

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA



TITULO

**DISEÑO DE SISTEMA DE DESORCIÓN Y ELECTRODEPOSICIÓN PARA LA
RECUPERACIÓN DE ORO DE PARTICULAS FINAS DE CARBÓN ACTIVADO
PRODUCIDOS EN LA PLANTA ADR DE MINERA LA ARENA S.A. LA LIBERTAD**

- PERU

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO METALURGISTA

PRESENTADO POR:

Bachiller: SOLIS PACHECO, Richard Paul.

CERRO DE PASCO

2015

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA



**DISEÑO DE SISTEMA DE DESORCIÓN Y ELECTRODEPOSICIÓN PARA LA
RECUPERACIÓN DE ORO DE PARTICULAS FINAS DE CARBÓN ACTIVADO
PRODUCIDOS EN LA PLANTA ADR DE MINERA LA ARENA S.A. LA LIBERTAD
- PERU**

PRESENTADO POR:

Bachiller Richard Paul SOLIS PACHECO

SUSTENTADO Y APROBADO ANTE LA COMISION DE JURADOS

Mag. Antonio Florencio BLA ARAUCO
PRESIDENTE

Dr. Hildebrando CONDOR GARCIA
MIEMBRO

Mag. Manuel HUAMAN DE LA CRUZ
MIEMBRO

CERRO DE PASCO

2015

DEDICATORIA

A Dios

Por todas las bendiciones que siempre ha derramado sobre mí y por haberme dado a una familia muy hermosa.

A mis grandes amores

Mi amada esposa quien es la persona más importante en mi vida, quien me brinda todo su amor, cariño y apoyo en todas las decisiones que he tomado siempre.

Mi hermosa y maravillosa hijita quien me brinda un cariño especial con mucha ternura y sonrisa, la personita quien es mi inspiración, quien me brinda todas las fuerzas para seguir día a día.

A mis grandes ejemplos

Mi padre quien fue la persona muy importante en mi desarrollo personal y profesional, quien me inculco valores, disciplina, buenos ejemplos haciéndose para mí un ejemplo a seguir.

Mi madre querida que siempre me ha entregado todo su amor enseñándome todas sus bondades, valores y muchas virtudes las cuales fueron indispensables en mi desarrollo personal y profesional.

Mi hermana por su infinito cariño, confianza, respeto y apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Manuel Ortega y Ing. Galmar Alarcón por su confianza, amistad y sinceros deseos de superación profesional y personal.

Al Mg. Luis Villar Requis Carbajal mi Asesor de Tesis por brindarme los consejos durante la elaboración de la presente Tesis.

A la Ing. Ana Pérez Villanueva por su invaluable apoyo durante los años de estudio.

A mí querida alma mater UNDAC, mis maestros que he conocido en el apasionante camino del desarrollo profesional; por la motivación y enseñanzas.

A mis amigos por sus buenos deseos y estima, apoyándonos siempre.

RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo en una mina a tajo abierto dedicada a la explotación de oro y plata de minerales oxidados, para lo cual se emplea cianuro de sodio como agente lixivante en pilas de mineral obteniendo así solución pregnant apta para ser tratada en la planta ADR para la recuperación de metales como son el oro y la plata.

La planta ADR cuenta con 05 circuitos de adsorción de 04 t de capacidad de carbón cada una, una planta de desorción, compuesta por 04 reactores verticales de 4 toneladas de capacidad cada uno, el sistema de desorción de 4 t está conceptualizada para realizar 41 desorciones al mes, y trata el carbón cargado proveniente del circuito de adsorción.

Por el número de desorciones que se tiene que realizar mensualmente existe mucho movimiento de carbón de una etapa hacia otra produciéndose por abrasión y/o desgaste partículas finas de carbón las cuales son

constantemente retiradas del proceso por medio de zarandas de clasificación.

El carbón fino separado contiene valores de oro que se deben recuperar; en el presente trabajo se ha desarrollado el diseño de un sistema de desorción no convencional apto para ser usado con partículas de carbón, el cual a su vez impida el escape de las partículas finas por la tubería de solución strip tanto de entrada como de salida reteniéndolas permanentemente durante la operación dentro del reactor.

El carbón fino cargado con metales valiosos se encontrará almacenado en big bags, los cuales se transportarán hacia el área del nuevo sistema de desorción por medio de un montacargas. En este punto, los bigs bags serán izados con ayuda de un tecele monorraíl hasta la parte superior del reactor de desorción, y colocados exactamente sobre la brida superior del reactor, para su apertura manual por parte del operador. De esta forma, se cargará con carbón activado fino el reactor de desorción 150-VS-005 hasta completar el llenado con 1 tonelada de material.

En la primera campaña se realizaron 21 desorciones desde el 11/05/15 hasta el 21/07/15, durante esta campaña se trataron un total de 11.7 TMS de carbón fino obteniéndose 367.89 onzas de oro fundidas. Cada desorción

alcanzo en promedio recuperaciones de oro del 90% haciendo factible el nuevo sistema de desorción desarrollado.

Para realizar el presente trabajo se ha estimado los costos de inversión el cual asciende a US\$ 240,176.26 como costo directo y US\$ 384,282.01 como costo indirecto.

INDICE

| | |
|--|------|
| DEDICATORIA | III |
| RECONOCIMIENTO | IV |
| RESUMEN | V |
| ÍNDICE DE CONTENIDO | VIII |
| LISTA DE TABLAS | X |
| LISTA DE FIGURAS | XI |
| INTRODUCCIÓN | XIII |
| | |
| CAPÍTULO I | 1 |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 1 |
| | |
| 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | 1 |
| 1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA | 7 |
| 1.2.1 PROBLEMA GENERAL | 7 |
| 1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS. | 7 |
| 1.3 OBJETIVOS DE LA TESIS | 8 |
| 1.3.1 OBJETIVO GENERAL | 8 |
| 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 8 |
| 1.4 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA | 9 |
| 1.5 IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN | 11 |
| 1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN | 12 |
| | |
| CAPÍTULO II | 14 |
| MARCO TEÓRICO. | 14 |
| | |
| 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN | 14 |
| 2.2 BASES TEÓRICO – CIENTÍFICO | 15 |
| 2.4. HIPOTESIS | 90 |

| | |
|--|------------|
| 2.4. HIPÓTESIS GENERAL | 90 |
| 2.4. HIPÓTESIS SECUNDARIOS | 90 |
| 2.5. VARIABLES DE LA INVESTIGACION | 91 |
| 2.5. VARIABLE INDEPENDIENTE | 91 |
| 2.5. VARIABLE DEPENDIENTE | 92 |
| CAPÍTULO III | 93 |
| METODOLOGÍA | 93 |
| 3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN | 93 |
| 3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN | 94 |
| 3.3. POBLACIÓN | 97 |
| 3.3.1. MUESTRA | 97 |
| 3.4. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN | 98 |
| 3.5. TÉCNICAS DE INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS | 98 |
| 3.6. TÉCNICAS DE PROCEDIMIENTO Y PRESENTACIÓN DE DATOS | 99 |
| CAPÍTULO IV | 100 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 100 |
| 4.1. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO E INTERPRETACIÓN DE DATOS | 100 |
| 4.2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS | 147 |
| 4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS | 152 |
| 4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 153 |
| CONCLUSIONES | 156 |
| RECOMENDACIONES | 158 |
| BIBLIOGRAFÍA | 159 |
| ANEXOS | 160 |

INDICE DE FIGURAS

| | | | |
|----------------------|------------------|---|-----|
| <u>FIGURA</u> | <u>1</u> | ESQUEMA DE PROCESAMIENTO DE CARBON ACTIVADO | 20 |
| <u>FIGURA</u> | <u>2</u> | MODELO ESQUEMATIZADO DE ADSORCIÓN PARA CIANURO DE ORO SOBRE LA SUPERFICIE E CARBON ACTIVADO | 26 |
| <u>FIGURA</u> | <u>3</u> | UN EJEMPLO DE LA CINÉTICA DEL CARGADO DE ORO SOBRE CARBON ACITVADO | 31 |
| <u>FIGURA</u> | <u>4</u> | ISOTERMA DE EQUILIBRIO DE ADSORCIÓN CARBON CARGADO CON ORO | 32 |
| <u>FIGURA</u> | <u>5</u> | ADSORCIÓN EN ETAPAS MÚLTIPLES EN CONTRACORRIENTE | 37 |
| <u>FIGURA</u> | <u>6</u> | EFECTO DE LA TEMPERATURA EN RATIOS DE ADSORCIÓN DE ORO EN PLANTA CON SOLUCIÓN SINTÉTICA A ph 10 | 48 |
| <u>FIGURA</u> | <u>7</u> | EL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA CAPACIDAD DE CARGA DE ORO EN EL CARBON | 49 |
| <u>FIGURA</u> | <u>8</u> | EL EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA EFICIENCIA DE EXTRACCIÓN EN LA DESORCIÓN EN MINA BEATRIX | 50 |
| <u>FIGURA</u> | <u>9</u> | EL EFECTO DE LA DIFERENCIA DE CATIONES CIANURO EN UN RATIO DE DESORCIÓN DE ORO | 52 |
| <u>FIGURA</u> | <u>10</u> | IONES DESOCIADOS EN UNA SOLUCIÓN | 54 |
| <u>FIGURA</u> | <u>11</u> | CIRCUITO SENCILLO PARA DEPOSITAR | 63 |
| <u>FIGURA</u> | <u>12</u> | REACCIONES IÓNICAS EN UNA CELDA | 63 |
| <u>FIGURA</u> | <u>13</u> | UN TIPO DE CELDA ELECTROLITICA DE LANA DE ACERO | 65 |
| <u>FIGURA</u> | <u>14</u> | REPRESENTACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE UN SISTEMA DE CELDA SENCILLA | 68 |
| <u>FIGURA</u> | <u>15</u> | ILUSTRACIÓN ESQUMÁTICA DE LA CAIDA DE POTENCIAL A TRAVÉS DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA | 70 |
| <u>FIGURA</u> | <u>16</u> | CURVAS CORRIENTE-POITENCIAL MOSTRANDO EL EFECTO DE CONCENTRACIÓN DE ORO | 78 |
| <u>FIGURA</u> | <u>17</u> | CURVAS CORRIENTE-POITENCIAL MOSTRANDO EL EFECTO DE CONCENTRACIÓN DE CIANURO | 84 |
| <u>FIGURA</u> | <u>18</u> | ESQUEMA DE LA CELDA ELECTROWINNING CON LANA DE ACERO TIPO MINTEK | 86 |
| <u>FIGURA</u> | <u>19</u> | TONELAJE DE CARBÓN FINO GENERADO | 102 |
| <u>FIGURA</u> | <u>20</u> | PASSING MALLA DE CARBÓN FINO MUESTRA DSM | 105 |
| <u>FIGURA</u> | <u>21</u> | RETENIDO EN MALLAS CARBÓN ACTIVADO FINO | 106 |

| | | |
|----------------------|--|-----|
| | MUESTRA DSM | |
| <u>FIGURA</u> | <u>22</u> PASSING MALLA DE CARBÓN FINO MUESTRA TOLVA DE CARBÓN FINO | 107 |
| <u>FIGURA</u> | <u>23</u> RETENIDO EN MALLAS CARBÓN ACTIVADO FINO MUESTRA TANQUE DE CARBÓN FINO | 107 |
| <u>FIGURA</u> | <u>24</u> IDENTIFICACIÓN DE ZONAS INTERNAS DE REACTOR DE DESORCIÓN DE CARBÓN FINO | 110 |
| <u>FIGURA</u> | <u>25</u> DETALLE DE MALLAS INTERNAS DE REACTOR DE DESORCIÓN DE CARBÓN FINO | 113 |
| <u>FIGURA</u> | <u>26</u> VISTA DE PLANTA ARREGLO MECÁNICO SISTEMA DE REGENERACIÓN DE CARBÓN FINO | 119 |
| <u>FIGURA</u> | <u>27</u> UBICACIÓN DE VÁLVULA PARA CONTROLAR FLUJO | 122 |
| <u>FIGURA</u> | <u>28</u> UBICACIÓN DE VÁLVULA PARA CONTROLAR PRESIÓN | 123 |
| <u>FIGURA</u> | <u>29</u> UBICACIÓN DE VÁLVULA PARA LIMPIEZA DE INTERNO SUPERIOR | 125 |
| <u>FIGURA</u> | <u>30</u> INTERNO SUPERIOR DEL REACTOR DE DESORCIÓN DE CARBÓN FINO | 126 |
| <u>FIGURA</u> | <u>31</u> APERTURA Y CIERRE DE VÁLVULA DE CAMBIO DE DIRECCIÓN HACIA REACTOR | 132 |
| <u>FIGURA</u> | <u>32</u> EXTRACCIÓN ACUMULADA DE ORO 1º DESORCIÓN | 143 |
| <u>FIGURA</u> | <u>33</u> EXTRACCIÓN DE ORO EN CELDA ELECTROLÍTICA 1º DESORCIÓN | 144 |
| <u>FIGURA</u> | <u>34</u> EXTRACCIÓN ACUMULADA DE ORO 2º DESORCIÓN | 145 |
| <u>FIGURA</u> | <u>35</u> EXTRACCIÓN DE ORO EN CELDA ELECTROLÍTICA 2º DESORCIÓN | 145 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla N° 01 El efecto del intercambio iónico de una solución en el equilibrio de la carga de oro en solución conteniendo 30 ppm de oro (De Fleming y Nicol, 1984)..... | 53 |
| Tabla N° 02 Potencial eléctrico..... | 59 |
| Tabla N° 03 Distribución de pérdidas de carbón..... | 104 |
| Tabla N° 04, Resultados de las Pruebas de Atrición..... | 107 |
| Tabla N° 05, Análisis granulométrico carbón fino muestra DSM..... | 108 |
| Tabla N° 06, Análisis granulométrico carbón fino muestra tanque de almacenamiento de carbón..... | 110 |
| Tabla N° 07 Parámetros operativos desorción de carbón fino..... | 112 |
| Tabla N° 08 Determinación del diámetro del reactor..... | 112 |
| Tabla N° 09 Determinación de la altura del reactor..... | 113 |
| Tabla N° 10 Listado de equipos involucrados en el sistema de desorción de carbón fino..... | 118 |
| Tabla N° 11: Equipos de protección personal..... | 124 |
| Tabla N° 12: Variables del proceso de desorción de carbón fino..... | 125 |
| Tabla N° 13: Variables del proceso de desorción de carbón fino..... | 131 |
| Tabla N° 14: Calculo de cantidad de carbón para 1° capa..... | 133 |
| Tabla N° 15: Calculo de cantidad de carbón para 3° capa..... | 134 |
| Tabla N° 16 Balance 1° desorción de carbón fino..... | 148 |
| Tabla N° 17 Balance 2° desorción de carbón fino..... | 149 |
| Tabla N° 18 Preparación de NaOH 1° Desorción..... | 151 |
| Tabla N° 19 Compensación de NaOH 2° Desorción..... | 151 |
| Tabla N° 20 Análisis granulométrico carbón fino planta ADR..... | 157 |

INTRODUCCIÓN

Nuestro país posee una gran riqueza mineral, polo de desarrollo en varias regiones desde los tiempos prehispánicos. Durante la etapa colonial se trabajaron algunos minerales de oro y plata de alta ley dando lugar a la formación de grandes ciudades; desafortunadamente estas reservas se fueron agotando y esto dio lugar a la búsqueda de tecnologías para el tratamiento de minerales de baja ley en el caso de los metales preciosos, alrededor de 1890, se comenzó a utilizar el proceso de cianuración, para la disolución de los valores de oro y plata en minerales de baja ley, utilizando cianuro de sodio en medio alcalino. Casi al mismo tiempo se desarrolló la técnica de cementación con zinc, para la recuperación de estos valores, proceso bien establecido en la hidrometalurgia de los metales preciosos.

Posteriormente, a finales de la década de los setenta, se empezó a aplicar el proceso de adsorción en carbón para soluciones diluidas de cianuración alcalina.

Las operaciones de lixiviación en pilas para recuperaciones de oro en minerales de baja ley han venido incrementándose en los últimos años. Existe varias plantas hidrometalúrgicas para la recuperación de oro, partiendo de la lixiviación de minerales de baja ley, las cuales utilizan el proceso de adsorción en carbón. Las plantas de procesos metalúrgicos que usan esta tecnología generan un residuo muy difícil de tratar tanto para la recuperación de valores como la adecuada captación y manejo; este residuo es el carbón fino generado por las continuas maniobras que se realizan durante la operación.

La mayoría de industrias mineras, el tratamiento que usan para la recuperación de valores del carbón fino es el uso de la fundición directa; este método usado no resulta del todo eficiente por generar altos costos operativos, contaminación del ambiente y bajas recuperaciones de valores.

De estas experiencias surge la necesidad de desarrollar un sistema eficaz y eficiente para el tratamiento de partículas finas de carbón, el cual es un sistema de desorción y electrodeposición no convencional.

Por tal motivo se realizó el diseño de un reactor de desorción el cual será capaz de retener las partículas finas y realizar la desorción considerando parámetros operacionales distintos a los convencionales los cuales se detallaran en el presente documento.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

Minera La Arena se dedica a la extracción de minerales oxidados para la obtención de Au y Ag; la tecnología para la recuperación de metales valiosos es a través de una Planta ADR mediante el uso de carbón activado, donde las etapas del proceso son adsorción, desorción, regeneración química y térmica del carbón activado.

La planta de procesos se ubica a una altitud de 3275.5 msnm y está ubicado en la zona del caserío La Arena en la provincia de Huamachuco, región La Libertad.

La desventaja del tratamiento de la Planta ADR es la generación de cantidades considerables de partículas finas de carbón activado -20 mallas (275 μ); El carbón fino es generado en la Planta ADR como resultado de diferentes etapas del proceso debido a la fricción entre partículas y superficies sólidas como son tuberías, tanques y accesorios. Actualmente La Arena S.A cuenta con un stock total de 34.40 TMS (Toneladas Métricas Secas) de carbón fino, con un contenido metálico total de oro de 978.45 onzas. Este material fue almacenado durante el periodo de inicio de operaciones en mayo de 2011 hasta julio de 2015; actualmente se continúa almacenando este material para su futuro tratamiento de recuperación de valores.

En la operación existen varios puntos de generación de carbón fino que a continuación se describen:

Circuito de Adsorción

En esta etapa la solución cianurada con altos contenidos de oro y planta, producto de la lixiviación en pilas es alimentada a 05 circuitos de adsorción; cada circuito de adsorción cuenta con 06 columnas y cada una tiene 4 t de capacidad.

La granulometría del carbón activado que se usa en el circuito de adsorción es de 6 x 12 mallas; es decir las partículas de carbón activado se encuentran entre 3360 μ y 1680 μ .

Cada circuito de adsorción tiene un promedio de caudal de 350 m^3/h , al final del circuito se cuenta con dos mallas estacionarias DSM (Dutch State Mines) instaladas consecutivamente, la primera tiene malla 20 (833 μ) y la segunda tiene malla 70 (210 μ).

Producto del transporte y de la misma operación en cada columna existe fricción entre partículas y superficies planas generando reducción de tamaño del carbón los cuales son arrastrados por la solución; estas partículas pueden ser muy finas las cuales son muy difíciles de captar; el método usado en este caso para capturar estas partículas es el uso de DSM.

Los finos generados en cada columna son arrastrados hasta llegar a las mallas DSM; el rango de tamaños capturados en los DSM está entre -1680 μ y +210 μ .

Estas partículas son almacenadas en los compartimentos del DSM hasta llegar a su capacidad de operación máxima, para luego ser descargadas y almacenadas.

Estas partículas tienen gran contenido de Au y Ag los cuales no deben ser retirados del proceso; esto causa pérdidas considerables en la producción.

Circuito de Desorción y Lavado Ácido

El carbón cargado contenido en las columnas de adsorción es descargado para pasar a la siguiente etapa (Desorción a presión).

La descarga y el traslado del carbón desde las columnas de adsorción hacia el reactor de desorción se realizan con el uso de un reductor y mangueras flexibles.

Después de finalizar el traslado del carbón se realiza la preparación de solución strip para posteriormente realizar el calentamiento de la solución e iniciar con la desorción.

El caudal de diseño de tratamiento en la desorción es de 17.6 m³/h; y el lecho fluidizado alcanza un 10% evitando que la suspensión de partículas finas sean en grandes proporciones; sin embargo, en el circuito después del reactor de desorción se tiene un filtro dúplex con malla 20 para atrapar posibles partículas arrastradas por el flujo de solución. Por lo antes indicado la captación de partículas finas en esta

etapa es mínima quedándose en si las partículas finas en el lecho del carbón activado. Después de la etapa de desorción se descarga el carbón y se envía hacia el reactor de lavado ácido; en esta etapa se recircula solución acida por el carbón a una razón de 20 m³/h (caudal de diseño); en este caso el lecho fluidizado alcanza un 15% para realizar una adecuada limpieza, con este porcentaje se tiene mayor arrastre de partículas finas por la solución acida, para atrapar estas partículas se tiene instalado un DSM con malla 20.

Después de finalizar la etapa de lavado ácido el carbón es descargado hacia una tolva de almacenamiento de carbón.

La descarga de carbón se realiza mediante un eductor y mangueras; el carbón es descargado hacia una zaranda vibratoria circular de 40" de diámetro con malla de acero inoxidable N° 20. Esta zaranda selecciona el carbón +20 mallas para descargarlo en la tolva de almacenamiento y el carbón -20 mallas es trasladado mediante tuberías hacia un tanque de almacenamiento de carbón fino.

La cantidad de carbón fino generado en esta etapa es de 0.16 t/proceso.

Reactivación química y térmica

Después de la etapa de lavado ácido se realiza la regeneración térmica del carbón. El carbón almacenado en la tolva es transportado mediante reductores a una zaranda circular de carbón de 40" de diámetro con malla de acero inoxidable N° 20. Esta zaranda selecciona el carbón +20 para descargarlo en la tolva de almacenamiento de carbón grueso y el carbón -20 es trasladado mediante tuberías hacia un tanque de almacenamiento de carbón fino.

En la etapa de regeneración térmica después de pasar el carbón por la zaranda antes indicada se almacena en otra tolva que alimenta a la zaranda de pre-secado la función de esta malla es reducir la humedad del carbón y separar cierta cantidad de agua con partículas finas de carbón; estas partículas finas también son colectadas en la tolva de carbón fino.

Manejo de carbón

Esta área es donde se realiza el almacenamiento y distribución del carbón activado nuevo o regenerado. Y es donde se almacena el carbón fino una tolva diseñada para tal fin.

Los partículas de carbón finas almacenadas son colectadas y almacenadas. Estas partículas poseen un alto índice de contenido de

oro los cuales por sus características no pueden ser tratados; el contenido metálico de oro del carbón fino acumulado es de 978.45 onzas.

El uso de un reactor de desorción convencional no es aplicable para el tratamiento de las partículas finas de carbón, ya que se generarían fugas de carbón fino del reactor, ensuciando las tuberías de ingreso de la solución strip llegando hasta otros equipos como los intercambiadores de calor, obstruyendo y generando sobrepresiones los cuales son muy peligrosas para el equipo, ambiente y sobre todo para el personal operativo.

1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA

Con esto nos planteamos las siguientes interrogantes:

General

¿Cómo se puede recuperar el oro contenido en las partículas de carbón fino producido en la Planta ADR de Minera La Arena S.A. con un sistema de desorción y electrodeposición?

Específicos

- a) ¿Qué factores se deberán evitar para que el carbón fino obstruya las líneas de flujo causando sobrepresiones y posibles accidentes?

- b) ¿Cuál es la velocidad de flujo en el reactor para generar la adecuada expansión de cama?

- c) ¿Cuál será el parámetro de diseño más importante a considerar en la recuperación de oro de las partículas de carbón fino?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Determinar y el diseño adecuado del sistema de desorción y electrodeposición para la recuperación de oro contenido en partículas finas de carbón producido en la Planta ADR de Minera La Arena S.A.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar los factores para evitar que el carbón fino obstruya las líneas de flujo causando sobrepresiones y posibles accidentes.

- b) Determinar la velocidad de flujo en el reactor para generar la adecuada expansión de cama
- c) Establecer los parámetros de diseño más importante para el nuevo sistema a desarrollar.

1.4 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA

Los resultados que se obtendrán al final de la presente investigación serán de beneficio para la unidad de operaciones La Arena logrando la recuperación de oro de partículas finas de carbón dando un valor agregado a la producción de la planta de procesos.

La importancia del desarrollo del proyecto es encontrar la forma de poder recuperar el oro de las partículas de carbón fino las cuales al momento muchas industrias mineras de uso de carbón activado no lo han podido realizar por su difícil manipulación.

Técnica

En plantas de procesos que usa carbón activado es inevitable la generación de partículas finas de carbón activado; además al reducir el tamaño el carbón activado gana más área superficial haciendo que

tenga mayor capacidad de adsorción de oro; al momento muchas industrias mineras no encontraron la forma correcta de poder recuperar los metales valiosos de estas partículas; es por este motivo que surge la necesidad de realizar una investigación y desarrollar el presente estudio con el fin de obtener un sistema adecuado de desorción para la recuperación de metales de manera eficiente.

Este objetivo se lograra con un diseño de un sistema de desorción adecuado para el tipo de partículas finas de carbón activado determinando los adecuados criterios de diseño y parámetros operacionales.

Económica

Se tiene diferenciado dos puntos de generación y captación de partículas finas de carbón; cada punto difiere por el grado de contenido de oro teniendo mayor cantidad las partículas finas captadas en las mallas estacionarias DSM pertenecientes a los circuitos de adsorción, estas partículas tienen alto grado de contenido de oro por tener contacto directo con la solución pregnant proveniente de las pilas de lixiviación con altas leyes de oro y el siguiente punto que son las demás áreas como desorción, lavado ácido y regeneración térmica donde el contenido de oro son menores.

Actualmente La Arena S.A. cuenta con un stock total de 34.40 TMS de carbón fino con un contenido metálico de oro de 978.48 onzas; de acuerdo al precio actual del oro (1100 \$/oz), se tiene valorizado un total de US\$ 1'076,328.00 (Un millón setenta y seis mil trescientos veintiocho con 00/100 dólares americanos); este monto es muy atractivo el cual incentiva poder hacer efectivo la presente investigación.

1.5 IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

El Perú es un país minero por naturaleza; en la actualidad se tienen muchas industrias minero-metalúrgicas a nivel nacional preocupadas por la producción de concentrados y/o metales para forjar el desarrollo del país.

Los objetivos más importantes de toda industria minera es tener las mejores producciones a un menor costo operativo generando así mayor rentabilidad.

Una de las tecnologías más usadas en la industria para la recuperación de metales valiosos como el oro y plata es el carbón activado. Estas plantas de procesamiento metalúrgico generan un residuo que es el carbón fino y este en muchos casos no ha sido tratado adecuadamente, almacenándolo sin darle utilidad, otros funden estas partículas

generando altos costos de producción y no logrando buenos resultados en la recuperación de los metales valiosos.

Es por este motivo es muy importante lograr buenos resultados en la presente investigación desarrollando un adecuado sistema de recuperación de metales valiosos de las partículas finas de carbón activado.

Con este sistema muchas industrias minero – metalúrgicas podrán tratar el residuo generado en las Plantas ADR incrementando la producción.

1.6 LIMITACIONES

1. La inversión para esta investigación fue la limitante más importante ya que se debió adquirir equipos mecánicos, partes mecánicas provenientes del extranjero, equipos eléctricos, equipos de instrumentación, infraestructura, tuberías y accesorios; así como también obras de concreto.
2. Otra de las limitaciones fue el espacio físico para poder ensamblar el sistema de recuperación de oro.

Estas limitaciones se pudieron manejar de la siguiente manera:

1. Después de realizar el análisis químico y determinar el contenido de oro total en el carbón fino y conocer la equivalencia económica el cual se podría obtener, Minera La Arena decisión financiar el proyecto para la adquisición de todos los equipos, materiales y accesorios necesarios.
2. Por el poco espacio que se contaba en la planta de procesos se tuvo que ajustar las dimensiones de la infraestructura y optimizar líneas de proceso nuevas con las existentes realizando para esto Toe-in en diversas tuberías como, líneas de solución strip para el ingreso y descarga de reactor de desorción.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES

Actualmente en la planta ADR tiene instalado 05 circuitos de adsorción con 06 columnas de 4 t capacidad cada, se tiene también instalada una planta de desorción a presión en la cual se puede realizar 41 desorciones al mes, lo cual se cumple con un sistema de desorción compuesto por 04 reactores verticales de 4 toneladas de capacidad cada uno así como un sistema de lavado ácido y regeneración térmica del carbón.

