

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**DISEÑO DEL CIRCUITO DE DESORCIÓN PARA  
TRATAR 200 KILOS DE CARBÓN ACTIVADO**

**TESIS**

Presentada por:

Bach. Modesto Avendaño Chura

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METALURGISTA**

TACNA – PERÚ

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**DISEÑO DEL CIRCUITO DE DESORCIÓN PARA  
TRATAR 200 KILOS DE CARBÓN ACTIVADO**

**TESIS**

Tesis sustentada, y aprobada el día 24 de julio de dos mil dieciocho por el Bachiller

Modesto Avendaño Chura, siendo el Jurado Calificador integrado por:

PRESIDENTE

  
.....  
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez


SECRETARIO

  
.....  
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

VOCAL

  
.....  
Ing. Daniel Jesús Zevallos Ramos

ASESOR

  
.....  
Ing. Zoilo Edgardo Valdivia Infantas

## **DEDICATORIA**

A Dios, por haberme guiado mis pasos y permitirme llegar a este punto y lograr mis objetivos trazados. A mis padres, por sus enseñanzas, inmenso sacrificio y entera confianza, en los malos y buenos momentos a lo largo de mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann – Tacna, asimismo agradecer a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, quienes contribuyeron en mi formación profesional para poder competir a todo nivel en este entorno minero metalúrgico, a mis amigos eternos y mi familia en general.

## CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Descripción del Problema	2
1.1.1 Antecedentes del problema	3
1.1.2 Problemática de la Investigación	4
1.2 Formulación del problema	4
1.3 Justificación e importancia	5
1.4 Alcances y limitaciones	6
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo general	6
1.5.2 Objetivos específicos	6
1.6 Hipótesis	6

1.6.1	Hipótesis general	6
1.6.2	Hipótesis específico	7
1.7	Operacionalización de variables	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO		8
2.1.	Antecedentes del estudio	8
2.2.	Bases teóricas	10
2.2.1	El carbón activado	10
2.2.2	Propiedades del carbón	12
2.2.3	Métodos de producción	13
2.2.4	Actividad física	14
2.2.5	Actividad química	15
2.2.6	Alternativa de regeneración	17
2.2.7	Desorción del carbón activado	18
2.2.8	Electrodeposición del oro	32
2.2.9	Celdas electrowinning	36
2.3	Definición de términos	40
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO		44
3.1	Diseño de la investigación	44
3.2	Población y muestra	44
3.3	Técnicas e instrumentación para recolección de datos	45
3.4	Procedimiento y análisis de datos	45

3.4.1	Procedimiento experimental	46
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS		66
4.1	Resultados	66
4.1.1	Resultados de las dimensiones del tanque de desorción	66
4.1.2	Diagrama del circuito de desorción del carbón activado	69
4.2	Análisis	70
CONCLUSIONES		71
RECOMENDACIONES		72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		73
ANEXOS		76

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de variables	7
Tabla 2. Propiedades de algunos carbones activados	11
Tabla 3. Características de carbón activado de diferente materia prima	12
Tabla 4. Soluciones de elución	22
Tabla 5. Datos iniciales	48
Tabla 6. Consideraciones de diseño equipo de desorción	53
Tabla 7. Consideraciones de diseño de celda	57
Tabla 8. Consideraciones de diseño celda electrolítica	59
Tabla 9. Parámetros de distribución de los electrodos	61
Tabla 10. Datos del tanque dosificador	63
Tabla 11. Datos del calentador	64
Tabla 12. Costo estimado de diseño del circuito de desorción	65



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama del proceso de producción mediante activación física	15
Figura 2. Diagrama del proceso de producción mediante activación química	16
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso ZADRA	24
Figura 4. Proceso de elución AARL	28
Figura 5. Esquema de la celda electrowinnig Zadra	36
Figura 6. Esquema de celda AARL	37
Figura 7. Esquema de la celda de grafito NIM	38
Figura 8. Esquema de la celda electrowinning con lana de acero tipo Mintek	39
Figura 9. Tanque de solución pobre	56
Figura 10. Distribución de los electrodos celda de electrodeposición	61
Figura 11. Electrodo: ánodo	62
Figura 12. Electrodo: cátodo	62
Figura 13. Tanque dosificador de cianuro	63
Figura 14. Calentador	64
Figura 15. Equipo de desorción del oro	66

Figura 16. Cátodo Interior de celda “espesor de polipropileno 1,57 cm	67
Figura 17. Estructura de la celda	68
Figura 18. Celda electrolítica y su estructura de la celda	68
Figura 19. Diagrama del circuito de desorción del carbón activado	69

## RESUMEN

El presente trabajo comprende en distintas fases para el diseño de tratamiento de 200 kilogramos de carbón activado que comprende básicamente en un tanque de desorción y en una celda de electroobtención para recuperar oro.

El tanque de desorción es donde ocurre la elución del oro por adición de reactivos y la celda de electroobtención es donde ocurre la precipitación del oro en el cátodo, basado al diseño.

Con respecto al estudio de diseño se logra obtener las dimensiones de equipo para la desorción de 0,2 toneladas de carbón activado de 1,88 m de altura con un diámetro de 0,54 m y las dimensiones de celda de electroobtención para extraer el oro de soluciones ricas en oro con medidas internas de 0,90 m de largo por 0,28 m de ancho y 0,33 m de altura; con una cantidad de 8 cátodos y 9 ánodos. Así mismo presenta el presente trabajo de tesis los diagramas que conforman los equipos de proceso para su construcción del equipo.

***Palabras clave: Circuito de desorción, carbón activado, diseño de circuito.***

## INTRODUCCIÓN

La cianuración es el principal proceso para la extracción de oro. A partir de la lixiviación con cianuro, el proceso de recuperación de oro está implicados operaciones unitarias básicas que marcan la etapa de pre-concentración de la solución como la adsorción en carbón activado del oro y la desorción de oro por el uso de una solución de cianuro, en la concentración y el pH apropiados, dando como resultado soluciones de metal que luego, se envían al proceso de recuperación convencional de oro.

La extracción del metal de intereses de carbón activado se realiza a temperaturas de orden de 358 K a 363 K (85 - 90 °C), por lo general bajo presión, produciendo soluciones resultantes aurocianídricas donde una concentración de oro puede alcanzar hasta  $5,0 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$  (1000 ppm). El oro se extrae de soluciones cianídricas por el proceso tradicional de electroobtención en lana de acero.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. Descripción del Problema**

El oro es un elemento poco reactivo y da lugar a un número bastante limitado de compuestos naturales, el oro puede presentarse libre o asociado a otras fases minerales, los sulfuros en particular, sus dimensiones pueden ser desde micrones hasta centímetros. El procesamiento de los minerales auríferos ha constituido siempre un reto en la minería. Las diferentes normas mineralógicas de las menas acompañantes del oro han complicado en cierta manera los procesos extractivos de este metal valioso, sin embargo, el estudio y la capacitación de las personas influyen con su procesamiento, han permitido pronto, con éxito el tratamiento de menas. Actualmente el procesamiento metalúrgico comprende el tratamiento por cianuración en pilas y recuperación de valores por adsorción con carbón activado, desorción, electrodeposición y fundición, para ello se usa también actividades complementarias, como son la reactivación “química y térmica” del carbón, todas estas actividades claramente cumpliendo con las medidas de seguridad y la de protección al medio ambiente.

Por lo mencionado es indispensable el planteamiento del problema, desarrollar cálculos y diseño del circuito de desorción para recuperar minerales de oro, gran necesidad para la pequeña y mediana minería.

### **1.1.1 Antecedentes del problema**

El proceso lixiviación del oro representa el método más importante desarrollado para la extracción del oro y es la técnica más usada a escala comercial en el mundo. Por esa razón, resulta de suma importancia comprender los fundamentos de la lixiviación de menas auríferas y las diversas tecnologías que se aplican en la actualidad, es de importancia el control de parámetros de proceso que involucran la extracción del oro desde sus menas y el tratamiento de menas difíciles de lixiviar.

La recuperación de oro desde soluciones cianuradas se basa en dos procesos de actualidad, como la tecnología del carbón activado y el proceso Merril - Crowe. Ambas técnicas son revisadas prestandose especial incidencia en la selección de la más óptima de acuerdo a las características del proceso. La solución de lixiviación, enriquecida en oro y plata se colecta sobre el piso el carbón cargado

con oro es sometido al proceso de desorción en volúmenes alcalinos, estos son aspectos básicos para diseñar una planta de desorción y electroobtención, trabajo del presente trabajo.

### **1.1.2 Problemática de la Investigación**

En el presente estudio se quiere conocer la desorción de oro del carbón activado y la experiencia al desarrollar el diseño de una planta piloto para obtener el oro en forma de cemento por medio de la electroobtención del oro a partir de la elución de oro a partir del carbón activado.

El desarrollo del diseño y la eficiencia de lograr equipos que tengan el 98 % de recuperación del oro es un desafío del presente trabajo y será exitoso si se conoce los parámetros de elución y electroobtención.

## **1.2 Formulación del problema**

Actualmente se hace la necesidad de que más empresas cuenten con el diseño de equipos para la recuperación de oro del carbón activado, usados para la extracción de oro de soluciones cianuradas.

El carbón activado sometido a desorción de acuerdo a sus propiedades tiene diversas aplicaciones, un efecto negativo es la emanación de gases en el ciclo de desorción y electroobtención del oro durante el proceso, lo cual contamina el medio ambiente en la concentración de oro.

### **1.3 Justificación e importancia**

Los costos por problemas de no contar con una planta de adsorción pueden ser enormes, la solución de este tipo de problemas les cuesta a las mineras o plantas metalúrgicas mucho dinero

El estudio se concentra en hacer cálculos que nos garantice el diseño de una planta de desorción que incluye la electroobtención del oro, de ahí que surge la necesidad de hacer una tesis con estas características como nueva alternativa más eficientes y económicas para resolver este problema industrial que no sólo afecta a las empresas mineras sino en general a todo el sector industrial del país, en el sentido de transportar carbón cargado de oro para que se realice la desorciones en otras empresas.



## **1.4 Alcances y limitaciones**

El presente trabajo de tesis trata de diseñar el tratamiento de obtención de oro por precipitación aplicando la desorción y electroobtención del oro; las limitaciones son exactamente la falta de información de diseño de equipos en los procesos metalúrgicos.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

- Calcular y diseñar el circuito de desorción para tratar 200 kilogramos de carbón activado cargado de oro.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Calcular las dimensiones de los equipos para la desorción.
- Calcular las dimensiones de celda de electroobtención.

## **1.6 Hipótesis**

### **1.6.1 Hipótesis general**

- Es posible diseñar el circuito de desorción para tratar 200 kg carbón, para contenidos de 7 gramos por kg de carbón, considerando variables como la concentración de reactivos, flujo de soluciones, capacidad de carga del carbón.

### 1.6.2 Hipótesis específico

- Al determinar las dimensiones del tanque de desorción basado en modelos matemáticos nos permitirá la desorción del oro en condiciones adecuadas.
- Al dimensionar la celda de electroobtención nos permitirá tratar soluciones de desorción en condiciones favorables.

### 1.7 Operacionalización de variables

Tabla 1.

Operacionalización de variables

<b>Variables</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Dependiente:</b> Calidad del diseño	• Evaluación de los materiales • Geometría de la celda
<b>Independiente:</b> Desorción para tratar 200 kg de carbón activado	• Capacidad de celda • Flujo de soluciones • Concentración de reactivos

Fuente: Elaboración propia.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes del estudio**

El carbón activado es una alternativa al uso del cinc en el proceso de recuperación del oro disuelto en una solución, producto del proceso de cianuración de un material aurífero. Entre las ventajas de este medio de recuperación está la reutilización del carbón, el evitar la acumulación de complejos de cinc y otros metales en la solución recirculante en los circuitos de cianuración, su gran eficiencia y relativa simplicidad tecnológica.

En el caso particular que aquí se expone se usa el método de carbón activado en columna. En este método, la solución aurífera clarificada, entra en contacto con el carbón activado, dispuesto en un lecho dentro de torres empacadas, de tal manera que el oro queda adsorbido en el carbón mientras la solución sale del sistema desprovista de oro, lista para ser reacondicionada para volver al ciclo en un nuevo proceso de cianuración. Por todo, se sigue una secuencia operativa de tres fases: la primera fase es la adsorción en columna, la segunda, la desorción del carbón cargado en la primera

y la tercera fase, la electroobtención. Con la desorción se despoja la solución del oro contenido y se carga el carbón activado con este mismo. En la desorción se obtiene una solución altamente concentrada de oro, propicia para ser electrolizada en el proceso de electroobtención. En 1950 cuando se descubre la reutilización de carbón activado, surge la idea de estudiar un método que pueda de sorber el oro adsorbido el cual es el método Zadra. El método Zadra es un proceso eficiente para la elución de oro y plata a partir del carbón activado.

