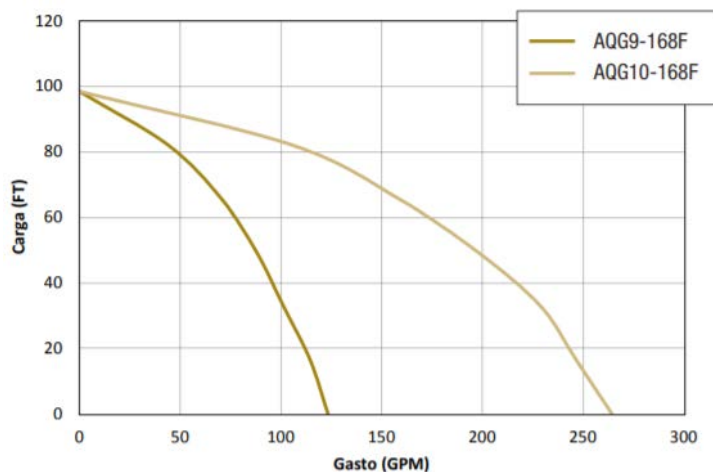


Figura 3.10. Curva de operación de la bomba centrífuga Modelo AQUOR AQG9-168F.



Figura 3.11. Bomba centrífuga a gasolina Modelo AL8M.

Cuadro 3.5 Información técnica de la bomba Modelo AL8M.

Característica	Descripción
Capacidad nominal	0,53 m ³ /min
Material de construcción	Carcasa de aluminio inyectado Impulsor de hierro gris Sello mecánico de carbón-cerámica
Temperaturas	Hasta 70 °C
Succión y descarga	2 pulgadas
Motor	Gasolina, 4 tiempos enfriados por aire
Potencia	6,0 HP
Costo	€190900 / \$332

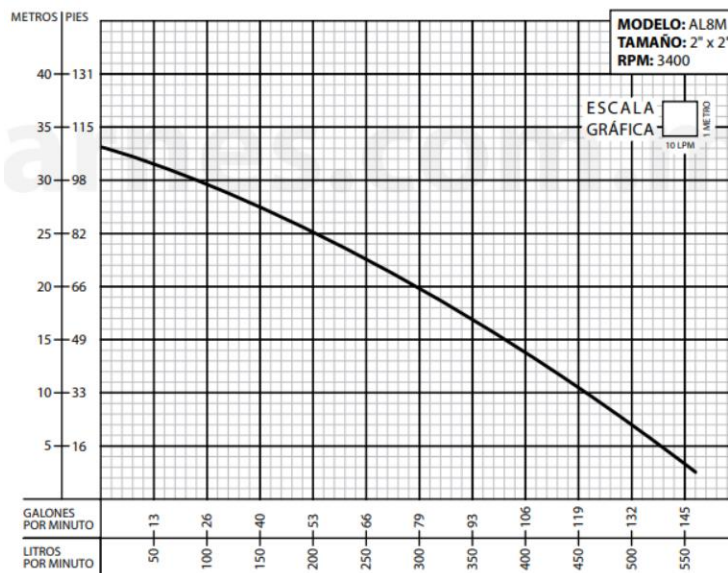


Figura 3.12. Curva de operación de la bomba centrífuga Modelo AL8M.



Figura 3.13. Bomba centrífuga a gasolina Modelo 12M.

Cuadro 3.6 Información técnica de la bomba Modelo 12M.

Característica	Descripción
Capacidad nominal	0,70 m ³ /min
Material de construcción	Aluminio inyectado
Temperaturas	-
Succión y descarga	2 pulgadas
Motor	Gasolina, 4 tiempos enfriados por aire
Potencia	8,0 HP
Costo	€361100 / \$623

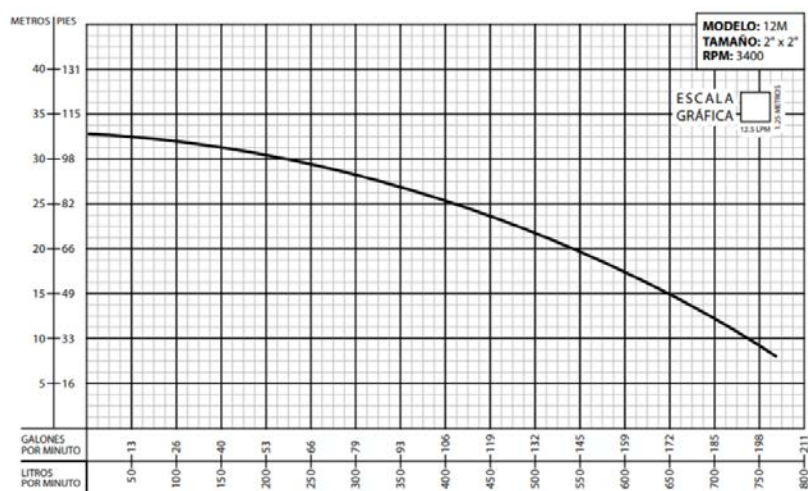


Figura 3.14. Curva de operación de la bomba centrífuga Modelo 12M.

Entre las bombas que se preseleccionaron, todas poseen una capacidad nominal similar que va desde los 0,5 m³/min a los 0,70 m³/min, dicha propiedad no influye de manera significativa

en el proceso de selección debido a que cualquiera de las propuestas lograría la descarga del reactor en el tiempo establecido de 15 minutos.

Además de las bombas que se mostraron anteriormente, se evaluará el uso de un equipo que actualmente se tiene en bodega y que se trata de una bomba de doble diafragma neumática, la cual se muestra en la Figura 3.15. Esta, al tener una capacidad de bombeo casi del doble que las demás presentadas, se convierte en una buena opción para llevar a cabo la tarea de descargar el reactor.



Figura 3.15. Bomba de doble diafragma Modelo Wilden 3" (76 mm).

Cuadro 3.7 Información técnica de la bomba Modelo Wilden 3" (76 mm).

Característica	Descripción
Capacidad nominal	1,025 m ³ /min
Material de construcción	Carcaza de aluminio
Temperaturas	-
Succión y descarga	3 pulgadas
Costo	€2012500
No representa costo de capital para la empresa	

Entre todos los equipos nuevos propuestos, se considera que la bomba AQUOR AQG9-168F representa la mejor opción debido a su material de construcción, puesto que esto le permitiría tener una mayor durabilidad, aunado a lo anterior, se trata de la bomba que tiene un menor costo.

Ahora bien, en el caso de la bomba que actualmente posee la empresa se tiene que considerar el hecho de que el equipo se encuentra en buen estado y que el personal de bodega sabe cómo operarla, lo cual facilita el proceso de bombeo, además, de que esta no representaría un gasto

extra para la empresa. Además, las mangueras de succión y descarga son lo suficientemente largas como para remover todo el líquido del reactor y bombear directamente a la cisterna o a una tanqueta según se requiera en el proceso.

La bomba actual de la empresa ya ha sido utilizada para realizar el trasiego de residuos que contienen hipoclorito de sodio sin presentar problemas, por otro lado, al ser de tipo neumática no tiene riesgo de cavitación como si podría ser en el caso de adquirir una bomba centrífuga como la AQUOR, de la cual no se pudo evaluar dicha posibilidad debido a la falta del parámetro de referencia NPSH disponible, haciendo que la empresa se incline por utilizar el equipo actualmente en bodega por sobre uno nuevo.



Figura 3.16. Mangueras de succión y descarga de la bomba neumática Wilden.



Figura 3.17. Compresor de aire



Figura 3.18. Sistema de bombeo hacia cisterna utilizando la bomba neumática Wilden.

3.2.4 Accesorios.

3.2.4.1 Sonda de pH y temperatura.

Los equipos que se consideraron para llevar el control de pH y temperatura durante el proceso son un medidor portátil y un medidor fijo removible. Dado que la empresa ya cuenta con medidores de pH, a continuación, se comparará la versión en existencia contra una propuesta.

En la Figura 3.19 se muestra el pHmetro actual, el cual logra mediciones precisas a partir de una sola gota de muestra, sin embargo, tomando en cuenta que el pH debe ser monitoreado durante el desarrollo de la reacción, su uso requeriría de un muestreo constante para llevar a cabo las mediciones, tomando aproximadamente de 2 a 3 minutos para obtener un dato. Dentro de los aspectos positivos sobresalen la disponibilidad del instrumento y la familiaridad que tienen los operadores de bodega con el uso del mismo, por otro lado, se debe mencionar que un muestreo constante durante el transcurso de la reacción podría estar asociado a un constante riesgo de exposición el cual podría aumentar la probabilidad de incidentes que afecten la salud del trabajador, además, en caso de que por algún motivo el pH de la reacción disminuyera y se empezaran a generar vapores tóxicos, el tiempo de respuesta sería mayor, puesto que este estará asociado a la velocidad de muestreo del operador. Aunado a lo anterior, dicho instrumento solo mide pH, por lo que habría que utilizar un instrumento extra para medir la temperatura del medio.



Figura 3.19. Medidor de pH disponible en las bodegas de Wastech.

El segundo instrumento que se propone se trata de un medidor que consiste en un electrodo industrial con un bulbo de vidrio el cual es resistente y fácil de limpiar. Su rosca externa de $\frac{1}{2}$ " (ver Figura 3.20) permitirá su instalación en la parte inferior del reactor, de modo que, aunque se opere el reactor a bajos volúmenes se pueda obtener una medición, eliminando la operación de muestreo por parte del operador y obteniendo datos en cuestión de segundos. Este medidor además elimina la necesidad de un instrumento extra para la medición de temperatura, puesto que ya tiene integrada dicha función. El medidor deberá ser conectado a una pantalla digital para mostrar los resultados.

Por lo antes expuesto sobre las facilidades que conlleva la instalación del medidor HI 1003 este es el que se elige para el monitoreo de las variables del proceso de eliminación de cianuro de sodio.



Figura 3.20 Medidor de pH y temperatura HI1003 HANNA Instruments.

3.2.5 Determinación del costo de capital del diseño.

Como fue determinado previamente, los componentes diseñados para llevar a cabo el proceso son: reactor, bomba, agitador, motor e instrumentación. Para determinar el costo de cada uno de ellos de acuerdo con las especificaciones deseadas, se siguieron distintas metodologías las cuales se describen a continuación.

Cotización a proveedores y construcción: Debido a la especificidad de equipos como el reactor y el agitador, se utilizó esta metodología la cual consistió en la cotización de los materiales de construcción de los equipos y seguidamente mediante una descripción del equipo requerido a un taller industrial, se obtuvo el costo de construcción del mismo. A partir de ambos costos se determinó entonces el costo del equipo.

Cotización a proveedores: Puesto que en el mercado existe una gran variedad de dispositivos, se cotizó con proveedores los equipos que cumplieran con la utilidad o con las características de diseño determinadas previamente. De ahí, que el costo del medidor de pH y temperatura, así como la bomba y el motor para el agitador fueron determinados de forma directa por el precio establecido por los proveedores.

Estimación por índices de costos: En caso de que no se pueda determinar el costo de algún equipo mediante las metodologías descritas previamente, se utilizará una forma de estimación basada en los índices de costos de Marshall and Swift, la cual consiste en utilizar un dato histórico del precio de un equipo en específico que se desee y actualizar dicho dato mediante el uso de índices que permiten estimar su costo en la actualidad.

3.2.5.1 Reactor y agitador mecánico.

Para determinar el costo del reactor y agitador mecánico, se cotizó su precio de construcción con la empresa SEMAC Metalmecánica y precisión y la empresa Eiqu LTDA Estructuras Industriales, a los cuales se les brindó la información de diseño especificada en la Sección 3.2.1 y sus subsecciones del reactor que se requería construir (dimensiones, acoples para accesorios como mangueras, instrumentación, base para transporte, tapa y material de construcción, acabados), a partir de ello, la empresa calculó el costo de su construcción y entrega en bodega.

3.2.5.2 Motor.

Dado que recientemente la empresa realizó la compra de un motor y el diseño del proceso se adaptó a dicho equipo, el costo asociado se consultó con el encargado de la compra. La determinación del costo específico del motor se aproximó tomando el 70% del total de la compra, esto porque el motor se compró en conjunto con un agitador mecánico y un variador de frecuencia y la factura no indica los montos específicos de cada componente.

3.2.5.3 Bomba.

Retomando de la Sección 3.2.3, Cuadro 3.4, Cuadro 3.5, Cuadro 3.6 y 3.7 entre las bombas analizadas los precios eran de ₡161000, ₡190900, ₡361100 y ₡2012500, entre ellas, se eligió la Modelo Wilden 3" la cual se trata de la más costosa entre las propuestas, no obstante, al tratarse de un equipo que ya se encuentra en bodega, no representa un costo de capital extra para la empresa.

El costo de la bomba se determinó por consulta a la alta gerencia de la empresa, a pesar de que no se contaba con registros se conoce que su costo de adquisición fue de ₡2012500 (\$3500) como equipo de segunda mano, valor que concuerda con las consultas que se hicieron a la empresa Zebol la cual indica que dicha bomba nueva posee un valor que ronda los ₡2875000 (\$5000).

3.3 Medidor de pH y temperatura.

A pesar de que la empresa ya cuenta con el medidor el medidor de pH para llevar a cabo la operación, de igual forma se consultó el precio de adquisición de dicho pHmetro, el cual se comercializa en un precio de ₡102600 por la empresa Envirotech. Por otra parte, el medidor propuesto y seleccionado de la marca HANNA Instruments, tiene un precio de venta de ₡123996, pero requiere de un adaptador digital para la lectura de los datos, el cual tiene un costo que asciende a los ₡479600.

En este caso, se debe recalcar que la inversión de un nuevo pHmetro se debe a la practicidad que tiene el mismo para realizar una medición, la mejora en el aspecto de salud y seguridad del trabajador y la incorporación de un sensor de temperatura en el mismo, lo cual hace que la operación sea mucho más sencilla.

Cuadro 3.8. Resumen de los costos de capital asociados al diseño del sistema de eliminación de cianuro de sodio.

Equipo	Metodología	Costo (₡)
Reactor / Agitador	Cotización materiales y construcción	3703575
Medidor de pH y temperatura	Cotización a proveedores	603596
Motor	Cotización a proveedores	1120000
Bomba	Cotización a proveedores	2012500
Total	-	7439671

CAPÍTULO 4

4. Disposición final de subproductos.

En el siguiente capítulo se evaluará mediante un análisis bibliográfico que incluya una breve descripción del proceso, la tecnología necesaria, los insumos y costo de llevar a cabo un proceso que logre la correcta disposición final de los subproductos generados en el proceso seleccionado en el Capítulo 1 y diseñado en el Capítulo 3.