El carbón activado es trasladado de una etapa hacia otra mediante tuberías y mangueras el cual es impulsado por un eductor.

De acuerdo a lo mencionado existe abrasión y/o desgaste a causa del movimiento de carbón activado en la planta existente y de su bombeo en estado de pulpa de una etapa a otra, generando partículas finas de carbón las cuales son constantemente retiradas del proceso por medio de zarandas de clasificación.

2.2 BASES TEORICO - CIENTIFICO

Historia del carbón activado

El hecho de que el carbón activado tenga la propiedad de absorber metales preciosos en solución fue primeramente publicado por Lazowski en 1847. Esa información atrajo considerables interés, como es evidente por la publicación de 46 artículos técnicos entre 1848 y 1917. El primer uso del carbón en un sistema metalúrgico fue para la extracción de oro después de la clorinación. El oro era solubilizado por gas cloro y luego filtrado a través del carbón. El uso del carbón activado para la extracción de oro fue patentado por Johnston e 1890.

Este proceso consiste en la disolución de oro y plata en solución de cianuro de sodio, pasando la solución clarificada a través de una serie de columnas de carbón activado. El carbón es quemado para recuperar metales preciosos y el residuo fundido.

Teoría del carbón activado

El carbón activado es el único agente usado para la recuperación, separación y purificación de muchas sustancias. Hasta 1700 fue reconocido como un agente purificador. Desde 1950 en los Estados Unidos el carbón activado se empleó como un material adsorbente de productos orgánicos en tratamiento de agua industrial.

El carbón activado comprende una familia de sustancias con fórmulas estructurales no definidas.

Las únicas bases para su diferenciación es la medida de su capacidad relativa de adsorción. Los procesos básicos de activación son la carbonización y oxidación. El proceso de carbonización es conducido en ausencia de aire entre 600 °C a 900°C, mientras la oxidación se realiza en a presión atmosfera oxidante así como también con vapor a 900°C.

Los cristales formados durante la carbonización consiste en 2 o más placas amontonadas una sobre otra. En las placas lisas, se descubrió que son átomos de carbono arreglados en una red hexagonal.

Cada átomo excepto aquellos de los bordes, es detenido por ligaduras covalentes de otros tres átomos de carbono. El diámetro de

las placas y la altura del apilamiento son menores de los 100 A°. El carbón preparado con un buen tratamiento de carbonización es suficientemente activo para su uso. El tratamiento de oxidación también es usado para corroer selectivamente la superficie, creando porosidad y con eso incrementar el área superficial. La oxidación también tiene una variedad de grupos funcionales que contienen oxígeno sobre la superficie que juegan un papel importante en los procesos de adsorción.

Una de las características más singulares del carbón activado es una estructura porosa. Aunque la estructura sub microscópica no está bien determinada, se asume que puede estar compuesta de partículas amorfas al azar distribuidas para dar una compleja red de forma irregular en parte interconectada entre las partículas. Los poros van dentro de las dos distintas clases de tamaño. Los macro poros constituyen aproximadamente el 5% de la superficie activa y tienen de 1000 a 2000 A° en diámetro. Los micro poros son menores de 20 A° en diámetro y son los más importantes ya que alcanzan 95% del área superficial disponible.

Propiedades del carbón activado

El carbón activado o carbón como es llamado ahora comúnmente, es un material orgánico el cual tiene una estructura esencialmente grafitica. Tiene una superficie especifica extremadamente grande debido al alto desarrollo interno de la estructura porosa y un área superficial especifica que excede de 1000 m²/g no son comunes. Como resultado, el carbón ha encontrado diversas aplicaciones industriales ya sea en procesos de separación de gas y liquido; sin embargo su uso en la industria de la recuperación de oro ha sido solamente difundido desde 1980.

Las más importantes de las propiedades del carbón activado para la extracción de oro son:

1. Capacidad de adsorción de oro.
2. Velocidad de adsorción de oro.
3. Esfuerzo mecánico y resistencia al uso.
4. Características de reactivación.
5. Distribución del tamaño de partícula.

Otras consideraciones no técnicas, tales como el costo disponibilidad y servicio para el suministrador también afecta la selección del carbón.

Manufactura y activación

Si cualquier material carbonaceos es tratado propia y virtualmente, puede ser usado para producir carbón activado.

Las fuentes materiales mayormente usadas son:

- Madera
- Turba
- Cascara de coco
- Carbón bituminoso
- Antracita
- Semillas

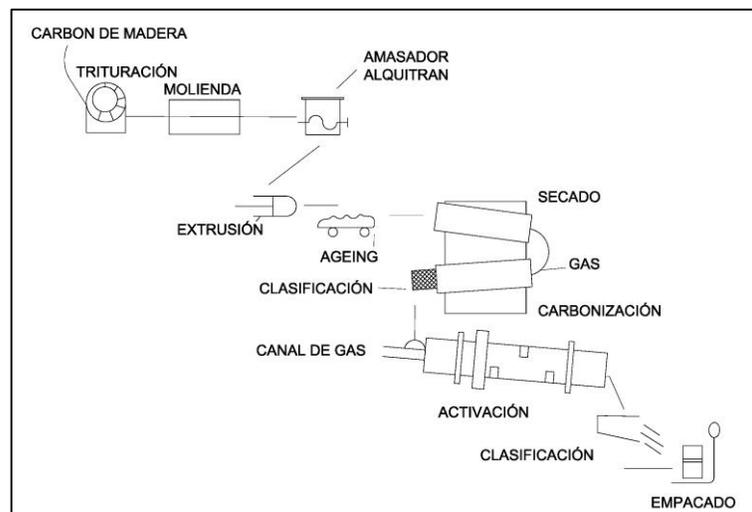
El tipo de material fuente tiene una influencia marcada sobre la estructura física del producto, en particular, el volumen del poro y la distribución del tamaño de partícula. Por ejemplo, la madera es usada como el material fuente de carbones decolorantes, mientras que los de cascara de coco y carbones obtenidos de carbón mineral son

generalmente usado para adsorción de fases gaseosas y aplicaciones de recuperación de oro.

El carbón es activado por la remoción de hidrogeno, o fracciones ricas de hidrogeno, a partir de materiales de la línea de los carbonaceos para producir un residuo de poro abierto. Este proceso es llamado “activación” y es ejecutado en dos etapas.

En la primera etapa el material es calentado aproximadamente a 500°C con la presencia de agentes deshidratantes; este proceso se llama “carbonización”. Muchas de las impurezas son removidas como gases (CO, CO₂, ácido acético) o permanecen como un residuo similar a la brea sobre el carbón.

Figura N° 01 Esquema de procesamiento de carbón activado



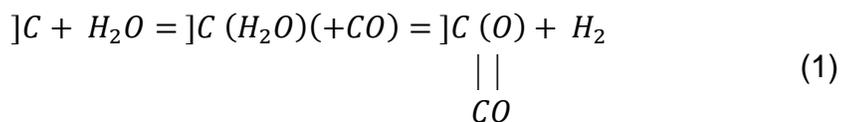
Fuente: elaboración propia

Como consecuencia, los átomos de carbón son liberados muchos de ellos y combinados como fracciones cristalinas, conocidos como cristalitas elementales. Esto resulta en el desarrollo de un producto con un área específica entre 10 y 500 m²/g, la mayoría de los cuales es debido a la formación de micro poros.

La segunda etapa consiste de exponer el material carbonizado para oxidarlo en una atmosfera de vapor, CO₂ y/o oxígeno (aire) a temperaturas de 700 – 1000 °C para quemar los residuos de brea y desarrollar la estructura de poros internos. Los átomos de carbón en las cuñas y esquinas de los cristalinicos elementales y en las discontinuidades o defectos, son especialmente reactivos debido a sus valencias no saturadas y so llamados “sitios activos”.

La reacción de vapor con carbón considera primeramente la adsorción de vapor de agua sobre la superficie del carbón seguida de la evolución de hidrogeno y CO₂.

Las reacciones son postulada abajo, donde los paréntesis rectos indican el enlace con la superficie del carbón.



Este mecanismo está representado por la reacción general, abajo:



Este proceso es algunas veces aplicado durante la reactivación de carbón en plantas de extracción de vapor por la adición de vapor dentro de hornos de reactivación.

La adsorción de carbón es catalizada por Fe, Cu, óxidos y carbonatos de metales cristalinos.

Adsorción de oro sobre carbón activado

El carbón activado fue introducido como un adsorbente para la recuperación de oro y plata de soluciones cianuradas alrededor del año 1880. Divas (1880) presento un proceso en el cual el carbón de madera era usado para la recuperación de oro de licores lixiviados de la clorinación. Johnson (1894) patento el uso de carbón para la recuperación de oro de soluciones cianuradas, descubriendo así (en 1890) que el cianuro era un excelente solvente para el oro. No obstante, la adsorción de oro sobre carbón podría no competir con la filtración y cementación con zinc hasta cerca de 1950s, cuando Zadra (1950) desarrollo un proceso para la remoción de oro y plata a partir de carbón cargado.

El carbón activado no es un material homogéneo. El carbón blando, tiene una actividad bien alta. De aquí que la pérdida de carbón blando debido a la atrición es la porción más activa. Cuando se selecciona carbón, la resistencia a la atrición será evaluada y el carbón con la más alta actividad después de la atrición será seleccionado.

Mecanismo de la adsorción de oro

El proceso de carbón alcanzo exitosa comercialización a pesar que los mecanismos básicos del proceso no habían sido cuidadosamente o extensamente estudiados. En 1979, una investigación fue publicada por Pitt et al. De la Universidad de Utah sobre la termodinámica y cinética de adsorción de cianuros de oro y plata sobre carbón activado. Unos experimentos de adsorción fueron llevados a cabo para cianuro de metales preciosos sobre carbón activado, usando soluciones con varias concentraciones de Na^+ , Ca^{++} , cianuro libre y H^+ . Los datos mostraron que el Na^+ , Ca^{++} , realzan la adsorción mientras que el cianuro libre lo reduce.

El siguiente mecanismo de adsorción fue propuesto basado sobre la teoría de doble capa eléctrica según se muestra en la Figura N° 02.

- El ion $Au(CN)_2^-$ es adsorbido como tal y adsorbe por electrostática o fuerzas de Van der Waal's
- Reducción de $Au(CN)_2^-$ a oro metálico, que es precipitado sobre el carbón.
- El compuesto de oro e alterado de alguna otra forma durante el proceso de adsorción.
- El $Au(CN)_2^-$ adsorbe sobre intersticios de carbón activado.
- El Na^+ y Ca^{++} son solo adsorbidos cuando el $Au(CN)_2^-$ está presente. Así, ellos probablemente son adsorbidos en la capa difusa.
- Cuando está presente el $Au(CN)_2^-$ adicional puede ser adsorbido en la capa difusa.
- El cianuro libre compite por los intersticios con el $Au(CN)_2^-$.
- Adsorción de pares de iones de $Ca[Au(CN)_2]_2$.

- La extracción de $Au(CN)_2$ y $Ag(CN)_2$ es incrementada por la presencia de electrolitos, tales como $CaCl_2^-$ y KCl .
- La cinética de adsorción y equilibrio de cargado se incrementa con el decrecimiento del pH.
- La adsorción de oro decrece con el incremento de la temperatura.

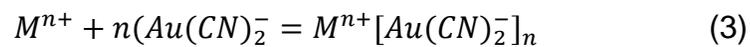
Los mecanismos propuestos antes de 1980 pueden ser divididos dentro de cuatro categorías:

1. Adsorción como el ion cianuro $Au(I)$.
2. Adsorción como $AuCN$ molecular.
3. Reducción y adsorción como oro metálico y
4. Adsorción en asociación con un catión metálico tal como Ca^{2+} .

Hay mucha controversia en la literatura de como el mecanismo por el cual el carbón activado es cargado con $Au(CN)_2$. Subsecuentes investigaciones usando espectroscopia Mossbauer, espectroscopia foto electrónica de rayos X (XPS o ESCA) y modelos extrantantes sobre soluciones de alto fuerza iónica, típica de aquellas obtenidos en

sistemas actuales de lixiviación de oro, han mostrado que los complejos de cianuro de oro se adsorben predominantemente como un par iónico.

Posteriores evidencias para esto han sido proveídas por superficie química, y otros, análisis los cuales han establecido que el estado de oxidación del oro sobre el carbón es +1. El mecanismo está mejor ilustrado por la ecuación:

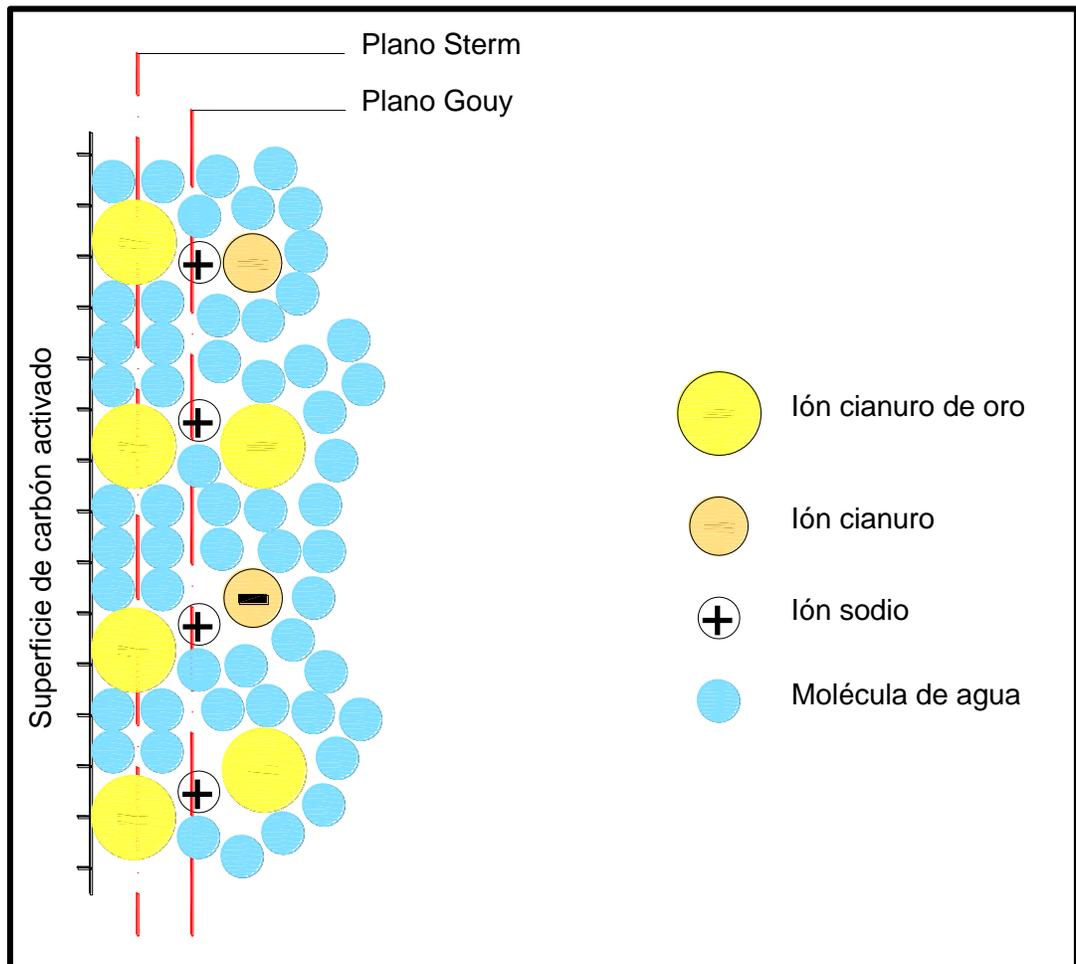


Donde el ion par, $M^{n+}[Au(CN)_2^-]_n$, es la especie de oro adsorbida.

Factores que afectan la adsorción de oro

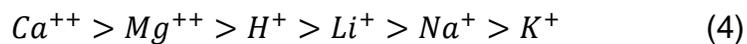
Los efectos de la fuerza iónica de solución sobre carbón cargado son significantes el cargado de carbón a partir de una solución de oro en agua des ionizada es bajo. La fuerza iónica de la solución de oro juega un papel importante en el mecanismo de adsorción.

Figura N° 02 Modelo esquemático de Adsorción para Cianuro de oro sobre la superficie de carbón activado.



Fuente: MISARI (1993) METALURGIA DE ORO.

Davidson (1974) probó experimentalmente que el grado al cual varios complejos de cianuro de oro son adsorbidos sobre el carbón activado depende de sus cationes. El aurocianuro de calcio parece ser el más fuerte complejo adsorbido en las siguientes series.



Factores físicos que afectan la adsorción de oro

Tipo de carbón

Los carbones producidos usando diferentes métodos o materiales fuentes, tienen un rango de propiedades físicas los cuales afectan la velocidad de adsorción y la capacidad de cargado. En general, los carbones de alta actividad son blandos, debido a una estructura porosa más extensa la cual reduce la fuerza mecánica del carbón. Aquellos carbones típicamente resultan de las altas pérdidas por atrición en plantas. Las pérdidas por atrición son importantes, no solamente porque consumen carbón, sino además están asociadas con las pérdidas de oro.

El tipo de carbón requerido para un proceso de aplicación particular depende de muchos factores incluyendo el tipo de proceso de adsorción (CIP, CIL o CIC), la concentración de oro, la velocidad de

flujo de la solución/pulpa, la velocidad de producción de oro, la velocidad de atrición del carbón y la severidad de las condiciones del proceso. Los carbones de alta actividad son usados cuando es requerida una alta eficiencia de adsorción, también prevenir pérdidas de valores de oro soluble o mejora en general la eficiencia del circuito. Los carbones de baja actividad son usados en circuitos en los cuales las pérdidas son menos susceptibles a perder oro cuando la eficiencia de adsorción del carbón es pobre y tienen la ventaja de tener bajas pérdidas por atrición.

Tamaño de partícula de carbón

Aunque la distribución del tamaño de partícula tiene un efecto significativo sobre el área superficial externa, tiene solo un efecto muy pequeño sobre el área de superficie específica a causa de la altamente desarrollada estructura porosa interna. Como resultado, la máxima capacidad de carbón cargado es virtualmente independiente del tamaño de partícula. Sin embargo, el tamaño tienen un gran efecto sobre la longitud media de poro dentro de las partículas de carbón y la velocidad de adsorción incrementa con el decrecimiento del tamaño de partícula.

Esto es un factor importante en los sistemas industriales de adsorción porque la mayoría opera el cargado del carbón por debajo de la verdadera capacidad de adsorción. Los rangos de tamaño de

partículas de carbones usados en aplicaciones industriales típicamente varían de 14 x 8 mallas a 6 x 12 mallas.

En la práctica, otros factores afectan la selección de tamaño de partículas de carbón:

1. El cribado del carbón eficientemente se hace grande y dificulta en tamaños finos (típicamente el cribado puede ser ejecutado a 0.7 – 0.8 mm en aplicaciones de pulpas).
2. El carbón fino es más susceptible a las pérdidas por atrición a causa de su gran área superficial a radio de masa, y generalmente es reducido a un tamaño donde pueda dejar la planta más rápido que partículas de carbón gruesas.
3. El carbón fino tiene una baja velocidad de fluidificación que el carbón grueso el cual afecta los diseños de equipos del proceso.

Los sistemas que contienen carbón con una amplia distribución de tamaño suelen experimentar perdidas de una diferencia en cargado de oro con el incremento del tamaño debido a un efecto llamado intercambio iónico por contacto.

Esto es un efecto medible fácilmente en el cual el oro es transferido del carbón cargado de oro al carbón de baja carga de oro y es llevado a cabo contacto directo de las delgadas películas que rodea la partícula de carbón, con despreciable oro pasando en la solución.

Eficiencia de mezclado

Las condiciones de mezclado tienen un efecto importante sobre la velocidad de adsorción de oro.

Este efecto es debido al hecho de que la mayoría de los sistemas de adsorción de carbón son operados en un pseudoequilibrio, por debajo del equilibrio máximo de cargado, donde la velocidad de adsorción es dependiente de alguna medida sobre la difusión a través de la capa límite sólido - líquido. Este pseudoequilibrio es atribuido a la proporción de poros que son utilizados dentro del tiempo de resistencia operativo del sistema de adsorción. Consecuentemente, el grado de mezcla de carbón en una solución o pulpa debe ser suficiente para:

- a) Mantener el carbón, solución y sólidos suspendidos y mantener la mezcla tan homogénea como sea posible, y
- b) Maximizar la velocidad de transporte de masa de las especies de cianuro de oro de la superficie del carbón, preferiblemente más rápido que la actual velocidad de adsorción en la superficie.

Factores químicos que afectan la adsorción de oro.

Temperatura

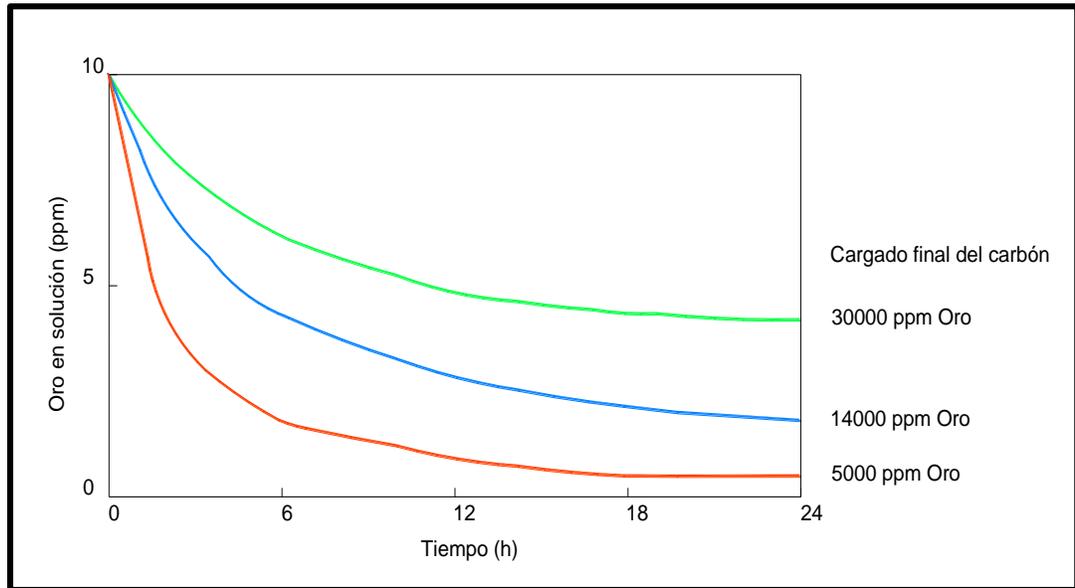
La adsorción de oro sobre carbón es exotérmica, el cual cuenta con la habilidad de invertir la adsorción por el incremento de

temperatura. Consecuentemente, la capacidad de cargado de oro decrece en cuanto la temperatura se incrementa. Esto es aprovechado en la alta temperatura de desorción de oro del carbón cargado. La velocidad de adsorción se incrementa ligeramente con el incremento de la temperatura debido a la difusión acelerada de especies de cianuro de oro, siguiendo un comportamiento descrito por la ecuación de Arrhenius.

Concentración de oro en la solución

La velocidad de adsorción de oro y el equilibrio de la capacidad de cargado, ambos se incrementan con el incremento de la concentración de oro en la solución, como parcialmente es ilustrado en la Figura N° 03. Típicamente velocidades de cargado de oro de 10 – 100 g Au/h/t carbón y cargados de 5 – 10 kg Au/t carbón son llevadas a cabo en la práctica en concentraciones de oro producidas por procesos estándares de lixiviación con cianuro.

Figura N° 03 Un ejemplo de la cinética del cargado de oro sobre carbón activado.



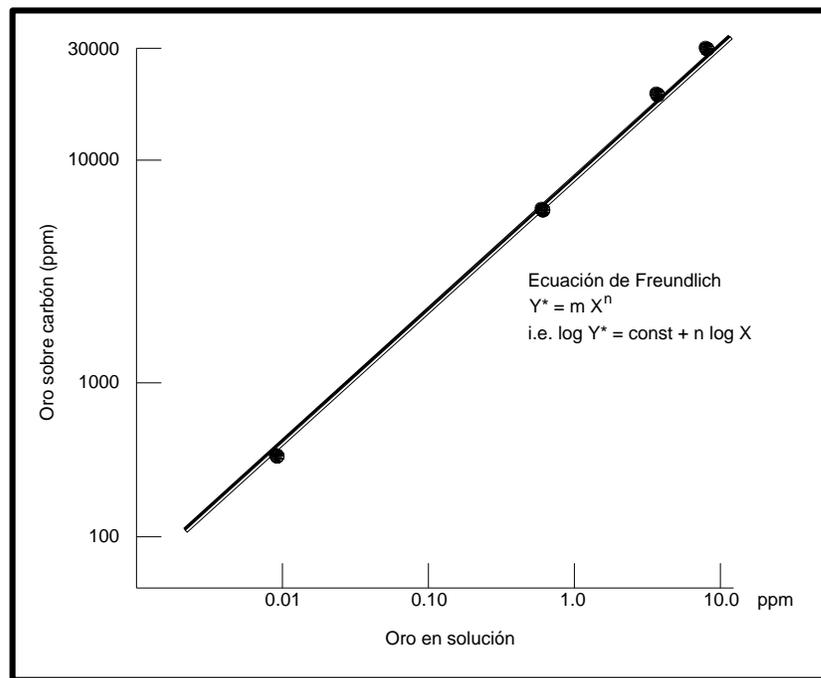
Fuente: MISARI (1993) METALURGIA DE ORO.

Velocidad de adsorción y capacidad de cargado de oro sobre el carbón

La velocidad de adsorción de oro sobre el carbón activado es muy dependiente de factores químicos y físicos los cuales afectan tanto la velocidad de adsorción y el equilibrio de la capacidad de cargado. La velocidad inicial de adsorción de oro es rápida, con la adsorción ocurriendo en los sitios más accesibles de macro poros, y

posiblemente meso poros, pero la velocidad decrece cuando el equilibrio se aproxima.

Figura N° 04 Isoterma de equilibrio de adsorción carbón cargado con oro.



Fuente: MISARI (1993) METALURGIA DE ORO.

Bajo estas condiciones la velocidad es controlada por el transporte de masa de las especies de cianuro de oro para las superficies del carbón activado. Sin embargo, una vez que esta capacidad de adsorción ha sido utilizada, un pseudo equilibrio es

establecido más allá en la cual la adsorción debe tomar lugar en los micros poros. Esta difusión requiere de las especies cianuradas de oro a lo largo de los poros dentro de la estructura del carbón, típicamente un proceso mucho más bajo que la difusión de las capas limite debido a la longitud y tortuosidad de los poros.

La energía de activación para la adsorción de oro sobre el carbón ha sido estimada en 11 Kj/mol la cual está bien adentro del rango esperado para el control de transporte de masa.

La velocidad de adsorción de oro sobre el carbón puede ser descrita por la ecuación de velocidad de primer orden:

$$\log C_t = mt + \log C_0 \quad (5)$$

Donde C_t = concentración de oro en el tiempo t , y C_0 = concentración inicial de oro y m es la constante de velocidad la cual puede ser determinada fácilmente de un ploteo de $\log C$ versus el tiempo, usando datos obtenidos de sencillos ensayos de laboratorio.

Una isoterma de equilibrio típica del cargado de oro es dada en la Figura N° 03. La capacidad de carga de carbón ha sido

tradicionalmente expresado como un número de yodo (la masa de yodo adsorbida por gramo de carbón es una solución de yodo 0.02 N) o como un número de tetracloruro (porcentaje en peso CCl_4 cargado sobre el carbón expuesto al aire saturado con CCl_4 a 0 °C). Ambos valores proveen una útil aproximación de la superficie de área útil para alguna fase de absorción de vapor, pero ha sido demostrado que tales aproximaciones son pobremente correlacionadas con la capacidad de adsorción de oro debido a la combinación compleja de procesos físicos y químicos implicados en la adsorción de oro de soluciones cianuradas.

Como consecuencia, los actuales datos de velocidad de cargado de oro son generalmente de uso más práctico en los actuales sistemas de adsorción, particularmente desde un verdadero equilibrio entre el oro en solución y el oro sobre el carbón nunca es conseguido.