El descubrimiento de J. B. Zadra de un método de desorción fue a inicios de 1950 que hizo posible la aplicación de la escala comercial del proceso CIP (Carbón en Pulpa). La técnica desarrollada por Zadra en la US. Bureau of Mines fue comercializada por primera vez por la Homestake Gold Mining en South Dakota en 1973. La tecnología CIP fue previamente probada en la Getchell Mine en Nevada 1950 y la Carlton Mill en Cripple Creek, Colorado (1954 - 1960). Durante los 10 últimos años, se ha visto la aparición de cuatro técnicas de elución: El proceso Atmosférico Zadra, el proceso de Re extracción con alcohol, Proceso de re extracción a alta presión y el Proceso Anglo Americano.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1 El carbón activado**

El carbón activado, es una forma de carbón procesado para tener poros pequeños y de bajo volumen que aumentan el área de superficie disponible para la adsorción o las reacciones químicas. Activado a veces se sustituye por activo. Debido a su alto grado de microporosidad, solo un gramo de carbón activado tiene una superficie superior a 3 000 m<sup>2</sup> (Dillon, 1989), según lo determinado por la adsorción de gas. Un nivel de activación suficiente para una aplicación útil puede obtenerse únicamente a partir de un área superficial elevada; sin embargo, el tratamiento químico adicional a menudo mejora las propiedades de adsorción.

El carbón activado generalmente se deriva de carbón. Los derivados del carbón y el coque se denominan carbón activado y coque activado, respectivamente. El carbón activado puede producirse desde: la turba, la lignita, ciertos desechos agrícolas, domésticos o industriales, también se han encontrado como materias primas útiles en la producción de carbón activado. El uso de materias primas agrícolas, como la cáscara de almendra, cáscaras de nueces, salvado de trigo, cáscaras de grano, mazorcas

de maíz, bambú, cáscara de maní, hojas de té, productos de madera (aserrín), y piedra de olivo en la fabricación de carbón activado. Los huesos de animales también se han utilizado en la preparación de carbón activado a través de medios químicos y térmicos a una temperatura entre 673 K a 1 273 K.

Tabla 2.

Propiedades de algunos carbones activados obtenidos a partir de diferentes materias primas.

<b>materia prima utilizada</b>	<b>Cascara de coco y cuescos de carozos</b>	<b>Carbón vegetal</b>	<b>Lignito</b>	<b>Madera en polvo</b>
Microporo	Alta	Alta	Media	Baja
Macroporo	Bajo	Medio	Alto	Alto
Dureza	Alto	Alto	Bajo	No aplicable
Cenizas	5 %	10 %	20 %	5 %
Cenizas soluble en agua	Alta	Baja	Alta	Media
Polvo	Bajo	Medio	Alto	No aplicable
Reactivación	Buena	Buena	Pobre	No
Densidad aparente	0,48 g/cm <sup>3</sup>	0,48 g/cm <sup>3</sup>	0,48 g/cm <sup>3</sup>	0,35 g/cm <sup>3</sup>
Numero de yodo	1 100	1 000	600	1 000

Fuente: Carbochem, Ardmore, USA. 1999.

### 2.2.2 Propiedades del carbón

Los carbones activados se utilizan por su estructura granular, los que tienen una gran superficie específica, las que permiten un alto grado de adsorción del oro y la plata, desde las soluciones cianuradas ricas a la superficie de estos carbones. A nivel industrial el método de adsorción por carbón activado es el más usado.

El carbón activado se fabrica a partir de la corteza del coco debido a su dureza lo que lo hace más resistente a la abrasión y la rotura, además su capacidad de adsorción es mayor que otros carbones activados fabricados a partir de otros materiales. Ver tipos de Carbones.

Tabla 3.

Características de carbón activado de diferente materia prima.

<b>Marca comercial</b>	<b>Materia prima</b>	<b>Dureza (%)</b>	<b>Índice de Iodo (mgI<sub>2</sub>/mg C.A)</b>	<b>Capacidad de carga k(mgAu/g C.A.)</b>
Calgon GRC-22	Cascara de coco	91,6	955	24
Norit RO-3515	Hulla bituminosa	95,2	890	18
Quimicarb	Cuesco de palmiste	87,9	525	14

Fuente: Valencia, C. 1993.

### **2.2.3 Métodos de producción**

Los carbones activados comerciales son fabricados a partir de materiales orgánicos que son ricos en carbono, especialmente carbón mineral, madera, huesos, cáscaras de frutas (como, por ejemplo, cáscaras de coco, de nuez y de maní), cuercos de carozos, aceites pesados de petróleo, celulosa, azúcar, aserrín, desechos de leche, granos de maíz, hollejos de legumbre, etc. La elección del precursor es una función de su disponibilidad, precio y pureza de éste, pero el proceso de fabricación y la posible aplicación del producto final deben ser también considerados para elegir la materia prima a utilizar. Los procesos de fabricación se pueden dividir en dos tipos: activación física o térmica y activación química. La porosidad de los carbones preparados mediante activación física es el resultado de la gasificación del material carbonizado a temperaturas elevadas, mientras que la porosidad que se obtiene en activación química es generada por reacciones de deshidratación química, que tienen lugar a temperaturas más bajas. En palabras simples, la activación consiste en "multiplicar" la cantidad de poros de un carbón dando como resultado una estructura extremadamente porosa de gran área superficial disponible para llevar a cabo el proceso de adsorción en las diferentes aplicaciones ya mencionadas.



#### **2.2.4 Actividad física**

Normalmente se lleva a cabo en dos etapas: la carbonización del precursor y la gasificación controlada del carbonizado. La carbonización es la transformación de la materia prima a carbón en la cual se eliminan elementos como el hidrógeno y el oxígeno del precursor, para dar lugar a un esqueleto carbonoso con una estructura porosa rudimentaria. Este proceso se realiza en ausencia de oxígeno a temperaturas inferiores a 973 K. En la activación el material sólido se expone a una atmósfera oxidante (oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono, o una mezcla de éstos) a temperaturas entre 1 073 K y 1 273 K, que elimina los productos volátiles, aumentando el volumen de poros y la superficie específica al oxidar parte de las moléculas de carbono. La activación es el proceso de oxidación lenta del carbón resultante por medio del cual se forman millones de poros microscópicos en la superficie del carbón. La carbonización y la activación se realizan principalmente en hornos rotatorios construidos en acero inoxidable y materiales refractarios para soportar las altas temperaturas de activación, cercanas a 1 273 K. Cuando se utiliza como materia prima un material orgánico (ya sea, cáscara de coco, cuercos de frutas u otro), el proceso debe comenzar con la carbonización del material.

Es en estos casos en el cual se debe optar por la fabricación de carbón activado mediante activación física. El siguiente diagrama muestra a grandes rasgos las etapas involucradas en la obtención de carbón activado mediante activación física.

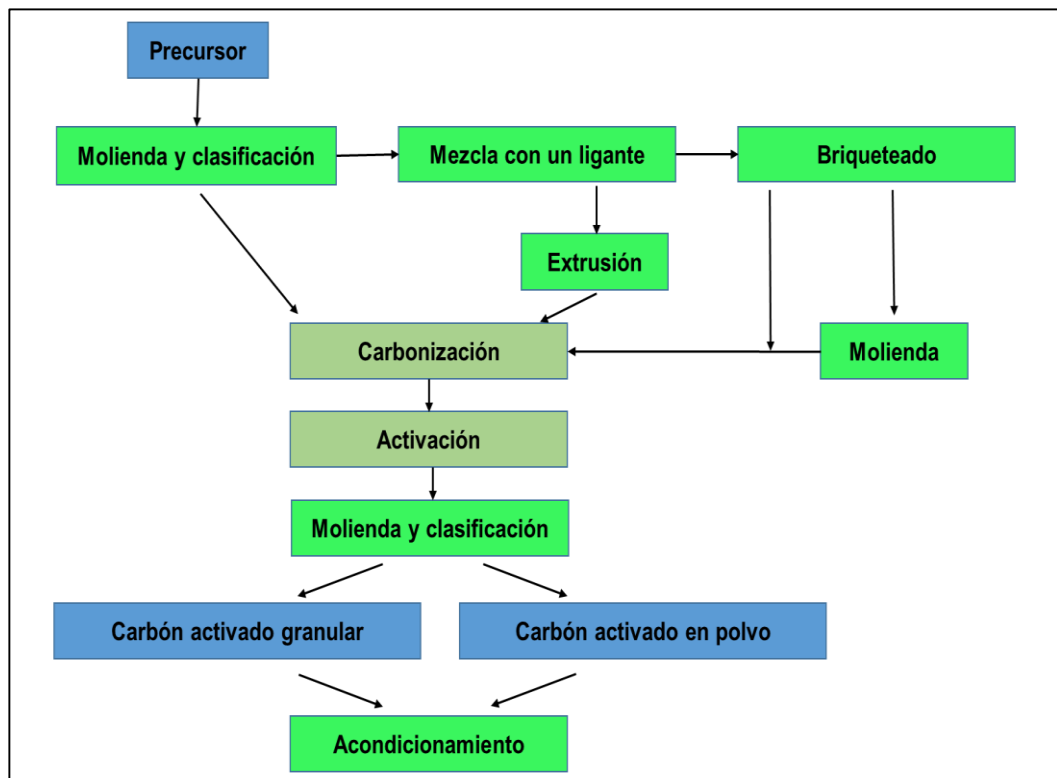


Figura 1. Diagrama del Proceso de Producción mediante Activación Física.

Fuente: Menéndez, A. & Martín – Gullón, I. 2008.

### 2.2.5 Actividad química

En este caso el precursor, normalmente un material ligno celulósico como madera, se impregna con un agente químico, preferentemente ácido fosfórico (aunque también se puede utilizar

cloruro de cinc), y el material impregnado se calienta en un horno a 273 – 973 K. Los agentes químicos utilizados reducen la formación de material volátil y alquitranes, aumentando el rendimiento en carbono. El carbón resultante se lava profundamente para eliminar los restos del agente químico usado en la impregnación. Adicionalmente, estos carbones pueden ser activados térmicamente por gasificación parcial con dióxido de carbono o vapor de agua para obtener carbones activados con elevadas áreas superficiales para aplicaciones como el almacenamiento de gas natural.

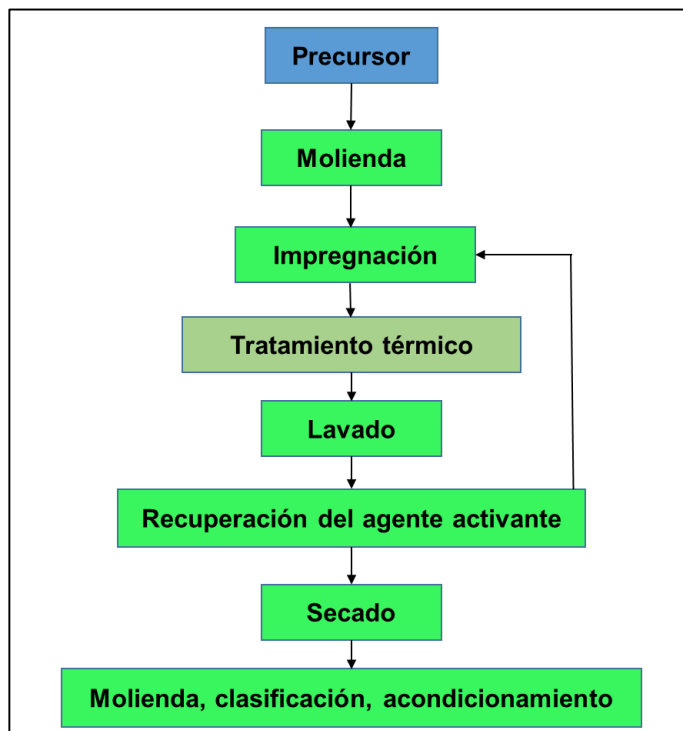


Figura 2. Diagrama del Proceso de Producción mediante Activación Química.

Fuente: Menéndez, A. & Martín – Gullón, I. 2008.

### **2.2.6 Alternativa de regeneración**

Una vez que el carbón activado ha sido saturado con los componentes que debe adsorber en una aplicación industrial puede ser regenerado mediante una serie de procesos, para así recuperar su estado original. Las ventajas de la regeneración son principalmente que se reduce el costo para el usuario y que se reduce el problema de la eliminación o almacenamiento del material gastado.

La regeneración puede hacerse en la propia instalación del usuario o en los sistemas de regeneración de los propios fabricantes. El método más simple de regeneración es la desorción de las sustancias adsorbidas por tratamiento térmico o por desgasificación. Lo que se suele hacer es pasar una corriente de vapor de agua sobrecalentado o de gas inerte a alta temperatura a través del lecho de carbón; este procedimiento es la base del proceso de recuperación de disolventes y del sistema PSA (pressure swing adsorption) utilizado en la separación de mezclas de gases. En algunos casos la regeneración se lleva a cabo en condiciones de activación para descomponer y desorber las sustancias adsorbidas y es en la práctica una reactivación. Aunque es posible regenerar

cualquier tipo de carbón activado, la regeneración está en este momento casi restringida al carbón granular, por su mayor costo, porque en el caso del carbón en polvo las pérdidas de material pueden ser demasiado elevadas.

### **2.2.7 Desorción del carbón activado**

El carbón cargado es tratado en la etapa de desorción para extraer los metales preciosos. Esta etapa de desorción tiene cuatro componentes principales: las columnas de elución de carbón; el equipo de concentración de metal; el equipo para manipular el carbón; y el equipo de calentamiento e intercambio de calor.

Las columnas de elución de carbón pueden ser manejadas en contracorriente; sin embargo, un solo reactor es mayor mente usada. Los parámetros más importantes son las características del carbón, flujo de circulación, la temperatura de la columna de elución y la eficiencia del equipo.

La solución resultante es sometida a un proceso de electrodeposición o cementación con zinc para recuperación y fundición de oro y plata.