Para ello se plantean 3 procesos: Coprocesamiento, encapsulamiento/solidificación y neutralización. De los cuales se pretende que alguno de ellos o la combinación de dos o más de dichos procesos logren disponer de manera segura los subproductos en cuestión.

4.1 Coprocesamiento.

El coprocesamiento es un procedimiento que tiene como objetivo el aprovechamiento de residuos para recuperar energía y recursos al disminuir el uso de combustibles convencionales y materias primas mediante su sustitución. Se basa en principios de ecología industrial, los cuales buscan convertir los desechos de una industria en la materia prima de otra, lo que lo convierte en una opción de recuperación de recursos ambientalmente racional y es una alternativa a la acumulación en vertederos o la incineración. Este proceso se define como el tratamiento térmico que reciben los residuos en hornos de las industrias productoras de cemento, en el cual actúan como una materia prima secundaria en la producción del componente principal del cemento, el Clinker (Holcim, 2012).

El Clinker es el resultado de someter a altas temperaturas una mezcla de distintos minerales, entre ellos pueden estar las calizas, pizarras y arcillas. Los componentes principales del Clinker son el silicato tricálcico, el silicato bicálcico, el aluminato tricálcico y el ferroalumnato tetracálcico. (Geocycle, 2017)

Dentro de las ventajas del coprocesamiento se puede mencionar:

- Valorización de los residuos.
- Destrucción total de los residuos a muy altas temperaturas y retención de cenizas en la matriz del Clinker (proceso cerrado).
- Disminución global de emisiones de dióxido de carbono al ambiente.

- Recuperación de la energía de algunos residuos industriales, colaborando con la preservación de fuentes de energía no renovables.
- La capacidad de operación y escala del sistema de cemento permite la introducción de estos residuos sin alterar el proceso ni la calidad del producto final.

Cuadro 4.1. Lista de materiales coprocesables y no coprocesables. (Holcim, 2012)

Materiales co-procesables	Materiales no-coprocesables
Papel	Desechos bioinfecciosos sin pre-procesamiento (autoclavado)
Cartón	Residuos anatómicos
Plásticos	Residuos con asbestos
Solventes	Desechos electrónicos
Aceites	Baterías enteras
Lodos industriales	Explosivos
Trapos contaminados	Ácidos minerales
Tierras, suelos y aserrín contaminados	Residuos radioactivos
Hules	-
Llantas	-
Estereofón	-
Productos químicos fuera de especificación	-
Drogas	-
Plaguicidas	-
Equipo de protección personal	-

4.1.1 Tecnología necesaria.

La producción de Clinker en los hornos de cemento inicia con la extracción de materias primas en las canteras, las cuales una vez molidas y homogenizadas resultan en un polvo conocido como el crudo, una vez precalentado el crudo este se introduce en un horno donde se alcanzan temperaturas de hasta 1800 °C y luego es enfriado, dando como resultado el Clinker.

Para mantener temperaturas constantes que rondan los 1800 °C en un horno cementero, se requiere de grandes cantidades de combustible, y es ahí donde las empresas cementeras buscan combustibles alternos para disminuir sus costos operativos. En el coprocesamiento los residuos son incorporados al proceso como un sustituto a los combustibles convencionales como fuente de energía, ahora bien, estos residuos no solo son utilizados para

el calentamiento del horno, sino que se toma en cuenta su naturaleza química, física y toxicológica para seleccionar adecuadamente los puntos de alimentación.

Generalmente los residuos son introducidos en el proceso en los siguientes puntos:

- El quemador principal situado en el extremo de salida del horno rotatorio.
- Una tolva de alimentación en la cámara de transición en el extremo de la salida del horno rotatorio (para combustible a granel).
- Quemadores secundarios en el conducto ascendente.
- Quemadores de pre calcinación en el pre calcinador.
- Una tolva de alimentación en el pre calcinador (para combustible a granel).
- Una válvula en la mitad del horno en caso de hornos largos de fabricación por vía seca y húmeda (para combustible a granel).

Según el estado en que se encuentre el residuo (líquido o sólido) estos se alimentan ya sea en la caldera principal (líquidos) o en la calera del pre calcinador (sólidos). Otros residuos que puedan volatilizarse a bajas temperaturas, como los disolventes, se deben introducir en zonas de altas temperaturas del sistema de horno, en cuanto a los compuestos tóxicos como sustancias halogenadas se debe priorizar su inserción en el sistema en lugares con altas temperaturas y adecuados tiempos de residencia para su apropiada destrucción.

4.1.2 Procedimiento de la operación.

Para el aprovechamiento energético de los residuos, es necesaria una etapa de acondicionamiento, esto para que el residuo pueda entrar al proceso de producción de cemento. Una de las operaciones que se puede realizar es la homogeneización de la mezcla de residuos, en donde, en caso de tener sólidos, se hace una mezcla con otros materiales triturados y se envía al horno para su destrucción (valorización energética y mineral), mientras que si se tiene un líquido, se realiza un análisis químico primario en el cual se toma una muestra del residuo para determinar su composición y determinar si es factible su mezcla con otros líquidos, haciendo batchs de residuos que ingresan por medio de tanques y tuberías hasta el quemador principal del horno.

4.1.3 Costo.

Para determinar el costo de coprocesar un material a este se le debe determinar su poder calórico, una vez determinada esta variable, el material puede poseer un valor energético alto, lo cual implica que puede ser vendido como combustible alternativo a una empresa cementera, o se puede tener un valor energético bajo, lo cual resulta en un costo asociado para la destrucción del residuo en un horno.

Al ser los residuos de naturaleza acuosa, puesto que estarán compuestos mayoritariamente por agua y algunas sales de bajo poder calórico como el bicarbonato de sodio, la destrucción representará un costo para la empresa y no una ganancia como es el caso de otros residuos de alto poder calorífico como el re-used derived fuel.

En Costa Rica, se encuentran disponibles dos hornos cementeros los cuales pueden ser utilizados para co-procesamiento, uno de ellos propiedad de Holcim Costa Rica y es gestionado por Servicios Ambientales Geocycle SAG S.A, mientras que el segundo pertenece a CEMEX Costa Rica. Ahora bien, tomando en cuenta el hecho de que la empresa Geocycle es competidor directo de Wastech Tecnologías en Manejo de Residuos S.A y que además Wastech ya posee acuerdos comerciales con CEMEX, se cotizó con CEMEX los precios de tratamiento para las aguas que se puedan generar en el proceso de eliminación de NaCN.

Las tarifas que maneja la empresa CEMEX para la destrucción de material acuoso, son de 30 \$/m³. Por lo que, tomando como base la eliminación de 3300 kg de NaCN mediante el proceso planteado en el Capítulo 3 de este documento en total se generarían 100,34 m³, además, se debe considerar las aguas de lavado por lo que se tomará un 10 % extra para contemplar esta cantidad, resultando entonces en un total de 110,4 m³ de aguas residuales las cuales deben ser tratadas. Otro costo significativo que se debe considerar es el transporte de las aguas hacia las instalaciones de CEMEX, para ello se utilizará un camión cisterna de 25 m³ de capacidad, por lo que se deben considerar al menos 4 viajes los cuales según datos de la empresa JM Transportes (aliado comercial y transportista principal de Wastech) tienen un costo de ₡300000 cada uno (ver cotización en anexos).

Considerando lo anterior, el costo de la destrucción de subproductos por el método de coprocesamiento es de ₡3103365.

4.2 Encapsulamiento/solidificación.

La solidificación engloba todos aquellos procesos que cumplen con el objetivo de encapsular un residuo en sólido monolítico de alta integridad estructural. La encapsulación puede ser en finas partículas de residuo (microencapsulación) o en un gran bloque contenedor de residuos (macro encapsulación).

Muchos de los residuos que se generan no están sujetos a tratamientos de encapsulación o no lo requieren debido a su naturaleza no peligrosa, o porque existen procesos más eficientes para su tratamiento, por ejemplo, los disolventes gastados se gestionan más fácilmente por procedimientos como recuperación o incineración; son los residuos líquidos catalogados como tóxicos y peligrosos los más adecuados para ser tratados por procedimientos de encapsulación.

Según la naturaleza del agente encapsulante, los tratamientos se pueden distinguir en:

Procesos orgánicos: en los que monómeros son polimerizados o enlazados tridimensionalmente mediante catalizadores o aceleradores después de ser mezclados con el residuo líquido. Entre los componentes más utilizados para la formulación de dichos agentes se encuentran la urea-formaldehído, polibutadieno, poliéster, epoxy, gel de acrilamina, poliolefina, sustancias bituminosas (asfalto) etc (Macías, Guerrero, & Fernández, 1999).

La ventaja de este tipo de proceso es que no es específico, es decir, es aplicable a una gran variedad de residuos y además es compatible con sustancias orgánicas. Por otro lado, su desventaja recae en su inestabilidad en presencia de microorganismos o luz ultravioleta lo cual limita la eficiencia del proceso y no ocurre una verdadera inmovilización del residuo, además de su alto costo.

Procesos inorgánicos: en los cuales los componentes utilizados como agente encapsulante son el cemento Portland, cenizas volantes, cal, puzolanas, silicato sódico, etc. Entre sus ventajas destacan su bajo costo, su buena estabilidad física y química a largo plazo, la amplia disponibilidad de sus componentes y sus componentes químicos no tóxicos, además, es un proceso de fácil ejecución y el aumento de volumen es relativamente bajo. Por otro lado, sus inconvenientes radican en que son específicos para ciertos residuos y condiciones particulares, son incompatibles con altos contenidos de aceites u otros compuestos orgánicos

y algunos requieren la adición de grandes cantidades de agentes solidificantes (Macías, Guerrero, & Fernández, 1999).

De los aditivos mencionados anteriormente, el cemento y las puzolanas son los más prometedores a escala nacional, principalmente por ser de bajo costo y producidos en el país. Incluso la industria de cemento nacional (Holcim) produce cementos puzolánicos desde el descubrimiento de yacimientos de estos materiales en Llano Grande de Cartago (Camareno & Romero, 2006).

Los aditivos inorgánicos han sido más ampliamente utilizados y han demostrado eficacia en el tratamiento de oxidantes como: hipoclorito sódico, permanganato, ácido nítrico, dicromato de potasio, ácido clorhídrico y fluorhídrico, materiales radioactivos, metales pesados como plomo, sulfatos, haluros, nitratos y cianuros (Camareno & Romero, 2006).

La inmovilización se utiliza principalmente en tres campos:

- Eliminación en el terreno: estabilización de residuos, previo a su eliminación en vertederos de seguridad.
- Recuperación de terrenos: la recuperación de terrenos contaminados.
- Solidificación de residuos industriales: principalmente sustancias inorgánicas y lodos.

La eficacia del proceso de inmovilización estará regida por mecanismos físicos y químicos básicos entre los cuales se encuentran:

- Macroencapsulación: los constituyentes del residuo quedan atrapados físicamente en una matriz estructural de mayor tamaño.
- Microencapsulación: los constituyentes del residuo peligroso quedan atrapados en el interior de la estructura cristalina de la matriz solidificada a nivel microscópico.
- Absorción: es el proceso por el cual los contaminantes son tomados por el sorbente, este proceso solo se toma como medida temporal para mejorar las características de manejo.
- Adsorción: fenómeno por el cual los contaminantes son ligados de manera electroquímica a los agentes de estabilización de la matriz.

- Precipitación: los contaminantes del residuo precipitan dando lugar a una forma más estable de los constituyentes del residuo.
- Detoxificación: en el proceso de inmovilización ocurren reacciones químicas que pueden originar un producto de menor toxicidad.
- Los sistemas basados en cemento Portland se utilizaron por primera vez en el campo de residuos radioactivos en 1950, para lo cual, los residuos fueron introducidos de forma líquida o sólida a la mezcla cementante, en la cual se produjo una pasta de consistencia más o menos fluida la cual se vertió en un molde para ser transportada y almacenada.
- El cemento Portland y la cal son representativos de una familia de materiales que tienen ventajas prácticas conceptuales como matrices de inmovilización de residuos. Son materiales de construcción relativamente probados y con una amplia historia de uso en distintas condiciones ambientales. El cemento Portland es un conglomerante o cemento hidráulico que al ser mezclado con grava, agua y algunas fibras de acero tiene la capacidad de formar una masa pétreo resistente y duradera a la cual se le llama hormigón (Macías, Guerrero, & Fernández, 1999).

Cuadro 4.2 Ventajas y desventajas asociadas al proceso de encapsulamiento con cemento Portland (Macías, Guerrero, & Fernández, 1999).

Ventajas	Desventajas
Materias primas baratas	Libera calor al endurecer
Relativamente no tóxico, matriz no inflamable	Puede reaccionar con metales, liberando gas
Proporciona inmovilización tanto física como química	Una alta gama de disolventes orgánicos e inorgánicos pueden inhibir y prevenir su fraguado
Su composición es constante para distintas fuentes o proveedores al existir normas para la comprobación de la calidad de producción	Se degrada en ambientes fuertemente ácidos y en algunas disoluciones salinas
Tolerante a los residuos húmedos	-

4.2.1 Tecnología necesaria.

La solidificación de residuos a diferencia de otros procesos de disposición final de residuos, solo requiere de una mezcladora de cemento como infraestructura principal y la operación puede ocurrir in situ, ex situ, en planta e incluso en planta móvil. El proceso de solidificación

es relativamente simple porque consiste en la mezcla del desecho peligroso pulverizado, cemento y otros aditivos, dicha mezcla producirá sustancias no peligrosas y además pueden ser usados como materiales para la ingeniería civil dado que están compuestos mayoritariamente por cemento (Camareno & Romero, 2006).