Por la misma razón, es más apropiado usar un equilibrio empíricamente desarrollado de la capacidad de cargado de oro (valor K) para la evaluación de carbones que se usan en sistemas de adsorción de oro. Esto es obtenido por la reacción de varios pesos de carbón con una solución borato – buffer de oro estándar para un tiempo

fijado. Estos resultados son ploteados como la isoterma de Freundlich (Figura N° 03) y el valor de K es interpolado como el carbón cargado en equilibrio con una solución de oro residual con concentración de 1 mg/l.

Operación de etapas múltiples en contracorriente

En la parte superior de la Figura N° 05 se muestra el diagrama esquemático para este tipo de operación. Aquí los círculos representan todo el equipo y procedimiento que constituyen etapas múltiples en contracorriente.

La solución a tratar contiene G_s lb de sustancia no adsorbida o solvente, y la concentración de soluto absorbible se reduce de Y_0 a Y_1 , lb de soluto/lb de solvente. Se adiciona el adsorbente hasta la cantidad de L_s lb de sólido libre de adsorbido, y el contenido de adsorbido soluto aumenta de X_0 a X_1 lb de soluto/lb de adsorbente. Si se utiliza adsorbente nuevo en la última etapa, $X_{Np+1}=0$. Puede tenerse una buena economía con la operación en contracorriente. Cuando se utilizan métodos discontinuos de tratamiento, esto puede solo simularse siguiendo el esquema general de las operaciones discontinuas en contracorriente simuladas para la extracción líquida que se muestra en

el esquema de la Figura N° 05 que se transforma entonces en el estado estacionario final alcanzado después de numerosos ciclos.

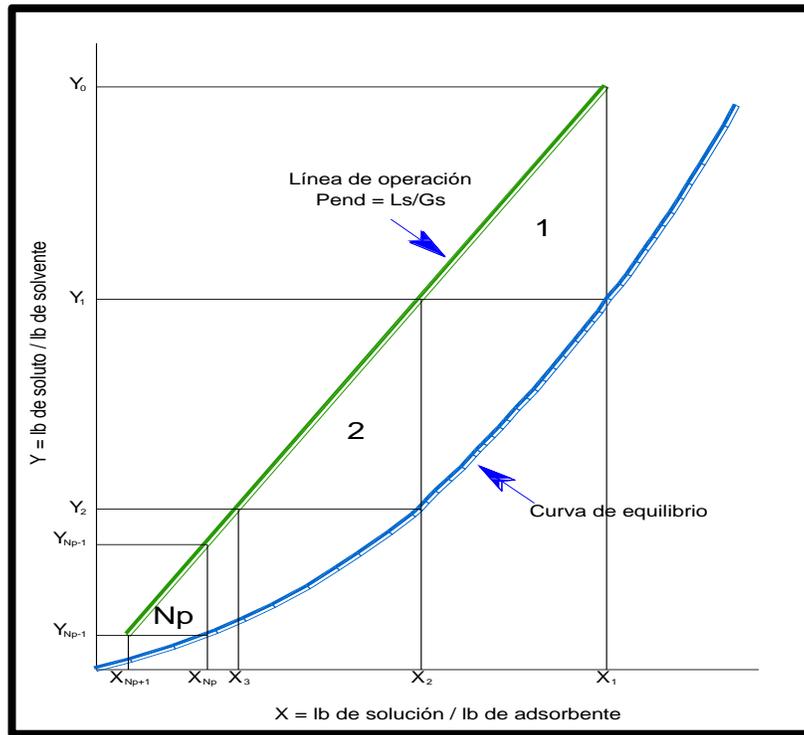
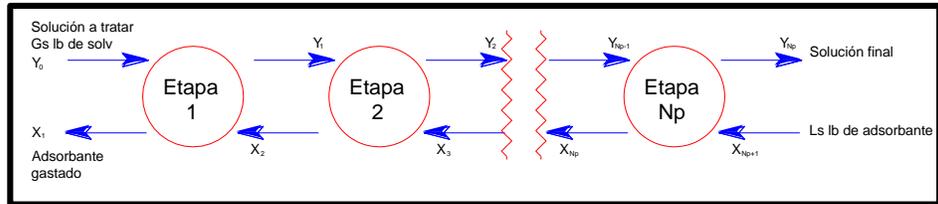
Un balance de soluto para las etapas Np es:

$$G_s(Y_0 - Y_{Np}) = L_s(X_1 - X_{Np+1}) \quad (6)$$

El que suministra la línea de operación de la figura, mediante las coordenadas de las condiciones terminales (X_{Np+1}, Y_{Np}) y (X_1, Y_0) de pendiente L_s/G_s .

Se halla el número necesario de etapas teóricas trazando la habitual figura en escalones, entre la curva de equilibrio y la línea de operación, del modo que se muestre. De otro modo se puede hallar la relación solución/adsorbente para un número predeterminado de etapas ubicando por tanteos la línea de operación.

Figura N° 05 Adsorción en etapas múltiples en contracorriente



Fuente: HABASHI, (1993) Principles of Extractive Metallurgy.

Consideraciones del proceso

Preparación de carbón

El carbón fresco, a pesar de ser manufacturado a especificaciones particulares de tamaño, siempre contiene pequeñas cantidades de carbón fino el cual es inadecuado para el uso en sistemas de carbón.

En suma, mucho de los carbones producidos por los fabricantes es de forma angular, conteniendo puntos y cuñas filudas los cuales son fácilmente desgastados bajo condiciones de proceso. Similarmente, partículas planas (placas) y partículas deterioradas (Cuarteadas o fracturado) son susceptibles a la degradación rápida en sistemas de adsorción, resultando en pérdidas de carbón fino y cualquier contenido de oro.

Consecuentemente es deseable remover el carbón fino que es más rápidamente generado a partir del carbón fresco previo a la introducción en el circuito de adsorción. Esto es usualmente ejecutado por la agitación mecánica en agua a 10 – 20% de sólidos para 0.5 – 2 h o por la recirculación hacia una zaranda mediante un reductor.

Típicamente entre 1 y 3% del total del peso del carbón es removido como finos, dependiente del tipo de carbón y la severidad y duración del atricionante.

La mezcla condicionada (carbón grueso, carbón fino y agua) es entonces cribada a un tamaño ligeramente grueso que el tamaño de criba empleando para el cribado entre etapas dentro del circuito de adsorción, el carbón grueso producido está listo para el uso, mientras que la pulpa con carbón fino es descargada del proceso.

Proceso de columnas en carbón CIC

La solución enriquecida producto de la lixiviación en pilas (solución pregnant) es bombeada desde la poza pregnant a los circuitos de adsorción, el sistema tiene una configuración horizontal de seis columnas por circuito, con una capacidad de 4 TM de carbón activado cada una, con la finalidad de que los valores de oro sean adsorbidos. De acuerdo a los criterios de diseño, se ha considerado que la capacidad de carga del carbón activado alcanzara valores alrededor de 3.0 kg de oro por tonelada de carbón antes de pasar al siguiente proceso.

Se ha calculado que la solución pregnant en condiciones de equilibrio tendrá leyes de oro alrededor de 0.391 a 0.430 g/m³.

En la línea de ingreso de cada circuito de adsorción estará instalado un flujómetro electromagnético para el registro del caudal así como sus respectivos accesorios de control y seguridad.

La solución pobre que saldrá de cada circuito de adsorción (solución barren) será conducida a unas zarandas estacionarias tipo DSM de malla 20 y 100, instaladas en serie, para la separación de partículas de carbón que podrían ser arrastrados de las columnas de adsorción, luego de las cuales caerán al tanque barren. En el tanque barren se adicionará el anti-incrustante y se realizara el Make Up de NaCN para reajustar la fuerza en la solución cianurada, y luego será bombeada a las pilas de lixiviación, produciéndose de esta manera el circuito cerrado en forma permanente.

Una vez que el carbón activado cargue alrededor de 3.0 kg de oro por tonelada en la primera columna, esta se descargará en las tolvas de almacenamiento y zarandeo para reducir la presencia de carbón fino, el carbón activado limpio será enviado mediante un eductor al proceso de desorción.

El procedimiento de operación para la descarga del carbón será aislando la columna que se va a descargar por medio de válvulas tipo mariposa que cortarán el ingreso de solución pregnant a la columna, derivando la solución a la columna siguiente con la cual se continuará el proceso y el carbón de la columna aislada será descargado mediante el uso de un eductor hacia la tolva de almacenamiento de carbón.

Cuando la columna haya sido descargada (4 toneladas de carbón) ésta cantidad será repuesta con carbón desorbido, regenerado o nuevo procedente del área de manejo de carbón.

Desorción de oro del carbón activado

Generalidades

Fue el de desarrollo de un proceso eficiente para la elución de oro y plata partir del carbón activado que hizo a la adsorción con carbón una alternativa viable económicamente a la precipitación con polvo de zinc Merrill & Crowe.

El descubrimiento de J.B. Zadra de un método de desorción a inicios de 1950 hizo posible la aplicación a escala comercial del proceso

CIP. Antes de este desarrollo el carbón ha sido usado con éxito para adsorber oro, pero el único método para recuperar el oro a partir de este fue por fundición del carbón. 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 e Cripple Creek. Colorado (1954 – 1960).

Los fines y objetivos de la etapa de desorción (elución) son:

1. Recuperar la mayor cantidad de valores metálicos cargados a partir de la solución desorbida en un volumen tan pequeño como sea posible.
2. Producir una solución impregnada con el tenor más alto posible de metales preciosos.
3. Dejar la menor cantidad de oro y plata posible en el carbón después de la desorción.
4. Dejar el carbón listo para retornar al sistema de adsorción.
5. Operar con seguridad y en forma económica en un desarrollo industrial.

El tamaño y en algún grado el tipo de sistema de elución requerido para una planta depende de varios factores:

1. La cantidad total de oro y plata a ser desorbido, el cual es controlado por la capacidad de planta y el grado de mineral.
2. El oro y plata cargado en el carbón a ser desorbido.
3. La velocidad a la cual el carbón avanza a través del circuito y
4. El tiempo que tomara para desorber el carbón a niveles apropiadamente bajos.

Durante los últimos 10 años, se ha visto la aparición de cuatro técnicas de elución:

1. El proceso Atmosférico Zadra
2. El proceso de re extracción con alcohol.
3. Proceso de re extracción a alta presión.
4. Proceso Anglo Americano (AARL).

Una amplia gama de compuestos inorgánicos para desorber el complejo adsorbido oro-cianuro en el carbón han sido investigados (Gross y Scott, 1927). Cianuro de potasio y sulfuro de sodio mostraron el poder disolvente más alto por el oro adsorbido. Este fue perseguido más recientemente (Zadra, 1950) y se encontró que un oro cargado en el carbón que contiene una carga de plata insignificante podría ser

desorbida de manera eficiente con una solución caliente (93°C) de sulfuro de sodio alcalino. Esta técnica de elución no es aplicable a los carbones que llevan plata, desde sulfuro de plata insoluble (Ag_2S) se precipita en los poros del carbón y este es retenido. Sin embargo, Homestake opero un procedimiento Zadra modificado (Zadra, Engel y Heinen, 1952) que utiliza una solución de cianuro alcalino caliente entre 90° a 93°C (La solución estuvo conformada por 1.0% de NaOH + 0,1% NaCN) a presión atmosférica obteniendo una desorción eficiente de oro y plata. En el circuito que se propuso originalmente. el eluyente o solución strip se bombea de flujo ascendente a través del lecho de carbón cargado, y el eluyente que contiene el oro y la plata desorbido se alimenta entonces a una célula electrolítica circular equipado con un ánodo de acero inoxidable y un cátodo con lana de acero. Como la celda y la unidad de desorción forman un circuito cerrado, los valores de oro y plata desorbidas se retiran del eluyente por electrodeposición tan rápidamente como son desorbidos del carbón, el electrolito estéril se convierte en el eluyente y se recicla al circuito de desorción. Por lo tanto, la desorción continua se consigue con un volumen mínimo de eluyente. Los valores de oro y plata son finalmente recuperados por la fundición de la lana de acero para obtener posteriormente los lingotes.

En la aplicación del procedimiento de desorción Zadra modificado en el Carlton Cripple Mill, Cripple Creek, Colorado (Ross, Salisbury y Potter, 1973), se encontró que eran necesarias de 24 a 48 horas para quitar el oro del carbón. Esto llevó a una investigación sobre técnicas de desorción que quita al oro más rápidamente, lo que llevó al desarrollo de un método de extracción a presión.

Anglo American Research Laboratories (AARL) investigó la desorción de oro usando agua desionizada tras el pre tratamiento de carbón cargado con varios relativamente fuertes reactivos cáustica / cianuro (Davidson y Duncanson, 1977; Davidson y Veronese, 1,979), aunque la desorción de oro eficiente usando solamente NaOH como reactivo de pre tratamiento se demostró, se observó poca o ninguna desorción de Ag, Cu, Ni y Zn. Mejoras significativas se obtuvieron más tarde usando un reactivo de pre tratamiento NaCN / NaOH. En el método AARL, el eluyente no se recicla a la columna de desorción.

El procedimiento de desorción AARL utilizando una columna de desorción con una relación diámetro / longitud relativamente alta en comparación con las columnas de elución Zadra se puso a prueba por primera vez en la mina de oro de Fairview y luego en el Golden Vuelca Limited y ahora es de uso general en Sudáfrica. El eluyente de las columnas de desorción se procesa generalmente en un circuito de

extracción electrolítica, aunque la cementación de zinc es actualmente una atención considerable, ahorro importante de energía y de los reactivos en comparación con el proceso de Zadra se reivindican.

Algunas investigaciones establecieron que cuando se añadieron etanol y ciertos disolventes miscibles otra de agua para soluciones de cianuro acuosas, tenían un efecto notable sobre la desorción de oro (Heinen, Peterson y Lindstrom, 1976;. Martin et al, 1976). Por ejemplo, se encontró que el oro fue despojado rápida y eficientemente a 60° C usando 20% soluciones de etanol en contraste con las condiciones lentas, de alta temperatura de cianuro acuosa originalmente desarrollados por Zadra. Sin embargo, no se estableció la razón de este efecto disolvente. En un estudio adicional (Tsuchida, Ruane y Muir, 1984) usando una variedad de disolventes orgánicos que contienen diferentes grupos funcionales, se encontró que el acetonitrilo acuoso (AN) era el mejor disolvente para la desorción de oro. Cuando una solución que contiene 40% v/v AN y 0.25 M NaCN, a temperatura ambiente, se puso en contacto con carbón cargado de oro, más del 80% del oro se desorbe del carbón en menos de 10 horas. El acetonitrilo fue un poco mejor disolvente de acetona, y mucho mejor que la dimetilformamida o etanol a la misma concentración. Otros estudios (Ruane, 1982) establecieron que el oro podría ser desorbido efectivamente de carbono utilizando 1 a 2 bed volumen de acetonitrilo

acuoso, que compararon favorablemente con el Zadra y AARL. La razón principal por la que los disolventes orgánicos, y acetonitrilo, en particular, promueven la desorción de oro parecería relacionarse con el efecto del disolvente sobre la actividad de CN^- y $Au(CN)_2^-$, debido a la adsorción preferencial de disolvente sobre la superficie del carbón.

Mientras que la desorción de oro usando disolventes orgánicos es sin duda más eficiente a temperaturas de funcionamiento más bajas que las utilizadas en otros procedimientos de desorción, tanto la necesidad para la recuperación del disolvente y los riesgos de incendio tal vez han limitado su uso más amplio en África del Sur, en particular en operaciones a gran escala. Procesos de desorción orgánicos son, sin embargo, utilizados para pequeñas operaciones. También se afirma que la elución disolvente orgánico regenera eficazmente al carbón, eliminando así la necesidad de regenerar de carbono térmicamente, pero esta afirmación es quizás especulativa en la actualidad.

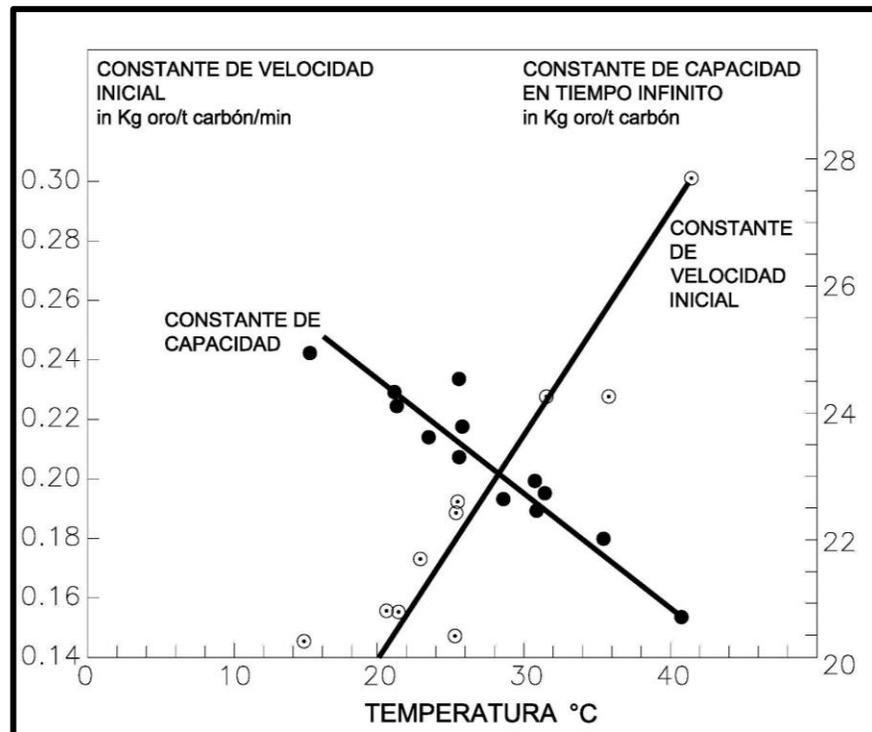
Efectos físicos y químicos

La desorción de oro a partir de carbón activado por cualquiera de los sistemas ya descritos se basa en el control de las condiciones que reducen la capacidad de carga de oro en el carbón.

Temperatura

La temperatura es probablemente la variable que tiene el mayor efecto sobre la velocidad de desorción. La disminución de la constante de la capacidad para el carbón en el rango de temperatura de 15 a 40°C se presenta en la Figura N° 06 (Davidson, Douglas y Tum 1982).

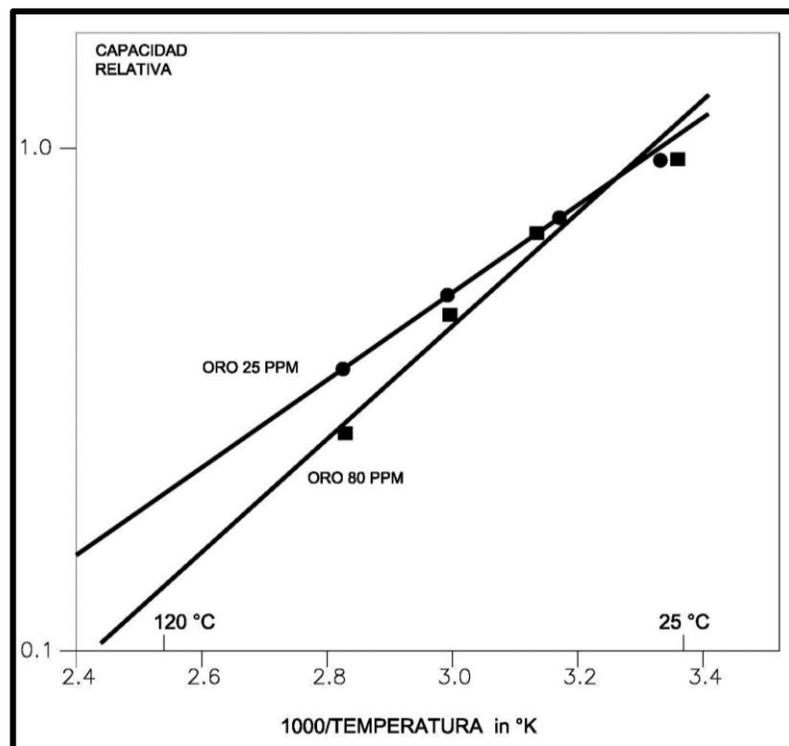
Figura N° 06 Efecto de la temperatura en ratios de adsorción de oro en planta con solución sintética a pH 10 (from Davidson, Douglas and Tumilty, 1982)



Fuente: HABASHI, (1993) Principles of Extractive Metallurgy.

El efecto de la temperatura hasta 85°C interviene en la capacidad relativa de carbón activado para aurocianuro esto se dio en dos estudios independientes (Nicol, 1985) (Figura N° 07).

Figura N° 07 El efecto de la temperatura en la capacidad de carga de oro en el carbón

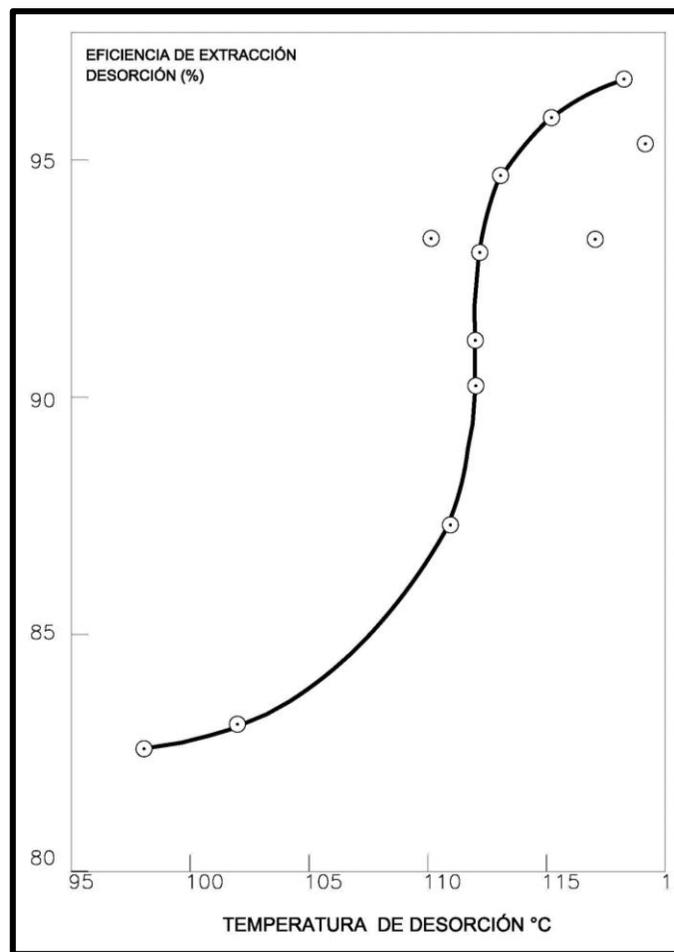


Fuente: HABASHI, (1993) Principles of Extractive Metallurgy.

Es evidente que un aumento de temperatura de 100° C tiene el efecto de disminuir la capacidad de carga de carbono por casi un orden

de magnitud. Los datos reales de funcionamiento de la mina Beatrix (Bailey, 1985e) mostraron que la extracción de la desorción aumentó significativamente cuando la temperatura se incrementa por encima de 115 °C y que no se trataba de una relación lineal (Figura N° 08).

Figura N° 08 El efecto de la temperatura en la eficiencia de extracción en la desorción en mina Beatrix.



Fuente: HABASHI, (1993) Principles of Extractive Metallurgy.

Otras investigaciones mostraron una curva similar, excepto que el cambio se produce a una temperatura ligeramente mayor de 120 - 125° C (Holtum, Rubin y. Laxen 1.981).

Fuerza Iónica

La presencia de sólidos disueltos en la solución de adsorción generalmente resulta en un aumento en la capacidad de carga del carbón como se muestra en la Tabla N° 01 La capacidad del carbono activado para oro aumenta al aumentar la concentración de cationes en solución en el orden:

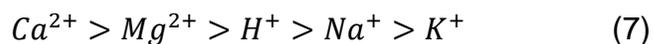


Tabla N° 01 El efecto del intercambio iónico de una solución en el equilibrio de la carga de oro en solución conteniendo 30 ppm de oro (De Fleming y Nicol, 1984)

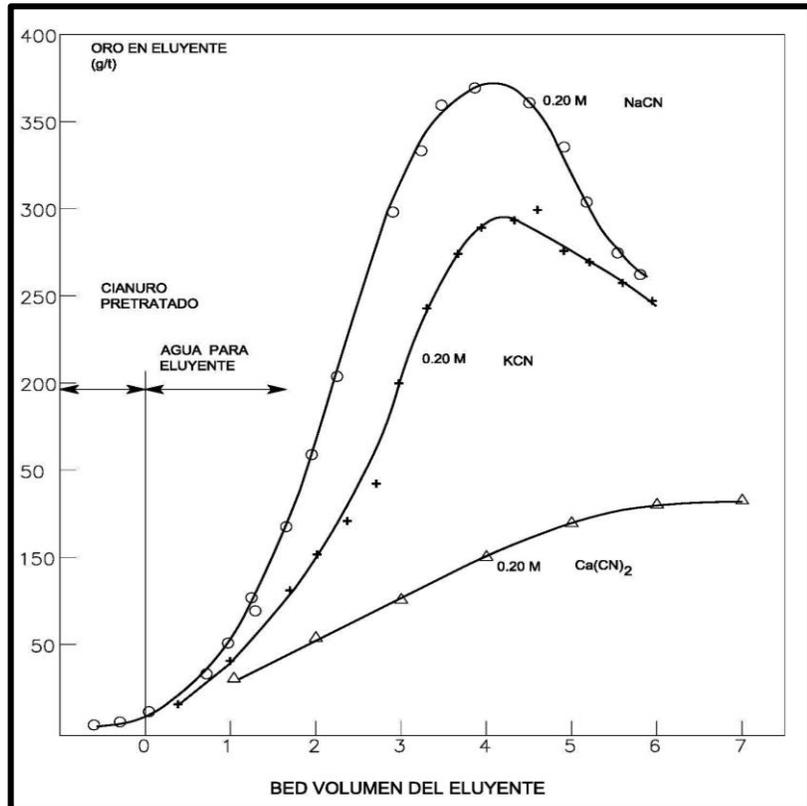
| Intercambio ionico (M) | Capacidad (kg/t) |
|---------------------------|---------------------|
| 0.005 | 56 |
| 0.01 | 60 |
| 0.02 | 63 |
| 0.05 | 73 |
| 0.10 | 84 |
| 1.0 | 113 |

Fuente: HABASHI, (1993) Principles of Extractive Metallurgy.

Por lo tanto, la desorción se ve favorecida por las condiciones de baja fuerza iónica y la ausencia de iones tales como Ca^{2+} y Mg^{2+} . Esto por supuesto es la base del procedimiento de desorción AARL, en el que se postula que el pre tratamiento con cianuro cáustico caliente convierte el $Ca^{2+}[Au(CN)^-]_2$, en el par iónico fuertemente adsorbido $Na^+Au(CN)^-$, que después se despoja en las condiciones de baja fuerza producida por el uso de agua ablandada o desmineralizada.

Al realizar la desorción utilizando diversas soluciones de cianuro como prelavados muestra claramente el efecto de los iones Ca^{2+} en los perfiles de la desorción (McDougall, Van Velde, Wellington y Hancock, publicación por Mintek 1980) (Figura N° 09).

Figure N° 09 El efecto de la diferencia de cationes cianuro en un ratio de desorción de oro



Fuente: HABASHI, (1993) Principles of Extractive Metallurgy.

Electrodeposición de oro

Principios electroquímicos

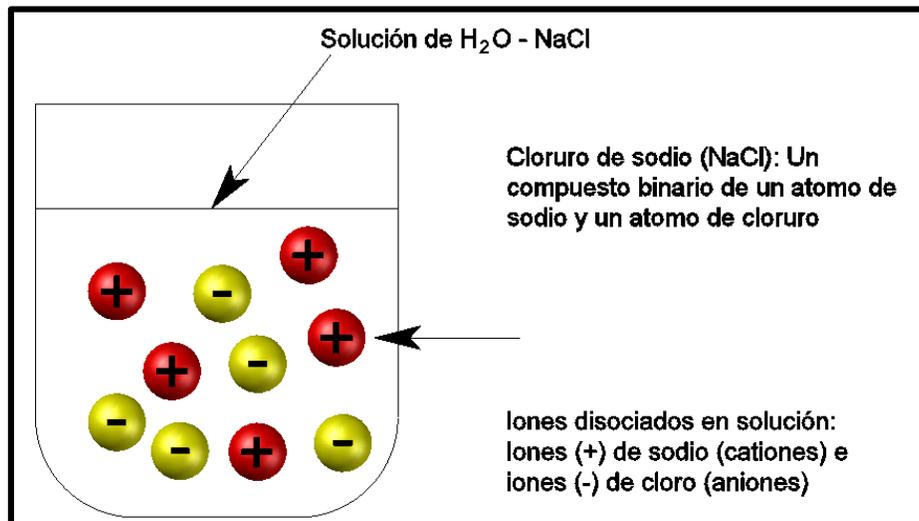
Ionización

S.A. Arrhenius en 1887, intento explicar la anomalía de la alta presión osmótica ejercida por muchas soluciones acuosas. Él descubrió que solo las soluciones que conducen la corriente ejercen alta presión osmótica. A partir de esto, él dedujo que había presentes en esas soluciones algunos otros tipos de partículas que otras moléculas y las designó como término de Faraday "iones".