**a. Sistema de calentamiento**

El circuito de elución recibe el carbón cargado frío para luego ser tratado en un circuito caliente. El equipo calentador, una caldera o un calentador eléctrico, calienta la solución a la temperatura de trabajo. La solución caliente los componentes del circuito y mantiene la temperatura de la columna de elución. La columna debe ser aislada para impedir pérdidas excesivas calor. Una vez que el circuito ha calentado, una serie de intercambiadores de calor transfieren calor a la solución de elución dejando la columna y calientan la solución de elución que ingresa a la columna. Las pérdidas de calor son altas, con ciclos frecuentes. El agua caliente o calderas generadoras de vapor se usan comúnmente para proveer la energía necesaria para calentar la solución de elución. Unos intercambiadores de calor transfieren el calor del vapor o el agua caliente para la solución. La máxima tarea de la caldera, que es proveer los requerimientos de calor para la puesta en marcha y minimizar las pérdidas de calor luego de la puesta en marcha. El equipo, el carbón, y la solución deben calentarse desde la temperatura ambiental hasta la temperatura de operación. A partir de la totalidad de componentes la capacidad de calentamiento de estos, la temperatura se incrementa hasta llegar al requerimiento de

la operación, esta es una forma de estimar la energía requerida, y luego se divide por los tiempos de cada ciclo. Las pérdidas de calor del sistema también deben ser incluidas en cálculo de energía. Las pérdidas incluyen pérdidas por convección y radiación de la columna de elución, el sistema de tuberías, los cambiadores de calor, los tubos de la caldera, y la distribución de las partes metálicas. Estas pérdidas de calor pueden calcularse basadas en la temperatura de trabajo del equipo y el coeficiente de transferencia de calor del interior del equipo al ambiente circundante. El requerimiento energético es la suma del calor para calentar el sistema y las pérdidas de calor.

**b. Columnas de desorción**

Las columnas de desnudación proveen contacto entre la solución caliente para la desorción y el carbón activado cargado en las condiciones necesarias para extraer los complejos de cianuro y los metales presentes. La columna de desorción es aislada para reducir la pérdida de calor. El carbón está cargado en la columna de elución usualmente mediante bombeo. El sistema está sellado y el carbón es despojado del oro y la plata. El carbón está entonces descargado de la columna y trasladado de regreso al circuito de

adsorción. Para el contacto eficiente con el carbón, el recipiente es típicamente una columna con una altura en proporción al diámetro en una razón de 3 a 6.

La carga de equilibrio del carbón activado para una solución de lixiviación puede exceder los 19,84 kg por tonelada de carbón; Sin embargo, el nivel de la carga operativa es muy inferior. Un carbón cargado de 4,25 kg/T a 5,66 kg/T de oro puede obtenerse bajo condiciones normales con concentraciones de oro en la solución de lixiviación por encima de 1 ppm. El carbón también puede contener otros complejos metálicos de cianuro como cobre, mercurio y zinc.

Para la desorción del carbón, una solución caliente es circulada a través del carbón. Muchas composiciones de soluciones eluyentes son posibles. La selección de composición de la solución eluyente está basada en la seguridad, facilidad de operación, costo de capital, y costo de operación. Cada solución debe funcionar en una temperatura particular y para que en un tiempo en particular obtenga una solución concentrada y rica. La USBM originalmente efectuó la desorción del carbón con una solución de 1 % de NaOH y



0,1 % de cianuro de sodio cerca del punto de ebullición de agua. Dos para tres días fueron requeridos para la desorción. La siguiente tabla ilustra varias soluciones diferentes con sus temperaturas y tiempos requeridos. Otras soluciones con variadas cantidades de orgánicos han sido usadas en África del Sur y Australia.

Tabla 4.  
Soluciones de elución

Composición	Temperatura K	Tiempo - horas
1 % NaOH 0,1 % NaCN	368	52
1 % NaOH 0,5 % Etanol	393	9
1 % NaOH	358	24
1 % NaOH 0,1 % NaCN	350	24

Fuente: 911 Metallurgist. 2017.

El flujo de la solución debe proveer buen contacto del carbón. Dos BV (bed volumen) de solución de elución por hora son a menudo seleccionados para obtener una buena relación entre la eficiencia del proceso y de la ley de la solución rica resultante. Flujos de menos

de 0.5 BV por hora puede dar como resultado puntos muertos en la columna, mientras las tasas de flujo de solución en exceso de seis volúmenes a menudo generarán una solución de baja concentración. Estos parámetros pueden disentir significativamente si la geometría de las columnas de elución es significativamente diferente de una proporción de cuatro a uno de la altura respecto al diámetro de la columna.

Hay un número de métodos comúnmente usados para extraer el oro y la plata del carbón cargado. Los métodos de desorción más comúnmente usados son:

**c. El proceso atmosférico Zadra**

Este proceso fue desarrollado por Zadra en la U.S. Bureau of Mines, comprende la reextracción de oro, a partir del carbón cargado usando una solución conteniendo 0,1 % de NaCN y 1 % NaOH a una temperatura de 358 K a 368 K. El proceso es llevado a una presión atmosférica y el tiempo total requerido para desorber el carbón hasta un nivel lo suficientemente bajo de oro puede estar en el rango de 24 – 60 horas, dependiendo de la solución y modo de operación.

Este proceso es simple y los costos de capital y operación son relativamente bajos, los cuales lo hacen altamente apropiado para operaciones a pequeña escala. Sin embargo, el ciclo de tiempo largo requerido para la elución efectiva puede ser un factor limitante para plantas a mayor escala.

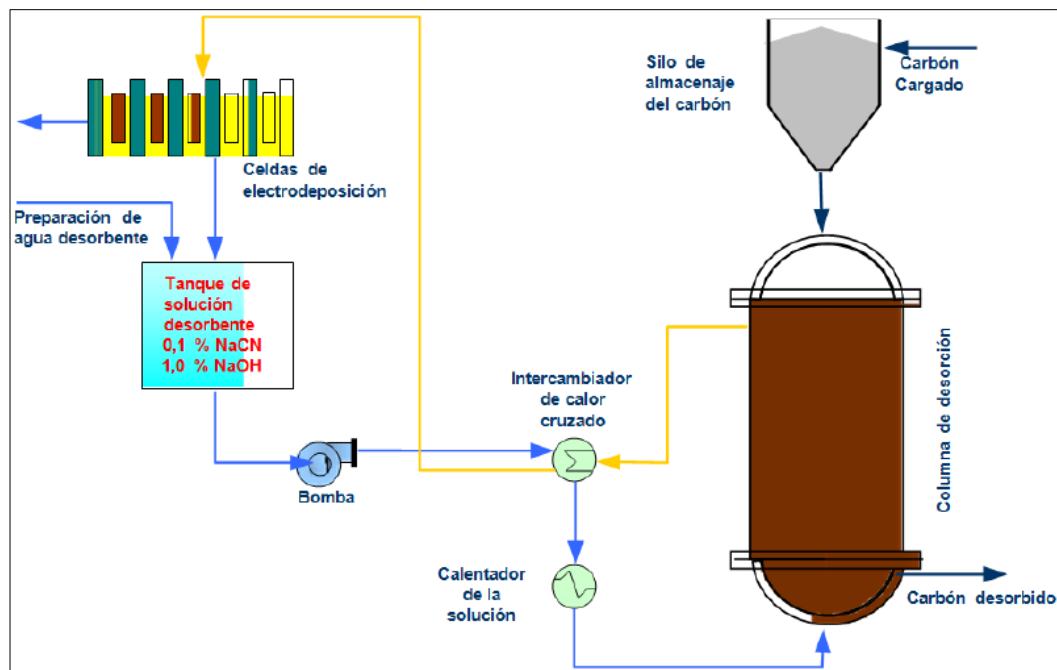


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de desorción Zadra.

Fuente: Linares, N. 2015.

#### d. Proceso de reextracción con alcohol (Zadra - Heinen)

Este proceso fue desarrollado por Heinen en la U.S. Bureau of Mines y es básicamente una extensión del proceso atmosférico Zadra.

El carbón cargado es desorbido usando una solución conteniendo 0,1 % de NaCN, 1 % de NaOH y 20 % de alcohol en volumen a una temperatura de 353 K. El proceso es operado a presión atmosférica y la adición de alcohol a la solución de desorción reduce significativamente el ciclo de elución a 5 - 6 horas. Las mayores ventajas y desventajas de los procesos Zadra - Heinen son las siguientes:

#### Ventajas:

- Los sistemas pueden tolerar agua de baja calidad en la elución (alto contenido de sólidos disueltos y concentraciones altas de iones Ca y Mg). La elución puede ser simplemente continuada hasta que exista suficiente oro fuera del carbón;
- La temperatura de los sistemas de elución es mantenida dentro del proceso porque la solución es recirculada, el único aporte de calor necesario es para mantener la temperatura de desorción.
- El volumen de solución es relativamente pequeño por lo que el consumo de reactivo es pequeño.

Desventajas:

- Para una elución rápida se requiere una presión alta.
- Las impurezas que se acumulan durante la elución son recirculadas y promueven una mala electrodeposición.
- Posibilidad de alto riesgo de incendio asociado con el alcohol y mayores costos de operación debido a las pérdidas de alcohol por volatilización.

**e. Proceso de Zadra presurizado**

Este proceso fue desarrollado en la U.S. Bureau of Mines, básicamente incluye la reextracción del carbón cargado con una solución conteniendo 0,1 % de NaCN y 1 % de NaOH a una temperatura y presión de trabajo es 433 K y 50 psi de presión durante 2 – 6 horas.

El efecto de usar alta presión para la reextracción es reducir el consumo de reactivo, inventario de carbón y el tamaño de la sección de reextracción. Sin embargo, las presiones y las temperaturas elevadas asociadas con este proceso requieren el uso de equipo más costoso y las soluciones efluentes tienen que ser enfriadas antes de la reducción de presión para evitar relampagueos.

**f. El proceso de desorción AARL**

Este proceso fue desarrollado por R. J. Davidson en la Anglo American Research Laboratories (AARL), el cual se ha hecho popular en Sud África y Australia. El uso de temperaturas y presiones elevadas implican un alto costo de capital en la instalación y el requerimiento de flujos múltiples aumenta la complejidad del circuito.

La Figura 4 representa el circuito AARL; el carbón cargado es colocado en la columna de elución desde una tolva de almacenamiento de carbón. La columna de elución es completamente llenada, y el carbón es primero tratado con un lavado ácido con una solución al 3 % en volumen de ácido clorhídrico de volumen.

Luego se hace un lavado con agua equivalente de uno a dos volúmenes de la cama (el volumen de la cama guarda relación con el volumen de la columna vacía). Durante este período el sistema eleva su temperatura 383 K y la presión 35 a 50 psi (2,4 - 3,4 atmósferas), mientras el ácido es descargado.

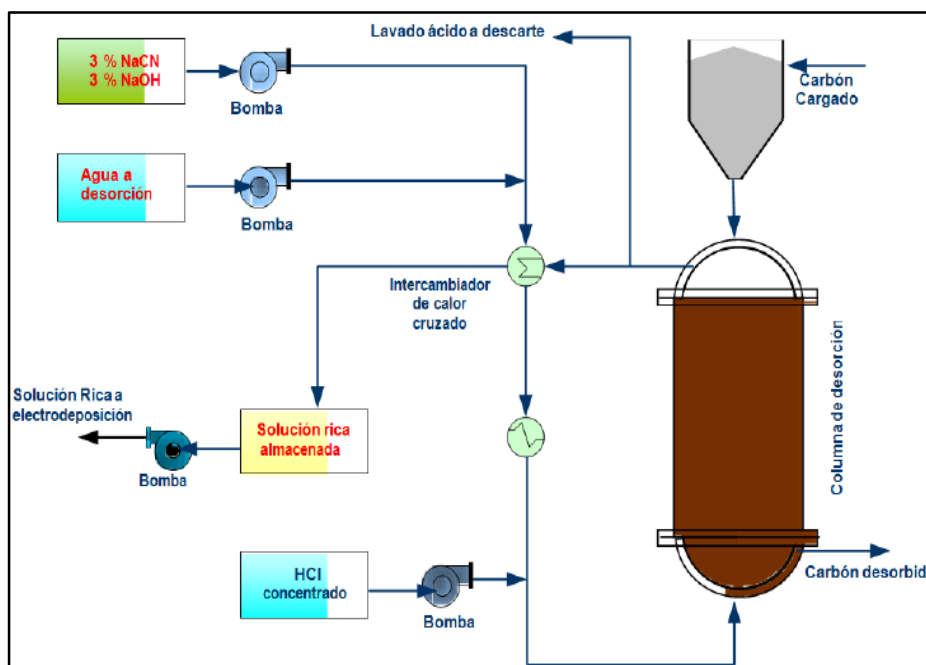


Figura 4. Proceso de elución AARL.

Fuente: Linares, N. 2015.

El carbón luego de haber sido lavado con ácido es pre-tratado con 0,6 BV de una solución compuesta por 3 % de NaCN y 3 % de NaOH. El carbón es tratado con esta solución por cerca de 30 minutos. El oro y la plata son eluidos por una adición de agua.

El agua fluye a través del carbón a un flujo equivalente a 2 BV por hora usando un total de 5 a 6 BV. El agua usada para la elución debe ser de alta calidad, preferiblemente con menos de 1 500 ppm de sólidos disueltos. Las principales ventajas y desventajas del proceso AARL son las siguientes:

#### Ventajas:

- El sistema de elución AARL es muy flexible por el tiempo de elución relativamente corto. El ciclo total de elución generalmente puede ser ejecutado en ocho horas.
- El sistema de elución AARL limita degradación del horno de regeneración de carbón. Esto es porque los contaminantes están todo el tiempo extraídos con solventes del carbón por una solución de elución fresca.
- El sistema AARL trabaja bien a 383 K y, por consiguiente, un sistema alto de presión no es requerido.