4.2.2 Procedimiento de la operación.

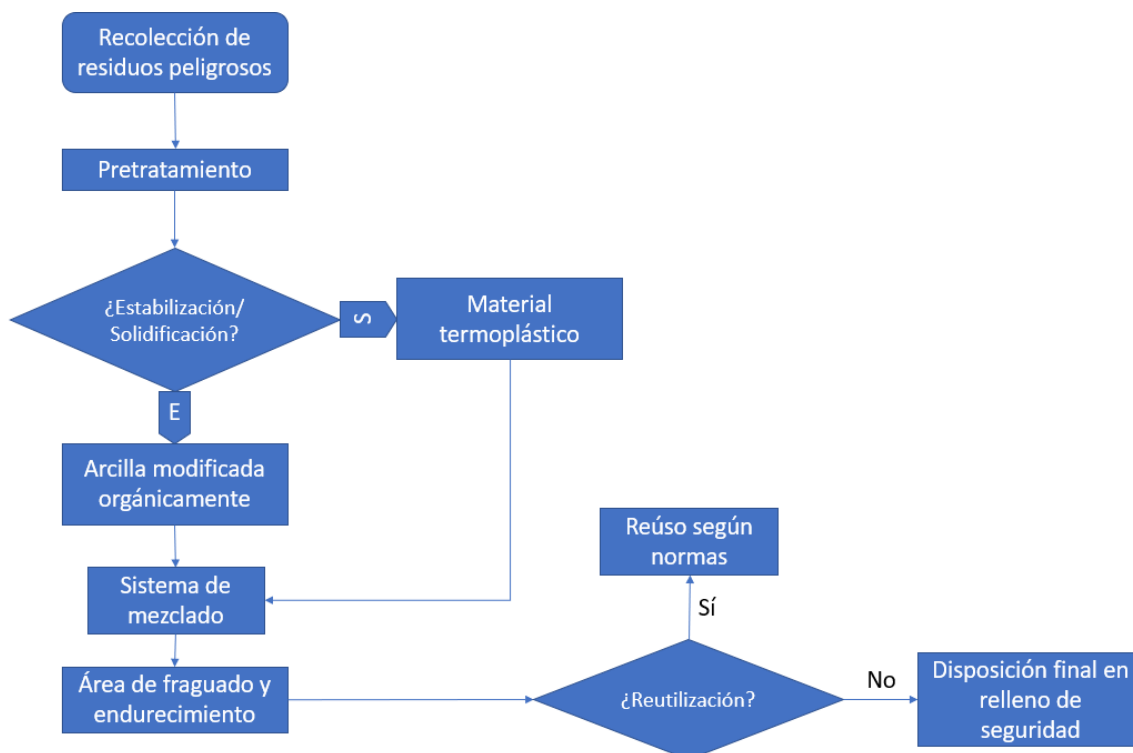


Figura 4.1. Diagrama de flujo de la operación de solidificación de residuos.

4.2.3 Costo.

Para determinar el costo de la eliminación de las aguas residuales del proceso de eliminación de NaCN planteado en el Capítulo 3 de este documento, se consideró los siguientes factores:

- Una razón de matriz sólida:agua residual de 8:2 en masa. (Romero Esquivel & Vargas Camareno, 2008)
- La disposición final de la matriz sólida en relleno sanitario.
- La compra de los materiales para la preparación de la matriz sólida (cemento, piedrilla y arena).
- El flete de materiales hacia las bodegas industriales de Wastech.

Dado que el volumen que se debe encapsular es de 100,34 m³ y debido a que la mezcla es mayormente agua se tendrá una densidad similar a la del agua, se debe dar tratamiento a 100340 kg de aguas residuales. Ahora, considerando que las proporciones usuales para el encapsulamiento de materiales peligrosos es de 8:2 matriz sólida:agua residual, se deberá comprar suficiente material para la preparación de 441478 kg de mezcla de cemento.

Para la preparación de la mezcla de cemento gris fuerte marca Holcim requiere proporciones en masa de 50:80:117 de cemento, piedrilla y arena respectivamente. Lo cual quiere decir que por saco de cemento (50 kg) se producirá 247 kg de mezcla de cemento a la cual se le agregará el agua residual para iniciar el proceso de fraguado. Para el cálculo de la cantidad de materiales que se requerirá para producir los 441478 kg de mezcla, se utilizaron las proporciones antes mencionadas y la especificación del cálculo se muestra en el Apéndice C de este documento, resultando en 89368 kg de cemento, 142988 kg de piedrilla y 20912 kg de arena requeridos para la preparación de la matriz sólida.

Utilizando los valores del Cuadro 4.3 los cuales fueron extraídos de la página de Construplaza se determina entonces el costo de la matriz sólida.

Cuadro 4.3 Propiedades de materiales para la producción de la matriz sólida utilizada en el proceso de solidificación de subproductos. (Construplaza, 2020)

Propiedad	Material		
	Arena	Piedrilla	Cemento (50 kg)
Densidad	834 kg/m ³	800 kg/m ³	-
Costo I.V.I	¢17000/m ³	¢19000/m ³	¢6000/saco

El costo de los materiales para la matriz es de ¢18382783. Además, el costo por el transporte de los envíos del material hacia las bodegas de Wastech es de ¢5250000 por el transporte de la piedrilla y la arena desde el tajo, mientras que el costo del flete del cemento es de ¢300000 según lo consultado en la página de ventas de Construplaza.

Otro costo que tiene un valor significativo para el proceso de solidificación, es la disposición final del producto resultante del proceso. Tomando en cuenta que la masa de matriz sólida que se genera es de 441478 kg aunado a los 100340 kg de aguas residuales que se le añadirán, se tiene un total de 541818 kg de material resultante. Al tratarse de un material cuyo potencial de contaminación y toxicidad ha sido reducido debido a la inmovilización de las trazas de

cianuro, este se puede considerar un desecho de tipo ordinario, pudiéndose entonces disponer en un relleno sanitario.

Las tarifas que maneja Empresas Berthier EBI Costa Rica S.A son de ₡18000 la tonelada por lo que el precio solo por el residuo generado sería de ₡9752724, no obstante, se deben cubrir los costos de transporte y además se debe tener en cuenta que será necesario al menos 30 viajes para transportar todo el material, los cuales tienen un costo de ₡80000 el viaje (ver cotización en anexos), por lo tanto, el costo total de la disposición en relleno sanitario asciende a los ₡12152724. En conclusión, el costo de la disposición de los residuos por medio de un proceso de solidificación es de ₡36085507.

4.3 Neutralización y evaporación.

El proceso de neutralización consiste en una reacción entre un ácido y una base, en donde generalmente si los reactivos se encuentran en fases acuosas los productos de reacción son una sal y agua. La meta al neutralizar un material consiste en llevar sus niveles de pH a un rango entre 6 y 8. Mientras que la evaporación puede ser utilizada como un método de separación en el cual se produce una corriente del disolvente relativamente puro y una versión más concentrada de la disolución alimentada. En algunos casos la disolución puede ser evaporada por completo hasta obtener una sal en estado sólido.

4.3.1 Tecnología necesaria.

La tecnología que se requiere para llevar a cabo un proceso de neutralización dependerá de la cantidad de material que se requiere neutralizar, la naturaleza del compuesto y sus características. Tomando en cuenta la cantidad de material a neutralizar, la operación se puede realizar en recipientes pequeños como baldes y estañones hasta tanquetas o reactores de gran tamaño, mientras que, si se considera la naturaleza del compuesto y características específicas, el sitio de reacción deberá ser previamente evaluado para determinar si el material del recipiente puede soportar o es compatible con los compuestos a neutralizar.

En general, los implementos necesarios para llevar a cabo una neutralización son:

- Recipiente de reacción (reactor).
- Agente neutralizante (ácido o base).
- Sustancia indicadora o pHmetro.

- Agitador (grandes volúmenes).

De los implementos anteriores, Wastech ya posee los elementos generales para llevar a cabo la neutralización de las aguas que se podrían generar en el tratamiento del cianuro. También se debe tomar en cuenta, que el reactor diseñado puede ser utilizado también para llevar a cabo dicha neutralización, puesto que el material de diseño tiene una alta resistencia a la temperatura y a la corrosión.

En el caso de la neutralización, no se posee la tecnología para llevar el proceso a cabo, es por ello que para proceder con la operación de la manera más sencilla se debería instalar un tanque que cuente con un sistema de calentamiento como una resistencia, pero al tratarse de un volumen a tratar tan grande ($100,34 \text{ m}^3$) tanto el costo energético como el costo de capital de la instalación de un tanque para dicha operación sería demasiado alto.

4.3.2 Procedimiento de la operación.

La neutralización de materiales se puede realizar siguiendo distintas metodologías, no obstante, al ser este proceso una operación que actualmente se realiza en Wastech, se planteará un resumen del procedimiento que se realiza en la empresa.

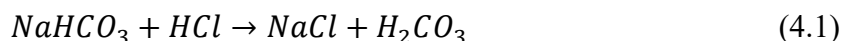
Dependiendo del volumen a tratar la neutralización se lleva a cabo en estañones o tanquetas, tomando en cuenta que la capacidad de dichos recipientes es de 200L y 1000L respectivamente. En caso de utilizarse una tanqueta se utiliza un agitador mecánico que se coloca sobre la estructura de la tanqueta, esto para facilitar el mezclado del ácido y la base y acelerar el proceso.

Una vez definido el recipiente de reacción se procede a preparar los reactivos que se utilizarán (ácido y base) en donde uno de ellos será el residuo que se requiere neutralizar. El proceso inicia con la adición de una porción del residuo a tratar dentro del recipiente de reacción seguido del ácido o base, al cabo de unos minutos de iniciada la agitación, se toma una muestra de la mezcla y se mide el pH. En caso de que el pH se encuentre en un valor inferior a 7 se procede a añadir el material de naturaleza básica siendo generalmente hidróxido de sodio y caso contrario si el pH es mayor a 7 se añade el material ácido donde generalmente se utiliza ácido clorhídrico.

El proceso se realiza de forma intermitente hasta llegar al volumen máximo del recipiente de reacción. El objetivo al llegar a un 90 % del volumen del recipiente es que el pH final se encuentre en un rango de 6-9. Una vez lleno el reactor y alcanzada la condición anterior, termina la operación. En caso de que se requiera neutralizar más material, se deberá preparar otro recipiente de reacción.

4.3.3 Costo.

Para determinar el costo de neutralización, primeramente, se definió el ácido a utilizar como agente neutralizante. Se eligió el HCl puesto que es un ácido de uso común y de fácil obtención puesto que existen muchos proveedores en el país. Además, analizando los productos de reacción mostrados en la Ecuación 4.1, se obtendría como producto NaCl y H₂CO₃, de los cuales el primero se trata de un producto común sin ninguna peligrosidad aguda para el ambiente o seres vivos y el segundo al tener una estabilidad tan baja al estar en un medio acuoso se descompondría lentamente y sería liberado al ambiente en forma de dióxido de carbono.



Seguidamente, se determinó la cantidad de ácido requerido para llevar a neutralizar todo el hidrógeno carbonato de sodio producido durante la eliminación del cianuro, para ello, se partió desde los 3300 kg de cianuro de sodio que posee la empresa y con las Ecuaciones 1.4 y 1.7 se determinó los moles de NaHCO₃, luego con la Ecuación 4.1, se determinó los moles requeridos de HCl, resultando entonces en 62,23 kmol requeridos de ácido clorhídrico, lo que se traduce en 2269,0 kg de ácido requerido para la neutralización de todas las aguas generadas.

El ácido clorhídrico tiene un precio de venta (GTM Chemicals Costa Rica) de \$0.48/kg en una concentración de 32,5 %m/m, por lo que se requeriría comprar 6981,6 kg de ácido clorhídrico para obtener los 2269,0 kg requeridos en la neutralización, resultando entonces en un costo de \$3360 ≈ ₡1932000 utilizando un tipo de cambio de ₡575,0/\$ (marzo 2020 Banco Nacional).

Dado que la empresa ya cuenta con un agitador mecánico utilizado para procesos de neutralización, no se requiere estimar dicho costo. En conclusión, el costo más significativo para llevar a cabo la neutralización se traduce en la adquisición del agente neutralizante.

4.4 Selección del proceso de disposición final

Cuadro 4.4 Matriz de comparación de los procesos propuestos para la disposición final de los residuos generados.

Proceso	Factores		
	Viabilidad Técnica	Costo	Dificultad de operación
Coprocesamiento	Media	Medio	Baja
Solidificación/encapsulamiento	Alta	Alto	Alta
Neutralización/evaporación	Baja	Alto	Media

Los criterios de evaluación para los factores utilizados se encuentran en el Cuadro 4.5.

Cuadro 4.5 Aspectos considerados para los factores analizados en la matriz de comparación de procesos de disposición final de residuos generados.

Factores	Niveles		
	Bajo	Medio	Alto
Viabilidad técnica	La empresa no cuenta con el espacio suficiente para instalar el proceso.	La empresa puede adaptar sus instalaciones o reacomodar su espacio para instalar el nuevo proceso.	La empresa cuenta con el espacio suficiente para instalar el proceso.
	El proceso no puede ser llevado a cabo fuera de las instalaciones (patio de bodegas).	El proceso puede ser llevado a cabo fuera de las instalaciones tomando precauciones como la impermeabilización parcial del sitio.	El proceso puede llevarse a cabo fuera de las instalaciones sin mayor problema.
Costo	Los insumos requeridos para llevar a cabo el proceso solo incluyen materias primas.	Los insumos requeridos para llevar a cabo el proceso incluyen materias primas y equipos de bajo costo (herramientas, equipo de medición).	Los insumos requeridos para llevar a cabo el proceso incluyen materias primas, equipos de alto costo (motores, tanques, agitadores).
	Una parte de los insumos ya se encuentra disponible en bodegas y/o son de uso común en los procesos existentes de Wastech.	Los insumos requeridos pueden ser alquilados.	Los insumos requeridos no pueden ser alquilados.
Dificultad de operación	No se requiere supervisión por parte de un trabajador profesional para ejecutar el proceso.	Se requiere de supervisión por parte de un trabajador profesional al menos en las primeras etapas del proceso.	Se requiere supervisión por parte de un trabajador profesional durante todo el desarrollo del proceso.
	Se requiere solamente un operador para llevar a cabo el proceso.	Se requiere de dos operadores para llevar a cabo el proceso.	Se requiere más de dos operadores para ejecutar el proceso.

Continuación Cuadro 4.5 Aspectos considerados para los factores analizados en la matriz de comparación de procesos de disposición final de residuos generados.