Simplemente explicada, ionización es la formación de iones. Si se disuelve una tableta de sal (cloruro de sodio) en agua, los elementos de sodio y cloro serán disociados en la solución de agua en iones, iones positivos llamados cationes e iones negativos llamados aniones.

El sodio (Na) tiene valencia +1, así sus iones son cationes y el cloro (Cl) como cloruro tiene una valencia de -1 así sus iones son aniones.

Figura N° 10 Iones disociados en una solución



Fuente: HABASHI, (1993) Principles of Extractive Metallurgy.

La ionización es siempre reversible. Se puede remover iones como un sólido o como un gas. Se puede reemplazar iones, poniendo un tipo en solución para abandonar el tipo deseado (como un sólido). Se suele recordar que si se coge un pedazo de cobre limpio en una solución de ácido nítrico conteniendo iones de plata, el cobre comenzara a disolverse, desprendiendo iones de cobre en la solución, mientras los iones de plata salen de la solución y atacan al cobre remanente como cristales de plata metálicos.

Esta acción es llamada intercambio iónico, se va sin la ayuda de un lado externo de corriente eléctrica y está basado sobre las diferencias de potencial entre los iones implicados.

Potencial eléctrico estándar

La tabla abajo muestra aproximadamente el potencial eléctrico de elementos metálicos hacia soluciones con normal concentración o actividad de iones metálicos, basado sobre hidrogeno de voltaje cero.

Cada metal reemplazará los iones de cualquier metal en solución que sea más noble (o más eléctricamente positivo) que si mismo. Por ejemplo los iones de zinc ($a - 0.76 \text{ V}$) reemplazara los iones de cadmio ($a - 0.4 \text{ V}$) porque los iones de cadmio son más positivos que los iones de zinc.

Cuando un ion entra en contacto con un ion que es más negativo que si mismo (asumiendo que la solución está en equilibrio), es neutralizado y se convierte a su forma metálica.

Este es el principio de precipitar iones de oro presentes en una solución de agua regia con sulfato ferroso. El hierro tiene un potencial

eléctrico único de -0.44 V y el oro un potencial eléctrico único de + 1.36 V.

Tabla N° 02 Potencial eléctrico

| Negativo | | | Positivo | | |
|---|-------|---|--|-------|---|
| $\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \Delta \text{Al}$ | -1.71 | v | Antimonio | +0.10 | v |
| $\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \Delta \text{Zn}$ | -0.76 | v | Bismuto | +0.20 | v |
| $\text{Cr}^{2+} + 2\text{e}^- \Delta \text{Cr}$ | -0.56 | v | Arsenico | +0.32 | v |
| $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \Delta \text{Fe}$ | -0.44 | v | $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \Delta \text{Cu}$ | +0.34 | v |
| $\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \Delta \text{Cd}$ | -0.40 | v | Rodio | +0.68 | v |
| Indio | -0.34 | v | $\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \Delta 2\text{Hg}$ | +0.78 | v |
| $\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \Delta \text{Co}$ | -0.28 | v | $\text{Ag}^+ + \text{e}^- \Delta \text{Ag}$ | +0.80 | v |
| $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \Delta \text{Ni}$ | -0.23 | v | Platino | +0.90 | v |
| $\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \Delta \text{Sn}$ | -0.14 | v | $\text{Au}^{3+} + 2\text{e}^- \Delta \text{Au}^+$ | +1.36 | v |
| $\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \Delta \text{Pb}$ | -0.12 | v | $\text{Au}^+ + 2\text{e}^- \Delta \text{Au}$ | +1.69 | v |

Fuente: elaboración propia.

Electrolisis

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.

Sobre una base de tonelaje de producción, la técnica para recuperación de metales más ampliamente usada (de soluciones acuosas) es la electrolisis.

La electrolisis es la recuperación de un metal de una solución por el uso de la corriente eléctrica.

Una celda electrolítica debe tener cuatro componentes esenciales, tales como:

- a) Una superficie anódica donde ocurre la oxidación.
- b) Una superficie catódica donde ocurre la reducción.
- c) Un conductor eléctrico para llevar corriente.
- d) Un electrolito (un conductor iónico).

Una fuente de potencia eléctrica debe estar disponible con la finalidad de forzar a las reacciones a que ocurran ya que ellas no son espontaneas de por sí.

Unidades electroquímicas

El amperio se define electroquímicamente como la corriente eléctrica de intensidad invariable que deposita plata a razón de 0.00111800 g/seg de una solución acuosa de Ag_2NO_3 bajo una serie de especificaciones fijas. Dividiendo la intensidad en amperios que pasa por una sección de un conductor por el área de dicha sección, se obtiene lo que se llama la densidad de corriente (j) (amperios por metro cuadrado o amperios por centímetro cuadrado, etc.).

El coulombio o amperio – segundo es la cantidad de electricidad que deposita 0.00111800 g de plata de una solución acuosa de Ag_2NO_3 .

También se conoce que es la cantidad de electricidad que fluye por un conductor cuando una corriente de 1 amperio es mantenida por un segundo.

Leyes electroquímicas

A mediados del siglo XIX, Faraday estableció la relación entre la cantidad de electricidad que fluye y la cantidad de materia liberada. Sus investigaciones condujeron a la formulación de las dos leyes de la electrolisis.

1. La cantidad de descomposición electroquímica producida en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad (coulombio) que pasa a través del circuito.
2. Las cantidades de sustancias diferentes producidas por la misma cantidad de electricidad serán proporcionales a sus pesos equivalentes.

Un equivalente de cualquier sustancia será liberada (oxidada o reducida) por un Faraday, F , el cual es aproximadamente 96500 coulombio. El equivalente electroquímico de un elemento o de un grupo de elementos es el número de gramos de esa sustancia liberados por el paso de 1 coulombio de electricidad a través de un electrolito. Los

equivalentes electroquímicos son proporcionales a los equivalentes químicos.

Un coulombio de electricidad libera (por definición) 0.00111800 g de plata de una solución de una sal de este metal. Si el equivalente gramo de la plata (su peso atómico en gramos dividido por su valencia) se divide por el equivalente electroquímico de la plata hallamos que:

$$\frac{107.88}{0.00111800} = 96494 \text{ coulombios} \quad (8)$$

Esta cantidad de electricidad recibe el nombre de Faraday (F). Se toma igual a 96500 coulombio, o sea, 26.8 amp - h. Si se hace pasar un Faraday a través de un conductor electrolítico, se liberara 1 equivalente – gramo de alguna substancia en cada electrodo. Si se hace pasar un Faraday a través de una solución que contiene varios electrolitos, la suma de las cantidades de los diferentes productos puestos en libertad en cada electrodo, expresadas en equivalentes, es igual la unidad.

En la práctica se necesita más de un Faraday para la liberación de un equivalente gramo de una substancia. Esto no se debe a que fallen las leyes de Faraday, sino a otras causas, como producirse reacciones secundarias en el electrolito, sufrir pérdidas mecánicas los

productos de la electrolisis y originarse reacciones secundarias en los electrodos.

$$W = \frac{EIt}{96500} \quad (9)$$

Donde,

W = peso, gramos

E = peso equivalente, peso atómico/valencia

I = corriente, amperios

T = tiempo, seg

Otro término algunas veces usado es el equivalente electroquímico que es la cantidad de material liberado por 1 coulombio, por ejemplo E/96500.

Conducción electrolítica

La conducción electrolítica, en la cual la carga es transportada por los iones, no ocurrirá a menos que los iones del electrolito se puedan mover libremente. Por consiguiente, la conducción electrolítica es exhibida principalmente por sales fundidas y por soluciones acuosas de electrolitos. Por consiguiente, una corriente que pase a través de un

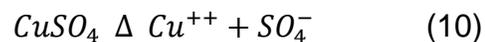
conductor electrolítico requiere que el cambio químico acompañe el movimiento de los iones.

Cuando se aplica una corriente eléctrica externa DC a una solución conteniendo iones positivos y negativos, se inicia la electrolisis. La solución es llamada el electrolito.

En refinación y extracción, el término “solución pregnant” es usado a menudo para referir a una solución conteniendo iones metálicos y otras.

Una solución pregnant puede ser hecha disolviendo una solución de cobre (por ejemplo, sulfato de cobre (CuSO_4) en agua y adicionado el ácido correspondiente de la sal (es este caso, ácido sulfúrico (H_2SO_4)) para incrementar la conductividad de la solución.

La ecuación química para la separación de sulfato de cobre en ácido sulfúrico diluido es:



El lado izquierdo de esta ecuación representa solamente los elementos químicos implicados en el electrólito. El lado derecho muestra que, en la solución de ácido sulfúrico, los iones de Cu^{++} y los iones SO_4^- son disociados y se mueven alrededor de la solución en random hasta que sean influenciadas por la adición de un reactivo.

Colocando la solución en un beacker grande sobre un plato calentado y con una fuente de corriente DC ya sea una batería, un rectificador o un generador de DC, es posible realizar una explicación de las reacciones del proceso.

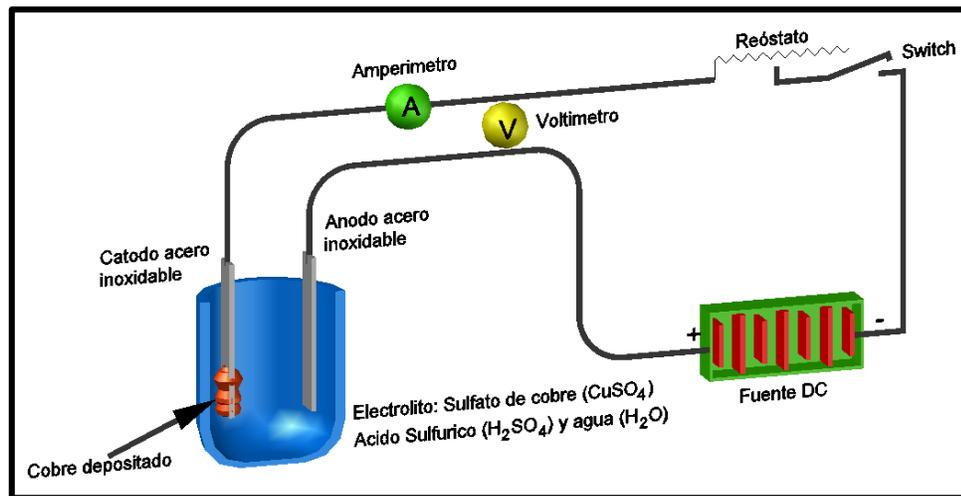
En la ilustración se tiene una batería de automóvil de 6 volts, un voltímetro, un amperímetro y un reóstato.

Atando una placa de acero inoxidable al alambre positivo, este es el ánodo.

Atando otra placa de acero inoxidable al alambre negativo, este es el cátodo. Sumergiendo parcialmente ambas placas en el electrolito de sulfato de cobre, cuando se cierra el switch se aplica un potencial eléctrico que cruza la solución entre las dos placas de acero inoxidable, los iones positivos (Cu^{++}) se van a la placa negativa. Cuando cada uno

de los iones de cobre, que llevan su doble cara positiva, hace contacto con la placa de acero inoxidable cargada negativamente, la carga ++ que lleva es cancelada por la placa negativa, y los iones de Cu^{++} son convertidos a una red metálica de cobre que se deposita sobre el cátodo. Mientras esto se da, los iones negativos (SO_4^-) se va a la placa positiva, el ánodo. Cuando consiguen entrar en contacto, pierden sus electrones (las cargas -) y se vuelven radicales.

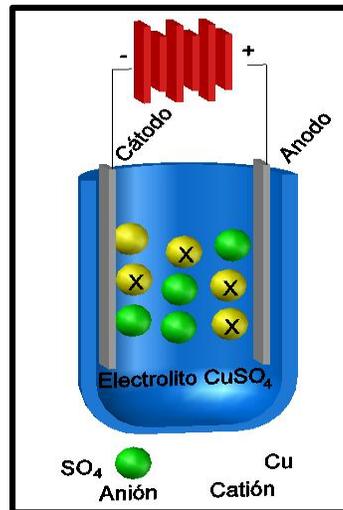
Figura N° 11 Circuito sencillo para depositar sobre



Fuente: HABASHI, (1993) Principles of Extractive Metallurgy.

Esta acción completa podría ser descrita como una reacción química producida por un corto circuito miniatura de iones + y - con placas cargadas positiva y negativamente.

Figura N° 12 Reacciones iónicas en una celda



Fuente: HABASHI, (1993) Principles of Extractive Metallurgy.

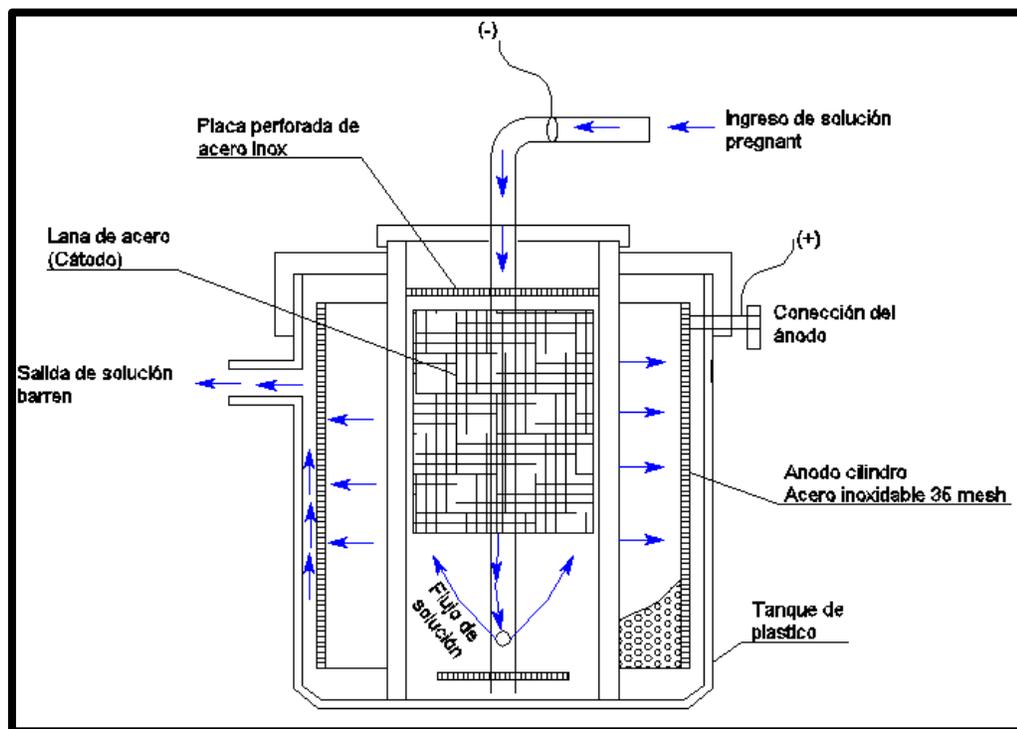
La fuerza eléctrica en este caso podría ser llamada catalizador, así causa una reacción química pero es en sí misma inalterada por la reacción.

Los cambios químicos y eléctricos que ocurren durante la electrólisis son representados por ecuaciones electroquímicas en los cuales los iones llevan cargas iguales a su valencia química.

Si se permite que la celda con el electrolito ion cobre y el ánodo de acero inoxidable y el cátodo continúe corriendo, atrapar los valores de la solución. Este es uno de los principios de sistemas

electroquímicos de recuperación de valores de soluciones de cianuro o ácido pregnant en la extracción primaria de un metal. El metal puede ser depositado sobre lana de acero o sobre cátodos de metal puro.

Figura N° 13 Un tipo de celda electrolítica de lana de acero



Fuente: elaboración propia.

Electrodeposición (electrowinning)

El electrowinning es usado para el tratamiento de soluciones con contenido de oro en alto grado como por ejemplo las de desorción de

carbón, produciendo cátodos cargados, los cuales requieren refinaciones posteriores.

Fundamentos del electrowinning

Una reacción de reducción catódica puede ser manejada en soluciones acuosas mediante la aplicación de un voltaje a través de un par de electrodos sumergidos en la solución. El voltaje aplicado debe exceder el potencial reversible del electrodo para la reacción deseada a ocurrir, y debe permitir para la caída de voltaje debido a la resistencia de la solución; una función de la conductividad de la solución. La cantidad por la cual el voltaje aplicado excede el potencial reversible del electrodo (E_r) es referida como el voltaje sobre potencial:

$$n = E_{aplicado} - E_r \quad (11)$$

La reducción en el cátodo está acompañada por la reacción de oxidación paralela al ánodo, usualmente la oxigenación de agua a oxígeno.

Considerando la electro-reducción de un ión metálico (M^{Z+}) el voltaje total de la celda está representado por:

$$V = E(O_2/H_2O) + E(M^{Z+}/M) + n_a + n_c + iR \quad (12)$$

Donde n_a y n_c son los sobre potenciales anódico y catódico, respectivamente, y el término iR representa la caída de potencial a través de la solución debido a la resistencia (o conductividad) de la solución.

Esto es ilustrado para un sistema de una celda en la Figura N° 14 y 15.

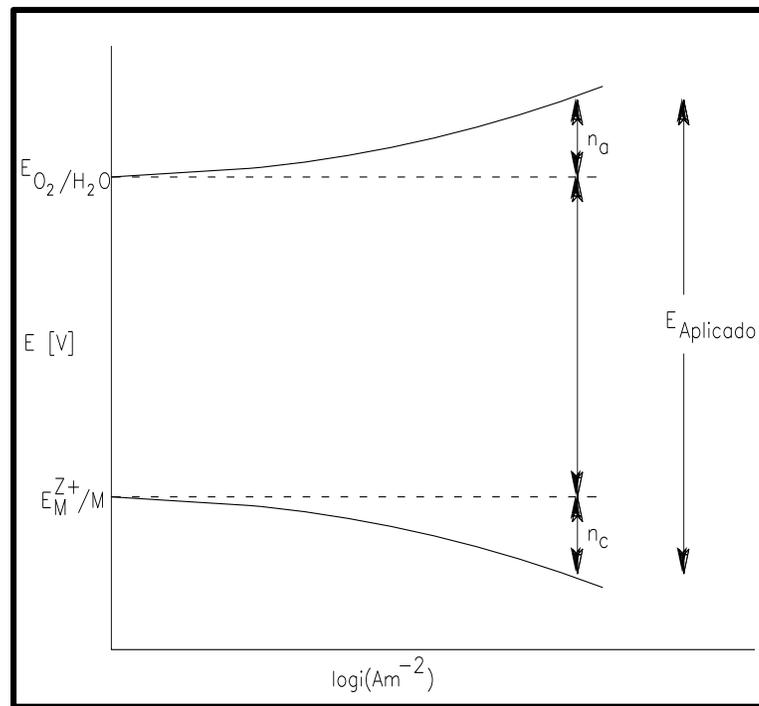
La velocidad del proceso de transferencia del electrón está descrita por la ecuación Butler-Volmer:

$$i = i_0 e^{\left(-\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right)} - e^{\left((1-\alpha)\left(\frac{n F \eta}{RT}\right)\right)} \quad (13)$$

En sobre potenciales altos, aproximadamente sobre 50 mV, el segundo término, el cual es debido a la reacción reversa o “back” suele ser descuidada. Como el sobre potencial es incrementado la concentración de especies reducidas cierra a la superficie del cátodo que viene a ser reducida, desde la transferencia de masa de las especies iónicas a través de la capa límite que no puede mantenerse con la velocidad de la reacción electroquímica. En éste punto la velocidad de reacción se convierte en una transferencia de masa controlada. La corriente en la cual esto ocurre es conocida como la

densidad de corriente limitante (i_L) la cual es expresada en unidades de A/m^2 de cátodo.

Figura N° 14 Representación de los requerimientos de un sistema de celda sencilla.



Fuente: HABASHI, (1993) Principles of Extractive Metallurgy.

Para el caso donde la concentración de especies a ser reducida en la superficie del cátodo es cero, entonces:

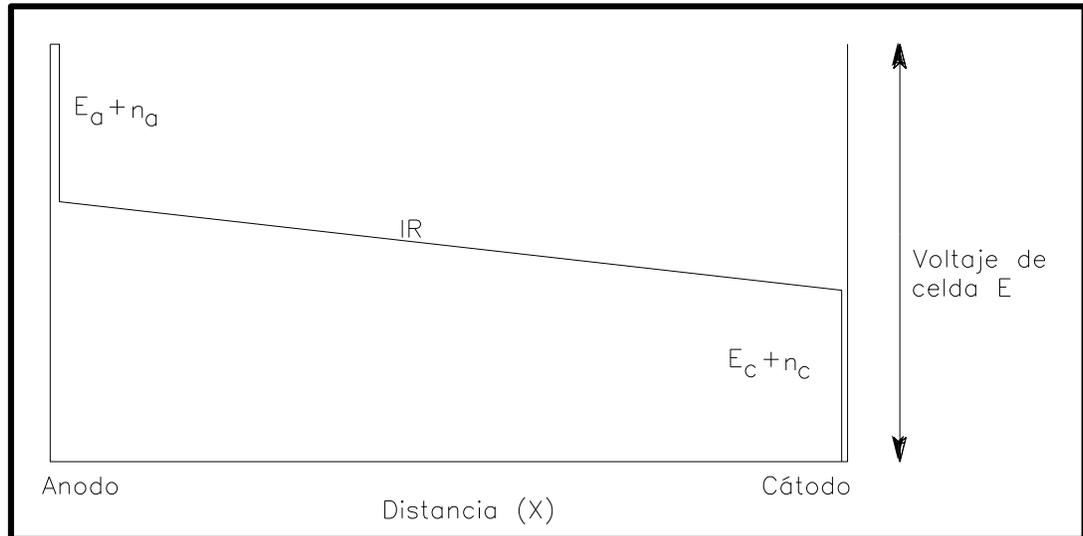
$$j_r = -D_M^{z^+} \left(\frac{c_b}{N} \right) \quad (14)$$

Combinando ésta expresión con la segunda ley de Faraday, puede ser mostrado que:

$$i_L = -nFK_m c_b \quad (15)$$

El valor de la densidad de corriente limitante es importante porque esta es la máxima corriente que puede ser pasada a través de solución antes que otras especies iónicas que las requeridas sean reducidas a iones metálicos. El valor de la densidad de corriente limitante, y consecuentemente la velocidad de deposición, se incrementa con el incremento de la concentración del ión metálico a ser depositado.

Figura N° 15 Ilustración esquemática de la caída de potencial a través de una celda electrolítica

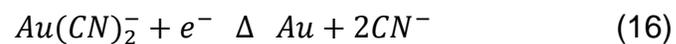


Fuente: HABASHI, (1993) Principles of Extractive Metallurgy.

Reacciones química

Reducción catódica del oro

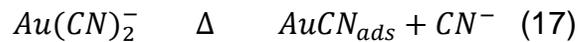
El oro es electrolíticamente desplazado de soluciones cianuradas alcalinas de acuerdo a la reacción:



Donde $E_{rev} = -0.60 + 0.118 \log a_{CN^-} + 0.059 \log a_{Au(CN)_2^-} V$

La deposición del metal ocurre en potenciales bajos aproximadamente -0.7 V, aunque 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. Algunos datos reportados varían entre -0.7 y -1.1 V.

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:



En sobre potenciales catódicos altos el paso de transferir electrones es probable que sea directo, y las especies intermedias adsorbidas es probable que no se forme. Esta distinción entre

mecanismos de deposición bajo diferentes condiciones es importante ya que las características físicas del oro depositado por los dos son muy diferentes: oro depositado en sobre potenciales relativamente bajos se forman densos, mientras que el producto sólido sobre el cátodo en sobre potenciales altamente catódico una esponja, que se deposita en forma porosa, la cual suele formar un lodo en el fondo de la celda. Cualquiera de estos tipos de productos suele ser deseable en circunstancias particulares por ejemplo:

1. El lodo suele ser considerado menor de un riesgo de seguridad o peligro de salud (por ejemplo si el producto contiene Hg) ya que puede estar almacenado “bajo” solución y puede ser manipulado por lavado y bombeo.
2. Un producto sólido sobre los cátodos suele ser de alta pureza, reduciendo subsecuentes requerimientos de refinación.
3. Cátodos cargados suelen ser transferidos para recubrir celdas para refinación (por ejemplo: el lodo es indeseable).

Wilkinson (1986) propuso un mecanismo conceptual de la deposición de oro a partir de soluciones de aurocianuro:

“El cátodo atrae predominantemente los iones positivos a una región cerca de su superficie, conocida como la doble capa Helmholtz. Los complejos de iones cargados negativamente, $Au(CN)_2^-$, los cuales están próximos a esta capa, se polarizan en el campo eléctrico del cátodo. La distribución alrededor del metal es distorsionada y la difusión del complejo iónico en la capa Helmholtz es asistida. Finalmente, dentro de la capa Helmholtz, el complejo se divide. Sus componentes iónicos o moléculas son liberadas y el metal liberado en forma de cationes metálicos cargados positivamente el cual depositado como el átomo metal sobre el cátodo”.

El complejo anionico aurocianuro tiene una constante de estabilidad alta (Wilkinson, 1986):

$$\frac{[Au(CN)_2^-]}{[Au^+][CN^-]^2} = 10^{38.3} \quad (20)$$

Además, la concentración de $[Au^+]$ es extremadamente baja en el electrolito:

$$[Au^+] = \frac{[Au(CN)_2^-]}{[CN^-]^2} \cdot 10^{-38.3} \quad (21)$$

De aquí, parecería que las razonables velocidades de deposición de oro a partir de soluciones cianuradas de oro (I) son solo posibles a causa de la polarización de los iones de $Au(CN)_2^-$, los cuales se aproximan a la superficie del cátodo y son distorsionados de acuerdo al modelo de Wilkinson.

Reducción de oxígeno y agua

El oxígeno que es producido naturalmente en el ánodo por oxidación de agua suele, en una celda sin membrana, migrar o difundirse al cátodo donde es reducido de regreso al agua, por cualquiera de las vías de dos o cuatro electrones:



Ha sido mostrado que la reducción de oxígeno suele contar por sobre el 50% de la corriente del cátodo. El uso de un intercambio de membranas iónicas elimina éste problema, pero hay desventajas con aquellos sistemas.

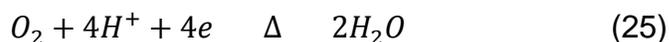
El agua puede ser reducida a hidrogeno, como está dado por la siguiente ecuación:



La reducción de agua y oxígeno en el cátodo tiende a incrementar el pH de la solución.

Reacción anódica

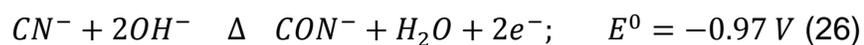
En la solución alcalina cianurada la mayor reacción en el ánodo es la oxidación de agua a oxígeno:



$$\text{Donde } E_{rev} = 1.228 + 0.015 \log p O_2 - 0.059 pH V$$

Esta reacción tiene a decrecer el pH de la solución junto al ánodo.

El cianuro puede ser oxidado a cianato en el ánodo:



Y suele hidrolizarse en forma de amoníaco y dióxido de carbono, aunque esto ocurre muy lentamente a pH altos:



Esta reacción suele contribuir al fuerte olor a amoníaco sobre muchas celdas electrowinning, aunque una significativa, si no dominante, porción del amoníaco es probablemente llevado de los sistemas de elución de carbón.

Reacciones cinéticas y factores que afectan la eficiencia

La deposición de oro está electrolíticamente controlada bajo potenciales en el orden de -0.85 a -1.0 V, dependiendo de las condiciones en la solución. La velocidad de la reacción en esta región esta descrita por la ecuación de Butler – Volmer. A potenciales más negativos la velocidad de deposición es dependiente del transporte de masa de las especies de cianuro de oro al cátodo. Para soluciones conteniendo concentraciones bajas de oro, como es generalmente el caso en los sistemas de extracción de oro, las celdas deber ser operadas bajo condiciones de transporte de masa controlado para maximizar la velocidad de deposición y permitir al electrowinning ser ejecutado económicamente. La corriente óptima para la deposición de oro es aquella en la cual la velocidad de deposición es sólo controlada por el transporte de masa ya que esto minimiza el otro lado de las reacciones en el cátodo.