#### Desventajas:

- AARL requiere relativamente agua de buena calidad y, preferentemente menos de 1 500 ppm de sólidos disueltos para la elución acelerada y es en particular sensible a la presencia de Ca y Mg en exceso de 100 ppm.
- La cantidad de electrolito generado por el proceso AARL para la electrodeposición es mucho mayor a la generada por el proceso Zadra. Este volumen crea una diferencia en la forma de hacer los balances y costos operativos considerando la energía requerida.



**g. Manejo del Carbón después de la desorción**

Tres otras operaciones que manejan el carbón están también presentes en la mayoría de circuitos de desorción, la limpieza, la regeneración, y la clasificación. El objetivo de estas operaciones es preparar el carbón para un nuevo uso. El carbón requiere un área superficial alta, una buena resistencia mecánica, y una buena distribución de tamaño que promueva la cinética de adsorción de los complejos de metal de cianuro. El carbón es clasificado para impedir pérdidas durante la operación.

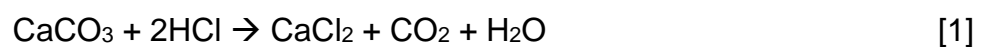
Usualmente se usan dos tamaños para la adsorción, 6 x 12 y 12 x 30. El tamaño más pequeño es más barato y mejora la rapidez de la adsorción. Pero también se tiene una mayor pérdida y se requiere un mayor consumo. Durante la limpieza del carbón, el barro y los depósitos minerales son removidos del carbón. El carbón puede ser limpiado cualquier antes o después de la operación de elución. El barro y los depósitos de minerales se remueven por enjuague con agua para quitar cianuro y luego se hace un tratamiento con una solución ácida caliente (1 a 3 por ciento de soluciones de ácido clorhídrico o nítrico). El tratamiento ácido puede hacerse a temperaturas de hasta 363 K. Ésta es una operación peligrosa y

debe ser realizada bajo estrictas medidas de control con operadores entrenados. El depósito de mineral es a menudo calcio (carbonato de calcio o el sulfato de calcio). El ácido debe ser compatible con disolución de estos depósitos. El ácido clorhídrico o el ácido nítrico son elecciones comunes. Los ácidos orgánicos deberían ser evitados, debido a su efecto en la actividad de carbón. Después de que el carbón haya sido despojado de metales y se hayan limpiado los depósitos de mineral, puede ser reactivado en un horno a temperaturas 863 a 1 073 K por 15 a 20 minutos bajo una atmósfera neutral o ligeramente oxidante conteniendo vapor de agua para restaurar los sitios activos. Las pérdidas altas de carbón pueden ocurrir dentro del horno ya que los requisitos de calor son altos. La inversión de capital es también alta. Hornos horizontales convencionales y hornos verticales pueden ser usados. El carbón saliendo a la temperatura de trabajo del horno debe ser enfriado para impedir su oxidación.

#### **h. Reactivación de carbón activado**

En el proceso de ADR, el carbón activado se utiliza para adsorber los complejos de cianuro de metales preciosos de la solución de lixiviación de alta impureza. El carbón activado se

somete a un lavado ácido donde el ácido clorhídrico (HCl) se usa para disolver principalmente el carbonato de calcio acumulado (CaCO<sub>3</sub>) como se muestra en la ecuación. A continuación: (Marsden y House, 2006).



Los metales preciosos se eliminan del carbono a una temperatura elevada de 408 K en una solución baja en impurezas a base de cáustico y cianuro. Los metales preciosos en el electrolito preñado se recuperan en la electroextracción. El carbono despojado se regenera en un horno a una temperatura de 923 K donde se ensucia el fouling orgánico. El carbono luego se recicla al circuito de adsorción.

### **2.2.8 Electrodeposición del oro**

La electrodeposición es un proceso electroquímico en el que se usa una corriente eléctrica para reducir cationes en una solución acuosa que los contienen para propiciar la precipitación de estos, que suelen ser metales, sobre un objeto conductor que será el cátodo de la celda, creando un fino recubrimiento alrededor de este con el material reducido. (Misari, 1993).

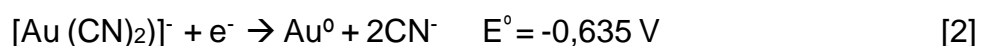
**a. Proceso de electro- obtención (EW)**

- El paso de la corriente entre los electrodos.
- El ánodo: material solido conductor en cuya superficie se realiza un proceso de oxidación con liberación de electrones.
- El cátodo: electrodo solido conductor en cuya superficie se realiza un proceso de reducción con los electrones provenientes del ánodo. En la actualidad tiene una gran importancia económica, al permitir el beneficio de recursos lixiviables, tanto el oro como el cobre, plata, etc.

**b. Reacción cátodo – oro**

En las soluciones alcalinas cianuradas, el oro es oxidado y disuelto hasta formar cianuro complejo de Au (I). El complejo de Au (I) es más estable que el complejo que podría formar el Au (III) por el elevado potencial que necesitaría. La reacción principal que se realiza en el cátodo tiene por objetivo la recuperación de oro de las aguas cianuradas.

La reacción es la siguiente:



El potencial exacto en el cual la reducción comienza, depende de las condiciones de la solución, tales como conductividad, las concentraciones de especies iónicas presentes y la temperatura. El mecanismo de la deposición electrolítica de oro probablemente se produce por la deposición de aurocianuro en el cátodo, seguida por la reducción de especies adsorbidas, como sigue:



El paso de la reducción catódica es entonces seguido por disociación de las especies reducidas:



### c. Reacciones en el ánodo

En la solución alcalina cianurada la mayor reacción en el ánodo es la oxidación de agua a oxígeno:



Esta reacción tiende a decrecer el pH de la solución junto al ánodo. El cianuro puede ser oxidado a cianato en el ánodo:



- **Leyes de Faraday**

Son las leyes fundamentales que gobiernan las reacciones electroquímicas fueron formuladas, en 1831, por Michael Faraday y describen lo siguiente. (Misari, 1993)

- **Primera ley de Faraday**

La masa que se deposita o libera en un electrodo es directamente proporcional a la carga eléctrica que atraviesa la solución.

$$W = Q K \quad [8]$$

W = masa depositada o liberada

K = constante de proporcionalidad

Q = carga eléctrica (Salcedo, 1987)

- **Segunda ley de Faraday**

Para una misma cantidad de electricidad, la masa de diferentes sustancias liberadas o depositadas son proporcionales a sus masas equivalentes. Podemos expresar esta ley indicando que en cada electrodo se deposita o libera el mismo número de equivalente gramo. (Salcedo, 1987).

## 2.2.9 Celdas electrowinning

Cuatro tipos de celdas han sido usados para electrowinning del oro de soluciones alcalinas de cianuro: celda AARL, Zadra, Celda de grafito NIM y celda de lana de acero Mintek.

### a. Celda Zadra

La celda electrowinning Zadra se muestra en la figura 5, consiste de un cátodo circular removible de compartimentos rellenos de lana de acero, el cual es colocado dentro de un ánodo circular de malla de acero stainless.

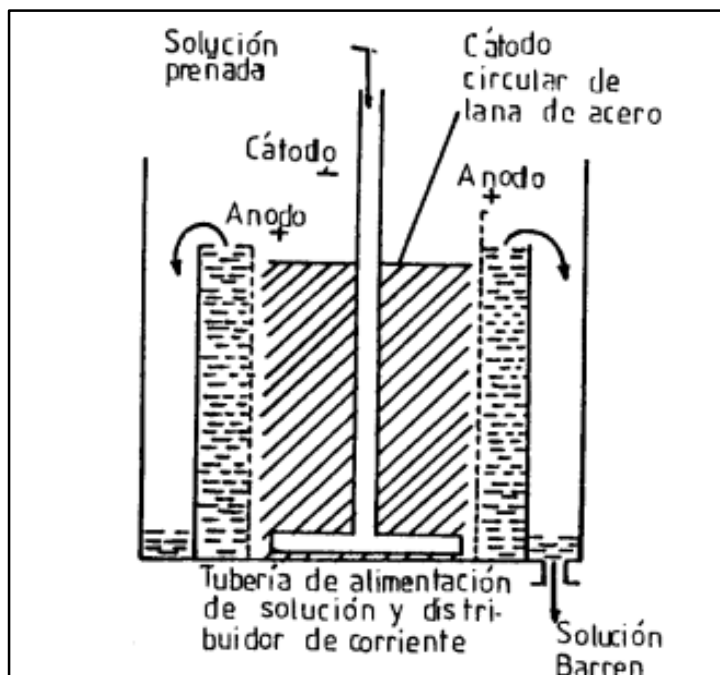


Figura 5. Esquema de la celda electrowinning Zadra.

Fuente: Méndez, J. 1989.

El electrólito es bombeado dentro por la base de la celda a través de una tubería. La solución fluye hacia arriba y hacia afuera a través de la lana de acero en el compartimiento del ánodo y finalmente rebosa por el tope del compartimiento del ánodo.

#### b. Celda AARL

La celda Anglo American Research Laboratory es una derivación del diseño Zadra. Los compartimientos del ánodo y el cátodo, sin embargo, son separados por una membrana catiónica Du Pont "Nafrón". El anolito consiste de un 10 a 20 % de solución de NaOH.

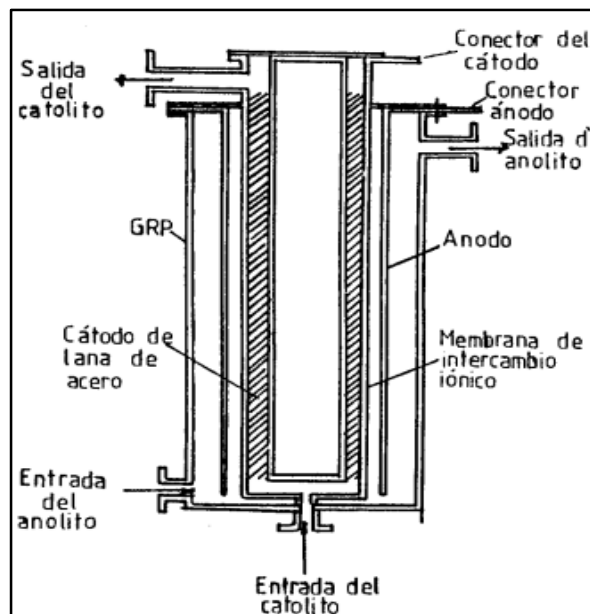


Figura 6. Esquema de la celda AARL.

Fuente: Méndez, J. 1989.



El material de la membrana es expansivo, pero puede ser usado a temperatura de 358 K, se expande considerablemente cuando se humedece.

**c. Celda de grafito NIM**

La celda de grafito NIM se muestra en la figura 7, es de tipo sánduche, comprimiendo un cátodo rectangular central de compartimientos llenados con gránulos de grafito. Esto fue separado a partir de los compartimientos del ánodo, sobre el otro lado, por membranas de intercambio catiónico.

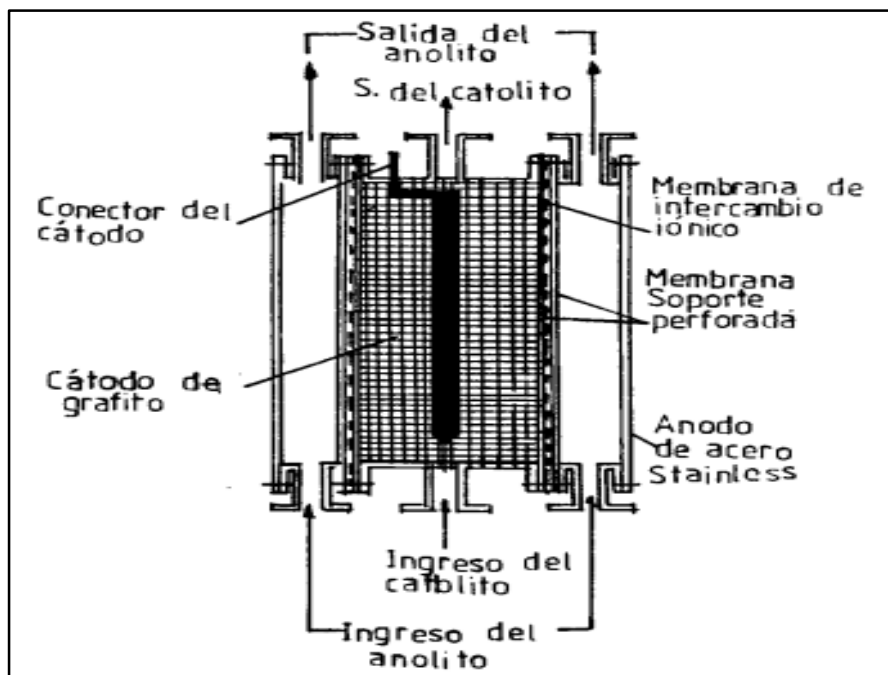


Figura 7. Esquema de la celda de grafito NIM.

Fuente: Méndez, J. 1989.