Factores	Niveles		
	Bajo	Medio	Alto
Dificultad de operación	<p>La ejecución del proceso es relativamente rápida con respecto a la cantidad de residuo tratado.</p> <p>La ejecución del proceso requiere de maniobras simples como la operación de equipos sencillos como herramientas (palas, mezcladoras, instrumentos de medición).</p>	<p>La ejecución del proceso es moderada en aspectos de consumo de tiempo con respecto a la cantidad de residuo tratado.</p> <p>La ejecución del proceso requiere de maniobras avanzadas como la operación de equipos como bombas, montacargas, minicargador.</p>	<p>La ejecución del proceso es relativamente lenta con respecto a la cantidad de residuo tratado.</p>

Al analizar las distintas variables mostradas en el Cuadro 4.4 para cada subproceso de disposición final de las aguas generadas de la eliminación del cianuro, no se obtiene una decisión clara sobre cuál de las rutas representa la mejor opción para la empresa. De ahí que se debe verificar cuales son las ventajas y desventajas de utilizar alguna de las alternativas, no obstante, se debe descartar primeramente el proceso de neutralización y evaporación puesto que se tienen varios inconvenientes a la hora de plantear dicho proceso, primeramente, se debe considerar que las aguas que deben ser tratadas tienen un volumen de 110,4 m³, el equivalente a 110 tanquetas, que deben ser almacenadas en las bodegas, ocupando un espacio significativo dentro de la empresa. Debido al gran volumen y considerando la velocidad de procesamiento, se prevé que la neutralización de toda el agua residual tome entre 3 y 4 semanas, generándose un mayor volumen de aguas puesto que se adicionará otro material líquido para llevar a cabo el proceso. Aunado a lo anterior, el factor determinante para no seleccionar este proceso como método de disposición final, radica tanto en la ausencia de la mayoría de insumos dentro de la organización como la de un servicio a nivel externo para llevar a cabo la evaporación del producto neutralizado.

Por otro lado, en el caso de la solidificación y el coprocesamiento, debemos plantear las ventajas y desventajas que presenta cada uno. Empezando por la solidificación, su ventaja radica en lo sencillo que es el proceso como tal, el cual consistiría en la preparación de una mezcla de concreto utilizando arena, grava, cemento y las aguas residuales lo cual es bastante sencillo, sin embargo, logísticamente, debemos considerar el hecho de que el volumen de aguas a tratar es bastante elevado (110,4 m³), y que los materiales requeridos para encapsular todo el líquido es bastante (441,5 toneladas de material), por lo que ocuparían un gran espacio en bodega y el tiempo para realizar todo el tratamiento sería bastante largo. Terminado el proceso el paso a seguir sería la entrega de los cilindros de matriz a un relleno sanitario para dar así su disposición final.

Ahora bien, el coprocesamiento también representa un proceso sencillo en términos de facilidad de operación, puesto que en dicho aspecto el proceso se limitaría a la contratación del servicio por parte de la empresa CEMEX y de parte de Wastech solamente se debería coordinar la entrega de las aguas residuales. A pesar de ello, se presenta una problemática que podría frenar esta alternativa, puesto que se debe considerar una limitación a nivel técnico

que consiste en la imposibilidad de introducir residuos con alto contenido de cloro a los hornos cementeros, ya que, estos pueden producir ciertas irregularidades durante el proceso, de ahí que se deba evaluar la implementación de un proceso de filtrado con carbón activado para reducir los niveles de cloro a niveles aceptables, lo cual aumentaría los costos del proceso.

Evalrados las ventajas y desventajas de cada proceso, entonces queda por analizar el aspecto económico, en donde el costo de llevar a cabo la solidificación de las aguas residuales asciende a los 35 millones de colones, representando una inversión bastante grande en comparación con los 3 millones de colones que conllevaría la contratación del servicio de coprocesamiento, no obstante, en el costo de coprocesamiento aún no se contempla la evaluación del costo de filtración de las aguas, por lo que se tiene un margen de 32 millones para la evaluar la adquisición del equipo de filtración, el cual debe consistir en una columna empaca con carbón activado.

En conclusión, la alta gerencia de la empresa deberá analizar las dos propuestas indicadas previamente y tomar la decisión que les parezca más conveniente para dar la disposición final de las aguas residuales, no obstante, se recomienda que el proceso que se utilice sea el coprocesamiento de las aguas, puesto que, como las operaciones de bombeo de aguas es una práctica común dentro de la empresa, el proceso de filtración no supondría un mayor reto para la empresa, mas que la inversión inicial de capital que se requerirá para adquirir el equipo.

CAPÍTULO 5

5. Identificación de riesgos.

A continuación, se ejecutará una metodología de identificación de riesgos laborales asociados al nuevo procedimiento de eliminación de cianuro para la empresa Wastech. El sistema de identificación que se utilizará se selecciona porque ofrece un mejor enfoque a procesos que se encuentran en desarrollo o que aún están en su etapa de conceptualización, dando una primera categorización de riesgos asociados a un proceso que aún no cuenta con planos detallados de su distribución de equipo en bodega, registros históricos de incidentes y procedimientos internos establecidos, para así plantear de antemano una serie de medidas que previenen, corrigen o mitigan los posibles riesgos que se puedan materializar durante la ejecución del nuevo proceso.

5.1 Metodología APR (Análisis preliminar de riesgos).

Esta técnica de identificación de riesgos es conocida en inglés como PHA (Preliminary Hazard Analysis), se desarrolló en un principio por las Fuerzas Armadas Estadounidenses, con el paso del tiempo, esta técnica fue adaptada por algunas empresas químicas americanas para su uso en procesos industriales. (Escuela Europea de Excelencia, 2015)

El análisis preliminar de riesgos es un mecanismo de mucha utilidad en la detección y localización de riesgos. Es muy utilizada por organizaciones para analizar los peligros involucrados dentro de un proceso.

La aplicación de esta metodología ocurre durante las etapas de diseño y desarrollo de cualquier proceso, producto o sistema, en casos que no hay datos o experiencias anteriores tanto del proceso como del tipo de implantación (Escuela Europea de Excelencia, 2015).

No existe un modelo de APR predeterminado, puesto que las normas en que esta metodología se sustenta (OHSAS 18001/ ISO 45001) no definen un modelo específico, por lo tanto, cada empresa puede crear y determinar el tipo de APR que mejor se adapte a las necesidades de seguridad de la empresa (Castellanos).

5.1.1 Etapas del APR ejecutado en Wastech Costa Rica.

La ejecución del Análisis Preliminar de Riesgos se desarrolló siguiendo las siguientes etapas:

- a. Análisis detallado: En el cual se llevó a cabo un análisis ordenado de acuerdo a los acontecimientos, sin excluir pasos básicos preliminares. Por ejemplo: traslado de herramientas, uso de herramientas, preparación del espacio de trabajo y otros.
- b. Reconocimiento de los peligros que se han dado en cada uno de los procesos: En cada etapa, por muy simple que parezca, puede ocurrir alguna situación que ponga en riesgo la integridad de las personas, por ello, se reconocieron todas aquellas situaciones de peligro que estén vinculadas con alguna tarea concreta.
- c. Estimación del peligro: mediante una evaluación de los peligros, se cuantificó el impacto que este podría tener en las personas, equipos materiales o medio ambiente.
- d. Desarrollo de medidas de control: las medidas de control deben ser específicas para cada peligro significativo asociado al proceso en estudio, con el objetivo de tratarlo con la mayor eficacia consiguiendo inhabilitar las posibilidades de daño que pueda causar este peligro.
- e. Constituir responsabilidades: se especificó la responsabilidad de cada una de las personas encargadas del control de la supervisión o asesoramiento en prevención de riesgos.
- f. Elaboración del informe de riesgos: en el informe final se incluyó un resumen de las etapas de la metodología el cual recibió aprobación por los encargados de la prevención de cada departamento de la organización.

Finalmente, los resultados que se obtuvieron en el APR, se deben registrar correctamente de modo que se visualizaran claramente los peligros constatados e identificados, así como la causa, la consecuencia principal que lo produce, y las diferentes medidas correctivas o preventivas.

5.1.2 Elaboración de medidas de prevención de riesgos.

Las medidas que se elaboraron para la prevención de riesgos asociados al tratamiento del cianuro de sodio, se construyeron a partir de la Guía para la elaboración del Programa de

Salud Ocupacional (Consejo de Salud Ocupacional, 2017). Los riesgos identificados en las actividades se clasifican según dicho programa en:

5.1.2.1 Seguridad.

Mecánico: Contempla los factores presentes en objetos, máquinas, equipos, herramientas que pueden ocasionar accidentes laborales por falta de mantenimiento preventivo y/o correctivo.

Entre los riesgos mecánicos asociados se encuentran:

- Golpe o atropello con montacarga/minicargador.
- Accidentes con maquinaria.
- Atrapamiento.
- Golpe con herramientas pesadas.
- Corte con herramientas filosas.
- Caída de objetos pesados.

Eléctrico: Se refiere a los sistemas eléctricos de las máquinas, equipos, herramientas e instalaciones locativas en general, que conducen o generan energía, que al entrar en contacto con las personas pueden provocar entre otras lesiones, quemaduras, choque, fibrilación ventricular, según sea la intensidad de la corriente y tiempo de contacto. Entre los riesgos eléctricos se encuentran:

- Shock eléctrico.

Incendios: Se refiere a todas aquellas situaciones que puedan desencadenar un derrame, escape, explosión, principio de incendio o declarado. Entre los riesgos de incendio se encuentran:

- Incendio ocasionado por la instalación eléctrica.

5.1.2.2 Higiene.

Químico: Toda sustancia orgánica e inorgánica, natural o sintética que, durante la fabricación, manejo, transporte, almacenamiento o uso, pueda incorporarse al ambiente y ser inhalada, entrar en contacto con la piel o ser ingerida, con lo cual se generen efectos tóxicos, corrosivos, asfixiantes y que puedan lesionar la salud de las personas. Entre los riesgos químicos se encuentran:

- Inhalación de gases tóxicos.
- Contacto físico con sustancias peligrosas.
- Ingesta de productos químicos tóxicos.
- Explosión causada por reacciones químicas de alta velocidad.

5.1.2.3 Ergonomía.

Fisiológico: Representan factor de riesgo los objetos, puestos de trabajo, máquinas, equipos y herramientas, cuyo peso, tamaño, forma y diseño pueden provocar sobre esfuerzo, así como posturas y movimientos inadecuados que traen como consecuencias fatiga física y lesiones osteomusculares. Entre los riesgos fisiológicos se encuentran:

- Cargas musculares por posturas estáticas asociadas a tiempos de espera.
- Sobre esfuerzo de cargas.

5.2 Resultados del APR.

Al realizar el análisis detallado de la operación propuesta para Wastech, el proceso se estructuró en actividades como lo muestra el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Actividades involucradas en el proceso de eliminación de cianuro de sodio.

Orden	Actividad
1	Colocación del recipiente de reacción
2	Acondicionamiento del recipiente de reacción
3	Transporte con montacargas del agitador hacia el área de trabajo
4	Ensamble del agitador en el recipiente de reacción
5	Conexión del agitador al sistema eléctrico y operación del agitador
6	Transporte de cianuro y cloro al lugar de trabajo
7	Llenado del sistema de reacción
8	Adición de cianuro al sistema de reacción e inicio de agitación
9	Adición de cloro al sistema de reacción / agitación
10	Toma de muestras
11	Remoción del sistema de agitación
12	Limpieza del agitador
13	Transporte con montacargas del recipiente de reacción a almacenamiento
14	Transporte de cianuro y cloro a almacenamiento
15	Transporte y almacenamiento del agitador
16	Limpieza del lugar de trabajo

Seguidamente, en la etapa de reconocimiento de los peligros, se detectaron los siguientes riesgos para cada actividad, según se muestra en el Cuadro 5.2

Cuadro 5.2. Riesgos asociados a las actividades del proceso de eliminación de cianuro de sodio.

Actividad	Riesgo
Colocación del recipiente de reacción	Golpe o atropello con el montacarga Accidentes con maquinaria Caída de objetos pesados Atrapamiento
Acondicionamiento del recipiente de reacción	Contacto físico con sustancias peligrosas Corte con herramientas filosas Golpe con herramientas pesadas Sobre esfuerzo de cargas
Transporte del agitador hacia el área de trabajo	Sobre esfuerzo de cargas Caída de objetos pesados
Ensamble del agitador en el recipiente de reacción	Sobre esfuerzo de cargas Caída de objetos pesados Golpe con herramientas pesadas
Conexión del agitador al sistema eléctrico y operación del agitador	Incendio ocasionado por la instalación eléctrica Shock eléctrico
Transporte de cianuro y cloro al lugar de trabajo	Quemaduras por salpicadura de materiales peligrosos Inhalación de gases tóxicos Contacto físico con sustancias peligrosas Golpe o atropello con el montacarga Caída de objetos pesados Accidentes con maquinaria
Llenado del sistema de reacción	Cargas musculares por posturas estáticas asociadas a tiempos de espera
Adición de cianuro al sistema de reacción e inicio de agitación	Inhalación de gases tóxicos Golpe por desprendimiento de piezas móviles Contacto físico con sustancias peligrosas Cargas musculares por posturas estáticas asociadas a tiempos de espera
Adición de cloro al sistema de reacción / agitación	Inhalación de gases tóxicos Golpe por desprendimiento de piezas móviles Contacto físico con sustancias peligrosas Explosión causada por reacciones químicas de alta velocidad Cargas musculares por posturas estáticas asociadas a tiempos de espera
Toma de muestras	Contacto físico con sustancias peligrosas Inhalación de gases tóxicos

Continuación del Cuadro 5.2. Riesgos asociados a las actividades del proceso de eliminación de cianuro de sodio.

Actividad	Riesgo
Remoción del sistema de agitación	Sobre esfuerzo de cargas Caída de objetos pesados Golpe con herramientas pesadas
Limpieza del agitador	Contacto físico con sustancias peligrosas Inhalación de gases tóxicos Ingesta de productos químicos tóxicos
Transporte del recipiente de reacción a almacenamiento	Quemaduras por salpicadura de materiales peligrosos Inhalación de gases tóxicos Contacto físico con sustancias peligrosas Golpe o atropello con el montacarga Caída de objetos pesados Accidentes con maquinaria
Transporte de cianuro y cloro a almacenamiento	Quemaduras por salpicadura de materiales peligrosos Inhalación de gases tóxicos Contacto físico con sustancias peligrosas Golpe o atropello con el montacarga Accidentes con maquinaria
Transporte y almacenamiento del agitador	Sobre esfuerzo de cargas Caída de objetos pesados
Limpieza del lugar de trabajo	Inhalación de gases tóxicos Contacto físico con sustancias peligrosas Ingesta de productos químicos tóxicos

En la etapa de estimación de peligro, se clasificaron los riesgos identificados en:

Trivial: No se requiere de acciones específicas.

Tolerable: No se necesita mejorar la acción preventiva, se pueden plantear mejoras que no supongan una carga económica considerable.

Moderado: Se deben hacer esfuerzos para reducir el riesgo, las medidas para reducir el riesgo deben implantarse en un periodo determinado.

Importante: No se debe iniciar la actividad hasta que se haya reducido el riesgo, se deben plantear medidas de prevención, corrección o mitigación.

Intolerable: No se debe iniciar la actividad hasta que se haya reducido el riesgo, si no es posible reducir el riesgo incluso con recursos ilimitados, se debe prohibir la actividad.