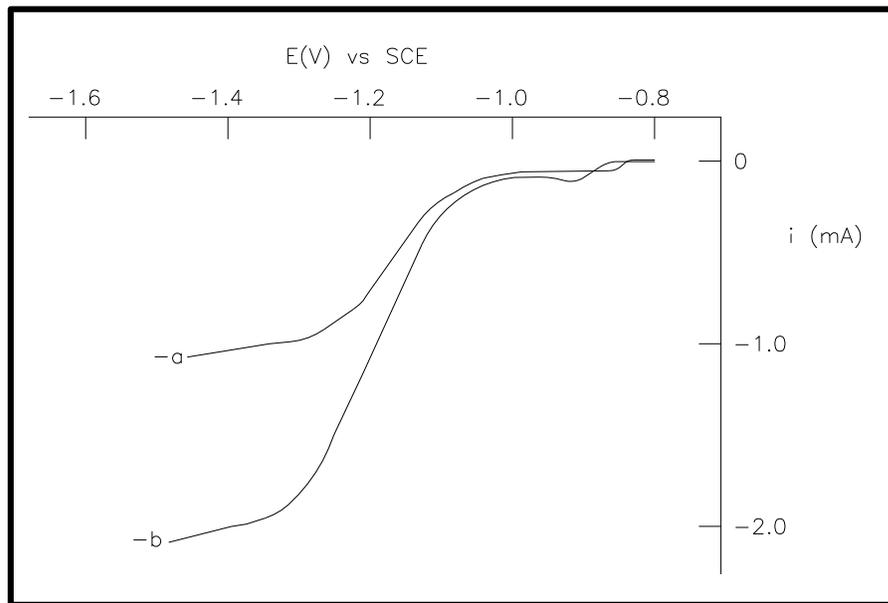
Consecuentemente, para un sistema eletrowinning operando en o sobre la densidad de corriente limitante (i_L), la velocidad está determinada por factores los cuales afectan el transporte de masa del cianuro de oro al cátodo, llamando concentración de oro a (C_b) y coeficiente del transporte de masa del sistema a (k_m). El coeficiente de transporte de masa depende de la hidrodinámica del electrolito, temperatura de solución y área superficial disponible en el cátodo.

Otros factores que afectan la eficiencia de los sistemas electrowinning son el voltaje y corriente de celda aplicado, los cuales son determinados por las propiedades de la solución (por ejemplo: temperatura, pH, concentración de cianuro, concentración de otros iones, conductividad).

Concentración de oro

El efecto de la concentración de oro sobre la velocidad de deposición es ilustrado por las curvas corriente – potencial para dos concentraciones de oro, dada en la Figura N° 16. Aquellas muestran la corriente limitante es aproximadamente doblada por un incremento del 100% en la concentración del oro.

Figura N° 16 Curvas corriente-potencial mostrando el efecto de concentración de oro $C_{\text{KCN}} = 3.14 \times 10^{-2}\text{M}$, sweep rate = 10mVs^{-1} , velocidad de rotación = 11.43 Hz. C_{Au} : (a) 1.00×10^{-2} ; (b) $5.00 \times 10^{-3}\text{M}$.



Fuente: HABASHI, (1993) Principles of Extractive Metallurgy.

Hidrodinámica del electrolito

El grado de mezcla dentro del electrolito tiene un gran efecto sobre el transporte de masa de las especies de la solución y consecuentemente sobre la velocidad de deposición de oro.

En las celdas electrowinning con electrodos fijos, tal como aquellos usados normalmente para la recuperación de oro (y refinación), y con agitación no mecánica, las condiciones hidrodinámicas son determinadas por la estructura del electrodo, la configuración de la celda y la velocidad de flujo de la solución.

Temperatura

Elevadas temperaturas del electrolito tienen las siguientes ventajas para la electrodeposición de oro:

1. El coeficiente de difusión del cianuro de oro (I) es incrementado.
2. La conductividad de la solución es incrementada.
3. La solubilidad de oxígeno es decrecida, reduciendo la cantidad de oxígeno disponible para la reducción en el cátodo.

El ítem 1. Incrementa la velocidad de deposición, mientras que el 2. y el 3. Improvisan la eficiencia de la corriente de celda.

Consecuentemente, hay una ventaja sobre todo al operar los sistemas electrowinning a elevadas temperaturas. Sin embargo, aquellos aspectos son completamente pequeños, particularmente

cuando son comparados con los efectos de la concentración de oro, el grado de mezcla del electrolito y el área superficial del cátodo.

Área superficial del cátodo

La eficiencia del electrowinning es maximizada al maximizar el área superficial del cátodo y el vaciado, por ejemplo por el uso de electrodos tridimensionales tales como la lana de acero usados en las celdas Mintek y otros, La presencia de cualquier partícula material en el electrolito que se construye en el cátodo tenderá a reducir el vaciado restringiendo aso el flujo y reduciendo la eficiencia de la celda. En suma como la cantidad de oro depositada sobre el cátodo se incrementa, el área superficial del cátodo también se incrementa, la cual incrementa la velocidad de reducción de agua y oxígeno en el cátodo. La evolución de hidrogeno incrementado incrementa la caída de potencial a través del cátodo el cual suele producir regiones dentro del electrodo donde la deposición de oro no puede ocurrir.

Voltaje de celda

El voltaje y la corriente que deben ser aplicados a la celda para que la recuperación de oro sea la más eficiente dependen del diseño de

la celda y las condiciones de la solución incluyendo conductividad, pH, temperatura y concentraciones de todas las especies iónica presentes. En celdas industriales los voltajes del orden de 2 – 4 V son aplicados.

Corriente de celda y eficiencia de corriente

La velocidad de deposición se incrementa con el incremento de la corriente, arriba de la corriente limitante, en la cual el punto máximo de eficiencia de corriente es obtenido en el sistema. Sobre los valores limitantes el exceso de corriente es consumido por el lado de las reacciones, principalmente la reducción de oxígeno y otros metales. Corrientes entre 200 y 8000 A son aplicadas, con eficiencia de corriente típicas de 2 – 8%, dependiendo de la configuración de la celda, concentración de oro, composición del electrolito y propiedades hidrodinámicas del electrolito. Eficiencias de corriente tal altas como 27% ha sido registradas por soluciones de alto grado de oro (>300 g/t).

Conductividad de la solución

La conductividad de la solución se determina por la caída de potencial que atraviesa la celda: la más alta la conductividad, la más baja las pérdidas eléctricas en la solución.

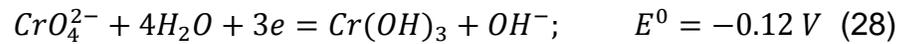
Típicamente celdas operadas con conductividades de electrolito en el orden de 2 S/m. Electrolitos producidos por la elución de carbón usualmente contienen una concentración suficiente de hidróxido de sodio para una adecuada conductividad de la solución, pero la conductividad suele ser incrementada por la adición de electrolitos útiles, tales como el hidróxido de sodio.

Las soluciones de lixiviación generalmente tienen una conductividad relativamente baja, la cual debe ser incrementada significativamente si el oro va a ser electro depositado eficientemente. Este factor asociado con densidades de corriente limitantes extremadamente bajas, previene el uso de electrowinning sobre soluciones que obtienen aproximadamente menos de 10 g/t de oro.

pH

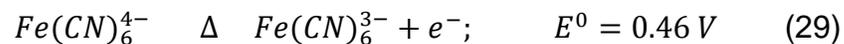
El pH es también importante para la estabilidad del electrodo. El uso de ánodos insolubles, usualmente de acero inoxidable (18% Cr / 8% Ni con un bajo contenido de Mo y Ti), es una manera popular para minimizar el capital de inversión. La mayoría de las celdas electrowinning comerciales usan ánodos de acero inoxidable (y cátodos en muchos casos) el cual se corroe en soluciones bajo un pH de aproximadamente 12.5 Esta corrosión incrementa la concentración de las especies de hierro y cromo en la solución, la cual suele pasar de

lado reacciones y reducir la eficiencia de la celda. Por ejemplo, iones de cromo son reducidos en el cátodo para formar una capa insoluble de hidróxido de cromo:



Concentraciones de ion cromo tan bajas como 5 g/t puede afectar significativamente la eficiencia de la celda y reducir la extracción de oro a niveles bajos. Concentraciones de cromo sobre los 100 g/t ha sido observada a prohibir completamente el electrowinning del oro.

Las especies de hierro (III) son también reducidas en el cátodo al complejo de cianuro de hierro (II), de este modo se instalan un sistema redox a través de la celda:

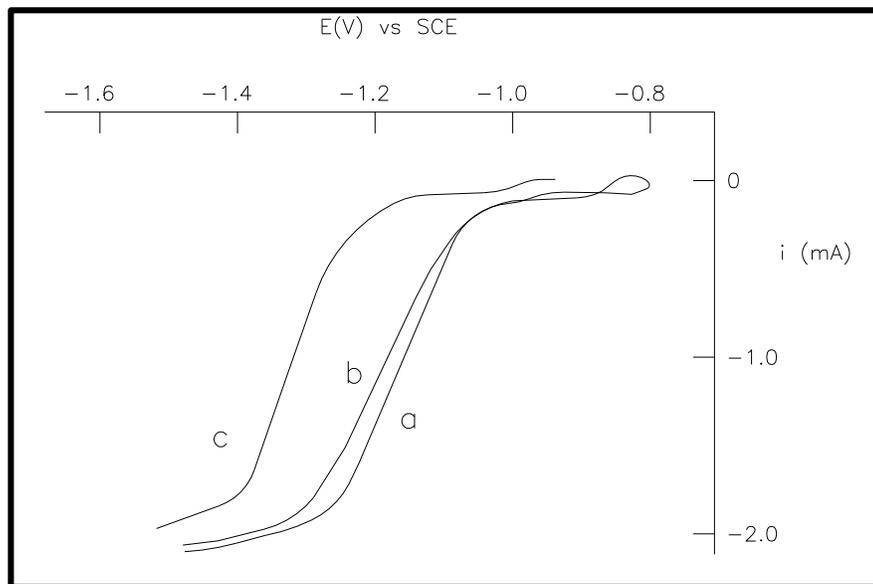


Estos problemas pueden ser eliminados por el uso alternativo de materiales del ánodo, aunque suele tener desventajas asociadas con esto.

Concentración de cianuro

El efecto de la concentración de cianuro sobre la curva corriente – potencial para la deposición de oro es mostrado en la Figura N° 17. Esto indica un cambio negativo en el potencial de aproximadamente 0.2 V para un incremento de 10 veces la concentración de cianuro (por ejemplo de 5 g/l de NaCN a 50 g/l). Un alto voltaje debe ser aplicado en la alta concentración para asegurar que el sistema es operado en, o ligeramente sobre, la corriente limitante.

Figura N° 17 Curvas corriente – potencial mostrando el efecto de concentración de cianuro: $C_{Au} 1.00 \times 10^{-2} M$, sweep rate = $10 mVs^{-1}$, velocidad de rotación = 11.43 Hz. C_{KCN} : (a) 3.14×10^{-2} ; (b) 0.1; (c) 1.00 M



Fuente: MISARI (1993) METALURGIA DE ORO.

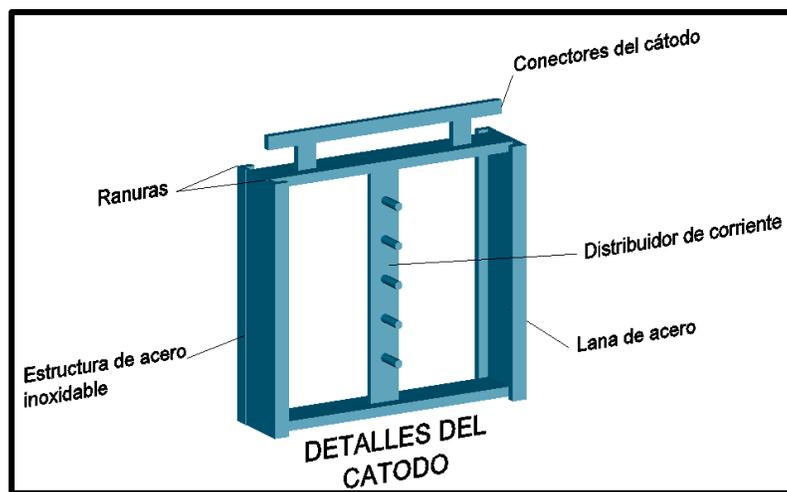
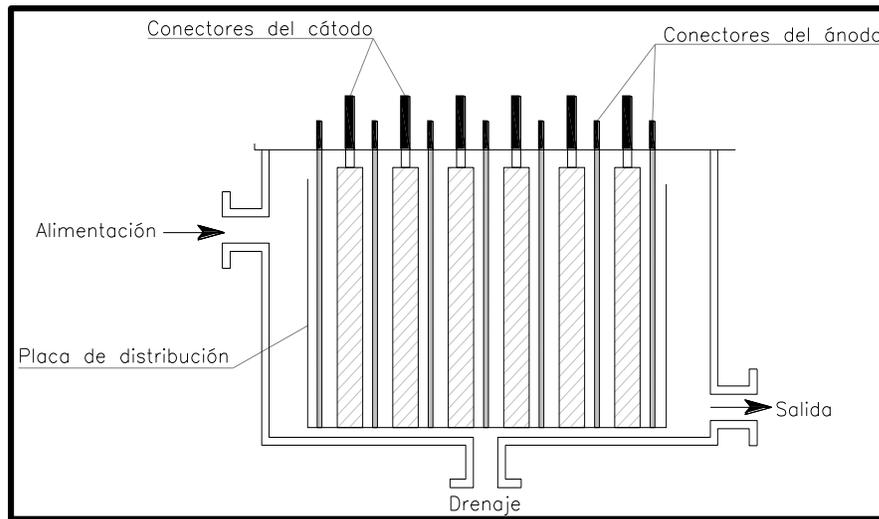
Efecto de otras especies en la solución

Iones de sulfuro, los cuales suelen estar presentes en bajas concentraciones en electrolitos de oro son oxidados a polisulfuros en el ánodo. Aquellos iones suelen entonces ser transportados al cátodo donde suelen reaccionar con depósitos de oro para formar complejos estables (por ejemplo: causando redisolución del metal depositado).

Celda electrowining (lana de acero)

La celda diseñada por Mintek (Paul 1983) consiste de un tanque de acero inoxidable rectangular conteniendo 6 cátodos canasta y 7 ánodos (Figura N° 18). los cátodos son construidos de polipropileno y empaquetados con 500 a 1000 g de lana de acero. Los ánodos consisten de una malla de acero inoxidable 316. La solución fluye desde el final del ánodo a través de los ánodos y cátodos alternados y así hasta el final.

Figura N° 18 Esquema de la celda electrowinning con lana de acero tipo Mintek



Fuente: elaboración propia

La celda tiene dimensiones internas de 900 x 720 x 640 mm, dando un área seccional de 0.46 m² 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 HIPOTESIS

General

Si determinamos diseño adecuado del sistema de desorción y electrodeposición entonces se va recuperar el oro contenido en partículas finas de carbón producido en la Planta ADR de Minera La Arena S.A.

Específicas

- a) Si determinamos los factores para evitar que el carbón fino obstruya las líneas de flujo evitaremos sobrepresiones y posibles accidentes.
- b) Si determinamos la velocidad de flujo en el reactor generaremos la adecuada expansión de cama
- c) Si determinamos los parámetros de diseño más importante el nuevo sistema se va desarrollar.

2.4 IDENTIFICACION DE LAS VARIABLES

2.4.1 VARIABLES INDEPENDIENTES

Diseño adecuado del sistema de desorción y electrodeposición

Indicadores

- Capacidad en toneladas de carbón en el reactor de desorción de partículas finas.
- Caudal de desorción de carbón fino.
- Concentración de NaCN y NaOH en la solución strip.
- pH de la solución.
- Temperatura de operación de la solución strip para la desorción.
- Presión de operación del sistema.
- Temperatura de operación de la solución strip para la electrodeposición.
- Voltaje otorgado a la celda electrolítica.
- Área catódica

2.4.2 VARIABLES DEPENDIENTES

Recuperación el oro contenido en partículas finas de carbón producido en la Planta ADR de Minera La Arena S.A.

Indicadores

- Leyes de oro contenidos en el carbón activado.
- Granulometría de carbón activado fino.
- Porcentaje de extracción de oro.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de la investigación que se ejecuto es aplicativo, con nivel exploratorio, descriptivo, cuantitativo, correlacionar y explicativo.

Es exploratorio por qué se va a determinar algunos parámetros operacionales de acuerdo al sistema de desorción por el método Zadra a presión modificado, es descriptivo y cuantitativo porque se va describir la secuencia del proceso, se recolectaran datos del problema a investigar se medirán y evaluaran, es correlacional porque se va a conocer la relación entre velocidad de flujo, caudal de tratamiento, porcentaje de expansión de cama del lecho fluidizado y tiempo de operación.

El método de investigación experimental es solamente para una etapa de la investigación realizada a nivel de laboratorio donde

se realizó la obtención de algunos datos como granulometría de carbón fino y leyes de oro.

3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño para poder realizar la presente investigación se describe a continuación:

- Se iniciara con la toma de muestras del carbón fino de los diferentes puntos de generación de carbón fino para determinar el análisis granulométrico respectivo.
- Posteriormente se planteara el mejor sistema a implementar para el tratamiento del carbón según la granulometría.
- Se realizara la ingeniería del sistema propuesto considerando todas las disciplinas que formaran parte de la investigación como:

Metalurgia: Será donde se defina el dimensionamiento del sistema, flujos, capacidades, tipos de reactivos, concentración de reactivos, definición de parámetros operativos.

Mecánica: Será el responsable de la adecuada selección y diseño de los equipos mecánicos según la información obtenida por el metalurgista.

Eléctrica: Será el responsable de realizar el diseño de todos los equipos eléctricos para energizar los equipos electromecánicos.

Instrumentación: Será el responsable de realizar la arquitectura de control según la necesidad del metalurgista para automatizar y controlar los variables operativas desde un sistema Scada.

Como parte de la ingeniería se desarrolló planos los cuales serán necesarios para la construcción del sistema a implementar.

- Se realizara todas las gestiones necesarias para dar inicio a la procura (adquisición de equipos y materiales), fabricación (se fabricaran spool de tuberías, se fabricara el reactor de desorción, plataformas estructurales, etc.) y posteriormente la construcción.
- Se realizara las respectivas pruebas de pre-comisionado y posteriormente las etapas de comisionamiento, al término de

estas pruebas se tendrán operativo el sistema para poder realizar las puesta en marcha.

- Se iniciara con la operación teniendo presente todos los requisitos de seguridad y medio ambiente. Se iniciara la operación con parámetros menores a los definidos en la etapa de ingeniería; gradualmente se incrementaran hasta llegar a los parámetros de diseño.
- Durante la operación se realizaran constantes tomas de muestra los cuales serán analizados en el laboratorio químico, con los resultados del laboratorio se podrán realizar los balances metalúrgicos y determinar la eficiencia del sistema de tal forma de verificar si se alcanzan los objetivos propuestos.

3.3. POBLACION Y MUESTRA

Población

La población con la que se realizó la investigación fueron todas las etapas de la planta ADR de Minera La Arena como el sistema de adsorción, desorción, lavado ácido, regeneración térmica del carbón y manejo de carbón. En cada etapa mencionada se generan partículas finas de carbón los cuales son seleccionados en zarandas vibratorias y separadas del proceso.

Muestra

Las muestras utilizadas en la presente investigación fueron tomadas de dos tipos de partículas finas; la muestra del tipo N° 01 fueron tomadas de los DSM instalados en los circuitos de adsorción los cuales presentan contenidos de oro mayores y el tipo de muestra N° 02 fueron tomados de las demás áreas de la planta como son desorción, lavado ácido, regeneración térmica y manejo de carbón.

Las muestras son muy importantes para determinar el análisis granulométrico y definir las características del equipo que realiza la extracción de oro.

3.4. METODO DE INVESTIGACIÓN

Se usara el método inductivo partiendo de los datos particulares de la presente investigación para llegar a obtener conclusiones generales.

La secuencia metodológica será la siguiente:

1. Observación y registro de los hechos.
2. Análisis de lo observado.
3. Clasificación de la información obtenida.
4. Formulación de enunciados y obtención de conclusiones por medio del análisis y razonamiento de acuerdo a la investigación en desarrollo.

3.5. TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Las técnicas de recolección de datos que se usaran para la presente investigación será:

- Análisis documental: Se usaron publicaciones de trabajos mineros realizados para la recuperación de oro del carbón activado mediante la tecnología de desorción por me

método Zadra convencional. Esta información entregará parámetros prácticos de plantas convencionales los cuales serán importantes para definir los criterios de diseño del sistema de recuperación de oro del carbón fino.

- Observación no experimental: La recolección de datos mediante esta técnica fue parcialmente durante la estadía en mina obteniendo básicamente parámetros como expansión de cama vs velocidad de flujo en operaciones como columnas de adsorción, columnas de desorción y columnas de lavado ácido de carbón activado.

3.6. TECNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS

- Trabajo de campo
- Ordenamiento y codificación de datos
- Tabulación
- Gráficos
- Análisis e interpretación

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 TRATAMIENTO ESTADISTICO E INTERPRETACION DE DATOS

Perdida de carbón por atrición

1. Carbón – carbón

Por las diversas etapas que el carbón atraviesa en la Planta ADR (adsorción, desorción, lavado ácido y regeneración térmica) se genera partículas finas por atrición entre mismas partículas de carbón.

2. Carbón – acero

Existe atrición en el sistema seco durante la regeneración térmica al pasar de la tolva principal hacia la tolva secundaria del horno de regeneración, por su

paso por el mismo horno y llegar hasta el sistema de descarga del carbón, fricción al descargar de las tolvas de almacenamiento ubicadas en el área de manejo de carbón.

3. Carbón – acero – solución

Carbón quebrado durante la transferencia de una etapa hacia la otra a través de eductores y tuberías.

4. Choque térmico

Quebradas durante el choque térmico que existe en la fase final de la regeneración térmica.

5. Choque químico

Quebradas durante la remoción de componentes inorgánicos

Las pérdidas de carbón por atricción varían dependiendo de 03 aspectos importantes los cuales se mencionan a continuación:

- Por las condiciones del proceso
 - Ratios de tratamiento
 - Velocidad de transferencia de carbón
 - Tipo de sistema de adsorción

- Sistema de traslado a ser usado
- Distancias entre etapas que la pulpa de carbón tendrá que vencer, etc.

- Equipos usados

- Tipos de bombas, eductores.
- Presión de los fluidos que impulsaran al carbón granulado
- Recorrido de tuberías.

- Tipo de carbón.

Se han hecho considerables esfuerzos para encontrar y establecer donde ocurren las más grandes pérdidas, pero cuantificar estas pérdidas es difícil porque la pérdida de carbón se lleva a cabo en cada etapa del proceso y se distribuye aproximadamente como sigue:

- Mezclado del circuito de Adsorción
42 %
- Inter-etapas de transferencia de carbón
4 %
- Desorción (*incluido la transferencia para la regeneración*)

11 %

- Regeneración (*Incluido quenching y separación final*

47 %

Sistema de captura de finos

- Cada tren cuenta con dos zarandas estacionarias DSM (la primera con malla 20 y la segunda malla 100) ubicada después de la última columna, teniendo como objetivo retener el carbón fino/grueso que contiene la solución barren, esta solución pobre en contenido de oro es enviada nuevamente al PAD de lixiviación.
- Zarandas vibratorias circulares previos a los procesos de manejo de carbón y regeneración térmica.
- Filtros dúplex en la epata de desorción a presión.
- Zaranda estacionaria DSM en la etapa de lavado ácido.
- Dependiendo de las características, el carbón recolectado puede retornar al circuito de adsorción (*carbón grueso*) o a su almacenamiento (*carbón fino*).

DISTRIBUCIÓN DE PÉRDIDAS DE CARBÓN

Tabla N° 03 Distribución de pérdidas de carbón

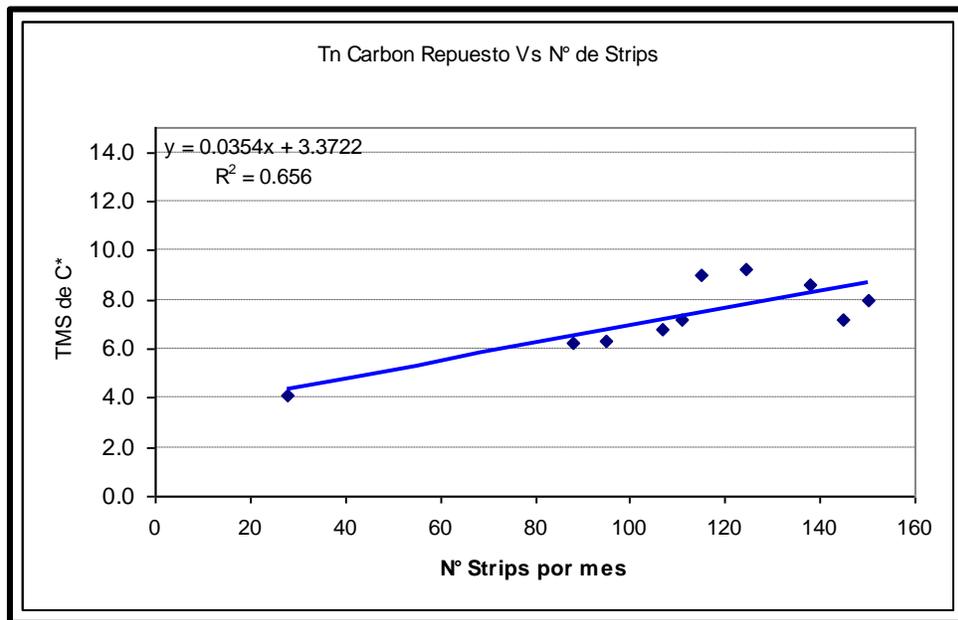
| Área | % Pérdida de masa | | | Porcentaje de pérdida total |
|----------------------|-------------------|------------|--------------|-----------------------------|
| | Total | kg/día | kg/t | |
| Adsorción | 0.46 | 104.17 | 4.63 | 41.67 |
| Desorción | 0.12 | 27.89 | 1.24 | 11.15 |
| Regeneración | 0.52 | 117.94 | 5.24 | 47.18 |
| Pérdida total | 1.11 | 250 | 11.11 | 100.00 |

Fuente: elaboración propia

Tonelaje de carbón fino generado

Existe una relación directa de la cantidad de carbón fino que se genera respecto a la cantidad de lotes de desorción que se realiza, esto se debe básicamente por el movimiento del carbón en el sistema de tuberías y bombas que se tiene en planta.

Figura N° 19 Tonelaje de carbón fino generado



Fuente: elaboración propia

Granulometría del carbón fino

Para la determinación de la granulometría del carbón fino se realizaron 02 actividades:

- Pruebas de atricción de carbón nuevo.
- Análisis Granulométrico de carbón fino generado en la planta ADR.

Pruebas de atricción

Para las pruebas de atricción se utilizó un rodillo y botellas para realizar la agitación respectiva. Las pruebas se realizaron a las siguientes condiciones:

- Porcentaje de sólidos a: 20, 25 y 30
- Revoluciones por minuto (rpm): 70 rpm
- Tiempo de agitación: 2 horas continuas.

Cada muestra fue pesada, tamizada en malla 20 y luego todo el producto +20 mallas se homogenizó, se cuarteo y se obtuvieron muestras representativas con las cuales se hicieron las pruebas de atricción.

Cada muestra representativa fue remojada por espacio de 48 horas, se lavó el carbón fino y luego se sometió a una agitación continua, después de la agitación se realizó el tamizado y lavado de los finos atricionados en la malla 20, se secaron y se pesaron.