**d. Celda de lana de acero MINTEK**

La celda diseñada por Paúl Mintek en 1983, consiste de un tanque de acero stainless rectangular conteniendo 6 cátodos canastas y 7 ánodos (figura 8), los cátodos son construidos de polipropileno y empaquetaduras con 500 a 1 000 g de lana de acero. Los ánodos consisten de una malla de acero stainless # 316. La solución fluye desde el final del ánodo a través de los ánodos y cátodos alternados a si hasta el final.

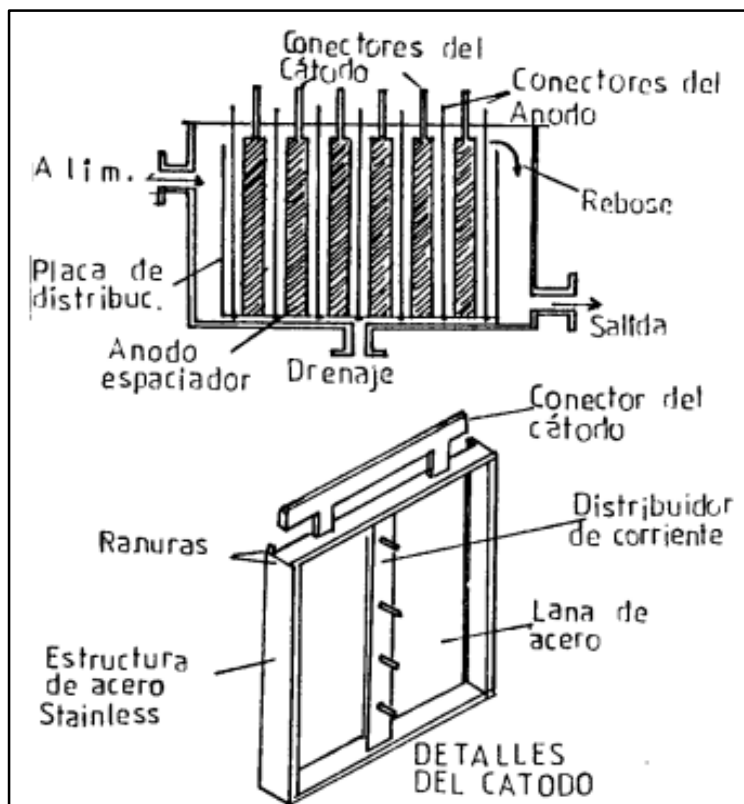


Figura 8. Esquema de la celda electrowinning con lana de acero tipo Mintek.

Fuente: Méndez, J. 1989.

La celda tiene dimensiones internas de 900 x 720 x 640 mm, dando un área seccional de 0,46 m<sup>2</sup> y un volumen de 400 litros. La celda está diseñada para operar a 150 L/min, dando un tiempo de residencia de 3 minutos. La celda arrastra una corriente de 500 a 800 A en un voltaje de 3 a 5 V.

### **2.3. Definición de términos**

#### **a. Concentraciones del electrolito**

A bajas concentraciones del electrolito la velocidad de difusión es lenta y, normalmente, es la que controla la totalidad del proceso. El proceso completo es controlado por difusión y se favorece la producción de polvo. Lo opuesto ocurre a concentraciones altas del electrolito.

#### **b. Temperatura**

Aumenta la temperatura aumenta la velocidad de difusión y la tasa de crecimiento de los cristales. Ambos factores favorecen a la formación de un depósito más grueso, de esa manera al aumentar la temperatura permite formar un depósito más coherente y grueso. (Sancho, 2000).

**c. Electrolisis**

Es la descomposición química de ciertas sustancias por medio de una corriente eléctrica que pasa a través de las sustancias mientras hay un estado disuelto o fundido.

**d. Amperímetro (A)**

Se emplea para medir la intensidad de corriente que pasa a través de un conductor o una resistencia, el amperímetro es conectado en serie y por ello se diseña con la menor resistencia posible.

**e. Voltímetro (V)**

Se emplea para medir la diferencia de potenciales entre dos bordes del circuito de una resistencia. Se conecta en paralelo y por ello se diseña con la mayor resistencia posible.

**f. Determinación de la densidad de corriente**

La densidad de corriente ( $j$ ) es la intensidad de corriente total ( $I$ ) que fluye por un conductor, dividida por el área de su sección transversal ( $S$ ). Las unidades más frecuentes empleadas en

electroquímica son amperios por centímetros cuadrados o amperios por decímetro cuadrado.

**g. Potencial estándar de celda**

También llamado potencial de simple electrodo es la diferencia de potencial entre el electrodo y la solución que le rodea. La FEM estándar de la celda es la diferencia de potencial estándar de oxidación y el de reducción.

**h. Sobre potenciales de celda**

Los sobres potenciales de celda están dados por la polarización, la sobretensión del hidrogeno y oxígeno, y las pérdidas de energía debido a conexiones y resistencias eléctricas.

**i. Polarización**

Cuando a través de la separación entre un electrodo y una disolución circula una corriente intensa, la diferencia de potencial entre una y otra difiere del valor de equilibrio y a la diferencia entre estos dos valores se le da el nombre de polarización.

**j. Sobretensión**

El incremento del valor del potencial de un electrodo, con respecto al potencial normal reversible, se llama sobretensión.

**k. Pérdidas de energía**

Las pérdidas de energía se deben a las resistencias que se producen por accesorios utilizados para la conducción de corriente.

**l. Rendimiento de recuperación por electrodeposición**

El rendimiento del equipo de electrodeposición se tornó en función a la cantidad de oro que recupera. El rendimiento del rectificador está dado por:

$$\% \text{ Rendimiento de recuperación} = \frac{\text{masa de oro recuperado}}{\text{masa inicial de oro}} \times 100 \quad [9]$$

**m. Equivalente electroquímico**

Se denomina equivalente electroquímico de una sustancia a la masa en gramos de dicha sustancia depositada por el paso de un culombio. (DeGamo, Black, & Kohser, 1994).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Diseño de la investigación**

El trabajo muestra diferentes etapas de diseño que se aplicaron al proyecto, donde el diseño empieza a tomar forma a medida que avanza el proceso y al mismo tiempo se genera la información adecuada que se considera y controla su avance.

#### **3.2 Población y muestra**

En este caso la población y muestreo de estudio se va realizar de acuerdo al diseño y construcción de una celda de electroobtención. Por tratarse de un proyecto de evaluación y de construcción de un equipo físico, la mejor manera de presentarlo será mediante la exposición de fotografía de acuerdo a las siguientes etapas:

- Cálculo de los parámetros de diseño.
- Selección de los materiales.
- Confección de los planos y utilizando el software de excel.
- Construcción de las piezas que conforman la celda.
- Ensamblaje final de la celda de electroobtención.

### **3.3 Técnicas e instrumentación para recolección de datos**

La celda de electroobtención debe cumplir la función para la cual es diseñada. Entre los principales requerimientos funcionales se tiene:

- La celda de electroobtención debe trabajar de forma continua hasta obtener la capacidad requerida.
- El equipo debe de ser de fácil operación, montaje, desmontaje de las partes para que pueda realizarse con comodidad y rapidez.

### **3.4 Procedimiento y análisis de datos**

El procedimiento y diseño de equipos a emplearse en el área de elución se diseñó con bases a la información y/o modelos matemáticos obtenidas de la bibliografía de este documento y ajustadas a los elementos disponibles en el mercado nacional.

El proceso atmosférico ZADRA comprende el re extracción de oro a partir del carbón cargado usando una solución de 0,1 % de NaCN y 1 % de NaOH a temperaturas entre 358 K y 368 K (85 - 95 °C).



### **3.4.1 Procedimiento experimental**

El proceso se lo realiza a presión atmosférica, y el tiempo total requerido para desorber el carbón hasta un nivel lo suficientemente bajo de oro puede estar en el rango de 24 – 60 horas, dependiendo de la solución y modo de operación.

El área de desorción está conformada por:

- Un caldero que proporciona calor y temperatura a la solución cianurada recirculante.
- El tanque de desorción, en donde estará el carbón para ser lavado con la solución recirculante y de esta manera liberar el oro.
- Celdas electrolíticas para precipitar el oro líquido en los cátodos utilizando corriente eléctrica.
- Acondicionador de solución barren.

#### **a. Lavado**

El carbón húmedo debe ser zarandeado y lavado para remover materiales extraños (arena, madera, etc.). El carbón zarandeado luego será colocado en la columna de carbón y llenado hasta un indicador de altura interno (una señal, una malla, etc.).

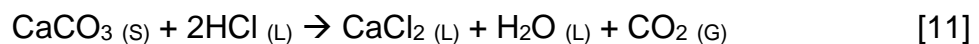
El carbón ideal para la desorción es un carbón húmedo conteniendo de 20 a 30 % de humedad, típico de un carbón que ha sido zarandeado para remover los elementos extraños.

El carbonato y/o sulfato de calcio a menudo precipita en los poros del carbón. Por su parte el ácido clorhídrico ha sido aplicado a elevadas temperaturas de aproximadamente 358 K (85 °C) en concentraciones de 1 a 5 %, dependiendo del cargado de constituyentes inorgánicos sobre el carbón y las condiciones de lavado ácido aplicadas.

La ecuación general para la disolución de un carbonato metálico divalente en el mineral con ácido está dada como sigue:



Así la ecuación estequiométrica es:



#### **b. Tanque de desorción**

Para el dimensionamiento de los equipos se tomó en cuenta los siguientes datos iniciales:

Tabla 5.

Datos iniciales, base de cálculo: 0,1 ton/semana de carbón procesado.

<b>Variables</b>	<b>Unidades</b>
Tiempo de retención adecuado para lograr la elución	12 horas
Velocidad lineal de flujo	0,5 cm/s
Densidad aparente del carbón	0,48 g/cm <sup>3</sup>
Densidad real del carbón	1,4 g/cm <sup>3</sup>
Capacidad másica de la columna	0,1 TM

Fuente: Pineda M. (2015).

Además, se tomó en cuenta consideraciones como:

- Material de los equipos
- Capacidad de los equipos
- Forma de operación
- Materiales y equipos existentes en el mercado local.

Después de pruebas en reactores a escala piloto, donde se optimiza las concentraciones iniciales de NaCN, NaOH y alcohol, se determina el tiempo de retención óptimo para la desorción, el mismo que será el tiempo de residencia, o el tiempo de contacto entre el carbón y las soluciones para realizar el stripping.

**c. Tiempo de residencia**

El tiempo de residencia es el tiempo en que una sustancia entra en contacto con otra para producir una reacción determinada. En nuestro caso el tiempo de residencia es el tiempo en que la solución recirculante permanece en contacto con el carbón activado dentro del tanque, para efectuar la desorción de metales.

Para encontrar el tiempo de residencia se debe realizar pruebas de laboratorio a fin de encontrar el tiempo óptimo de contacto para liberar el oro del carbón activo.

Aplicando la siguiente ecuación:

$$t_r = \frac{V}{Q} \quad [12]$$

**Dónde:**

$t_r$  = Tiempo de residencia (h)

V = Volumen del tanque en m<sup>3</sup> (volumen de contacto con el carbón)

Q = Caudal de tratamiento (m<sup>3</sup>/h)

• **Volumen de contacto:**

$$V \text{ contacto} = V \text{ aparente} + V \text{ fluidización} - V \text{ real} \quad [13]$$

- **Cálculo del volumen aparente y volumen real:**

$$V_{\text{aparente}} = \frac{\text{masa}}{\rho_{\text{aparente}}} \quad [14]$$

$$V_{\text{real}} = \frac{\text{masa}}{\rho_{\text{real}}} \quad [15]$$

Así, con estos dos parámetros, tanto Volumen a ocupar por el carbón, así como el tiempo de residencia, se puede calcular de la Ecuación [12] el caudal.

Cálculo del volumen de fluidización: tomando el 50 % del volumen aparente, por la fluidización. (Pineda, 2015)

$$V_{\text{fluidización}} = 0,5 (V_{\text{aparente}}) \quad [16]$$

- **Cálculo de la altura del tanque de desorción**

Para este cálculo debemos tener en cuenta la altura mínima que el tanque debe tener, relacionado con el volumen del carbón, fluidización y factores de seguridad en caso de incremento de carbón y/o del flujo. Para ello se emplea la ecuación de densidad, a fin de encontrar el volumen ocupado por el carbón.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [17]$$

Empleando además la ecuación [17] para el cálculo del volumen de un cilindro, Ecuación [18] siguiente:

$$V = \frac{\pi D^2 h}{4} \quad [18]$$

Es necesario considerar como criterio de diseño, acorde a (Milligan, 1999), que se debe guardar una relación altura/diámetro de 3 a 4.

$$\frac{h}{D} = 4 \quad [19]$$

Es decir, así: Combinando la Ecuación [18] y [19] y despejando tenemos el diámetro:

$$V = \frac{\pi D^2 4 D}{4} = \pi D^3 \quad [20]$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}} \quad [21]$$

Además, se debe tener en cuenta el efecto de la Fluidización, la que generalmente es del 50 %, de donde:

$$h_t = 0,5 (h_c) (f_s) \quad [22]$$

**Dónde:**

**ht** = altura de la torre (m)

**hc** = altura calculada (m)

**0,5** = fracción de fluidización

**fs** = factor de seguridad (m)

**d. Diseño del reservorio de almacenamiento de solución barrens (recirculante)**

Para el dimensionamiento del reservorio para la solución barrens (solución estéril) tomaremos en cuenta el volumen aparente de solución a utilizar.