De lo anterior, que los riesgos considerados como Moderado, Importante o Intolerable se consideraron significativos. Para la determinación del nivel de riesgo, se utilizó la matriz mostrada en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3. Matriz de clasificación de riesgos según su severidad y probabilidad.

		Severidad		
		Leve	Grave	Muy grave
Probabilidad	Baja	Riesgo trivial	Riesgo tolerable	Riesgo moderado
	Media	Riesgo tolerable	Riesgo moderado	Riesgo importante
	Alta	Riesgo moderado	Riesgo importante	Riesgo intolerable

Los criterios de evaluación Probabilidad y Severidad, fueron asignados tomando como referencia los parámetros mostrados en el Cuadro 5.4 y Cuadro 5.5. Resultando entonces en las calificaciones que se encuentran en el Cuadro 5.6.

Cuadro 5.4. Criterios de evaluación para el parámetro Severidad.

Severidad (Se)	Consecuencias previsibles
Leve	Contusiones Cortes superficiales Esguinces Irritaciones Pequeñas quemaduras superficiales
Grave	Laceraciones Quemaduras extensas Conmociones Fracturas menores Enfermedad crónica que conduce a una incapacidad menor (sordera, dermatitis, asma) Trastornos musculoesqueléticos
Muy grave	Amputaciones Fracturas mayores Intoxicaciones Cáncer Enfermedades crónicas que acorten severamente la vida Incapacidades permanentes Gran invalidez Muerte

Cuadro 5.5. Criterios de evaluación para la variable Probabilidad.

Probabilidad (Pr)	Criterios aplicados
Baja	<ul style="list-style-type: none"> - Es raro que pueda ocurrir - Se sabe que ha ocurrido en alguna parte - Pudiera presentarse en determinadas circunstancias - La exposición al peligro es ocasional - El daño ocurrirá raras veces
Media	<ul style="list-style-type: none"> - No es extraño que ocurra el daño - Ha ocurrido en algunas ocasiones - Existe constancia de incidentes o de accidentes por la misma causa - Los sistemas y medidas aplicados para el control del riesgo no impiden que el riesgo pueda manifestarse en algún momento dada la exposición - El daño ocurrirá en algunas ocasiones - La exposición al peligro es frecuente o afecta a bastantes personas - El resultado es más probable si se presenta la exposición continua o afecta a muchas personas
Alta	<ul style="list-style-type: none"> - Ocurrirá con cierta seguridad a medio o largo plazo - El daño ocurrirá siempre o casi siempre

Cuadro 5.6. Clasificación de los riesgos asociados a las actividades según su severidad y probabilidad.

Riesgo	Probabilidad	Severidad	Importancia
Golpe o atropello con el montacargas	Baja	Grave	Riesgo tolerable
Accidentes de maquinaria	Baja	Grave	Riesgo tolerable
Caída de objetos pesados	Media	Grave	Riesgo moderado
Atrapamiento	Baja	Leve	Riesgo trivial
Contacto físico con sustancias peligrosas	Baja	Muy grave	Riesgo moderado
Corte con herramientas filosas	Baja	Grave	Riesgo tolerable
Golpe con herramientas pesadas	Media	Leve	Riesgo tolerable
Sobre esfuerzo de cargas	Media	Leve	Riesgo tolerable
Incendio ocasionado por la instalación eléctrica	Media	Muy grave	Riesgo importante
Shock eléctrico	Baja	Grave	Riesgo tolerable
Quemaduras por salpicadura de materiales peligrosos	Baja	Grave	Riesgo tolerable
Inhalación de gases tóxicos	Baja	Muy grave	Riesgo moderado
Golpe por desprendimiento de piezas móviles	Baja	Grave	Riesgo tolerable

Continuación del Cuadro 5.6. Clasificación de los riesgos asociados a las actividades según su severidad y probabilidad.

Riesgo	Probabilidad	Severidad	Importancia
Explosión causada por reacciones químicas de alta velocidad	Baja	Muy grave	Riesgo moderado
Cargas musculares por posturas estáticas asociadas a tiempos de espera	Alta	Leve	Riesgo moderado
Ingesta de productos químicos	Baja	Muy grave	Riesgo moderado

De acuerdo con la clasificación previa de los peligros en la sección de estimación del peligro, se establecieron medidas de corrección o prevención para los riesgos clasificados con una peligrosidad moderada, importante o intolerable. Dichas medidas tienen como objetivo disminuir la probabilidad de que el peligro pueda ocurrir o minimizar las consecuencias del mismo. Además, es responsabilidad del Coordinador de Operaciones velar por que las medidas correctivas y preventivas planteadas en este documento se ejecuten de manera correcta.

En el Cuadro 5.7 se muestra un resumen en el cual se incluyen las medidas planteadas para mitigar, prevenir o corregir los riesgos significativos que fueron previamente identificados.

Cuadro 5.7. Resumen del Análisis Preliminar de Riesgos

Actividad	Riesgo significativo	Clasificación	Medidas
Transporte de cianuro y cloro al lugar de trabajo Adición de cianuro y cloro al sistema de reacción/ inicio de agitación Toma de muestras Limpieza del agitador Transporte del recipiente de reacción y reactivos a almacenamiento Limpieza del lugar de trabajo	Contacto físico con sustancias peligrosas	Riesgo Químico	<p>Prevención:</p> Para complementar el uso de EPP durante toda la operación, se adquirirán máscaras completas con filtros y protección visual para todos los involucrados en la operación. Las puertas de las bodegas se mantendrán abiertas para favorecer la ventilación del lugar. El personal se mantendrá en una posición a favor del viento siempre que sea posible. Se mantendrá solo personal necesario en las cercanías de la operación.
Transporte de cianuro y cloro al lugar de trabajo Adición de cianuro y cloro al sistema de reacción/ inicio de agitación Toma de muestras Limpieza del agitador Transporte del recipiente de reacción y reactivos a almacenamiento Limpieza del lugar de trabajo	Inhalación de gases tóxicos	Riesgo Químico	Se dispondrá de un traje desechable para el personal involucrado en las operaciones. Se verificará previo a la operación el buen estado del dique de contención para descartar obstrucciones y la presencia de sustancias incompatibles. La limpieza del agitador, debe realizarse antes de retirarlo de la tanqueta (enjuague) y posteriormente en seco. Todo recipiente contaminado con el producto químico, debe de descontaminarse y disponerse adecuadamente una vez finalizada la tarea.
Transporte de cianuro y cloro al lugar de trabajo Adición de cianuro y cloro al sistema de reacción/ inicio de agitación Toma de muestras Limpieza del agitador Transporte del recipiente de reacción y reactivos a almacenamiento Limpieza del lugar de trabajo	Ingesta de productos químicos	Riesgo Químico	<p>Mitigación:</p> Se dispondrá de un kit de neutralización y contención de derrames. Dicho kit tendrá una capacidad de contener un 110% del posible derrame.

Continuación del Cuadro 5.7. Resumen del Análisis Preliminar de Riesgos

Actividad	Riesgo significativo	Clasificación	Medidas
Adición de cianuro y cloro al sistema de reacción/ inicio de agitación	Cargas musculares por posturas estáticas asociadas a tiempos de espera	Riesgo Fisiológico	<p>Mitigación:</p> <p>Se verificará que los operadores que participen en el proceso, no presenten condiciones previas que puedan aumentar las consecuencias de las cargas musculares estáticas como sobre peso o problemas de espalda.</p> <p>Los operadores presentes en el proceso, rotarán cada 30 minutos para la adición de reactivos al proceso, de manera que se reduzcan los tiempos de espera.</p> <p>Corrección:</p> <p>Se adquirirán plantillas antifatiga para retrasar los efectos de las cargas musculares estáticas.</p>
Remoción del sistema de agitación. Transporte del sistema de reacción a almacenamiento. Transporte y almacenamiento del agitador.	Caída de objetos pesados	Riesgo Mecánico	<p>Prevención:</p> <p>Los tanques de almacenamiento de subproductos del proceso se almacenarán en el nivel más bajo posible.</p> <p>Siempre se asignará dos operadores para la instalación, la remoción y el transporte manual del sistema de agitación.</p> <p>Cargas cuyo peso supere los 25 kg, deben manejarse con el montacargas o carretillas (cuando las condiciones del terreno y las características de la carga así lo permitan).</p>
Conexión y operación del agitador	Incendio ocasionado por la instalación eléctrica	Riesgo de Incendio	<p>Prevención:</p> <p>Se evitará sobrecargar las conexiones eléctricas y los toma corrientes.</p> <p>En complemento a las verificaciones del sistema eléctrico establecido en el Código Eléctrico, se realizarán mantenimientos preventivos al sistema eléctrico cada dos años.</p> <p>Se despejará el área de trabajo de cualquier fuente de ignición o material combustible previo al inicio de la operación.</p> <p>Las herramientas eléctricas se desconectarán al término de su función o pausa en el trabajo</p> <p>Mitigación:</p> <p>Se mantendrán extintores en zonas cercanas a la operación y debidamente rotulados.</p>

Continuación del Cuadro 5.7. Resumen del Análisis Preliminar de Riesgos

Actividad	Riesgo significativo	Clasificación	Medidas
Adición de cloro al sistema de reacción / agitación	Explosión causada por reacciones químicas de alta velocidad	Riesgo Químico	Prevención: La alimentación de agente oxidante se hará de forma intermitente. Mitigación: Se dispondrá de un kit de neutralización y contención de derrames. Dicho kit tendrá una capacidad de contener un 110% del posible derrame.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Se concluye que, de las tres rutas químicas evaluadas para la eliminación de cianuro de sodio, la cloración alcalina se adapta de mejor forma al contexto de la empresa, esto debido a la simplicidad de los equipos requeridos y su versatilidad para ser adaptados a procesos futuros, además de que la facilidad de la operación no supone costos elevados en capacitación al personal o adaptación de las instalaciones.
- Se concluye que el orden de reacción del proceso seleccionado con respecto a la concentración de cianuro es de dos, por lo que el tratamiento de disoluciones concentradas favorecerá la velocidad de reacción, disminuyendo el tiempo necesario para llevar a cabo el proceso y los costos de operación.
- El diámetro de 30 cm del impulsor de turbina se logra adaptar a las especificaciones del motor con el que ya se cuenta para satisfacer las condiciones de agitación requeridas que logran un alto porcentaje de eliminación de cianuro de sodio.
- El reactor batch es el que mejor se adapta para llevar a cabo la eliminación del cianuro mediante la cloración alcalina, debido a su fácil operación y por su favorecimiento a la cinética química por la cual se rige el proceso.
- El costo de capital del diseño es de ₡7439671, por lo tanto, representa una inversión viable y asequible para que la empresa implemente el proceso, considerando las tarifas que se manejan para la gestión de este tipo de residuos, no obstante, debe considerarse que los costos operativos pueden llegar a representar un gasto significativo puesto que la materia prima principal (NaOCl) es relativamente costosa por lo que se debe analizar su impacto sobre la rentabilidad.
- De los riesgos identificados durante la operación se consideran riesgos significativos el incendio ocasionado por la instalación eléctrica, la ingesta, inhalación y/o contacto con sustancias peligrosas, las cargas estáticas asociadas a tiempos de espera y las explosiones debido a altas velocidades de reacción.

Recomendaciones

- Se recomienda la evaluación de rutas no químicas como el encapsulamiento o solidificación para la neutralización de los peligros asociados al cianuro de sodio.
- Utilizar el método de cuantificación de cianuro por potenciometría con un electrodo específico de cianuro, el cual no fue utilizado debido a la falta de insumos en el laboratorio pero que ofrece resultados de mayor precisión.
- Identificar y evaluar los riesgos asociados al proceso una vez sea implementada la nueva tecnología.
- En caso de que la alta gerencia de Wastech se incline por el uso del hipoclorito de calcio, se recomienda el uso de agentes antiespumantes para eliminar la formación de espumas densas las cuales pueden ser difíciles de disponer.
- Se recomienda considerar la contratación del servicio de una planta de tratamiento de aguas residuales externa que posea equipos que a un nivel técnico sean capaces de dar un tratamiento final a los subproductos generados durante el proceso de cloración alcalina.

Bibliografía

- Asamblea Legislativa. (2015). *Opinión Jurídica 105-J*. San José: Sistema Costarricense de Información Jurídica.
- Ascuña, V., Zela, J., Bolaños, H., Mamani, P., Huamani, R., & Huanca, P. (2018). *Tratamiento de soluciones de cianuro y precipitación de metales cianicidas por reacción con peróxido de hidrógeno y soda caustica, el método perso; obtención de lodos económicamente útiles*. San Andrés: Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Perú.
- Bolaños Alfaro, J., Cordero Castro, G., & Segura Araya, G. (2017). *Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación causada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica)*. Tecnología en Marcha.
- Brady, G., Clauser, H., & Vaccari, J. (2002). *Materials Handbook: An Encyclopedia for Managers, Technical Professionals, Purchasing and Production Managers, Technicians, and Supervisors, Fifteenth Edition*. McGraw Hill.
- Briceño, M., & Cobos, S. (2004). *Escalamiento del proceso de mezclado de emulsiones O/W concentradas*. Mérida: Universidad de los Andes.
- Camacho, F., Vargas, C., & Colpas, F. (2011). *Degradación de cianuro en aguas residuales provenientes de la actividad minera del municipio de San Martín de Loba, empleando métodos de oxidación química*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Camareno, M., & Romero, L. (2006). *Tecnología de inmovilización de desechos peligrosos en Costa Rica*. Cartago: Tecnología en Marcha.
- Castellanos, C. (s.f.). *Análisis Preliminar de Riesgos (APR)*. Seguridad y Salud Ocupacional.
- Consejo de Salud Ocupacional. (2017). *Programa de Salud Ocupacional*. Ministerio de Trabajo y Seguridad Social.