Tabla N° 04, Resultados de las Pruebas de Atrición

| ITEM | CODIGO MUESTRA*C | % SOLIDOS | TIEMPO AGITACION (h) | rpm | PESO DE MUESTRA DE CARBÓN (%) | | | |
|------|------------------|-----------|----------------------|-----|-------------------------------|----------|-----------|-----------------|
| | | | | | INICIAL | TAMIZADO | ATRICCION | PERDIDA (-20 m) |
| 1 | 1 | 20 | 2.0 | 70 | 100.0 | 0.025 | 10.25 | 10.28 |
| 2 | | 25 | 2.0 | 70 | 100.0 | 0.025 | 11.69 | 11.71 |
| 3 | | 30 | 2.0 | 70 | 100.0 | 0.025 | 11.73 | 11.75 |
| 4 | 2 | 20 | 2.0 | 70 | 100.0 | 0.049 | 3.47 | 3.52 |
| 5 | | 25 | 2.0 | 70 | 100.0 | 0.049 | 4.43 | 4.48 |
| 6 | | 30 | 2.0 | 70 | 100.0 | 0.049 | 6.25 | 6.29 |
| 7 | 3 | 20 | 2.0 | 70 | 100.0 | 0.016 | 0.88 | 0.89 |
| 8 | | 25 | 2.0 | 70 | 100.0 | 0.016 | 0.51 | 0.53 |
| 9 | | 30 | 2.0 | 70 | 100.0 | 0.016 | 0.44 | 0.45 |
| 10 | 4 | 20 | 2.0 | 70 | 100.0 | 0.019 | 1.26 | 1.28 |
| 11 | | 25 | 2.0 | 70 | 100.0 | 0.019 | 0.40 | 0.42 |
| 12 | | 30 | 2.0 | 70 | 100.0 | 0.019 | 0.25 | 0.27 |

Fuente: elaboración propia

En los resultados se puede apreciar que las muestras con código 3 y 4 son las que tienen menor atrición, cuyos porcentajes de pérdida están entre 0.27% y 1.28%. Los carbones 1 y 2 sufren mayor atrición por lo tanto van a generar mayor cantidad de carbón fino, cuyos porcentajes de pérdida están entre 11.75% y 3.52%.

Análisis granulométrico

Para realizar el análisis granulométrico se realizaron la toma de muestra en 02 puntos de generación de carbón fino en la planta ADR.

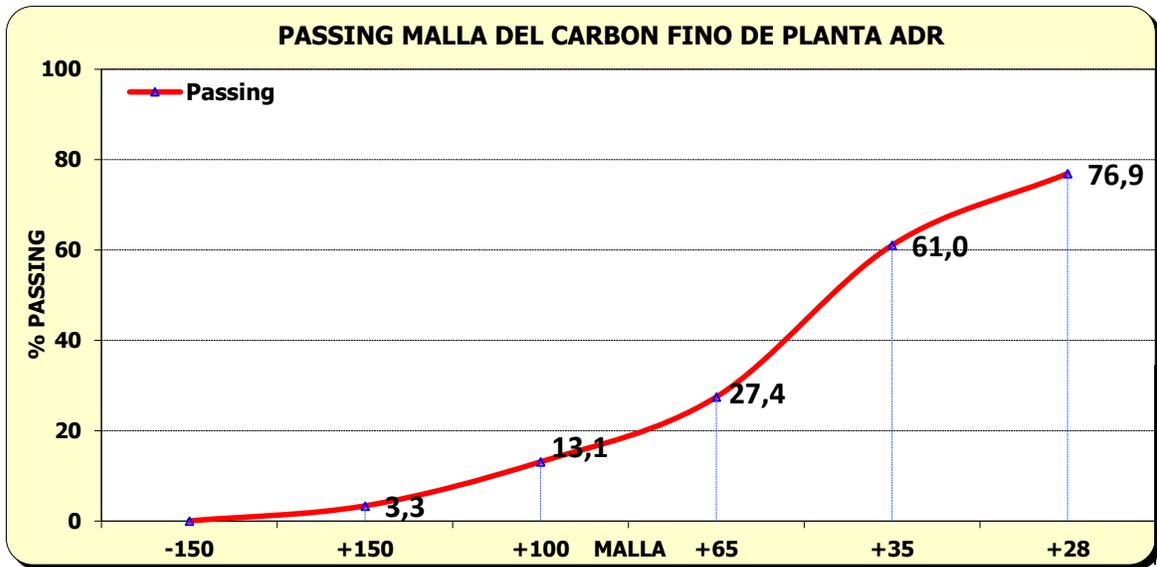
1. Análisis granulométrico de la muestra tomada en los DSM del circuito de adsorción.

Tabla N° 05, Análisis granulométrico carbón fino muestra DSM

| LABORATORIO METALURGICO - (Malla Especificación TYLER) Análisis en Seco | | | | | |
|--|----------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| MALLA Nro. | Abertura (μm) | Peso (g) | Peso Retenido Malla (%) | Acumulado Retenido (%) | Acumulado Passing (%) |
| 150 | 106 | 13 | 3.3 | 100.0 | 0.0 |
| 150 | 106 | 38 | 9.7 | 96.7 | 3.3 |
| 100 | 150 | 56 | 14.4 | 86.9 | 13.1 |
| 65 | 212 | 131 | 33.6 | 72.6 | 27.4 |
| 35 | 425 | 62 | 15.9 | 39.0 | 61.0 |
| 28 | 600 | 90 | 23.1 | 23.1 | 76.9 |
| TOTAL | | 390 | 100 | | |

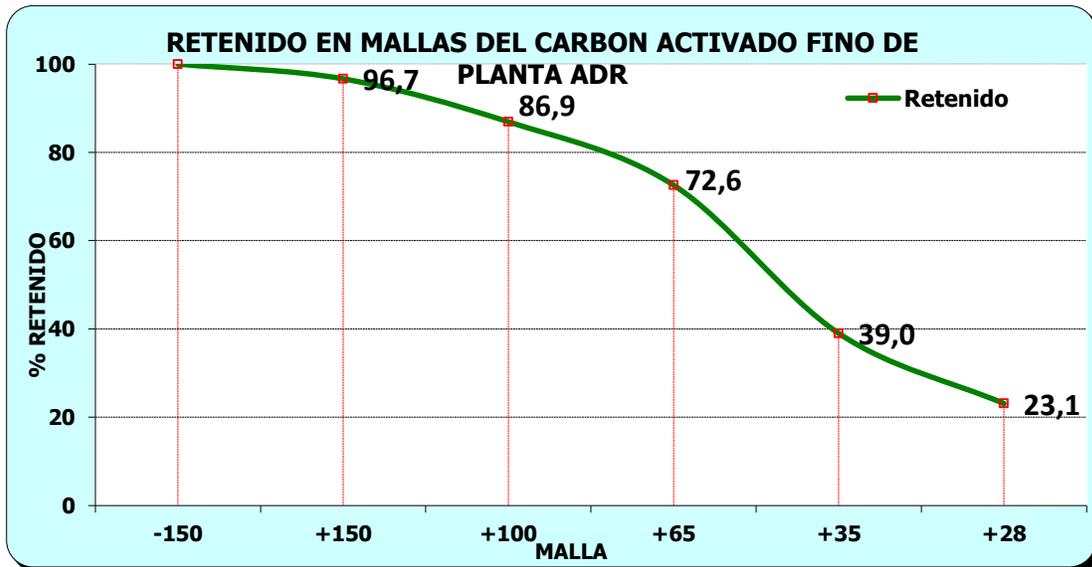
Fuente: elaboración propia.

Figura N° 20 Passing malla de carbón fino muestra DSM



Fuente: elaboración propia.

Figura N° 21 Retenido en mallas carbón activado fino muestra DSM



Fuente: elaboración propia.

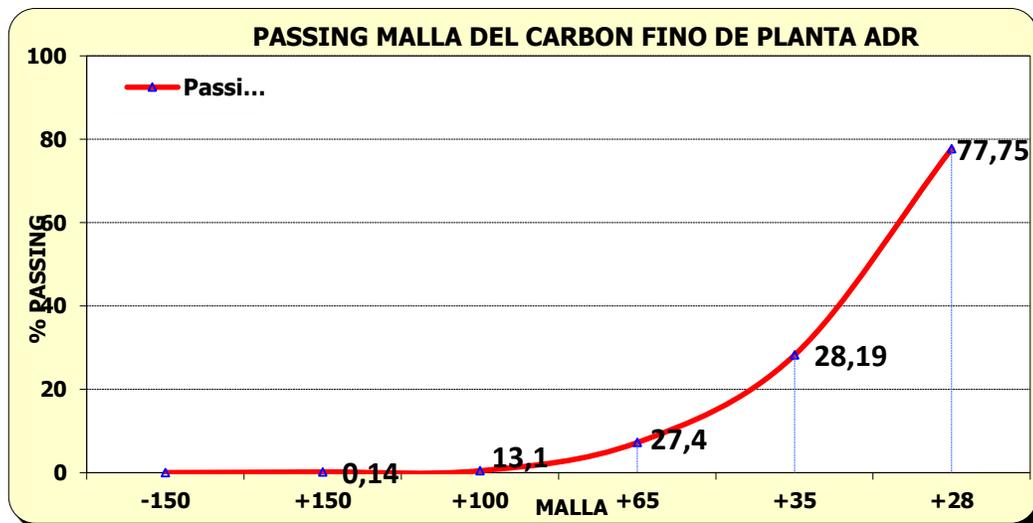
2. Análisis granulométrico de la muestra tomada en el tanque de almacenamiento de carbón fino.

Tabla N° 06, Análisis granulométrico carbón fino muestra tanque de almacenamiento de carbón

| LABORATORIO METALURGICO - (Malla Especificación TYLER) Análisis en Seco | | | | | |
|---|---------------|---------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| MALLA Nro. | Abertura (µm) | Peso (g) | Peso Retenido Malla (%) | Acumulado Retenido (%) | Acumulado Passing (%) |
| -150 | 106 | 1.25 | 0.14 | 100.00 | 0.00 |
| +150 | 106 | 2.48 | 0.29 | 99.86 | 0.14 |
| +100 | 150 | 58.61 | 6.77 | 99.57 | 0.43 |
| +65 | 212 | 181.72 | 20.99 | 92.80 | 7.20 |
| +35 | 425 | 429.02 | 49.56 | 71.81 | 28.19 |
| +28 | 600 | 192.64 | 22.25 | 22.25 | 77.75 |
| TOTAL | | 865.72 | 100.00 | | |

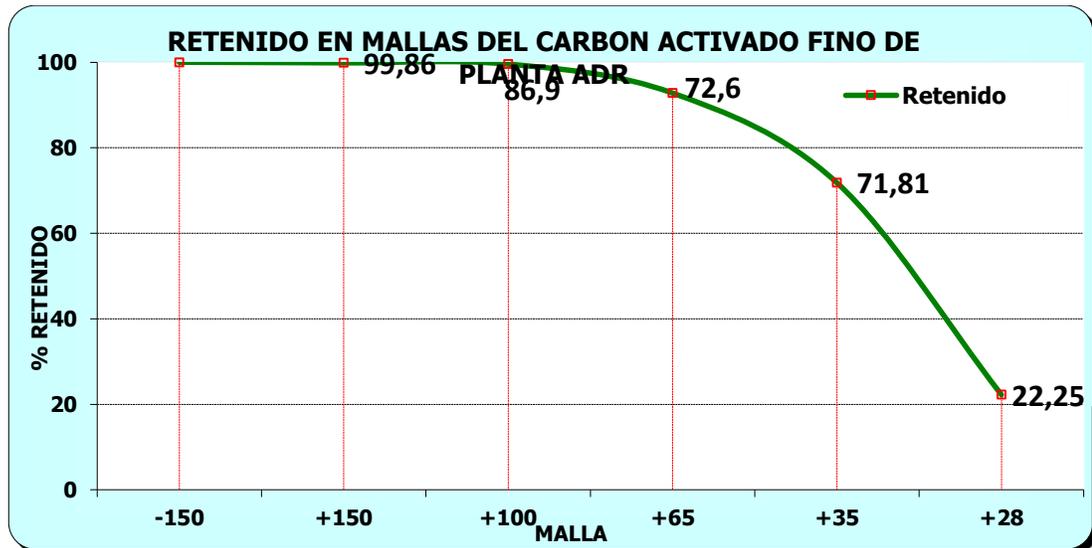
Fuente: elaboración propia.

Figura N° 22 Passing malla de carbón fino Muestra tolva de carbón fino



Fuente: elaboración propia.

Figura N° 23 Retenido en mallas carbón activado fino Muestra tanque de carbón fino



Fuente: elaboración propia.

Diseño de sistema de desorción

De acuerdo a la información recopilada se realizó el planteamiento para el diseño del reactor según las consideraciones indicadas en el capítulo I.

La tecnología que se usara para la desorción del carbón fino fue el método Zadra modificado.

De acuerdo al análisis granulométrico realizado se plantearon los siguientes criterios de diseño para el reactor de desorción de finos:

Tabla N° 07 Parámetros operativos desorción de carbón fino

| Descripción | Unidad | Dato |
|---|-------------------|--------|
| Caudal de diseño total | m ³ /h | 5.5 |
| Caudal de operación total | m ³ /h | 5.0 |
| Numero de circuitos | Nº | 1.0 |
| Densidad de carbón | t/m ³ | 0.5 |
| Tonelaje de carbón por columna | t | 1.0 |
| Diámetro de tubería de ingreso | Pulg. | 1 1/2" |
| Velocidad de flujo (partículas carbón 6x12) | cm/s | 0.21 |
| % de velocidad (para partículas carbón finas) | % | 6 |

Fuente: elaboración propia.

Con los datos indicados en los criterios de diseño se pudo determinar el diámetro del reactor de desorción de carbón fino así como también la altura del reactor.

Tabla N° 08 Determinación del diámetro del reactor

| Descripción | Unidad | Datos |
|----------------------------|----------------|-------------|
| Velocidad lineal | cm/s | 0.21 |
| Área de columna | m ² | 0.72 |
| Diámetro de columna | m | 0.95 |

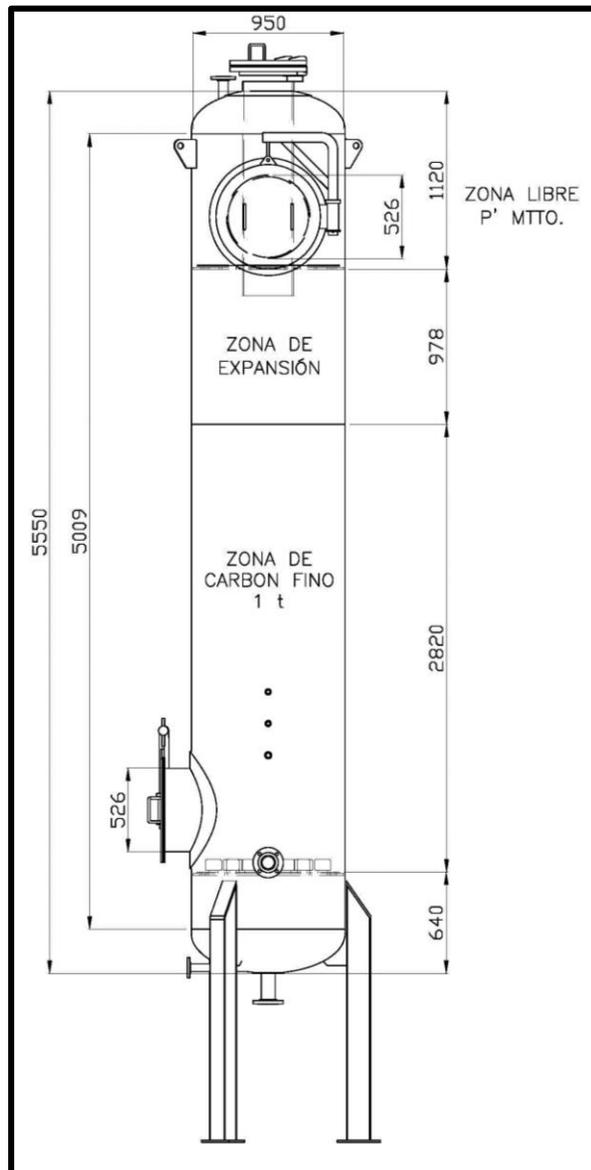
Fuente: elaboración propia.

Tabla N° 09 Determinación de la altura del reactor

| Descripción | Unidad | Datos |
|---|----------------|-------------|
| Altura para ingreso de solución | m | 0.64 |
| Volumen de carbón | m ³ | 2.00 |
| Altura que ocupa el carbón | m | 2.82 |
| Expansión de cama de carbón | % | 6.1 |
| Altura de expansión de carbón | m | 0.17 |
| Altura efectiva de carbón + altura p' in solución | m | 3.63 |
| Altura de rebose de solución | m | 0.82 |
| Zona libre para mantenimiento | m | 1.10 |
| Altura total | | 5.55 |

Fuente: elaboración propia.

Figura N° 24 Identificación de zonas internas de reactor de desorción de carbón fino



Fuente: elaboración propia

Como parte del diseño se adiciono unos accesorios internos capaces de retener las partículas finas de carbón dentro del reactor con el fin de evitar pérdidas por la parte inferior y parte superior del reactor.

Internamente se instalaran mallas diseñadas especialmente para este sistema. La malla inferior y la malla superior son de diferentes características, a continuación se indican:

Malla inferior:

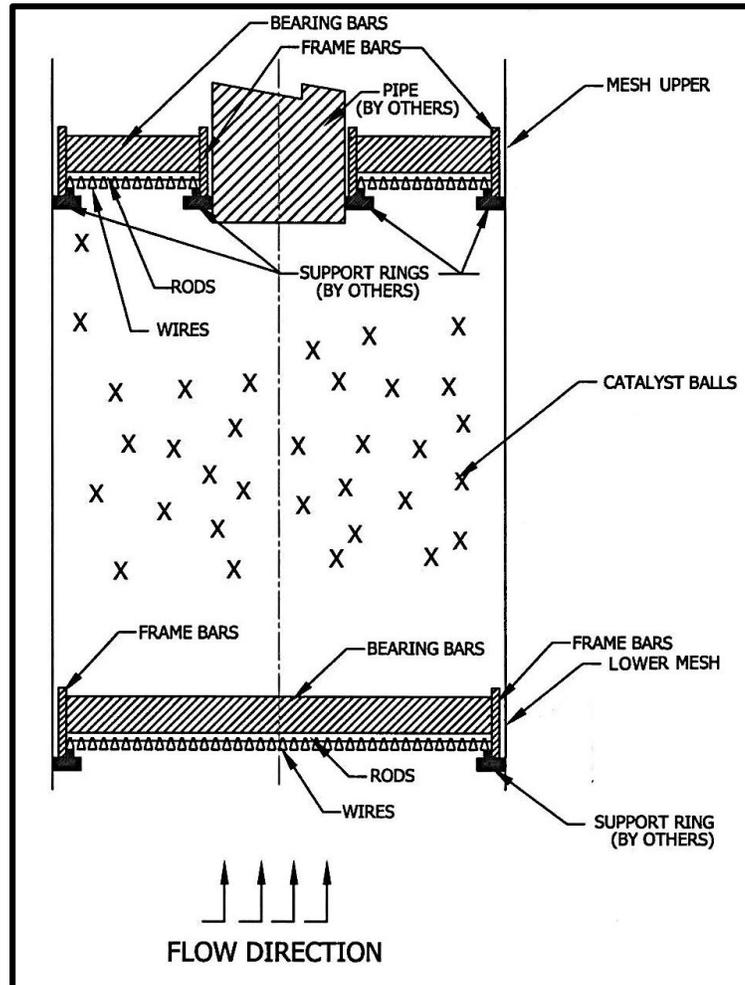
- Diámetro de malla = 36.5"
- Perforación central de malla = No
- Diámetro de soporte de malla = 37,5"
(950mm)
- Material = Acero
inoxidable 316L
- Abertura de malla = 0.003" ± 0.002"
- N° de secciones = 02
piezas

- Temperatura de diseño = 302 °F
(150 °C)
- Presión total = 60 psi
- Stress = 15600 psi

Malla superior:

- Diámetro de malla = 36.5"
- Diámetro de soporte de malla = 37.5" (950mm)
- Perforación central de malla = Si
- Diámetro de perforación central = 12.75"
- Diámetro de soporte de malla = 37.5" (950mm)
- Material = Acero
inoxidable 316L
- Abertura de malla = 0.003" ± 0.002"
- N° de secciones = 05
piezas
- Temperatura de diseño = 302 °F
(150 °C)
- Presión total = 60 psi
- Stress = 15600 psi

Figura N° 25 Detalle de mallas internas de reactor de desorción de carbón fino



Fuente: elaboración propia

De acuerdo a los criterios de diseño desde el punto de vista de procesos se determinó las dimensiones del reactor y las

características internas adecuadas para trabajar con el carbón fino.

Con el diseño del reactor finalizado se analizaron los demás consideraciones para completar el sistema.

Actualmente La Arena cuenta una planta de desorción de 4t de capacidad; los equipos de este sistema existente serán usados también para el nuevo sistema de desorción de carbón fino, a continuación se listan los equipos con sus respectivos códigos de identificación:

Tabla N° 10 Listado de equipos involucrados en el sistema de desorción de carbón fino

| DESCRIPCIÓN | CODIGO | SISTEMA |
|------------------------------------|-------------|------------------------------|
| Tanque de solución strip | 150-TK-005 | Pertenecen al sistema de 4 t |
| Bomba de solución strip | 150-PU-007C | Pertenecen al sistema de 4 t |
| Bomba de solución strip - Stand by | 150-PU-007D | Pertenecen al sistema de 4 t |
| Intercambiador espiral | 150-HX-004A | Pertenecen al sistema de 4 t |
| Intercambiador espiral - Stand by | 150-HX-004B | Pertenecen al sistema de 4 t |
| Intercambiador de placas | 150-HX-005 | Pertenecen al sistema de 4 t |

| | | |
|---------------------------|------------|------------------------------|
| Intercambiador de placas | 150-HX-006 | Pertenecen al sistema de 4 t |
| Caldero de aceite térmico | 150-HE-002 | Pertenecen al sistema de 4 t |
| Tanque de distribución | 150-TK-007 | Pertenecen al sistema de 4 t |
| Celda electrolítica | 150-EW-005 | Pertenecen al sistema de 4 t |
| Celda electrolítica | 150-EW-006 | Pertenecen al sistema de 4 t |
| Celda electrolítica | 150-EW-007 | Pertenecen al sistema de 4 t |
| Celda electrolítica | 150-EW-008 | Pertenecen al sistema de 4 t |
| Reactor de desorción 1 t | 150-VS-005 | Pertenecen al sistema de 1 t |
| Tecle monorriel | 150-HT-001 | Pertenecen al sistema de 1 t |

Fuente: elaboración propia

La operación del sistema para la desorción de carbón fino se describe a continuación:

El carbón cargado con contenido de metales valiosos se encontrará almacenado en big bags, los cuales se transportarán hacia el área de desorción por medio de un montacargas. En este punto, los bigs bags serán izados con ayuda de un tecele monorriel 150-HT-001 hasta la parte superior del reactor de desorción, y colocados exactamente sobre la brida superior del

reactor, para su apertura manual por parte del operador. De esta forma, se cargará con carbón activado fino el reactor de desorción 150-VS-005 hasta completar el llenado con 1 tonelada de material.

La solución para desorción será preparada en el tanque de almacenamiento de solución strip 150-TK-005 y consistirá en una solución alcalina con 3.0% de soda cáustica (NaOH), 100 ppm de cianuro de sodio (NaCN) y 12 ppm de anti-incrustante, de donde mediante una bomba centrífuga (150-PU-007C ó 150-PU-007D) será impulsada hacia el segundo intercambiador tipo placa 150-HX-005 para aprovechar la temperatura de solución de salida del reactor de desorción, luego esta solución strip ingresará al primer intercambiador tipo espiral 150-HX-004A (dejando otro intercambiador 150-HX-004B tipo espiral en stand by) que transfiere el calor que se logrará mediante el paso de aceite caliente generado por el caldero 150-HE-002.

La solución strip al salir del primer intercambiador 150-HX-004A alcanzará una temperatura de 140 °C y una presión de 50 psi, y luego se derivara el fluido hacia el reactor de desorción 150-VS-005, removiendo de esta forma el oro y otros metales

presentes. Cabe mencionar que, debido a que el reactor 150-VS-005 es de menor capacidad de tratamiento que los otros reactores de 4 t de capacidad, se debe regular el flujo de ingreso de solución strip que ingrese a este reactor al valor recomendado de 5.0 m³/h.

La solución enriquecida al salir de los reactores ingresará al segundo intercambiador 150-HX-005 tipo placas, luego ingresará al tercer intercambiador 150-HX-006 tipo placas donde será enfriada hasta 60°C, el enfriamiento de la solución se realizará haciendo uso de solución barren o agua industrial; la solución con 60°C ingresará al tanque de distribución 150-TK-007 donde será despresurizada. De este tanque será distribuido a dos circuitos de electrodeposición; cada circuito estará conformado por dos celdas electrolíticas 150-EW-005/006 y 150-EW-007/008 que trabajan en serie, cada celda con su respectivo rectificador de corriente; la configuración de las tuberías permitirán poder independizar cualquier celda dando flexibilidad a la operación; para el sistema de desorción de carbón fino se usó solo una celda electrolítica.

Por aplicación de corriente continua, se depositará el oro y otros metales presentes en los cátodos de acero inoxidable. Al salir de las celdas, la solución pobre será conducida por gravedad al tanque de almacenamiento de solución strip 150-TK-005, cerrando de esta manera el circuito.

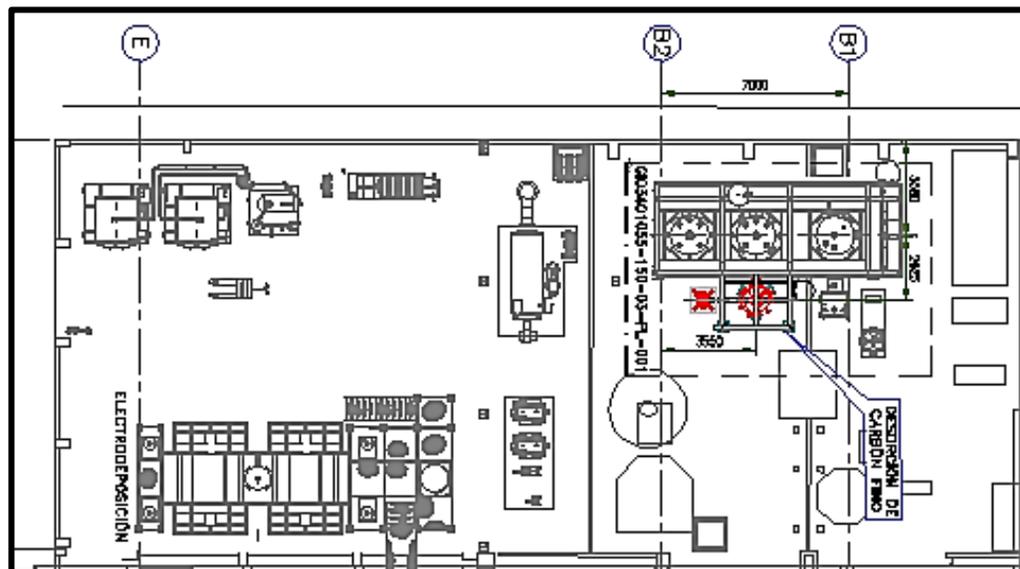
El proceso de desorción se realizará en circuito cerrado y durará aproximadamente 26 horas, luego de lo cual el carbón desorbido será descargado y enviado al área de lavado ácido en el caso de los reactores convencionales. Para cuando se use el reactor de desorción de carbón fino, el carbón desorbido será enviado al tanque de finos para su posterior envío a fundición, con el objetivo de recuperar la mayor cantidad de valores metálicos que puedan quedar remanentes.

Después de varios usos la solución de desorción se saturará con elementos contaminantes por tal motivo será descargada del tanque de solución strip 150-TK-005 y enviada al sumidero de desorción 150-SU-004 y por medio de una bomba sumergible será enviada hacia el sumidero principal.

En el área de desorción se ha considerado la instalación de un reactor de desorción de 1.0 tonelada de carbón 150-VS-005 y un tecele monorriel de 2.0 toneladas de capacidad 150-HT-001.

A continuación se muestra un esquema del arreglo mecánico del sistema de desorción de carbón fino. Los únicos equipos que se adicionaran serán el reactor de desorción y el tecele monorriel; los demás equipos descritos serán los existentes pertenecientes a la planta de desorción de 4t de capacidad.

Figura N° 26 Vista de planta Arreglo Mecánico sistema de regeneración de carbón fino



Fuente: elaboración propia

Luego de haber realizado la fabricación, construcción del reactor y modificación de tuberías para el nuevo sistema de desorción de carbón fino se procedió con la operación. A continuación se detalla el procedimiento de operación:

PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN

Para el inicio de las operaciones el personal a cargo tomo las medidas preventivas para los distintos riesgos a los que se encontró expuesto, debiendo utilizar para esto equipos de protección personal (EPP's).