El proceso requiere una recirculación de la solución caliente fluyendo a través de la columna que contiene el carbón; así se logrará recuperar en la solución el oro que recuperó el carbón durante la adsorción.

De esta manera habrá un momento en que la solución llegará al estado estacionario.

### e. Cálculo de las dimensiones del tanque de desorción

Tabla 6.

Consideraciones de diseño equipo de desorción.

<b>Variables</b>	<b>Datos</b>
Tiempo de retención adecuado para lograr la elución.	12 horas
Velocidad lineal de flujo	0,5 cm/s
Densidad aparente del carbón	0,48 g/cm <sup>3</sup>
Densidad real del carbón	1,4 g/cm <sup>3</sup>
Capacidad másica de equipo de desorción	0,2 TM

Fuente: Elaboración propia.

- **Cálculo del volumen aparente**

$$V \text{ aparente} = \frac{0,2 \text{ TM}}{0,48 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 0,42 \text{ m}^3$$

- **Cálculo de volumen real**

$$V \text{ real} = \frac{0,2 \text{ TM}}{1,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 0,14 \text{ m}^3$$



- **Cálculo de volumen de fluidización**

$$V_{\text{fluidización}} = 0,5 (0,42 \text{ m}^3) = 0,21 \text{ m}^3$$

- **Luego calculamos el volumen de contacto de acuerdo a la ecuación [13].**

$$V_{\text{contacto}} = 0,42 + 0,21 - 0,14 = 0,48 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{contacto}} = 0,48 \text{ m}^3$$

- **Cálculo de diámetro del tanque de desorción**

$$D = \sqrt[3]{\frac{0,48 \text{ m}^3}{\pi}} = 0,54 \text{ m}$$

$$D = 0,54 \text{ m}$$

- **Cálculo de la altura**

Consideremos un aumento de 50 % de carbón más un 50 % del volumen total.

$$\text{Densidad aparente} = 0,48 \text{ g/mL}$$

$$\text{Densidad real} = 1,40 \text{ g/mL}$$

Primero se calcula la altura del carbón en el tanque de desorción.

Peso del carbón = 0,2 TM + 50 % = 0,3 TM

Usando la ecuación [18] y la ecuación [17] obtenemos la siguiente ecuación cual corresponde a la altura:

$$h = \frac{4 \text{ masa}}{\pi D^2 \rho} \quad [23]$$

- **Luego calculamos altura de acuerdo a la ecuación anterior.**

$$h = \frac{4 (0,3 \text{ TM})}{\pi (0,54 \text{ m})^2 (1,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3})} = 0,95 \text{ m}$$

$$h = 0,95 \text{ m}$$

Fluidización = 50 %

(Incluyendo la forma cónica del reactor al 50 %)

$$h = 0,5 (0,95 \text{ m}) = 0,48 \text{ m}$$

Altura de la torre = h + fluidización + forma cónica = 1,88 m

Altura de la torre = 1,88 m

**f. Diseño del tanque de almacenamiento de solución barren**

Diseño del reservorio de almacenamiento de solución barren (recirculante). Para el dimensionamiento del reservorio para la solución barren (solución estéril) tomaremos en cuenta el volumen aparente de solución que vamos a utilizar  $0,48 \text{ m}^3$  Sus dimensiones son altura  $1,20 \text{ m}$ , largo  $1,20 \text{ m}$  y su volumen  $0,48 \text{ m}^3$ .

Se propuso la construcción de un tanque circular con capacidad de  $0,48 \text{ m}^3$ . Ver figura 9.

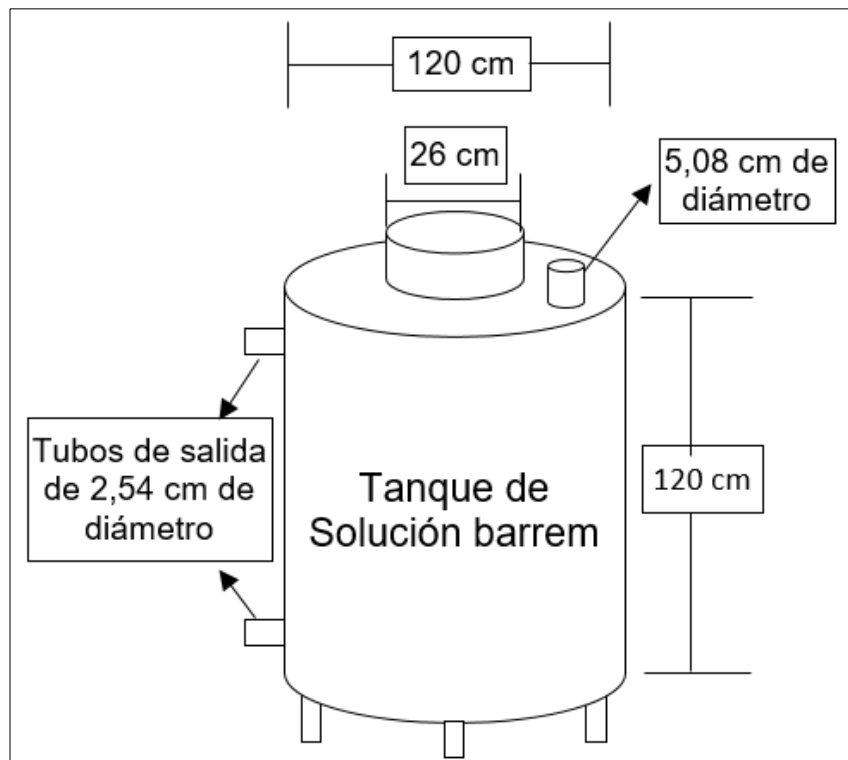


Figura 9. Tanque de solución pobre.

Fuente: Elaboración propia.

### g. Propuesta de celda de electrodeposición

Tabla 7.

Consideraciones de diseño de celda.

<b>Variables</b>	<b>Datos</b>
Espacio entre ánodo y cátodo	5 cm
Voltaje de celda	3 – 5 V.
Densidad de corriente	350 – 500 Amp/m <sup>2</sup>
Temperatura de solución	358 K (85 °C)
Relación largo: ancho: altura	2,7: 3,2: 1
Velocidad de flujo	4,08x10 <sup>-3</sup> cm/s
Caudal	7 L/h
Tiempo de retención del electrolito	12 h

Fuente: Elaboración propia.

Se considera para el cálculo expresiones matemáticas como:

- **Tiempo de retención o tiempo de residencia del electrolito**

$$t_r = \frac{V}{Q} \quad [24]$$

- **Volumen total de celda**

$$V = l a h \quad [25]$$

Dónde:

l = largo de la celda

a = ancho de la celda

h = altura de la celda

- **Caudal total**

En vista de que generalmente se necesita trabajar con flujos altos provenientes de la torre de desorción es conveniente trabajar con celdas en paralelo, el número de celdas a utilizar se calcula en base a la siguiente expresión.

$$n_{\text{celda}} = \frac{Q_T}{Q_i} \quad [26]$$

Dónde:

$n_{\text{celda}}$  = número de celdas

$Q_i$  = caudales individuales

$Q_T$  = Caudal total

- **Densidad de corriente**

$$J = \frac{I}{A} \quad [27]$$

Dónde:

$J$  = densidad de corriente

$I$  = intensidad en amperios

$A$  = área total del material anódico

- **Área de material de electrodo**

$$A = 8 I^2 a^2 e \quad [28]$$

Dónde:

$l$  = largo del electrodo

$a$  = ancho del electrodo

$e$  = espesor del electrodo

Se recomienda un revestimiento de la celda con fibra o material plástico resistente a la temperatura. Las tuberías de entrada y salida serán de acero negro. A lo largo de la celda están ubicadas las barras conductoras de corriente (busbars).

#### h. Cálculo de las dimensiones de celda electrolítica

Tabla 8.

Consideraciones de diseño celda electrolítica

Variables	Datos
Espacio entre ánodo y cátodo	5 cm
Voltaje de celda	3 – 5 V.
Densidad de corriente	350 – 500 Amp/m <sup>2</sup>
Temperatura de solución	358 K (85 °C)
Relación largo, ancho y altura	2,7: 3,2: 1
Velocidad de flujo	4,08x10 <sup>-3</sup> cm/s
Caudal	7 L/h
Tiempo de retención del electrolito	12 h

Fuente: Elaboración propia.

- **Cálculo de celda:**

$$V = Q t_r \quad [29]$$

$$V = 7 \frac{L}{h} (12 \text{ h}) = 84 \text{ litros}$$

Dimensionando acorde a relación largo, ancho y altura  $l =$   
largo, es decir:

$$h = \frac{l}{2,7} \qquad a = \frac{l}{3,2}$$

Según la Ecuación [25] tenemos:

$$V = l a h$$

$$V = l \frac{l}{3,2} \frac{l}{2,7}$$

Despejando l:

$$l = \sqrt[3]{8,64}$$

$$l = \sqrt[3]{8,64 (84 l)} = 0,9 \text{ m}$$

Reemplazando el valor de Volumen y convirtiendo a  $\text{m}^3$  largo es igual a 0,9 m. Por lo tanto, obtenemos los valores de ancho y largo de la celda.

Ancho:

$$a = \frac{l}{3,2} = \frac{0,9}{3,2} = 0,28 \text{ m}$$

Altura

$$h = \frac{l}{2,7} = \frac{0,9}{2,7} = 0,33 \text{ m}$$

Medidas de la celda de electrodeposición: 90 cm x 33 cm de alto x 28 cm de ancho.

**i. Distribución de los electrodos**

Tabla 9.

Parámetros distribución de los electrodos.

<b>Datos:</b>		
Distancia entre electrodos (5 cm)		80,7 cm
Espacio ocupado por el cátodo	0,2 x 8	1,6 cm
Espacio ocupado por el ánodo	0,3 x 9	2,7 cm
Los costados (opcional)	3 x 2	5 cm
Largo total c/u celda		90 cm

Fuente: Elaboración propia.

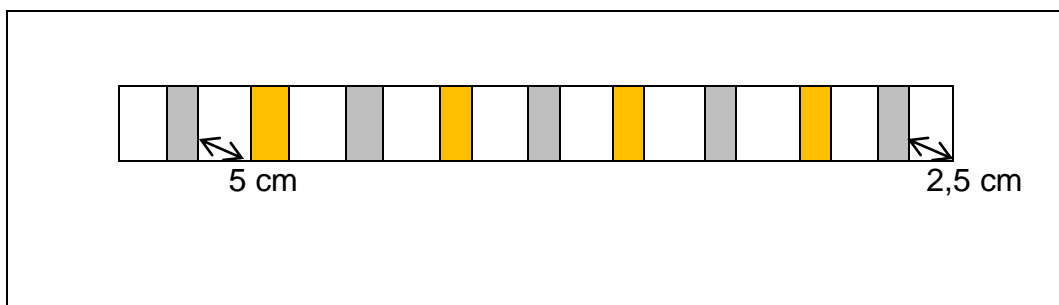


Figura 10. Distribución de los electrodos celda de electrodeposición.

Fuente: Elaboración propia.



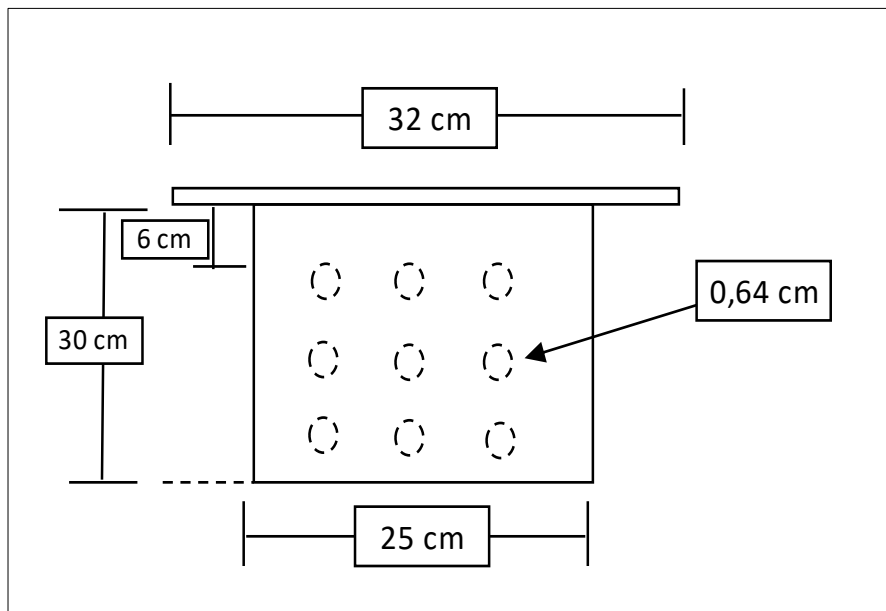


Figura 11. Electrodo: ánodo.

Fuente: Elaboración propia.