- Construplaza. (15 de Marzo de 2020). *Construplaza.com*. Obtenido de <https://www.construplaza.com/Materiales/Obra-Gris>
- Elorza, E., Nava, F., Uribe, A., & Pérez, R. (2007). *Análisis químico de cianuro en proceso de cianuración: revisión de los principales métodos*. Revista de Metalurgia.
- Escuela Europea de Excelencia. (2015). *OHSAS 18001: El análisis preliminar de riesgos*. Santa Lucía.
- Fisher, G. (2003). *United States of America Patente n° US 6,596,916 B1*.
- Fogler, S. (2001). *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*. Naucalpan: Pearson Education.
- Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. CECSA.
- Geocycle. (2017). *El coprocesamiento y sus beneficios*. El Salvador.
- GoodFellow. (Lunes de Abril de 2020). *GoodFellow*. Obtenido de GoodFellow: <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.html>
- Guy, J. Z. (2012). *Factibilidad técnica de precipitación selectiva de metales mediante la aplicación de dos procesos: INCO y con H₂O₂*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Holcim. (2012). *Guía para el coprocesamiento de residuos en la producción de cemento*.
- Jácome, M. J. (2013). *Diseño e implementación de sistemas para la recuperación de oro*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Jiménez, S. O. (2018). *Examen de razonabilidad jurídica ante la prohibición absoluta del uso de cianuro y mercurio en el beneficio del oro en Costa Rica*. San Ramón: Universidad de Costa Rica.
- Leiva, P. G. (2012). *Degradación de cianuros mediante Oxidación Química en efluentes industriales*. Asturias: Universidad de Oviedo.
- Levenspiel, O. (2004). *Ingeniería de las reacciones químicas*. México: Editorial Limusa.

- Logsdon, M., Hagelstein, K., & Mudder, T. (2009). *El manejo del cianuro en la extracción de oro*. Ottawa.
- Macías, A., Guerrero, A., & Fernández, E. (1999). *Inmovilización/solidificación de residuos tóxicos y peligrosos en matrices de cemento*. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC).
- Martínez, A. D. (2011). *Tratamiento de desechos del cianuro por bioremediación*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.
- Ministerio de Salud. (2016). *Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos*. San José.
- Muuder, T., Botz, M., & Smith, A. (2001). *Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes*. London: Mining Journal Books LTD .
- Padilla Camacho, F., Vargas Aya, C., & Colpas Castillo, F. (2010). *Degradación de cianuro en aguas residuales provenientes de la actividad minera del municipio de San Martín de Loba empleando métodos de oxidación química*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Paniagua, J. V. (2019). *Estudio ambiental y optimización en la extracción del oro utilizando el cianuro*. Ciencia & Desarrollo.
- Pérez Domínguez, J., & Higuera Cobos, Ó. (2008). *Comportamiento electroquímico del cianuro*. Pereira.
- Procuraduría General de la República de Costa Rica. (23 de Abril de 2019). *PGR*. Obtenido de PGR: <https://www.pgrweb.go.cr/>
- Razanamahandry, L., Onwordi, C., Saban, W., & Bashir, A. (2019). *Performance of various cyanide degrading bacteria on the biodegradation of free cyanide in water*. Elsevier.
- Romero Esquivel, L., & Vargas Camareno, M. (2008). *Desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización / solidificación de desechos peligrosos en Costa Rica*. Cartago: Tecnología en marcha.
- Sacher, W. (2010). *Cianuro, La cara tóxica del oro: Una introducción al uso de cianuro en la explotación del oro*.

Smith, J. M. (1992). *Ingeniería de la cinética química*. McGraw Hill Book Company.

Tapia, G., Bourgois, J., Carrillo, & F. (2007). *A knowledge base system for the oxidation cyanide process of industrial wastewater treatment*. Tampico: Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Altamira del instituto Politécnico.

United States Environmental Protection Agency. (2009). *Cyanide overview and properties*. EPA.

Universidad de Antioquía. (2005). *Electroquímica*.

Vale, A. (2016). *Medicine: Cyanide*. Elsevier.

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Acumulación	kg - kmol
α	Orden de reacción	-
C	Concentración	mol/L
Co	Costo	colones
D	Diámetro	m
FE	Factor estequiométrico	Adim
h	Altura	m
k	Constante de velocidad de reacción	L/mol min
m	Masa	kg
MM	Masa molar	g/mol
\dot{N}	Velocidad de giro	rps
N	Número	Adim
P	Potencia	W
Pu	Pureza	%
Pr	Probabilidad	Adim
r	Radio	m
Re	Número de Reynolds	Adim
r	Velocidad de reacción	mol/Lmin
S	Solubilidad	g/mL
Se	Severidad	Adim
V	Volumen	m ³
ρ	Densidad	kg/m ³
μ	Viscosidad	Ns/m ²
X	Conversión	Adim
Subíndices		
0	Indica que el tiempo es igual a 0	-
p	Potencia	-
M	Media	-
x	Indica una sustancia o compuesto	-
A	Indica el reactivo A de una reacción química	-
E	Entrada	-
S	Salida	-
G	Generado	-
C	Consumido	-

APÉNDICES

A. Datos experimentales

Cuadro A.1. Datos relacionados a la determinación de la pureza del cianuro de sodio.

Muestra	Masa pesada NaCN (g)	Volumen consumido AgNO ₃ (L)
1	0,0605	0,0355
2	0,0579	0,0342
3	0,0471	0,0278

Cuadro A.2. Datos experimentales obtenidos para la corrida 1 de eliminación de cianuro de sodio.

Volumen bureta (mL)	Tiempo (min)	Volumen consumido AgNO ₃ (mL)
0,00	0	0,00
1,70	0,5	1,70
2,80	2	1,10
3,55	4	0,75
4,05	6	0,50
4,30	8	0,25
4,50	10	0,20
4,60	16	0,10
4,70	20	0,10

Cuadro A.3. Datos experimentales obtenidos para la corrida 2 de eliminación de cianuro de sodio.

Volumen bureta (mL)	Tiempo (min)	Volumen consumido AgNO ₃ (mL)
0,00	0	0,00
1,40	0,5	1,40
2,25	2	0,85
2,65	4	0,40
3,00	6	0,35
3,15	8	0,15
3,25	10	0,10
3,35	16	0,10
3,45	20	0,10

B. Resultados intermedios

Cuadro B.1. Pureza de las muestras analizadas de cianuro de sodio.

Muestra	Pureza (%)
1	92,02
2	92,63
3	92,56
Promedio	92,41

Cuadro B.2. Concentración de NaCN en el tiempo durante la determinación de la cinética de reacción.

Tiempo (min)	Cn NaCN (mol/L)	
	Corrida 1	Corrida 2
0	0,1796	0,1767
0,5	0,0731	0,0602
2	0,0473	0,0366
4	0,0323	0,0172
6	0,0215	0,0151
8	0,0108	0,0065
10	0,0086	0,0043
16	0,0043	0,0043
20	0,0043	0,0043

Cuadro B.3. Resultados de escalamiento del sistema de agitación y mezclado.

Variable	Experimental	Diseño
Densidad de la disolución (kg/m ³)	997	997
Viscosidad de la disolución (Pas)	0.0007977	0.0007977
Masa tratada (kg)	0,250	7089
Velocidad de agitación (rpm)	250	855
Número de Reynolds (adim)	20404	195694267
Diámetro del agitador (m)	0.0625	0.3
Número de potencia (adim)	2,7	2,7
Potencia media (W/kg)	0,745	0,745

Cuadro B.4. Costos asociados a la gestión de procesos de disposición final propuestos.

Proceso	Costo (€)
Coprocesamiento	3101365
Solidificación	36085507
Neutralización	1932000

C. Muestra de cálculo

Para los cálculos realizados en los que se involucran precios en dólares (\$) se utiliza un tipo de cambio de 575,0 colones por dólar, referenciado al precio de marzo de 2020 según el Banco Nacional de Costa Rica.

C.1 Cálculo de la pureza del NaCN

Para el cálculo de la pureza se utilizó la Ecuación C.1.

$$Pu = \frac{(V_{consumido} - V_{Blanco})_{AgNO_3} * Cn_{AgNO_3} * FE * MM_{NaCN}}{m_{NaCN}} * 100\% \quad (C.1)$$

Utilizando los datos del Cuadro A.1 y A,2 se tiene:

$$Pu = \frac{(0,0355 - 0)L * 0,016003mol/L * 2 * 49g/mol}{0.0605g} * 100\% = 92,42 \%$$

Dato que se encuentra tabulado en el Cuadro B.1. Todas las purezas reportadas en el Cuadro B.1 fueron calculadas utilizando la misma metodología.

C.2 Cálculo de la concentración de NaCN en el tiempo

La concentración de NaCN en el tiempo se determinó utilizando la Ecuación C.2.

$$C_{NaCN} = \frac{V_{AgNO_3} * C_{AgNO_3} * FE}{V_{alícuota}} \quad (C.2)$$

Utilizando los datos del Cuadro A.1 y A.3 y considerando que las alícuotas tomadas durante la reacción fueron de 1,000mL, se tiene lo siguiente:

$$C_{NaCN} = \frac{0,0017L * 0,02150mol/L * 2}{0.001L} = 0,0731 mol/L$$

Dato que se encuentra reportado en el Cuadro B.2. Todos los datos de concentración reportados en el Cuadro B.2 se calcularon utilizando la misma metodología.

C.3 Cálculo de las dimensiones del reactor

Las dimensiones básicas del reactor cilíndrico (radio y altura) se determinaron por sustracción considerando las restricciones en el espacio de almacenamiento del transporte. Por otro lado, el volumen se calculó a partir de la Ecuación C.3.

$$V_{reactor} = \pi r^2 h \quad (C.3)$$

Utilizando las medidas especificadas en la Sección 3.2.1.3 se tiene lo siguiente:

$$V_{reactor} = \pi * 1,12m^2 * 2.13m = 8,39 m^3$$

C.4 Cálculo del número de Reynolds

El número de Reynolds se calculó a partir de la Ecuación C.4.

$$Re = \frac{\rho \dot{N} D^2}{\mu} \quad (C.4)$$

A partir de los datos de las corridas experimentales se tiene lo siguiente:

$$Re = \frac{997 \frac{kg}{m^3} * \frac{4.17}{min} * 0,0625m}{797,7 \times 10^{-6} Pas} = 20404$$

C.5 Cálculo de la potencia específica consumida

El cálculo de la potencia específica consumida se realizó a partir de la Ecuación C.5.

$$P_M = N_p \frac{\rho \dot{N}^3 D^5}{m} \quad (C.5)$$

Tomando en cuenta el número de Reynolds experimental, con la Figura 3.6 se tiene que N_p es 2.7, de ahí que:

$$P_M = 2,7 * \frac{997 \frac{kg}{m^3} * \left(\frac{4,17}{min}\right)^3 (0,0625m)^5}{0,250kg} = 0,745$$

C.6 Cálculo de el volumen de aguas residuales especiales

Tomando como base 3300 kg de NaCN, la disolución del cianuro en 7 veces la cantidad de agua requerida para preparar una disolución y una relación 1:3 entre el cianuro y el hipoclorito, se tiene la Ecuación C.6:

$$V_{aguas\ residuales} = \frac{m_{NaCN} P_{uNaCN}}{S_{NaCN}} * 1,5 + \frac{m_{NaCN} P_{uNaCN} * P_p}{C_{nNaOCl}} \quad (C.6)$$

$$V_{aguas\ residuales} = \frac{3300\ kg * 0,9241}{0,58\ kg/L} * 7 + \frac{3300\ kg * 0,9241 * 3}{0,144\ \frac{kg}{L}} = 100336\ L$$

$$= 100,34\ m^3$$

C.7 Cálculo de la masa de matriz sólida requerida

Partiendo de la relación matriz sólida: aguas residuales 8:2, se tiene lo siguiente:

$$m_{matriz\ sólida} = m_{agua\ residual} * \frac{8}{2} \quad (C.7)$$

Considerando el cálculo de la Sección C.6, asumiendo la densidad de las aguas residuales similar a la del agua y un 10 % extra de aguas de lavado, se tiene que:

$$m_{matriz\ sólida} = 110369\ kg * \frac{8}{2} = 441478\ kg$$

C.8 Cálculo de la masa de cemento, piedrilla y arena requeridas para la matriz sólida

Tomando como base las proporciones para preparar un saco de cemento Holcim (1 saco 50 kg, 80 kg de piedrilla y 117 kg de arena) y considerando el cálculo de la Sección C.7, se tiene que:

$$m_{\text{cemento total}} = \frac{m_{\text{cemento}}}{m_{\text{mezcla}}} * m_{\text{matriz sólida}} \quad (\text{C.8})$$

$$m_{\text{piedrilla total}} = \frac{m_{\text{piedrilla}}}{m_{\text{mezcla}}} * m_{\text{matriz sólida}} \quad (\text{C.9})$$

$$m_{\text{arena total}} = \frac{m_{\text{arena}}}{m_{\text{mezcla}}} * m_{\text{matriz sólida}} \quad (\text{C.10})$$

Considerando la información anterior y el resultado de la Sección C.7, se tiene que:

$$m_{\text{cemento total}} = \frac{50 \text{ kg}}{247 \text{ kg}} * 441478 \text{ kg} = 89368 \text{ kg}$$

$$m_{\text{piedrilla total}} = \frac{80 \text{ kg}}{247 \text{ kg}} * 441478 \text{ kg} = 142988 \text{ kg}$$

$$m_{\text{arena total}} = \frac{117 \text{ kg}}{247 \text{ kg}} * 441478 \text{ kg} = 209121 \text{ kg}$$

C.9 Cálculo del costo de materiales para la matriz sólida

El cálculo de costo de materiales para la matriz sólida se realizó utilizando las Ecuación C.11.

$$C_{\text{material total}} = C_{\text{material}/\text{m}^3} * \frac{1}{\rho_{\text{material}}} * m_{\text{material req}} \quad (\text{C.11})$$

Con los datos del Cuadro 4.2 se tiene que:

$$C_{\text{cemento}} = \frac{\$6000}{\text{saco}} * \frac{1 \text{ saco}}{50 \text{ kg}} * 89368 \text{ kg} = \$10724160$$

$$C_{\text{piedrilla}} = \frac{\$19000}{\text{m}^3} * \frac{\text{m}^3}{800 \text{ kg}} * 142988 \text{ kg} = \$3395965$$

$$C_{\text{piedrilla}} = \frac{\$17000}{\text{m}^3} * \frac{\text{m}^3}{834 \text{ kg}} * 209121 \text{ kg} = \$4262658$$

C.10 Cálculo de la masa requerida de HCl para neutralización

Tomando en consideración las Ecuaciones 1.4, 1.7 y 4.1 se plantea la Ecuación C.12 para determinar la masa requerida de ácido clorhídrico.

$$m_{HCl req} = Pu_{NaCN} * \frac{m_{NaCN}}{MM_{NaCN}} * \frac{1 \text{ mol}_{CNO^-}}{1 \text{ mol}_{CN^-}} * \frac{2 \text{ mol}_{HCO_3^-}}{2 \text{ mol}_{CNO^-}} * \frac{1 \text{ mol}_{HCl}}{1 \text{ mol}_{HCO_3^-}} * \frac{MM_{HCl}}{1 \text{ mol}_{HCl}} \quad (C.12)$$

Utilizando como base 3300 kg de cianuro de sodio se tiene:

$$m_{HCl req} = 0.924 * \frac{3300 \text{ kg}}{49,00 \text{ kg/kmol}} * \frac{1 \text{ kmol}_{CNO^-}}{1 \text{ kmol}_{CN^-}} * \frac{2 \text{ kmol}_{HCO_3^-}}{2 \text{ kmol}_{CNO^-}} * \frac{1 \text{ kmol}_{HCl}}{1 \text{ kmol}_{HCO_3^-}} * \frac{36,46 \text{ kg}}{\text{kmol}} = 2269 \text{ kg}$$

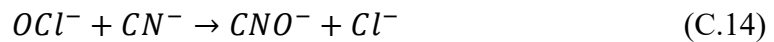
C.11 Balances de masa.