Tabla N° 11: Equipos de protección personal

| EPP's | DESORCIÓN |
|--------------------------------------|-----------|
| Mameluco impermeable | X |
| Chaleco de seguridad | X |
| Casco de seguridad | X |
| Botas de jebe con punta de acero | X |
| Lentes de seguridad | X |
| Respirador con filtros para mercurio | X |
| Guantes de jebe o neopreno | X |
| Tapones auditivos | X |

Fuente: elaboración propia

DESORCIÓN DE CARBON FINO A PRESIÓN

Para realizar el proceso de desorción se deberá cumplir los siguientes parámetros de operación:

Variables del proceso de desorción

Para que la planta opere eficientemente, ciertas variables fueron modificadas para la puesta en marcha las cuales fueron controladas cuidadosamente; estas variables incluyen parámetros de control del proceso tales como se muestra en la Tabla N° 11.

Tabla N° 12: Variables del proceso de desorción de carbón fino

| Descripción | Unidad | Dato |
|---------------------------|-------------------|---------|
| Caudal | m ³ /h | 2 |
| Presión en el reactor | psi | 50 |
| Temperatura en el reactor | °C | 122 |
| Concentración de NaOH | % | 3 |
| Concentración de NaCN | ppm | 300 |
| pH de solución | --- | 12 - 13 |

Fuente: elaboración propia

Métodos de control

- En la operación de la planta, el flujo de ingreso de solución strip al sistema se controló de forma manual regulándolo mediante la válvula ubicada en el by pass de la válvula de control ubicada en la descarga de las bombas de solución strip 150-PU-007C/D; el caudal se controló monitoreando el flujometro ubicado cerca a las bombas strip.

La señal del flujometro también controla el encendido y apagado de la caldera eléctrica de aceite térmico 150-HE-001.

Figura N° 27 Ubicación de válvula para controlar flujo



Válvula manual para controlar

Fuente: elaboración propia

- Para el control de la temperatura se monitoreo los termómetros, y manipulando las válvulas de enfriamiento a los intercambiadores de calor. En el caso el intercambiador de calor 150-HX-006 (tercer intercambiador), el flujo de solución de enfriamiento se controló manualmente.

- Para el control de presión en el sistema se usó una válvula manual ubicada en el by pass de la descarga de solución pregnant del intercambiador de calor 150-HX-006.

Figura N° 28 Ubicación de válvula para controlar presión



**Válvula manual para controlar
presión**

Fuente: elaboración propia

- El sistema de desorción a presión cuenta con 02 indicadores de fallo por sobrepresión, una baliza instalado en la parte superior de la estructura del reactor y una sirena.

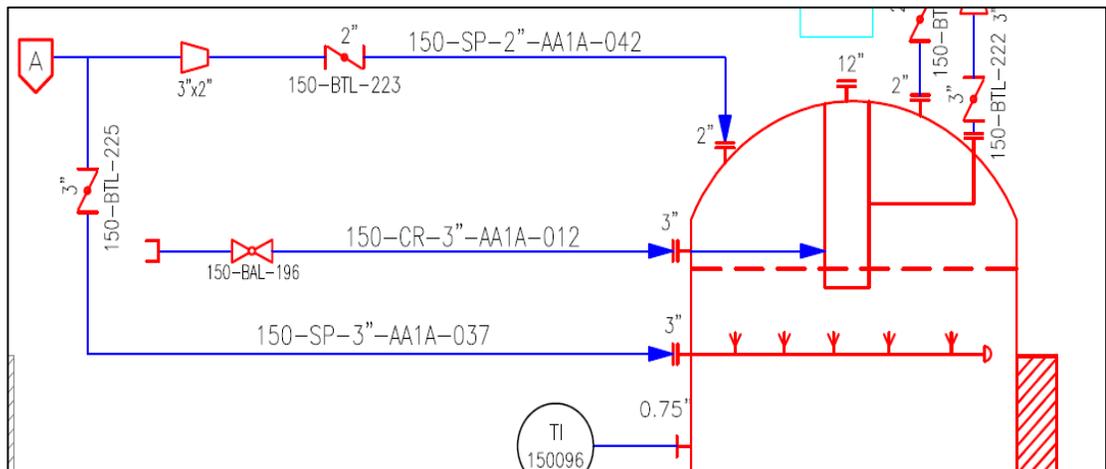
El primer indicador de sobrepresión es la baliza el cual se activa si la presión asciende a 52 psi en el reactor de desorción de carbón fino. Esta es una señal preventiva para corregir la sobrepresión manipulando la válvula manual de presurización (Abriendo la válvula, ver Figura N° 28).

El segundo indicador de sobrepresión es la sirena, esta se accionara si la presión asciende a 55 psi en el reactor de desorción de carbón fino. Esta señal indica que se tiene que actuar de inmediato en aliviar la presión manipulando la válvula manual de presurización (Ver Figura N° 28).

Si el sistema no responde se deberá apagar la bomba strip y de inmediato cerrar al 100% la válvula de presurización.

Ante ese suceso es probable que el interno superior del reactor este obstruido por carbón fino, para esto se debe realizar la limpieza encendiendo la bomba de solución barren ubicada debajo de los DSM y abrir la válvula 150-BTL-225 y realizar la limpieza por 20 minutos.

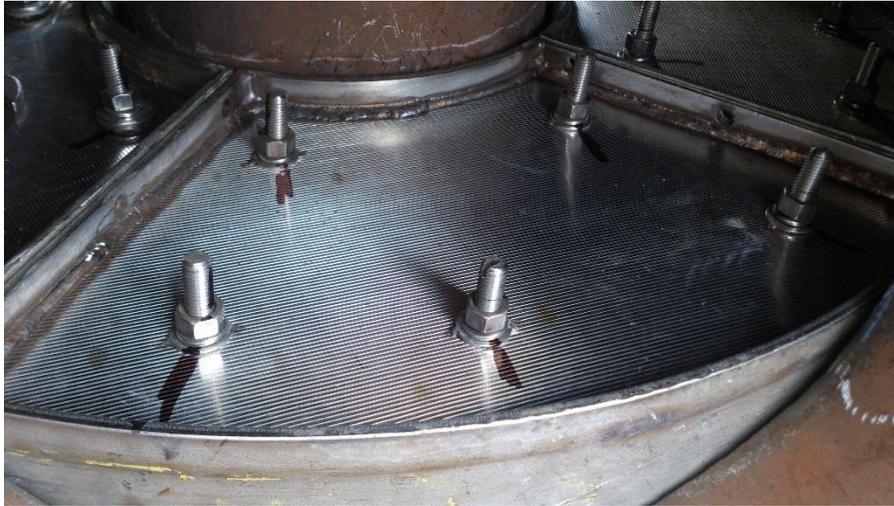
Figura N° 29 Ubicación de válvula para limpieza de interno superior



Fuente: elaboración propia

Luego se debe restablecer el sistema encendiendo la bomba strip y regulando la válvula de presurización. Si el problema persiste se debe apagar la bomba strip, cerrar la válvula de presurización y esperar el enfriamiento de la solución hasta obtener 80 °C, luego drenar la solución del reactor al tanque strip y posteriormente realizar la limpieza manual de la malla interna superior del reactor.

Figura N° 30 Interno superior del reactor de desorción de carbón fino



Fuente: elaboración propia

Preparación y Manejo de Reactivos

Para realizar la desorción de carbón fino es necesario el manejo adecuado de los reactivos que serán empleados, siendo estos los siguientes: Cianuro de sodio, hidróxido de sodio y anti-incrustante.

Preparación y Dosificación de Hidróxido de sodio.

La solución de hidróxido de sodio se preparó de la siguiente manera:

- Se agregó agua industrial al tanque de preparación de hidróxido de sodio existente hasta alcanzar una altura de 1.8 m, se verificó la altura con el visor de nivel del tanque.

- Luego se agregó 12 sacos de 25 kg de hidróxido de sodio al tanque.

- Se encendió el agitador para diluir la soda cáustica en el agua; se agitó por un lapso de 30 minutos verificando que el hidróxido de sodio este completamente diluido.

- Se agregó la cantidad necesaria de NaCN para alcanzar una concentración de 300 ppm en la solución strip.

Tabla N° 13: Variables del proceso de desorción de carbón fino

| Preparación de NaOH para solución strip | | |
|--|-----------------|----------------|
| Datos | Unidades | Nominal |
| Volumen de tanque strip | m ³ | 10.00 |
| Concentración de NaOH en tanque strip | % | 3 |
| Concentración de la solución de NaOH | % | 30 |
| Pureza de NaOH | % | 98 |
| Resultados | | |
| Consumo de NaOH | kg/batch | 300 |
| Consumo de NaOH al 98% | kg/batch | 306.1 |
| Cantidad de sacos a preparar | Und. | 12 |

Fuente: elaboración propia

Para realizar posteriores desorciones se deberá compensar la cantidad de hidróxido de sodio hasta alcanzar un volumen de 10 m³ en el tanque strip con 3% de concentración de NaOH.

Arranque de la planta de desorción

El proceso total comprende tres etapas básicas:

1. Carguío de carbón fino al reactor de desorción.
2. Preparación de la solución de strip.
3. Recirculación de la solución strip en el reactor de desorción.
4. Calentamiento y presurización de la solución strip a través de los intercambiadores de calor.

Carguío de carbón fino de reactor de desorción

Antes de realizar el carguío de carbón al reactor de desorción de carbón fino este fue remojado asegurándonos que esté completamente humedecido.

Como una medida de contingencia se realizó 03 capas de carbón divididos de la siguiente manera:

1° Capa

Se deberá pesar aproximadamente 106 kg de carbón grueso (carbón 6 x 12); esta cantidad es suficiente para obtener una primera cama en el reactor de desorción de 0.3 m de altura.

Tabla N° 14: Calculo de cantidad de carbón para 1° capa

| Descripción | Unidad | Datos |
|--|----------------|-------|
| Densidad de carbón | | 0.50 |
| Diámetro de reactor | m | 0.95 |
| Cantidad de carbón grueso cama inferior | | |
| Altura de primera cama | m | 0.30 |
| Volumen de primera cama | m ³ | 0.21 |
| Peso de carbón primera cama | kg | 106 |

Fuente: elaboración propia

2° Capa

La segunda capa corresponde al carbón fino agregando 700 kg de carbón fino previamente remojado en agua industrial.

3° Capa

Se deberá pesar aproximadamente 284 kg de carbón grueso (carbón 6 x 12); esta cantidad es suficiente para obtener una tercera cama en el reactor de desorción de 0.8 m de altura

Tabla N° 15: Calculo de cantidad de carbón para 3° capa

| Descripción | Unidad | Datos |
|--|----------------|-------|
| Densidad de carbón | | 0.50 |
| Diámetro de reactor | m | 0.95 |
| Cantidad de carbón grueso cama superior | | |
| Altura de segunda cama | m | 0.80 |
| Volumen de primera cama | m ³ | 0.57 |
| Peso de carbón primera cama | kg | 284 |

Fuente: elaboración propia

Preparación de la solución strip

A. Ingreso de la solución de hidróxido de sodio hacia el tanque de solución strip (150-TK-001)

Se trasvaso la solución de NaOH al tanque strip, para eso se abrieron las válvulas que corresponden para poder

direccionar el flujo hacia el tanque strip y posteriormente prender la bomba de trasvase de NaOH.

B. Almacenamiento de solución de remoción (strip) en el tanque strip (150-TK-001)

Después de realizar el trasvase de la solución de NaOH al tanque strip se completó con agua hasta alcanzar 10 m³ de solución. Para esto el nivel del tanque alcanzo una altura de 2.5 m.

Recirculación de la solución strip en el reactor de desorción

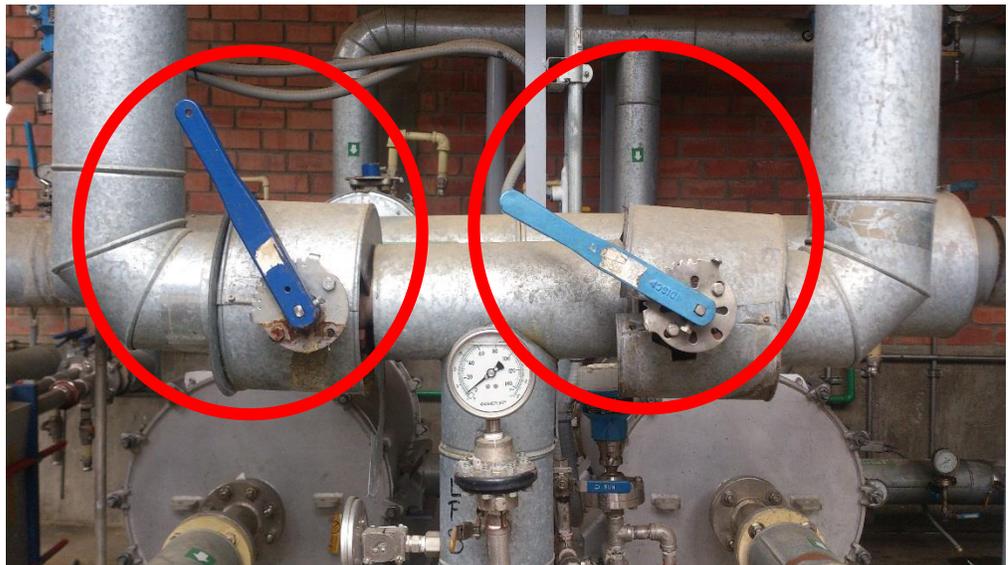
Después de completar la preparación de la solución strip se inició la recirculación de la solución strip haciendo pasar por el segundo intercambiador, primer intercambiador y tanque strip. Se realizó la recirculación por 15 minutos.

Luego se envió la solución hacia el reactor de desorción. Para esto se verifico la correcta posición de todas las válvulas que corresponden a la secuencia de flujo.

Las válvulas para el cambio de dirección de flujo se abrieron y cerraron aproximadamente 60% como se muestra en

la Figura N° 29, con la finalidad de inyectar al reactor de desorción un flujo menor con la finalidad de evitar arrastrar partículas finas de carbón por el reactor evitando causar obstrucciones en la malla interna superior del reactor.

Figura N° 31 Apertura y cierre de válvula de cambio de dirección hacia reactor



Válvula cerrada al 60 %

Válvula abierta al 60 %

Fuente: elaboración propia

Presurización del sistema y calentamiento de solución strip

Cuando la solución strip empezó a recircular por el reactor de desorción y el tanque strip, se verifico que todas las líneas y las válvulas se encuentren en la posición correcta.

Luego, para incrementar la presión en el sistema a 50 psi y lograr la desorción de los valores del carbón activado, se manipulo la válvula manual ubicado en el by pass de la válvula de control en la descarga de solución pregnant del tercer intercambiador alcanzando 50 psi. Se verifico constantemente la presión en el manómetro instalado en el reactor.

Una vez alcanzado la presión de 50 psi se encendió la bomba de aceite térmico y seguidamente el caldero el cual fue programado para calentar el aceite térmico hasta 125°C.

Una vez alcanzado la temperatura 110 °C en el reactor de desorción se derivó el flujo hacia el tanque de distribución a las celdas electrolíticas. Al inyectar la solución a las celdas electrolíticas se inyecto solución barren al tercer intercambiador de calor para mantener la solución pregnant en 65 °C.

Durante toda la operación se tuvieron las siguientes consideraciones:

1. Al hacer la derivación de la solución strip hacia el reactor de desorción y manipular las válvulas se tubo cuidado de no generar turbulencia dentro del reactor para evitar la salida de carbón activado fino y causar obstrucciones en la malla interna del reactor.
2. Al realizar la recirculación de la solución strip por el reactor de desorción y tanque strip se debe mantuvo la presión en 50 psi monitoreando constantemente; si la presión llegara a bajar por alguna fuga o válvula mal cerrada se producirá gasificación de la solución lo cual es perjudicial en la operación.
3. El corte de energía intempestivo durante la operación es muy perjudicial; por correr el riesgo de despresurización del sistema; en este caso la acción inmediata a realizar es cerrar la válvula ubicada en la salida de solución rica del intercambiador 150-HX-063 para mantener la presión en 50 psi.

4. El procedimiento de apagado del sistema se apagó primero el caldero de aceite térmico, luego la bomba de recirculación de aceite térmico cuando la temperatura del aceite estuvo por debajo de 90°C y por último la bomba de solución strip.

Toda la operación descrita anteriormente fue monitoreada desde una sala de control mediante un sistema SCADA; para esto se tuvo las siguientes consideraciones:

MONITOREO

El monitoreo del proceso se realizó desde las estaciones de operación e Ingeniería ubicadas en la sala de control, la instrumentación del reactor 150-VS-005 se va a integrar al sistema existente (Factory Talk - Rockwell).

ARQUITECTURA DE CONTROL

La arquitectura del sistema de control está conformada por equipos existentes:

- 1 Tablero remoto 150-RIO-001 existente, el cual centraliza y canaliza la comunicación de la instrumentación y equipos del área de electrodeposición y desorción, está ubicado en campo en el área de desorción.
- 1 Estación de operación 0000-OS-002, existente ubicada en la sala de control.
- 1 Estación Servidor existente, ubicada en la sala de control.

Asimismo se utilizó los medios físicos existentes; cable de comunicación Profibus, fibra óptica, cable UTP; equipos convertidores; cajas de conexiones y accesorios diversos para integrar los equipos.

INSTRUMENTACIÓN.

En esta sección se describe los instrumentos que se instalaron así como su función.

ÁREA DE ADSORCIÓN.

Reactor de desorción para carbón fino 150-VS-005.

- PT-150054C : Censa y transmite presión en el reactor 150-VS-005.
- PI-150054C : Indicación local de presión en el reactor 150-VS-005.
- TE/TT -150095 : Censa y transmite la temperatura en el reactor 150-VS-005.
- TI-150096 : Indica la temperatura local en el reactor 150-VS-005.
- XL-150054C : Baliza.
- XA-150054C : Sirena.

Montaje de instrumentos y sistema de control.

Para el montaje de los instrumentos y sistema de control se tuvo en cuenta las condiciones de operación del reactor y los elementos que forman parte del proceso, se consideraron las temperaturas de proceso que superan los 100 °C y condiciones agresivas de corrosión.

Por lo que se consideró en la selección de sensores que puedan ser sometidos a condiciones de operación agresivas

como cianuro, soda cáustica y las adecuaciones de montaje correspondiente como tubería de impulsión llena, y elementos que van a tener contacto directo con el fluido que aloja el reactor fabricados con materiales resistentes.

Se consideraron los siguientes grados de protección para los instrumentos

- NEMA 4 o equivalente IP : En lugares abiertos.
- NEMA 4X o equivalente IP : Áreas Corrosivas.

ARQUITECTURA DE CONTROL

Según la arquitectura de control existente se dispuso de un gabinete de control 100-PLC-002 el cual tiene asociado un gabinete remoto de entradas y salidas denominado 150-RIO-001, este gabinete integrará las señales adicionales de los instrumentos de campo del área 150 (Electrodeposición).

El sistema contempla la integración de 2 señales que corresponden al Nivel de Instrumentación de Campo, Nivel de Control y Nivel de Supervisión.

FILOSOFIA DE CONTROL

ÁREA DE DESORCIÓN Y ELECTRODEPOSICIÓN

Secuencia de Arranque y Funcionamiento

Antes de iniciar las operaciones de esta área es necesario que se cumplan las siguientes condiciones, en el orden como se indica:

- El Reactor 150-VS-005 cuenta con un indicador de temperatura TI-150096, un transmisor de temperatura TE/TT-150095, un transmisor de presión PT-150054C y un indicador de presión PI-150054C. El transmisor de presión PT-150054C estará enlazado con la válvula de control de presión existente PCV-150054 que estará ubicado en la salida del intercambiador también existente 150-HX-006, este lazo de control tendrá por finalidad mantener la presión constante en el reactor de desorción.
- A la salida del reactor 150-VS-005 se unirá al circuito de proceso existente.

LAZOS DE CONTROL, ENCLAVAMIENTOS Y ALARMAS

Lazo de Control de Presión

Para mantener una presión constante de 50 psi en el sistema de desorción (reactores e intercambiadores) se instaló una válvula de control de presión existente denominada PCV-150054, un transmisor de Presión (reactor 150-VS-005) denominado PT-150054C el cual tiene asignado un controlador (PIC-150054C). Los controladores comparten el mismo actuador (PCV-150054), dado que los reactores trabajan en diferentes tiempos. Esto quiere decir que cuando entre en funcionamiento el reactor 150-VS-005, el lazo estará formado por el PT-150054C, PIC-150054C.

Enclavamientos

- Las bombas existentes de transferencia de solución Strip 150-PU-007C y 150-PU-007D (stand by) se detienen cuando la alarma de presión alta PAH-154054C del reactor de desorción 150-VS-005 se activa.

- La válvula de control modulante de solución Pregnant PCV-154054 (existente) se cierra cuando la alarma de presión alta PAH-154054C del reactor de desorción 150-VS-005 se activa.
- La luz estroboscópica (baliza) se enciende cuando la alarma de presión alta PAH-154054C del reactor de desorción 150-VS-005 se activa.
- La alarma sonora (sirena) se enciende cuando la alarma de muy alta presión PAHH-154054C del reactor de desorción 150-VS-005 se activa.

Alarmas

- PAH-150054C, Alarma de alta presión en reactor de desorción 150-VS-005.
- PAL-150054C, Alarma de baja presión en reactor de desorción 150-VS-005.
- TAH-150095, Alarma de alta temperatura en reactor de desorción 150-VS-005.
- TAL-150095, Alarma de baja temperatura en reactor de desorción 150-VS-005.

Monitoreo

Monitoreo de Temperatura

Se monitoreo el valor de temperatura (TI-150095) en el reactor 150-VS-005, usando el sensor transmisor de temperatura TT-150095.

Monitoreo de Presión

Se monitoreo el valor de presión (PI-150054C) en el reactor 150-VS-005, usando el sensor transmisor de presión PT-150054C.

ESTIMADO DEL NIVEL DE INVERSION

Para desarrollar el estimado del nivel de inversión se ha cotizado en el mercado local los equipos mecánicos y de instrumentación, así como diversos materiales tales como tuberías, válvulas, accesorios en general.

El presente nivel de inversión se ha determinado los costos directos los cuales ascendieron a la suman de US\$ 240,176.26; este costo fue alcanzado por:

- Suministro de los diferentes fabricantes.

- Transporte a la obra con aseguramiento respectivo.
- Montaje y/o instalación tanto para los equipos así como para los materiales en general.

Adicionalmente se ha incluido en los costos indirectos la movilización y desmovilización del contratista, inducción del personal, obras provisionales, gastos generales del contratista, utilidad del contratista, cartas fianza y flete el costo total ascendió a US\$ 144,105.75.

El costo de inversión total fue de US\$ 348,282.01.

4.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Durante la operación del sistema se realizaron tomas de muestra en la entrada y salida de la celda electrolítica para monitorear la extracción de Au del carbón fino.

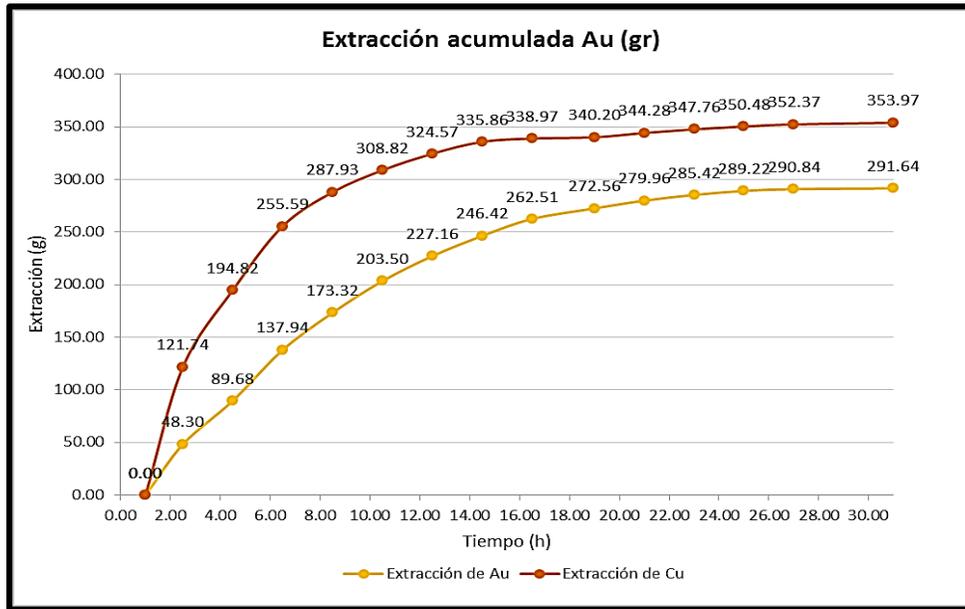
A continuación se muestra los balances metalúrgicos:

Tabla N° 16 Balance 1° desorción de carbón fino

| Tiempo | Hora | Volumen m3 | Au | | | | | Cu | | | | |
|--------|-------|---------------|--------------------|--------|-------------------|---------------|----------------|--------------------|--------|-------------------|---------------|----------------|
| | | | Leyes de Au (g/m3) | | Au | | | Leyes de Cu (g/m3) | | Cu | | |
| | | | Rica | Barren | Gr de Au extraído | Gr de Au Acum | Recuperación % | Rica | Barren | Gr de Cu extraído | Gr de Cu Acum | Recuperación % |
| 1.00 | 14:30 | 0 | 10.60 | 2.41 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 26.75 | 7.92 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2.50 | 17:00 | 5 | 10.77 | 1.11 | 48.30 | 48.30 | 89.69 | 27.26 | 2.91 | 121.74 | 121.74 | 89.31 |
| 4.50 | 19:00 | 4 | 11.64 | 1.29 | 41.38 | 89.68 | 88.90 | 20.78 | 2.51 | 73.08 | 194.82 | 87.91 |
| 6.50 | 21:00 | 5 | 10.78 | 1.13 | 48.26 | 137.94 | 89.52 | 13.71 | 1.55 | 60.77 | 255.59 | 88.66 |
| 8.50 | 23:00 | 4 | 9.964 | 1.12 | 35.38 | 173.32 | 88.76 | 9.08 | 0.99 | 32.34 | 287.93 | 89.07 |
| 10.50 | 01:00 | 4 | 8.602 | 1.057 | 30.18 | 203.50 | 87.71 | 6.03 | 0.81 | 20.89 | 308.82 | 86.60 |
| 12.50 | 03:00 | 4 | 6.717 | 0.803 | 23.66 | 227.16 | 88.05 | 4.45 | 0.51 | 15.75 | 324.57 | 88.49 |
| 14.50 | 05:00 | 4 | 5.643 | 0.827 | 19.26 | 246.42 | 85.34 | 3.18 | 0.36 | 11.29 | 335.86 | 88.69 |
| 16.50 | 07:00 | 5 | 3.814 | 0.596 | 16.09 | 262.51 | 84.37 | 0.93 | 0.31 | 3.11 | 338.97 | 67.03 |
| 19.00 | 09:30 | 5 | 2.57 | 0.56 | 10.05 | 272.56 | 78.21 | 0.49 | 0.24 | 1.23 | 340.20 | 50.31 |
| 21.00 | 11:30 | 4 | 1.90 | 0.05 | 7.40 | 279.96 | 97.37 | 1.22 | 0.20 | 4.08 | 344.28 | 83.61 |
| 23.00 | 13:30 | 4 | 1.47 | 0.099 | 5.46 | 285.42 | 93.24 | 0.99 | 0.12 | 3.48 | 347.76 | 3.77 |
| 25.00 | 15:30 | 4 | 0.98 | 0.03 | 3.80 | 289.22 | 96.94 | 0.79 | 0.11 | 2.72 | 350.48 | 3.55 |
| 27.00 | 17:30 | 3 | 0.76 | 0.22 | 1.62 | 290.84 | 71.05 | 0.79 | 0.16 | 1.90 | 352.37 | 3.38 |
| 31.00 | 21:30 | 8 | 0.1 | 0.00 | 0.80 | 291.64 | 100.00 | 0.20 | 0.00 | 1.60 | 353.97 | 8.00 |