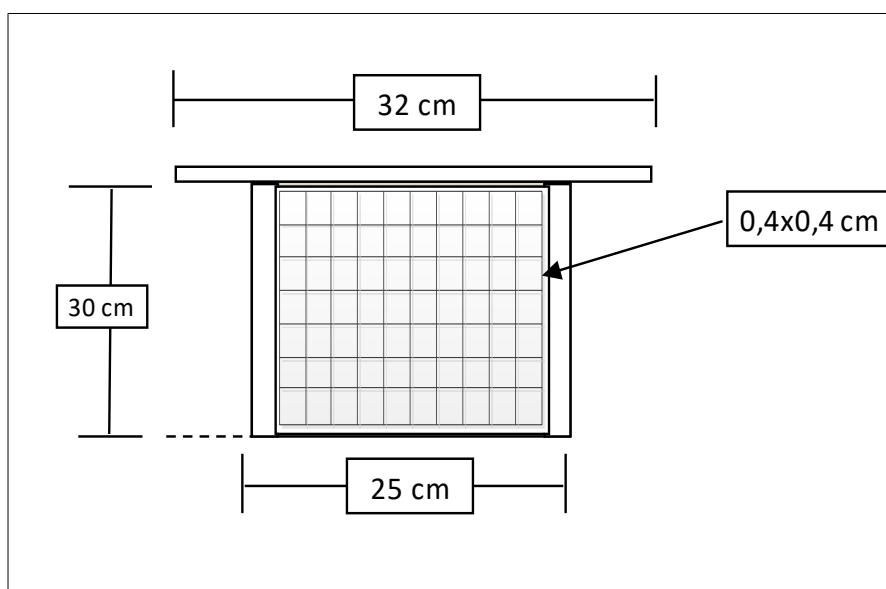


Figura 12. Electrodo: cátodo.

Fuente: Elaboración propia.

- **Tanque dosificador**

Tabla 10. Datos del tanque dosificador.

<b>Datos</b>	
Diámetro	78 cm
Altura	120 cm
Volumen	0,55 m <sup>3</sup>
Eje	2,54 cm de diámetro
Largo eje	170 cm
Diámetro hélice	20 cm

Fuente: Elaboración propia.

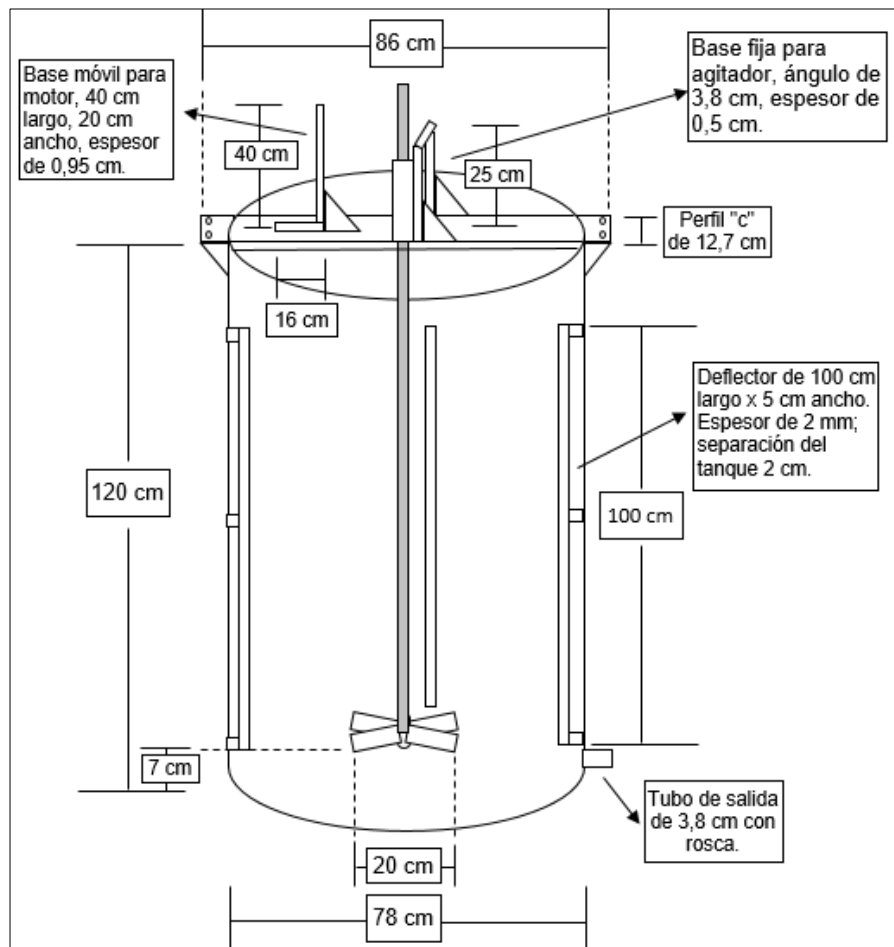


Figura 13. Tanque dosificador de cianuro.

Fuente: Elaboración propia.

- **Calentador o Bolier**

Tabla 11. Datos del calentador.

<b>Datos</b>	
Diámetro	40 cm
Altura total	94 cm y 32 cm un de total = 126 cm
Volumen	0,55 m <sup>3</sup>
Tubo de salida	2,54 cm de diámetro
Tubo de entrada	2,54 cm de diámetro
Base del quemador,	tubo de 14 cm largo por 15,24 cm de diámetro

Fuente: Elaboración propia.

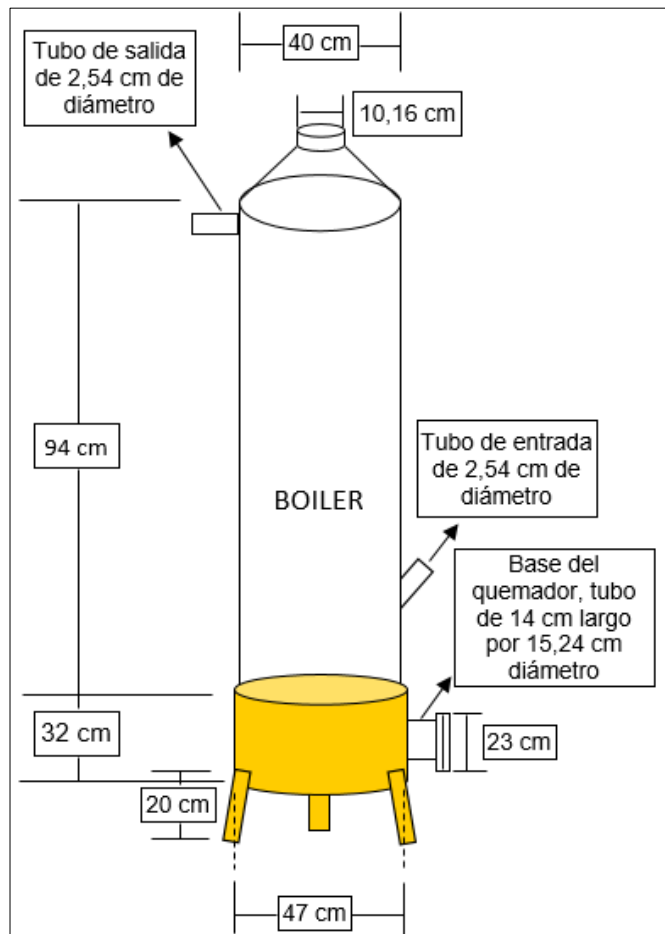


Figura 14. Calentador.

Fuente: Elaboración propia.

**j. Costo estimado del diseño del circuito de desorción**

Tabla 12.

Costo estimado del diseño del circuito de desorción.

<b>Descripción</b>	<b>Precio (\$)</b>
Celda electrolítica	1 500
Rectificador de corriente	1 000
Quemador	600
Bomba	700
Equipos	
Elementos normalizados	
Instrumentos de medición y verificación	10 000
Herramientas	
Máquinas y equipos	
Otros	
<b>Total</b>	<b>\$. 13 800</b>

Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 4.1. Resultados

##### 4.1.1 Resultados de las dimensiones del tanque de desorción

Las dimensiones del tanque para la desorción de 0,2 toneladas de carbón activado son de 1,88 m de altura con un diámetro de 0,54 m.

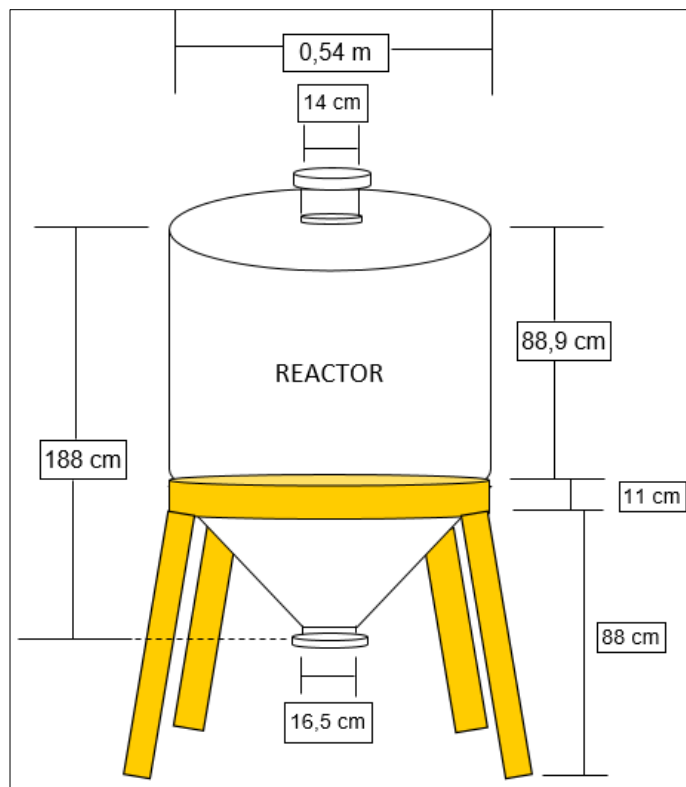


Figura 15. Equipo de desorción del oro.

Fuente: Elaboración propia.

Dimensiones de la celda de electrodeposición son: largo 90 cm, 33 cm de alto y 28 cm de ancho.

- **Celda electrolítica:**

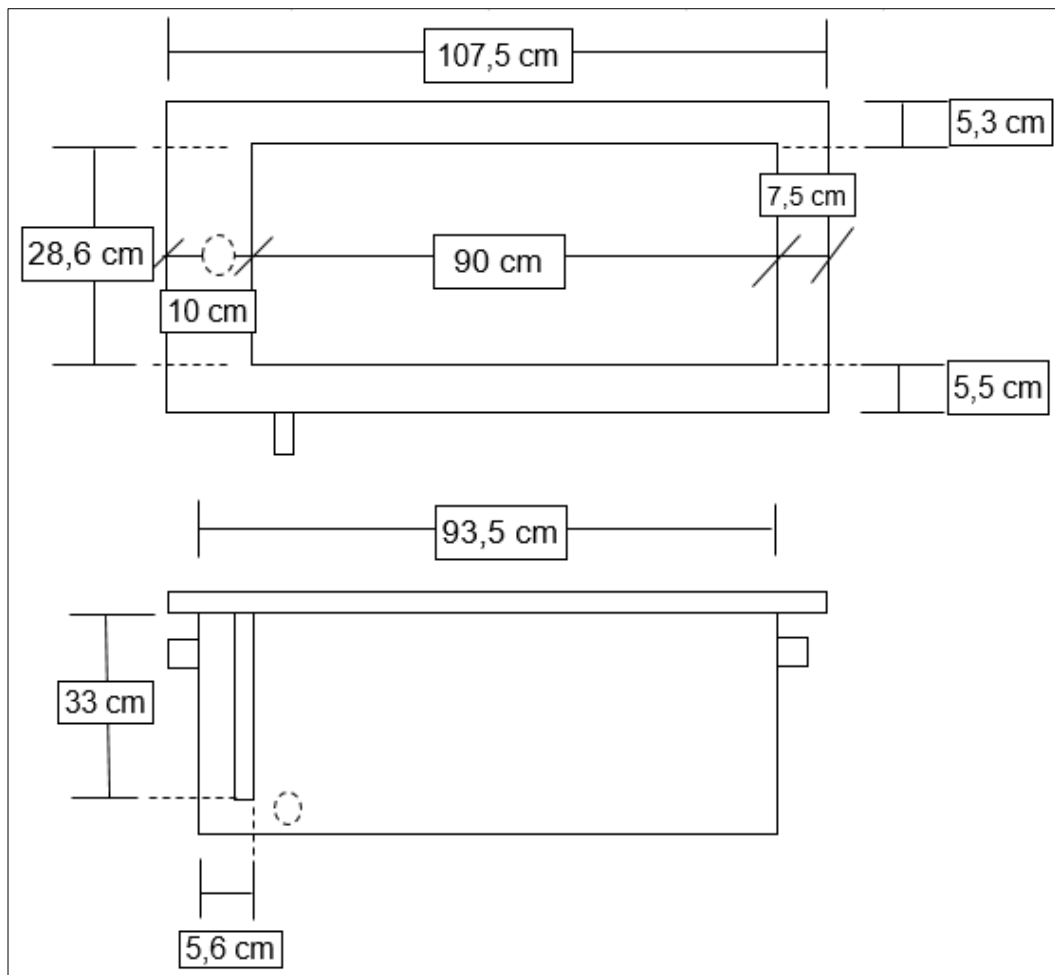


Figura 16. Interior de celda "espesor de polipropileno 1,57 cm".

Fuente: Elaboración propia.