Partiendo de una base de cálculo de 100 kmol de cianuro de sodio se tiene lo siguiente:

El sistema fue escalado como se muestra en el Capítulo 3, tendrá una conversión de 99,4, por otro lado, se tiene el siguiente balance general para todas las sustancias:

$$M_E - M_S + M_G - M_C = A \quad (C.13)$$

En el sistema ocurrirá dos reacciones las cuales se muestran en la Ecuación C.14 y C.15.



C.11.1 Balance de cianuro de sodio.

El cianuro de sodio a la salida se calcularía de la siguiente manera, utilizando la conversión para determinar la porción consumida y sabiendo que el mismo no se genera, por lo tanto, la Ecuación C.13 sería:

$$100 \text{ kmol NaCN} - 100 \text{ kmol NaCN} * 0,994 = M_S = 0,6 \text{ kmol NaCN}$$

C.11.2 Balance de hipoclorito de sodio.

El hipoclorito de sodio para la primera reacción se encuentra en exceso y este está definido por la relación de tres veces más que el cianuro de sodio que se tratará, mientras que, al

terminar el proceso se consume lo necesario para convertir el 99,4 % del cianuro de sodio, por lo tanto, en la primera etapa se tiene lo siguiente:

$$\frac{\left(100 \text{ kmol NaCN} * \frac{49 \text{ kg NaCN}}{\text{kmol NaCN}} * 3 \frac{\text{kg NaOCl}}{\text{kg NaCN}}\right)}{74,44 \frac{\text{kg NaOCl}}{\text{kmol NaOCl}}} - 100 \text{ kmol CN}^- * 0,994 * \frac{1 \text{ OCl}^-}{1 \text{ CN}^-} = M_S$$

$$= 98,1 \text{ kmol NaOCl}$$

Para la segunda etapa del proceso, el hipoclorito de sodio se convierte en el reactivo limitante por lo que a la salida del reactor se debería solo tener trazas del mismo.

C.11.3 Balance de bicarbonato de sodio.

De las reacciones generales y del proceso, se sabe que el bicarbonato de sodio solo se genera, por lo tanto, el nitrógeno a la salida será igual al nitrógeno generado utilizando el hipoclorito de sodio como reactivo limitante y sabiendo que de la primera reacción solamente se tienen 98,1 kmol restantes de hipoclorito de sodio.

$$98,1 \text{ kmol OCl}^- * \frac{2 \text{ HCO}_3^-}{3 \text{ OCl}^-} = M_S = 65,3 \text{ kmol NaHCO}_3$$

C.11.4 Balance de nitrógeno.

De las reacciones generales y del proceso, se sabe que el nitrógeno solo se genera, por lo tanto, el nitrógeno a la salida será igual al nitrógeno generado utilizando el hipoclorito de sodio como reactivo limitante y sabiendo que de la primera reacción solamente se tienen 98,1 kmol restantes de hipoclorito de sodio.

$$98,1 \text{ kmol} * \frac{1 \text{ N}_2}{3 \text{ OCl}^-} = M_S = 32,6 \text{ kmol N}_2$$

C.11.5 Balance de cloruro de sodio.

De las reacciones generales y del proceso, se sabe que el cloruro de sodio solo se genera, por lo tanto, el nitrógeno a la salida será igual al nitrógeno generado utilizando el hipoclorito de sodio como reactivo limitante y sabiendo que de la primera reacción solamente se tienen 98,1 kmol restantes de hipoclorito de sodio.

$$98,1 \text{ kmol} * \frac{3 \text{ Cl}^-}{3 \text{ OCl}^-} = M_S = 98,1 \text{ kmol NaCl}$$

ANEXOS

Cotizaciones



GTM Costa Rica S.A.

Cotización

Alto de Ochomogo, 800 m este del
Servicentro Cristo Rey, contiguo a
Madisa, carretera a Cartago

Teléfono.....2537-0010
Fax.....2537-2121
NIF.....3:101-065279-26

Número.....: 00015961_050-1
Página.....: 1 de 1
Fecha.....: 28/08/2019
Pago.....: Contado
Vigente Hasta.....: 05/09/2019
Modo de Entrega.....: Cartago

CLIENTE:
WASTECH TECNOLOGÍAS
EN MANEJO DE RESIDUOS
S.A

07-005743
CONTACTO:

Código	Descripción	Situación fiscal	Unidad	Origen / Presentación / Grado	Precio U.	Cantidad	Subtotal
PR-00270	HIPOCLORITO DE CALCIO	Gravado	Kg	IND45K	1.75	1,035.00	1,811.2500



GTM Costa Rica S.A.

Cotización

Alto de Ochomogo, 800 m este del
Servicentro Cristo Rey, contiguo a
Madisa, carretera a Cartago

Teléfono.....2537-0010
Fax.....2537-2121
NIF.....3:101-065279-26

Número.....: 00016447_050-1
Página.....: 1 de 1
Fecha.....: 25/10/2019
Pago.....:
Vigente Hasta.....: 02/11/2019
Modo de Entrega.....:

CLIENTE:
STEPHEN COLEMAN

CONTACTO:

Código	Descripción	Tamaño	Unidad	Color	Precio U.	Cantidad	Subtotal
PR-00407	SODA CAUSTICA ANHIDRA	Gravado	Kg	CHI25kPERLAS	780.00	25.00	19,500.0000
PR-00407	SODA CAUSTICA ANHIDRA	Gravado	Kg	CHI25kESCAMA99 ^c	650.00	25.00	16,250.0000
PR-00431	SULFATO DE COBRE	Exento	Kg	BRA25K	1,900.00	25.00	47,500.0000

Sur Química, S.A.

Ced. Jurídica..... 3-101-022435
Telephone.....: (506)2211-3700/3701
Fax.....: (506)2257-9662
Calle 38, contiguo al Cementerio La Uruca, San
José, Costa Rica, Centroamérica.

www.gruposur.com



Page 1 / 1

10000 COTIZACIONES

Cotización

0205856_Cot-2

Ruta.....: 114
Secuencia de ruta : 9999

Transporte.....: Ruta

Email.....: pedidos@gruposur.com

Vigencia de la oferta.: 24/11/2019

Término de pago.....: Plazo 1 día

Date.....: 25/10/2019

Funcionario.....:

Responsable.....: Adrian Enrique López López

#	CODIGO	DESCRIPCION	VENI	CANT	UNIDAD	PRECIO UNIT.	DESC.	IMP. CONSUMO	IVA	PRECIO TOTAL
1	53508000K20	SUR HIDROXIDO DE CALCIO	N/A	30.00	Saco 20 Kilos	4,103.00		0.00	16,001.70	123,090.00

EMPRESAS BERTHIER EBI DE COSTA RICA S.A.
COTIZACIÓN N°1905

COMPROMISO AMBIENTAL

23 DE DICIEMBRE 2019

PARA Stephen Coleman
Tel: 84144781
Stephen.coleman@crsostenible.com

CONTACTO Kristell Bonilla Montero
Gerente de Ventas
Tel.: (506) 2432 5000
Cel.: (506) 70134657

Cotización N°
EBI-KB1905-2019

LUGAR DE SERVICIO	LUGAR DE DISPOSICION	MODALIDAD DE SERVICIO	CRÉDITO	CONTADO
Tejar del Guarco	RELLENO SANITARIO	Roll-Off / Esporadicos	30 días	n/a

UNIDAD	SERVICIO	TARIFA
DISPOSICIÓN	Tarifa de Disposición por Tonelada de Desechos No Ordinarios	€18.000,00
TRANSPORTE	Tarifa de transporte por viaje	€80.000,00
*Tarifa mínima por tonelada, No Incluye Acta Certificada // No incluye personal para Carga de los Desechos. Servicio carga en un mismo día. Max de tiempo 2h. después de cada hora extra de servicio se cobra €25.000,00 por hora.		
El pago de facturas será a ocho días trámite de cheque ó transferencia.		

En EBI aplicamos los métodos de operación establecidos en la **NUEVA LEY PARA LA GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS #8839 publicada en la Gaceta #135 del 13 de Julio 2010**; contamos con todos los permisos necesarios para garantizar la seguridad en el manejo de los desechos sólidos de nuestros clientes.

En razón a la normativa vigente en el país, el cliente debe de comprometerse a no depositar en nuestros contenedores residuos clasificados como **PELIGROSOS**.

Nota: El personal que ingrese al Relleno Sanitario deberá por normas de Salud Ocupacional de la compañía, utilizar chalecos reflectivos, pantalón largo y zapatos de seguridad.

YO, _____,
NÚMERO DE CÉDULA: _____
EN REPRESENTACIÓN DE _____,
AUTORIZO Y APRUEBO LA PRESENTE COTIZACIÓN.
FIRMA: _____



1/1

FACTURA ELECTRÓNICA N°
00100001010000000083

CONESA DE TURRIALBA S.A.

Cédula Jurídica: 310119779

Teléfono: 25567679

Turrialba Barrio San Rafael Frente Cencinal

tamecocr@gmail.com

Clave numérica: 50601101900310111977900100001010000000083167739703

Cliente: Wastech Tecnología en Manejo de Residuos S.A.

Céd: 3101625830

Tel: 22016869

Dirección: Del Servicentro Quijongo 100 S 250 O

Condición de Venta: Contado

Medio de pago: Otro

01, Octubre, 2019 2:46:19 PM

Observaciones

Código	Descripción	Pr Unit Exento	Pr Unit Gravado	Cantidad	% Descuento	Total
785	AGITADOR DE LIQUIDO PARA TANQUETAS DE 1000 LITROS, MOTOR 1.5 HP 3F CON VARIADOR DE VELOCIDAD, ESTRUCTURA DE SOPORTE Y EJE DE EN ACERO INOXIDABLE 304	¢ 0.00	¢ 1,415,929.20	1.00	0.00	¢ 1,415,929.20

Subtotal	¢ 1,415,929.20
Descuento	¢ 0.00
Exonerado	¢ 0.00
I.V.A	¢ 184,070.80
I.V.A Devuelto	¢ 0.00
Total	¢ 1,600,000.00

El recibido conforme de esta factura da por aceptado que se recibieron todas sus líneas y exime a CONESA DE TURRIALBA S.A. de todo reclamo futuro. Autorizada mediante la Resolución DGT-R-033-2019, publicada en La Gaceta, Alcance N° 147 del 27 de junio de 2019.

Versión del documento electrónico 4.3

Documento electrónico generado por www.facturele.com Correo: contacto@facturele.com Tel 4070-0284

FACTURA ELECTRÓNICA



JORGE MUNOZ MONGE

302260014

25379125

facturasjmtransportes@gmail.com

Tejar de El Guarco Cartago 50 metros sur de la escuela Guayabal

Orden de Compra No.

Clave 5062206200030226001400100001010000001169100002825

Factura00100001010000001169

Cliente WASTECH COSTA RICA S A

CREDITO

Cédula 3101625830

Fecha 22/06/2020 16:18

Tel. 506

Plazo 30

100 metros Sur y 200 Oeste de la estacion de servicio El Guarco

Vence 22/07/2020

CANTIDAD	DESCRIPCION	MONTO	TOTAL	DESCUENTO
1	SERVICIO DE TRANSPORTE Servicio CEMEX. Sistemas 19 y 22 de Junio.	₡600,000.00	₡600,000.00	₡0.00



Estructuras Ind. Quesada Ureña Ltda

LUXORINOX

C O T I Z A C I O N G E N - 1 6 0 5

PARA:

Sr. Stephen Coleman

DE:

Ing. Manuel Quesada Ureña

ORGANIZACIÓN:

CR Sostenible

FECHA:

13 de mayo de 2020

D E S C R I P C I O N :

Por fabricar tanque con capacidad de 6300 litros en acero inoxidable aisi 304 de 3mm de espesor de 2000mm de diámetros x 2000mm de altura cilíndrica con anillos superior de refuerzo de 1/4" x 2", fondo plano, tapa superior, estructura de soporte inferior. Soldadura TIG, no incluye acabado sanitario.

Precio Unitario. \$ 5,700.00

Sub Total \$ 5,700.00

13% I.V. \$ 741,00

Total \$ 6,441,00

Seis mil cuatrocientos cuarenta y uno con 00/100USD

Tiempo de entrega: 4-5 semanas.

Forma de Pago: 50% con orden de compra y 50% contra entrega

Garantía: 12 meses sobre defectos de fabricación

Esperando que esta sea de su total agrado, me despido atentamente:

Atte: Ing. Manuel Quesada Ureña.

Informe de Análisis APR.

WASTECH COSTA RICA

GESTIÓN OPERATIVA

INFORME DEL ANÁLISIS PRELIMINAR DE RIESGOS

Eliminación de cianuro de sodio

Elaboración: C. Stephen Coleman Wilson

Objetivo

El siguiente informe se elabora con el objetivo de resumir las etapas de identificación de riesgos asociadas al proceso de eliminación de cianuro de sodio en las bodegas industriales de Wastech Costa Rica, de modo que se visualice claramente los peligros constatados e identificados, así como su causa, consecuencia principal y las medidas correctivas o preventivas planteadas.

Alcance

Las actividades que se evaluarán en este documento comprenden todas aquellas que estén involucradas en la manipulación del cianuro de sodio dentro de las bodegas de Wastech con el fin de dar su disposición final.

Responsabilidades

Es responsabilidad del encargado de Seguridad y Salud Ocupacional la participación en la elaboración de este análisis y la revisión y actualización del mismo. Además, debe informar a los involucrados sobre los resultados y conclusiones del análisis e impartir capacitaciones para todo aquel que sea parte del proceso analizado.

Es responsabilidad del Gerente de Operaciones velar por que las medidas correctivas y preventivas planteadas en este documento se ejecuten de manera correcta.