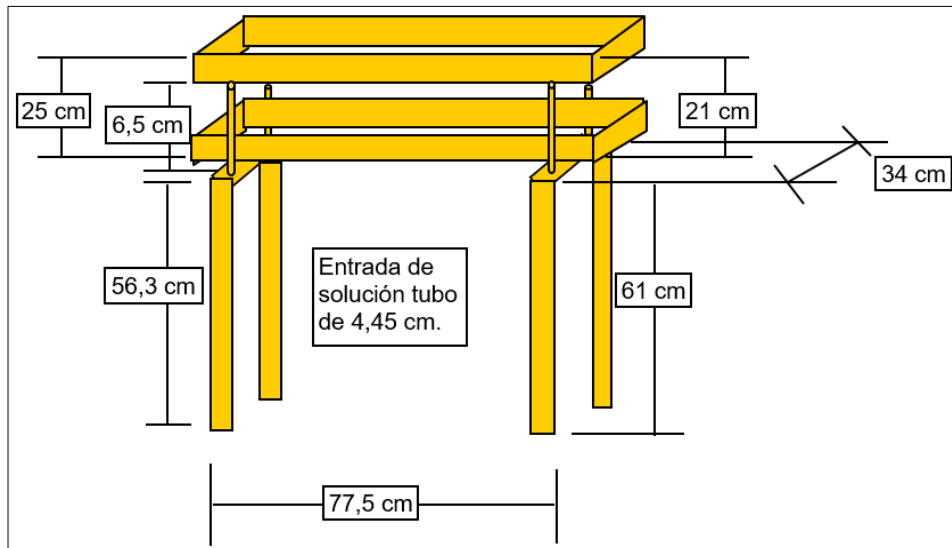


Figura 17. Estructura de la celda.

Fuente: Elaboración propia.

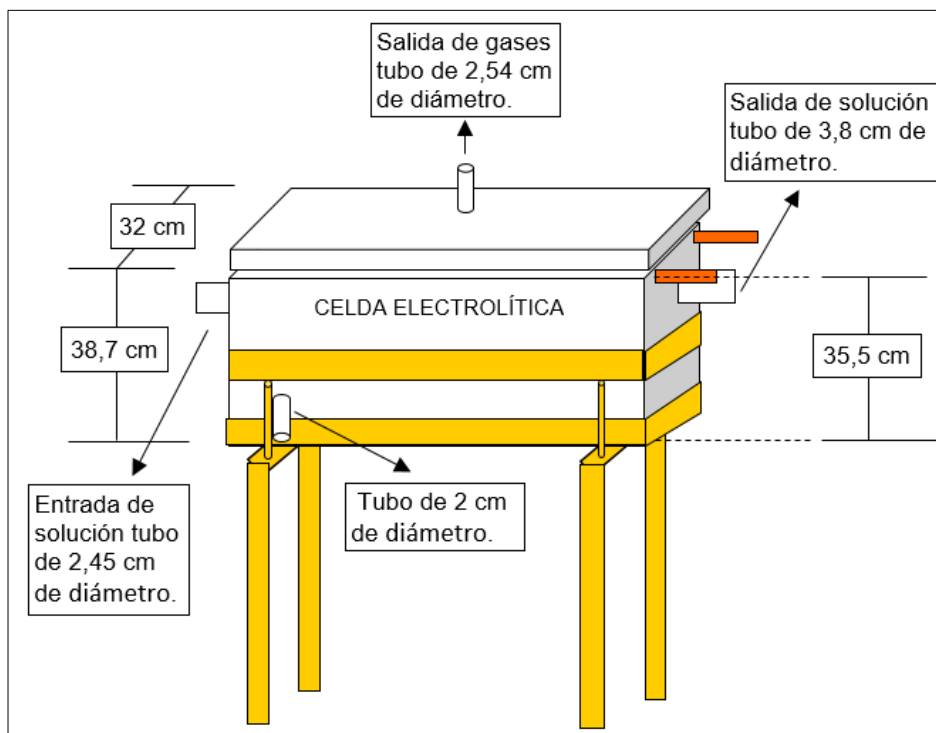


Figura 18. Celda electrolítica y su estructura de la celda.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2 Diagrama del circuito de desorción del carbón activado

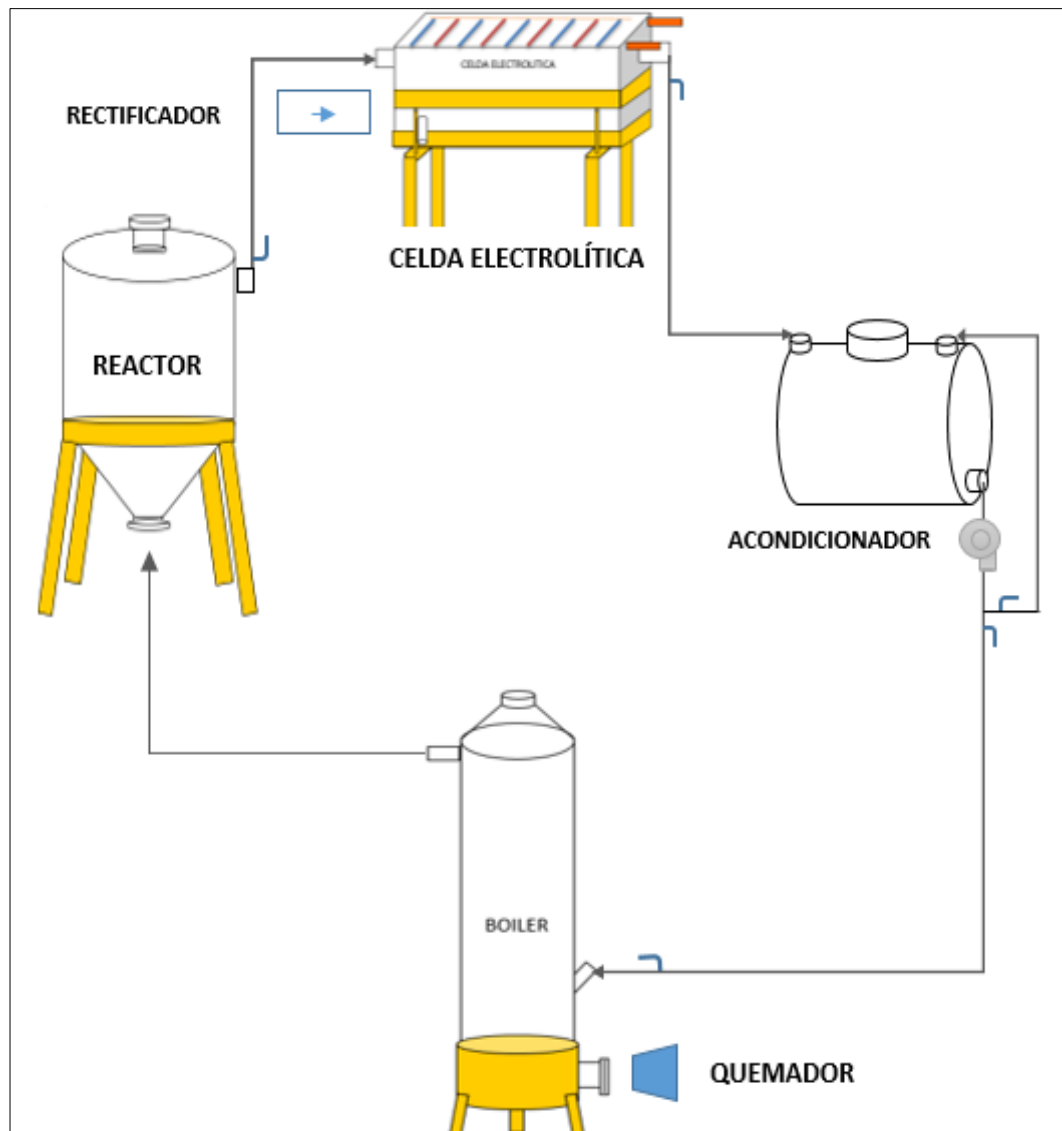


Figura 19. Diagrama de circuito de desorción del carbón activado.

Fuente: Elaboración propia.



## 4.2. Análisis

Para realizar la construcción de cada uno de los elementos que conforman la celda de electroobtención es de mucha importancia la selección del material para lograr obtener equipos con garantía para la minería, se utilizara material de polipropileno para la construcción de la celda electrolítica que sea resistente al ataque químicos de ácidos o bases y resista altas temperaturas, para la fabricación del equipo de desorción del oro será de acero inoxidable de espesor de 0,3 mm, el tanque de solución pobre y tanque dosificador de reactivos serán de acero de espesor de 0,4 mm. Así mismo el reactor de calentador. Los electrodos serán de acero inoxidable 304L para el ánodo y alambre de acero para el cátodo. Los procesos de construcción del equipo pueden realizarse en cualquier taller que tenga los equipos básicos; no es necesario contar con equipos de alta tecnología; la construcción para el equipo básicamente incluye proceso de corte, rolado, soldadura, doblado. Se adquirirá un rectificador de corriente con las especificaciones necesarias para el proceso de electroobtención que tendrá una salida graduable de 0 a 10 V, y un amperímetro de 0 a 500 amperios de trabajo. Alimentación de electricidad de 220 voltios de corriente. (Flores, 2001).

## **CONCLUSIONES**

El diseño de los equipos se diseñó en función a los parámetros relacionados con variables operativas, así lograr equipos adecuados para la pequeña minería.

Los materiales para la construcción de la celda de electrodeposición se escogieron en base a los parámetros y criterios antes indicados como también la inspección del material que va ser adquirido.

Las dimensiones del equipo para la desorción de 0,2 toneladas de carbón activado son de 1,88 m de altura con un diámetro de 0,54 m.

Las dimensiones de celda de electroobtención para extraer el oro de soluciones ricas en oro son de medidas internas de 0,90 m de largo por 0,28 m y 0,33 m; con una cantidad de 17 electrodos con 8 cátodos y 9 ánodos.

## **RECOMENDACIONES**

La construcción de la celda de electroobtención se debe ejecutar en un taller mecánico industrial, en donde existan todos los equipos necesarios para la construcción de los elementos que conforman el equipo.

Se debe tener precauciones para la selección del rectificador de corriente, para evitar problemas en el proceso de electroobtención del oro.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arriagada, H. (2006). Diseño, construcción y optimización de una celda de electro obtención de cobre con cátodo particulado móvil basada en electro diálisis reactiva (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Carbochem, Ardmore, US. (1999). Activated carbon manufacturer & chemical supplier. Recuperado de: <http://www.carbochem.com/>.
- Chambi, V. (2010). Recuperación de oro y plata por el proceso electrolítico ZADRA. Ingeniería y Tecnología, volumen (1), pp.31 - 49.
- Chamorro, C., & Jiménez, Y. (2001). Purificación y electrodeposición de cobre a partir del lixiviado de la Empresa Ferroquímica S.R.L. para obtener cobre electrolítico a nivel laboratorio (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo – Perú.
- Cifuentes, J. (2005). Temperature dependence of the cathodic and anodic kinetics in a copper electrowinning cell based on reactive electrodyalisis. Chemical engineering scencie. Chile: Editorial Santiago.
- DeGamo, E., Black, J., & Kohser, R. (1994). Materiales y métodos de fabricación. Barcelona, España: Reverté.

- Dillon, E. (1989). Large Surface area activated charcoal and the inhibition of aspirin absorption. Annual Scientific Meeting of AACT/AAPCC, Vancouver, Canadá.
- Flores, C. (2001). Recuperación de cobre por electrodeposición en cascada del blend off de la refinera de cobre de DOE RUN PERU a nivel laboratorio. (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo – Perú.
- Izquierdo, L. (1997). Electroobtención del cobre (EW). España: Editorial España.
- Linares, N. (2015). Procesamiento de minerales con oro y plata, Capítulo IV. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.
- Marsden, J., & House, L. (2006). The Chemistry of Gold Extraction, segunda edición. SME, pp.260 - 266.
- Méndez, J. (1989). Hidrometalurgia de oro y plata, procesos convencionales y revisión bibliográfica, México.
- Menéndez, A., & Martín - Gullón, I. (2008). Types of carbon adsorbents and their production. España.
- Mihovilovic, Dimic, E. (2001). Hidrometalurgia, fundamentos procesos y aplicaciones. Chile: Editorial, Santiago Instituto de ingeniero de Minas.
- Milligan, D. (1999). Metal Production. US.

Misari, F. (1993). Metalurgia del oro, Volumen (1). Universidad Nacional de San Marcos. Lima.

Pineda, M. (2015). Diseño de una planta para desorción de carbón activado por el método Zadra, en Sominur Cía. LTDA. Ubicada en el distrito Minero Bella Rica. (tesis de pregrado). Universidad Técnica de Machala. Ecuador.

Salcedo, L. (1987). Química general. Lima: Editorial. San Marcos.

Sancho, J. (2000). Metalurgia extractiva: Volumen (2). Procesos de obtención. Editorial Síntesis, Madrid, España.

Saravia, C. (2013). Recuperación de oro de filtros de carbón activado en la Empresa Exportadores Bolivianos S.R.L. (tesis de pregrado). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz – Bolivia.

Tomalá, A. (1998). Análisis de un sistema de adsorción y desorción de oro de carbón activado y su electrodeposición (tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil – Ecuador.

Valencia, C. (1999). Estudio del Proceso Carbón en Pulpa para Minerales Auríferos. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, DEMEX, Ecuador.

911metallurgist. (2017). Elución de carbón activado. Recuperado de: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/elucion-carbon-activado/>.

## **ANEXOS**

### **a. Material acero inoxidable del grado 304L**

En todas estas instalaciones los aparatos que están en contacto directo con la solución en fase a tratamiento son de acero inoxidable del grado 304L AISI 304 empleándose ampliamente en la fabricación de equipos intercambiadores de calor.

### **b. Composición química del acero inoxidable del grado 304L**

- % C 0,20 máx.
- % Mn 2
- % Cr 18 - 20
- % Ni 10 - 12,5