Es responsabilidad de los operadores y cualquier otro involucrado en la operación de eliminación de cianuro de sodio conocer los riesgos asociados que se estipulan en este documento, así como las buenas prácticas que deben realizarse para prevenir cualquier eventualidad durante la ejecución del proceso.

Etapas de la metodología APR

1. Análisis detallado.

Para llevar a cabo esta etapa del análisis, se observó el procedimiento de eliminación de cianuro de sodio que se llevó a cabo en la Bodega 5 de Wastech, con el fin de identificar las actividades involucradas en dicha operación.

Un resumen de las actividades se encuentra a continuación.

Orden	Actividad
1	Colocación del recipiente de reacción
2	Acondicionamiento del recipiente de reacción
3	Transporte del agitador hacia el área de trabajo
4	Ensamble del agitador en el recipiente de reacción
5	Conexión del agitador al sistema eléctrico y operación del agitador
6	Transporte de cianuro y cloro al lugar de trabajo
7	Llenado del sistema de reacción
8	Adición de cianuro al sistema de reacción e inicio de agitación
9	Adición de cloro al sistema de reacción / agitación
10	Toma de muestras
11	Remoción del sistema de agitación
12	Limpieza del agitador
13	Transporte del recipiente de reacción a almacenamiento
14	Transporte de cianuro y cloro a almacenamiento
15	Transporte y almacenamiento del agitador
16	Limpieza del lugar de trabajo

2. Identificación de los riesgos asociados a cada actividad.

Actividad	Riesgo
Colocación del recipiente de reacción	Golpe o atropello con el montacarga Accidentes con maquinaria Caída de objetos pesados Atrapamiento
Acondicionamiento del recipiente de reacción	Contacto físico con sustancias peligrosas Corte con herramientas filosas Golpe con herramientas pesadas Sobre esfuerzo de cargas
Transporte del agitador hacia el área de trabajo	Sobre esfuerzo de cargas Caída de objetos pesados
Ensamble del agitador en el recipiente de reacción	Sobre esfuerzo de cargas Caída de objetos pesados Golpe con herramientas pesadas
Conexión del agitador al sistema eléctrico y operación del agitador	Incendio ocasionado por la instalación eléctrica Shock eléctrico
Transporte de cianuro y cloro al lugar de trabajo	Quemaduras por salpicadura de materiales peligrosos Inhalación de gases tóxicos Contacto físico con sustancias peligrosas Golpe o atropello con el montacarga Caída de objetos pesados Accidentes con maquinaria
Llenado del sistema de reacción	Cargas musculares por posturas estáticas asociadas a tiempos de espera
Adición de cianuro al sistema de reacción e inicio de agitación	Inhalación de gases tóxicos Golpe por desprendimiento de piezas móviles Contacto físico con sustancias peligrosas Cargas musculares por posturas estáticas asociadas a tiempos de espera
Adición de cloro al sistema de reacción / agitación	Inhalación de gases tóxicos Golpe por desprendimiento de piezas móviles Contacto físico con sustancias peligrosas Explosión causada por reacciones químicas de alta velocidad Cargas musculares por posturas estáticas asociadas a tiempos de espera
Toma de muestras	Contacto físico con sustancias peligrosas Inhalación de gases tóxicos

Actividad	Riesgo
Remoción del sistema de agitación	Sobre esfuerzo de cargas Caída de objetos pesados Golpe con herramientas pesadas
Limpieza del agitador	Contacto físico con sustancias peligrosas Inhalación de gases tóxicos Ingesta de productos químicos tóxicos
Transporte del recipiente de reacción a almacenamiento	Quemaduras por salpicadura de materiales peligrosos Inhalación de gases tóxicos Contacto físico con sustancias peligrosas Golpe o atropello con el montacarga Caída de objetos pesados Accidentes con maquinaria
Transporte de cianuro y cloro a almacenamiento	Quemaduras por salpicadura de materiales peligrosos Inhalación de gases tóxicos Contacto físico con sustancias peligrosas Golpe o atropello con el montacarga Accidentes con maquinaria
Transporte y almacenamiento del agitador	Sobre esfuerzo de cargas Caída de objetos pesados
Limpieza del lugar de trabajo	Inhalación de gases tóxicos Contacto físico con sustancias peligrosas Ingesta de productos químicos tóxicos

3. Estimación del peligro.

Los peligros identificados serán clasificados en niveles de acuerdo con la metodología de estimación de peligros en:

Trivial: No se requiere de acciones específicas.

Tolerable: No se necesita mejorar la acción preventiva, se pueden plantear mejoras que no supongan una carga económica considerable.

Moderado: Se deben hacer esfuerzos para reducir el riesgo, las medidas para reducir el riesgo deben implantarse en un periodo determinado.

Importante: No se debe iniciar la actividad hasta que se haya reducido el riesgo, se deben plantear medidas de prevención, corrección o mitigación.

Intolerable: No se debe iniciar la actividad hasta que se haya reducido el riesgo, si no es posible reducir el riesgo incluso con recursos ilimitados, se debe prohibir la actividad.

De lo anterior, que los riesgos considerados como Moderado, Importante o Intolerable serán significativos.

Riesgo	Probabilidad	Severidad	Importancia
Golpe o atropello con el montacargas	Baja	Grave	Riesgo tolerable
Accidentes de maquinaria	Baja	Grave	Riesgo tolerable
Caída de objetos pesados	Media	Grave	Riesgo moderado
Atrapamiento	Baja	Leve	Riesgo trivial
Contacto físico con sustancias peligrosas	Baja	Muy grave	Riesgo moderado
Corte con herramientas filosas	Baja	Grave	Riesgo tolerable
Golpe con herramientas pesadas	Media	Leve	Riesgo tolerable
Sobre esfuerzo de cargas	Media	Leve	Riesgo tolerable
Incendio ocasionado por la instalación eléctrica	Media	Muy grave	Riesgo importante
Shock eléctrico	Baja	Grave	Riesgo tolerable
Quemaduras por salpicadura de materiales peligrosos	Baja	Grave	Riesgo tolerable
Inhalación de gases tóxicos	Baja	Muy grave	Riesgo moderado

Golpe por desprendimiento de piezas móviles	Baja	Grave	Riesgo tolerable
Explosión causada por reacciones químicas de alta velocidad	Baja	Muy grave	Riesgo moderado
Cargas musculares por posturas estáticas asociadas a tiempos de espera	Alta	Leve	Riesgo moderado
Ingesta de productos químicos	Baja	Muy grave	Riesgo moderado

4. Desarrollo de medidas de control.

De acuerdo con la clasificación previa de los peligros en la sección de estimación del peligro, se establecieron medidas de corrección o prevención para los riesgos clasificados con una peligrosidad moderada, importante o intolerable. Dichas medidas tienen como objetivo disminuir la probabilidad de que el peligro pueda ocurrir o minimizar las consecuencias del mismo.

5. Responsabilidades.

Es responsabilidad del Coordinador de Operaciones velar por que las medidas correctivas y preventivas planteadas en este documento se ejecuten de manera correcta.

Es responsabilidad de los operadores y cualquier otro involucrado en la operación de eliminación de cianuro de sodio conocer los riesgos asociados que se estipulan en este documento, así como las buenas prácticas que deben realizarse para prevenir cualquier eventualidad durante la ejecución del proceso.

Cuadro resumen del análisis APR.

Actividad	Riesgo significativo	Clasificación	Medidas
Transporte de cianuro y cloro al lugar de trabajo Adición de cianuro y cloro al sistema de reacción/ inicio de agitación Toma de muestras Limpieza del agitador Transporte del recipiente de reacción y reactivos a almacenamiento Limpieza del lugar de trabajo	Contacto físico con sustancias peligrosas	Riesgo Químico	<p>Prevención:</p> <p>Para complementar el uso de EPP durante toda la operación, se adquirirán máscaras completas con filtros y protección visual para todos los involucrados en la operación.</p> <p>Las puertas de las bodegas se mantendrán abiertas para favorecer la ventilación del lugar. El personal se mantendrá en una posición a favor del viento siempre que sea posible.</p>
Transporte de cianuro y cloro al lugar de trabajo Adición de cianuro y cloro al sistema de reacción/ inicio de agitación Toma de muestras Limpieza del agitador Transporte del recipiente de reacción y reactivos a almacenamiento Limpieza del lugar de trabajo	Inhalación de gases tóxicos	Riesgo Químico	<p>Se mantendrá solo personal necesario en las cercanías de la operación.</p> <p>Se dispondrá de un traje desechable para el personal involucrado en las operaciones.</p> <p>Se verificará previo a la operación el buen estado del dique de contención para descartar obstrucciones y la presencia de sustancias incompatibles.</p>
Transporte de cianuro y cloro al lugar de trabajo Adición de cianuro y cloro al sistema de reacción/ inicio de agitación Toma de muestras Limpieza del agitador	Ingesta de productos químicos	Riesgo Químico	<p>La limpieza del agitador, debe realizarse antes de retirarlo de la tanqueta (enjuague) y posteriormente en seco. Todo recipiente contaminado con el producto químico, debe de descontaminarse y disponerse adecuadamente una vez finalizada la tarea.</p> <p>Mitigación:</p>

Actividad	Riesgo significativo	Clasificación	Medidas
<p>Transporte del recipiente de reacción y reactivos a almacenamiento Limpieza del lugar de trabajo</p>			<p>Se dispondrá de un kit de neutralización y contención de derrames. Dicho kit tendrá una capacidad de contener un 110% del posible derrame.</p>
<p>Adición de cianuro y cloro al sistema de reacción/ inicio de agitación</p>	<p>Cargas musculares por posturas estáticas asociadas a tiempos de espera</p>	<p>Riesgo Fisiológico</p>	<p>Mitigación: Se verificará que los operadores que participen en el proceso, no presenten condiciones previas que puedan aumentar las consecuencias de las cargas musculares estáticas como sobre peso o problemas de espalda. Los operadores presentes en el proceso, rotarán cada 30 minutos para la adición de reactivos al proceso, de manera que se reduzcan los tiempos de espera. Corrección: Se adquirirán plantillas antifatiga para retrasar los efectos de las cargas musculares estáticas.</p>
<p>Remoción del sistema de agitación. Transporte del sistema de reacción a almacenamiento. Transporte y almacenamiento del agitador.</p>	<p>Caída de objetos pesados</p>	<p>Riesgo Mecánico</p>	<p>Prevención: Los tanques de almacenamiento de subproductos del proceso se almacenarán en el nivel más bajo posible. Siempre se asignará dos operadores para la instalación, la remoción y el transporte manual del sistema de agitación. Cargas cuyo peso supere los 25 kg, deben manejarse con el montacargas o carretillas (cuando las condiciones del terreno y las características de la carga así lo permitan).</p>
<p>Conexión y operación del agitador</p>	<p>Incendio ocasionado por la</p>	<p>Riesgo de Incendio</p>	<p>Prevención: Se evitará sobrecargar las conexiones eléctricas y los toma corrientes.</p>

Actividad	Riesgo significativo	Clasificación	Medidas
	instalación eléctrica		<p>En complemento a las verificaciones del sistema eléctrico establecido en el Código Eléctrico, se realizarán mantenimientos preventivos al sistema eléctrico dos años.</p> <p>Se despejará el área de trabajo de cualquier fuente de ignición o material combustible previo al inicio de la operación.</p> <p>Las herramientas eléctricas se desconectarán al término de su función o pausa en el trabajo</p> <p>Mitigación: Se mantendrán extintores en zonas cercanas a la operación y debidamente rotulados.</p>
Adición de cloro al sistema de reacción / agitación	Explosión causada por reacciones químicas de alta velocidad	Riesgo Químico	<p>Prevención: La alimentación de agente oxidante se hará de forma intermitente.</p> <p>Mitigación: Se dispondrá de un kit de neutralización y contención de derrames. Dicho kit tendrá una capacidad de contener un 110% del posible derrame.</p>

Metodología de estimación de riesgo laboral

Para iniciar con la estimación de riesgo laboral, se tomaron en cuenta dos factores para cada uno de los peligros identificados: la severidad y la probabilidad.

La severidad indicará el daño que puede recibir el trabajador o la maquinaria en caso de que el riesgo se materializara y se clasificó en tres niveles de acuerdo con las consecuencias previsibles.

Severidad (S)	Consecuencias previsibles
Leve	<ul style="list-style-type: none">- Contusiones- Erosiones- Cortes superficiales- Esguinces- Irritaciones- Pequeñas quemaduras superficiales
Grave	<ul style="list-style-type: none">- Laceraciones- Quemaduras extensas- Conmociones- Fracturas menores- Enfermedad crónica que conduce a una incapacidad menor (sordera, dermatitis, asma)- Trastornos musculoesqueléticos
Muy grave	<ul style="list-style-type: none">- Amputaciones- Fracturas mayores- Intoxicaciones- Cáncer- Enfermedades crónicas que acorten severamente la vida- Incapacidades permanentes- Gran invalidez- Muerte

La probabilidad indica si es fácil o no que el riesgo se materialice en las condiciones existentes.

Probabilidad (P)	Criterios aplicados
Baja	<ul style="list-style-type: none"> - Es raro que pueda ocurrir - Se sabe que ha ocurrido en alguna parte - Pudiera presentarse en determinadas circunstancias - La exposición al peligro es ocasional - El daño ocurrirá raras veces
Media	<ul style="list-style-type: none"> - No es extraño que ocurra el daño - Ha ocurrido en algunas ocasiones - Existe constancia de incidentes o de accidentes por la misma causa - Los sistemas y medidas aplicados para el control del riesgo no impiden que el riesgo pueda manifestarse en algún momento dada la exposición - El daño ocurrirá en algunas ocasiones - La exposición al peligro es frecuente o afecta a bastantes personas
Alta	<ul style="list-style-type: none"> - El resultado es más probable si se presenta la exposición continua o afecta a muchas personas - Ocurrirá con cierta seguridad a medio o largo plazo - El daño ocurrirá siempre o casi siempre

Seguidamente se utilizó una matriz de importancia y clasificación de riesgo.

		Severidad		
		Leve	Grave	Muy grave
Probabilidad	Baja	Riesgo trivial	Riesgo tolerable	Riesgo moderado
	Media	Riesgo tolerable	Riesgo moderado	Riesgo importante
	Alta	Riesgo moderado	Riesgo importante	Riesgo intolerable

Actualización del informe APR

Este informe de identificación de riesgos se debe actualizar cuando se elijan nuevos equipos de trabajo, se introduzcan nuevas tecnologías en el proceso, se modifique el

acondicionamiento de los lugares de trabajo, cuando el proceso sea modificado de alguna forma o cuando en un control periódico se determine que las medidas de prevención no sean suficientes para garantizar la seguridad del trabajador.