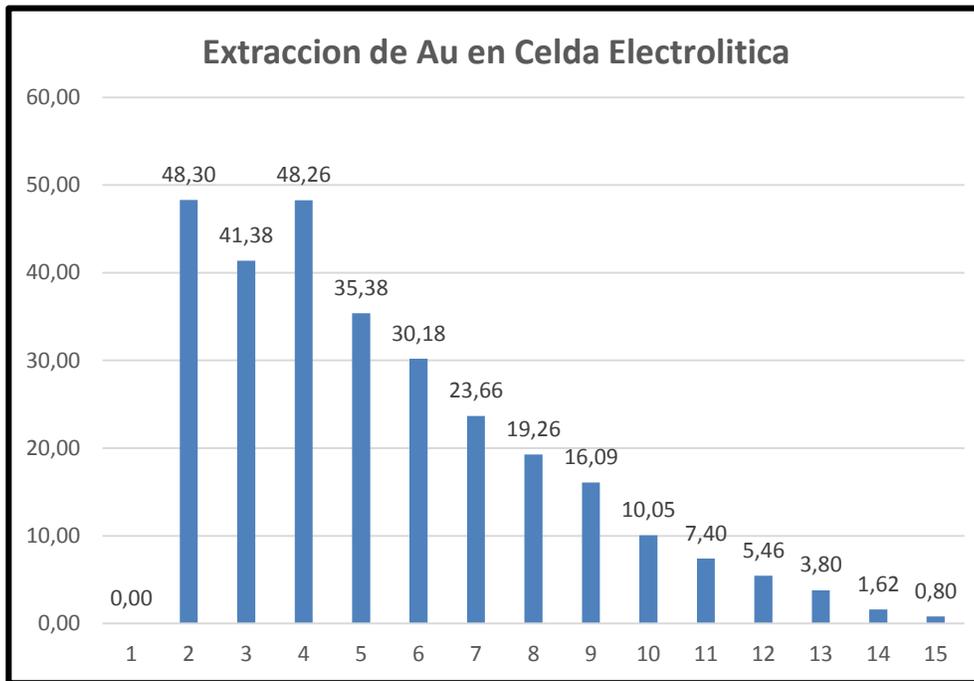
Fuente: elaboración propia

Figura N° 32 Extracción acumulada de oro 1° Desorción



Fuente: elaboración propia

Figura N° 33 Extracción de oro en celda electrolítica 1º Desorción



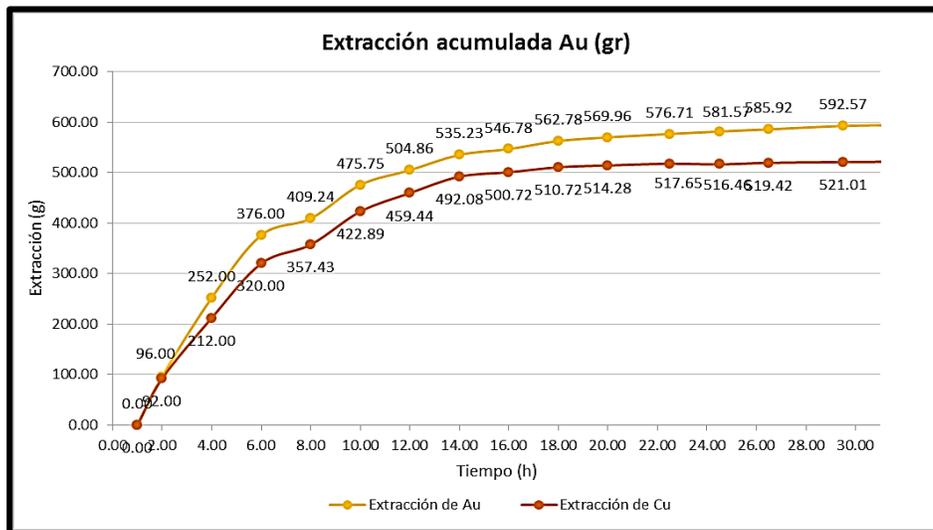
Fuente: elaboración propia

Tabla N° 17 Balance 2º desorción de carbón fino

| Tiempo | Hora | Volumen m3 | Au | | | | | | Cu | | | | |
|--------|-------|---------------|--------------------|--------|-------------------|---------------|----------------|--------------------|--------|-------------------|---------------|----------------|--|
| | | | Leyes de Au (g/m3) | | Au | | | Leyes de Cu (g/m3) | | Cu | | | |
| | | | Rica | Barren | Gr de Au extraido | Gr de Au Acum | Recuperación % | Rica | Barren | Gr de Cu extraido | Gr de Cu Acum | Recuperación % | |
| 1.00 | 19:00 | 0 | 12.00 | 3.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 43 | 26 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| 2.00 | 21:00 | 4 | 29.00 | 5.00 | 96.00 | 96.00 | 82.76 | 49 | 26.00 | 92.00 | 92.00 | 46.94 | |
| 4.00 | 23:00 | 4 | 44.00 | 5.00 | 156.00 | 252.00 | 88.64 | 43.0 | 13.00 | 120.00 | 212.00 | 69.77 | |
| 6.00 | 01:00 | 4 | 34.00 | 3.00 | 124.00 | 376.00 | 91.18 | 34.0 | 7.00 | 108.00 | 320.00 | 79.41 | |
| 8.00 | 03:00 | 3 | 12.34 | 1.26 | 33.24 | 409.24 | 89.79 | 15.06 | 2.58 | 37.43 | 357.43 | 82.85 | |
| 10.00 | 05:00 | 4 | 18.39 | 1.77 | 66.51 | 475.75 | 90.40 | 20.75 | 4.38 | 65.46 | 422.89 | 78.89 | |
| 12.00 | 07:00 | 4 | 7.90 | 0.63 | 29.10 | 504.86 | 92.07 | 9.81 | 0.67 | 36.55 | 459.44 | 93.16 | |
| 14.00 | 10:00 | 6 | 5.71 | 0.64 | 30.38 | 535.23 | 88.75 | 6.05 | 0.61 | 32.64 | 492.08 | 89.87 | |
| 16.00 | 12:00 | 3 | 4.64 | 0.79 | 11.54 | 546.78 | 82.98 | 3.33 | 0.45 | 8.64 | 500.72 | 86.46 | |
| 18.00 | 14:00 | 5 | 3.60 | 0.40 | 16.00 | 562.78 | 88.89 | 2.30 | 0.30 | 10.00 | 510.72 | 86.96 | |
| 20.00 | 16:00 | 3 | 2.86 | 0.467 | 7.18 | 569.96 | 83.68 | 1.408 | 0.222 | 3.56 | 514.28 | 84.23 | |
| 22.50 | 17:30 | 4 | 2.05 | 0.178 | 6.75 | 576.71 | 91.33 | 1.1 | 0.165 | 3.37 | 517.65 | 3.35 | |
| 24.50 | 19:30 | 4 | 1.404 | 0.13 | 4.86 | 581.57 | 91.10 | 0.651 | 0.077 | 2.18 | 516.46 | 3.68 | |
| 26.50 | 21:30 | 4 | 1.344 | 0.14 | 4.35 | 585.92 | 89.81 | 0.556 | 0.064 | 1.77 | 519.42 | 3.55 | |
| 29.50 | 12:15 | 5 | 1.33 | 0.10 | 6.65 | 592.57 | 92.63 | 0.476 | 0.182 | 1.59 | 521.01 | 3.60 | |
| 31.50 | 01:30 | 4 | 0.542 | 0.08 | 1.68 | 594.25 | 85.98 | 0.339 | 0.166 | 0.62 | 521.63 | 2.14 | |
| 33.50 | 03:30 | 4 | 0.432 | 0.04 | 1.47 | 595.72 | 89.81 | 0.287 | 0.156 | 0.50 | 522.13 | 1.93 | |
| 35.50 | 05:30 | 4 | 0.255 | 0.02 | 0.84 | 596.56 | 90.98 | 0.269 | 0.158 | 0.40 | 522.53 | 1.63 | |

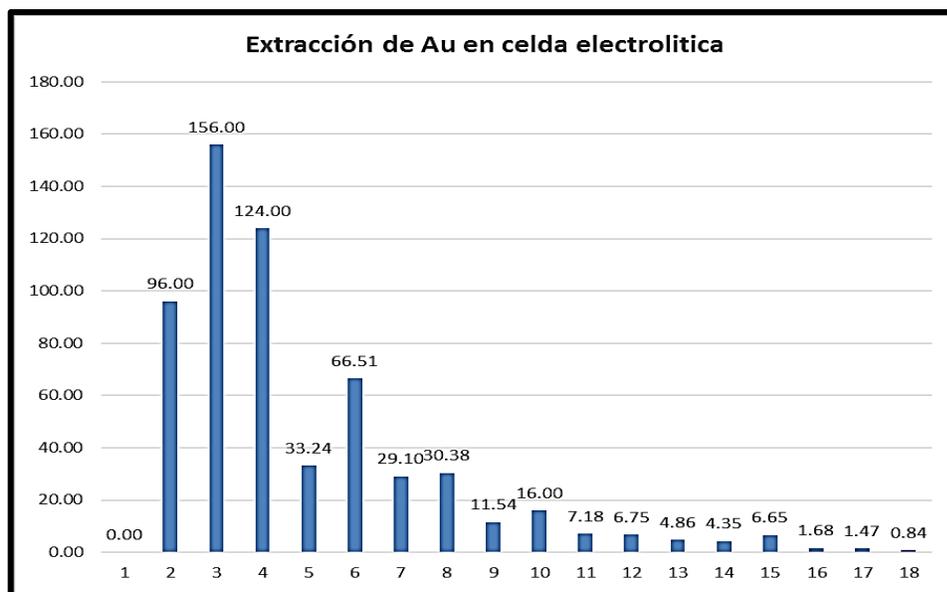
Fuente: elaboración propia

Figura N° 34 Extracción acumulada de oro 2º Desorción



Fuente: elaboración propia

Figura N° 35 Extracción de oro en celda electrolítica 2º Desorción



Fuente: elaboración propia

Como se indicó en la sección anterior, a continuación se muestran los cálculos realizados para dosificación de reactivos:

Tabla N° 18 Preparación de NaOH 1° Desorción

| Primera desorción carbon fino | | | |
|--|--|-----------------|----------------|
| Consumo de NaOH en tanque strip | | | |
| Datos | | Unidades | Nominal |
| Volumen de tanque strip | | m ³ | 10.00 |
| Concentración de NaOH en tanque strip | | % | 3 |
| Concentración de la solución de NaOH | | % | 30 |
| Pureza de NaOH | | % | 98 |
| Número de preparaciones | | veces/mes | 28 |
| Resultados | | | |
| Consumo de NaOH | | kg/batch | 300 |
| Consumo de NaOH al 98% | | kg/batch | 306.1 |
| Consumo de NaOH al 98% | | kg/mes | 8,571 |

Fuente: elaboración propia

Tabla N° 19 Compensación de NaOH 2° Desorción

| Segunda desorción carbon fino | | | |
|--|--|-----------------|----------------|
| Consumo de NaOH en tanque strip | | | |
| Datos | | Unidades | Nominal |
| Volumen de tanque strip | | m ³ | 3.0 |
| Concentración de NaOH en tanque strip | | % | 3 |
| Concentración de la solución de NaOH | | % | 30 |
| Pureza de NaOH | | % | 98 |
| Resultados | | | |
| Consumo de NaOH | | kg/batch | 90 |
| Consumo de NaOH al 98% | | kg/batch | 91.4 |
| Consumo de NaOH al 98% | | kg/mes | 2,559 |

Fuente: elaboración propia

4.3 PRUEBA DE HIPOTESIS

General

De acuerdo a los resultados obtenidos después de las primeras desorciones se puede decir que el diseño del rector de desorción especial para carbón fino permite extraer el oro de las partículas finas logrando recuperaciones de hasta 90%.

Específicas

- a) El dimensionamiento realizado para el sistema de desorción dio buenos resultados; con esta información se podrá realizar un sistema de mayor capacidad.
- b) Las muestras de carbón realizadas en las diversas etapas de la planta ADR y su análisis fueron importantes para definir las condiciones operativas así como el diseño y dimensionamiento de las mallas internas del carbón fino.
- c) Durante la operación se demostró que la velocidad de flujo está vinculado a la mínima expansión de cama evitando así la obstrucción de la malla superior.

4.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El proceso de desorción de carbón fino, se inició el 11/05/2015 02:30 p.m. realizándose 21 campañas de desorción hasta el 21/07/2015 04:00 a.m. habiéndose tratado en total 11.7 TMS de Carbón Fino seco, de los cuales se recuperaron 367.89 onzas de oro fundidas.

Los parámetros usados en la electrodeposición fueron las siguientes:

- Celda N°07 de electrodeposición : 17 Ánodos y 16 Cátodos.
- Flujo del electrolito : 3.1 m³/h.
- Voltaje promedio de operación : 2.5 V.
- Corriente promedio de operación : 900-1000 A.
- Tiempo promedio de proceso : 26.5 h

Cosecha de precipitado de electrodeposición de oro.

La cosecha de la Celda N° 7 se realizó el 24/07/2005, obteniéndose como producto el cemento electrolítico del proceso de desorción / electroposición y desmercurización, según:

| | |
|------------------------------------|-------------------|
| Peso de cemento electrolítico seco | : 26.96 kg. |
| Ley de Oro | : 42.56 % de Au |
| Contenido de Onzas de Oro | : 368.96 Onzas Au |
| Ley de Plata | : 6.16 % de Ag |
| Ley de Cobre | : 21.57 % de Cu |
| Ley de Fe | : 12.30 % de Fe |

Fundición y Obtención de barras metálicas

El cemento electrolítica seco obtenido en la primera campaña de desorciones (11.7 TMS de carbón fino tratado) fue mezclado con fundentes para la obtención de las barras metálicas dore con un contenido de oro de 367.89 onzas equivalente a US\$ 404,679.00.

Se tuvo un total de carbón acumulado de 34.40 TMS con un contenido de oro de 978.45 onzas equivalente a US\$ 1'076.326.00, quedado para las siguientes campañas 22.7 TMS más las cantidades que se seguirán generando.

Con la producción obtenida de la primera campaña y sabiendo que el costo de inversión total es de US\$ 348,282.01 se puede decir que se realizó la recuperación de la inversión realizada en la construcción del sistema de desorción y electrodeposición de carbón fino.

CONCLUSIONES

- ✓ Se determinó que la tecnología planteada para la recuperación de valores de oro de partículas finas de carbón dio buenos resultados logrando recuperaciones de 90%, con un tiempo de operación de 26.5 horas.
- ✓ Se logró recuperar en la primera campaña 367.89 onzas de oro fundidas a partir de 11.7 TMS de carbón fino tratado en el nuevo sistema de desorción de carbón fino.
- ✓ Por los resultados indicados anteriormente se logró incrementar la producción de la planta de procesos; se cuenta con 22.7 TMS de carbón fino por tratar más las cantidades que se irán generando el vida operativa de la planta de procesos.
- ✓ Para partículas de carbón fino con granulometrías como se muestran en los siguientes cuadros se puede concluir que la velocidad de flujo en el reactor de 0.21 cm/s genera la adecuada expansión de cama evitando el arrastre de partículas finas y almacenamiento en la malla superior interna del reactor de desorción.

| Descripción | Unidad | Dato |
|---------------------------|--------|------|
| Presión en el reactor | psi | 50 |
| Temperatura en el reactor | °C | 122 |
| Concentración de NaOH | % | 3 |
| Concentración de NaCN | ppm | 300 |

Tabla N° 20 Análisis granulométrico carbón fino planta ADR

| LABORATORIO METALURGICO - (Malla Especificación TYLER) Análisis en Seco | | | | | |
|--|----------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| MALLA Nro. | Abertura (µm) | Peso (g) | Peso Retenido Malla (%) | Acumulado Retenido (%) | Acumulado Passing (%) |
| -150 | 106 | 13 | 3.3 | 100.0 | 0.0 |
| +150 | 106 | 38 | 9.7 | 96.7 | 3.3 |
| +100 | 150 | 56 | 14.4 | 86.9 | 13.1 |
| +65 | 212 | 131 | 33.6 | 72.6 | 27.4 |
| +35 | 425 | 62 | 15.9 | 39.0 | 61.0 |
| +28 | 600 | 90 | 23.1 | 23.1 | 76.9 |
| TOTAL | | 390 | 100 | | |

Fuente: elaboración propia

| LABORATORIO METALURGICO - (Malla Especificación TYLER) Análisis en Seco | | | | | |
|--|----------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| MALLA Nro. | Abertura (µm) | Peso (g) | Peso Retenido Malla (%) | Acumulado Retenido (%) | Acumulado Passing (%) |
| -150 | 106 | 1.25 | 0.14 | 100.00 | 0.00 |
| +150 | 106 | 2.48 | 0.29 | 99.86 | 0.14 |
| +100 | 150 | 58.61 | 6.77 | 99.57 | 0.43 |
| +65 | 212 | 181.72 | 20.99 | 92.80 | 7.20 |
| +35 | 425 | 429.02 | 49.56 | 71.81 | 28.19 |
| +28 | 600 | 192.64 | 22.25 | 22.25 | 77.75 |
| TOTAL | | 865.72 | 100.00 | | |

Fuente: elaboración propia

- ✓ Con este criterio de diseño conservador también es posible fijar el caudal de operación así como la determinación las dimensiones de un reactor de desorción para partículas finas de mayores proporciones.

RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda incrementar el flujo gradualmente de tal manera de poder tabular y mejorar los tiempos de desorción manteniendo la misma recuperación evitando en todo momento incrementos bruscos de expiación de cama, el cual puede causar atoros y por ende sobrepresiones en el reactor de desorción.
- ✓ El sistema de carbón fino usa el equipamiento de la planta de desorción existente de 4t; por esta razón existe la dificultad al realizar las desorciones durante la operación del carbón fino; motivo por el cual se recomienda independizar el sistema agregando un tanque strip, 03 intercambiadores de calor, 01 caldero de aceite térmico y una celda electrolítica con su respectivo rectificador de corriente.
- ✓ Es importante adicionar capaz de carbón grueso (6 x 12 mallas) en la parte inferior y superior como medidas de contingencia ante sucesos de incremento de flujo por una mala operación. La altura de la cama inferior se debe mantener en 0.3 m el cual equivale a 106 kg de carbón grueso y la altura de la cama superior se debe mantener en 0.8 m el cual equivale a 284 kg de carbón grueso.

BIBLIOGRAFIA

Libros

1. Fidel Sergio Misari Chuquipoma, "METALURGIA DE ORO", Lima; Centro de estudios de promoción en ciencias de la tierra, 1993.
2. Astucuri, Venancio; "PRINCIPIOS DE HIDROMETALURGIA Y ALGUNAS APLICACIONES FUNDAMENTALES". Ed. GOL SRL, Lima, 1984.
3. Gilchrist, J. D., EXTRACTION METALLURGY, Ed. Pergamon Press, 3a Edición, 1989.
4. Habashi, F., PRINCIPLES OF EXTRACTIVE METALLURGY, pub: Plenum Press, New York, Vols 1 & 2, 1993.
5. Rosenqvist, T. "FUNDAMENTOS DE METALURGIA EXTRACTIVA", Centro Regional de Ayuda Técnica (AID), México, 1987.
6. Wills, B. A., MINERAL PROCESSING TECHNOLOGY, 5th. Edition, Pergamon Press, Oxford, 1992.
7. Marsden, J. y House, I. "THE CHEMISTRY OF GOLD EXTRACTION", Ellis Horwood Ed. , Great Britain, 1993.

Revistas Especializadas

1. MUNDO MINERO, "Oro, Tratamiento De Los Minerales De Oro"
Separata del Periódico Mundo Minero, Lima, Perú.

ANEXOS



Fotografía N° 01: Mallas superiores del reactor de desorción.



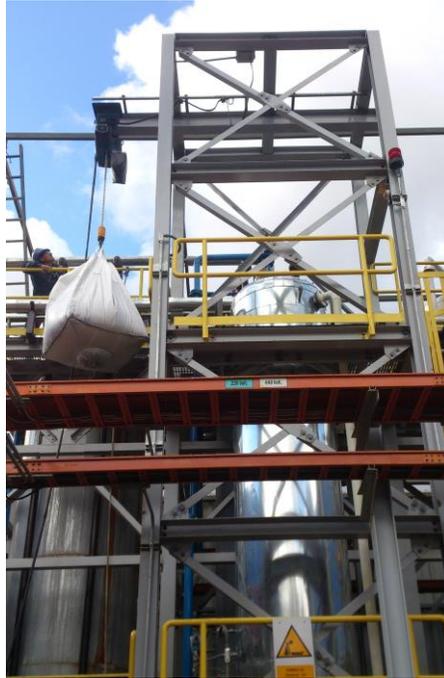
Fotografía N° 02: Brida superior lugar de carga de carbón fino



Fotografía N° 03: Tanque de preparación de NaOH



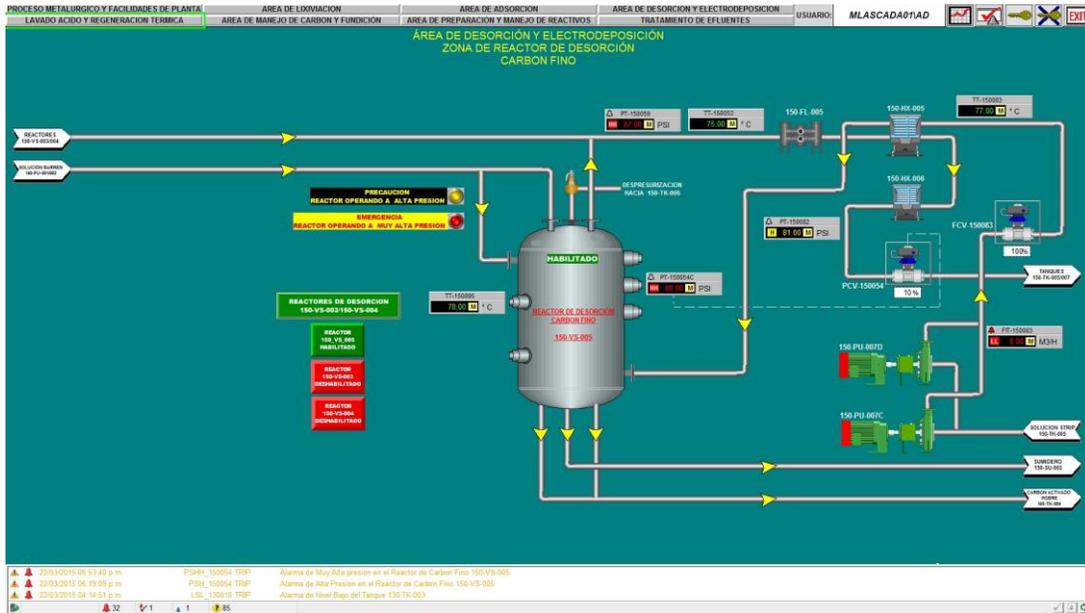
Fotografía N° 04: Intercambiadores de calor



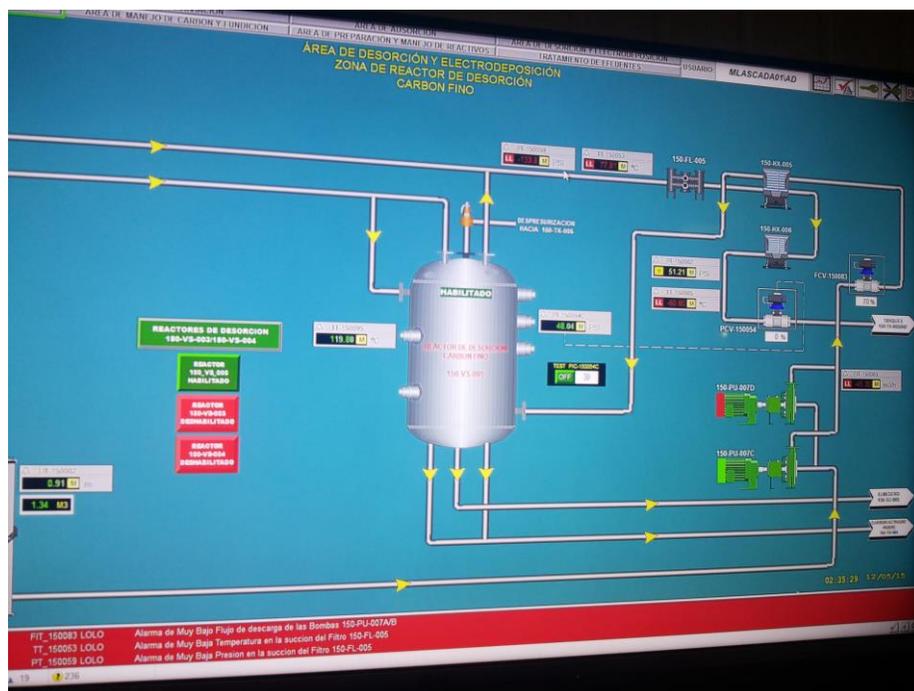
Fotografía N° 05: Sistema de carga de carbón fino



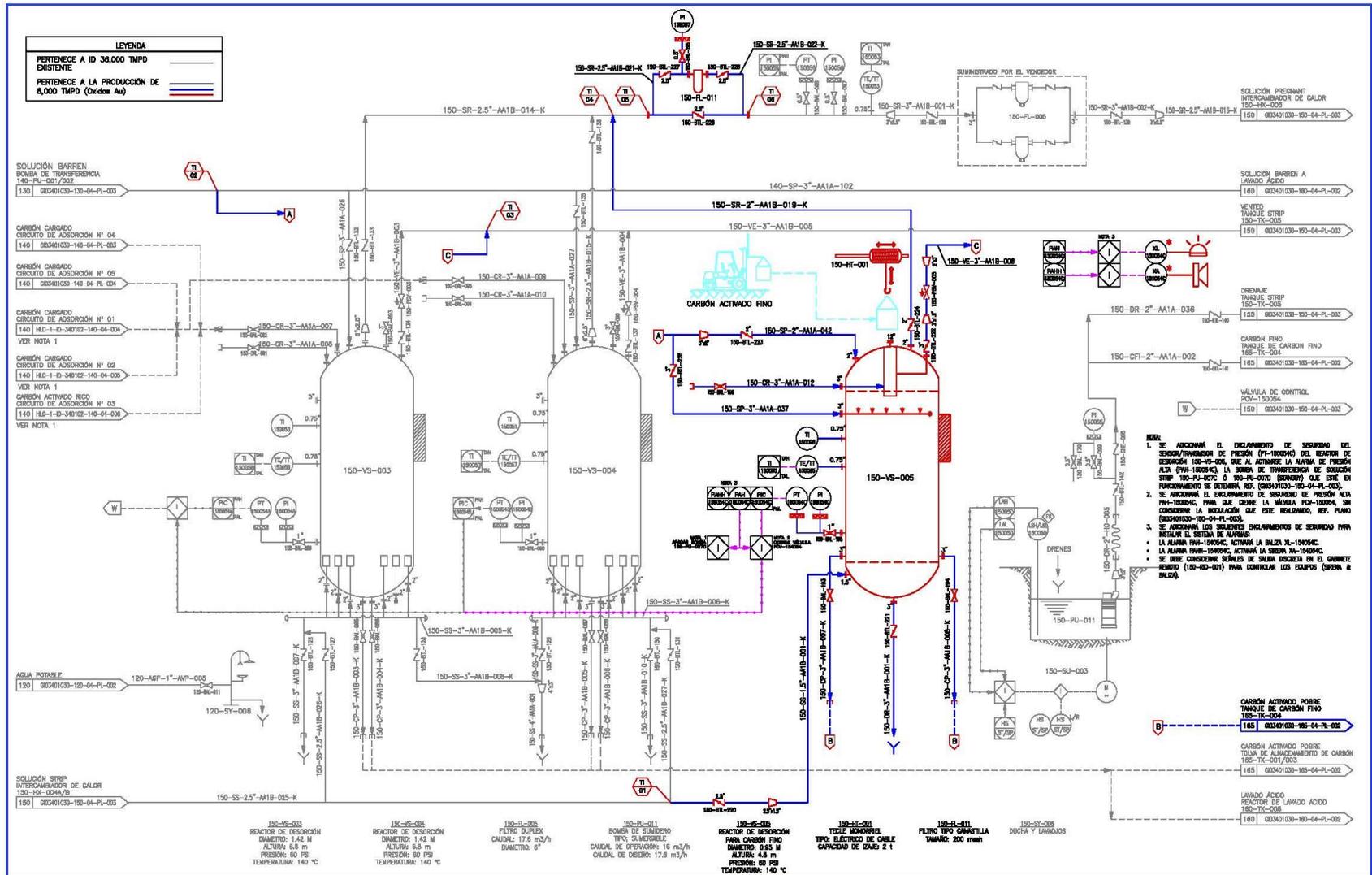
Fotografía N° 06: Muestras de carbón fino



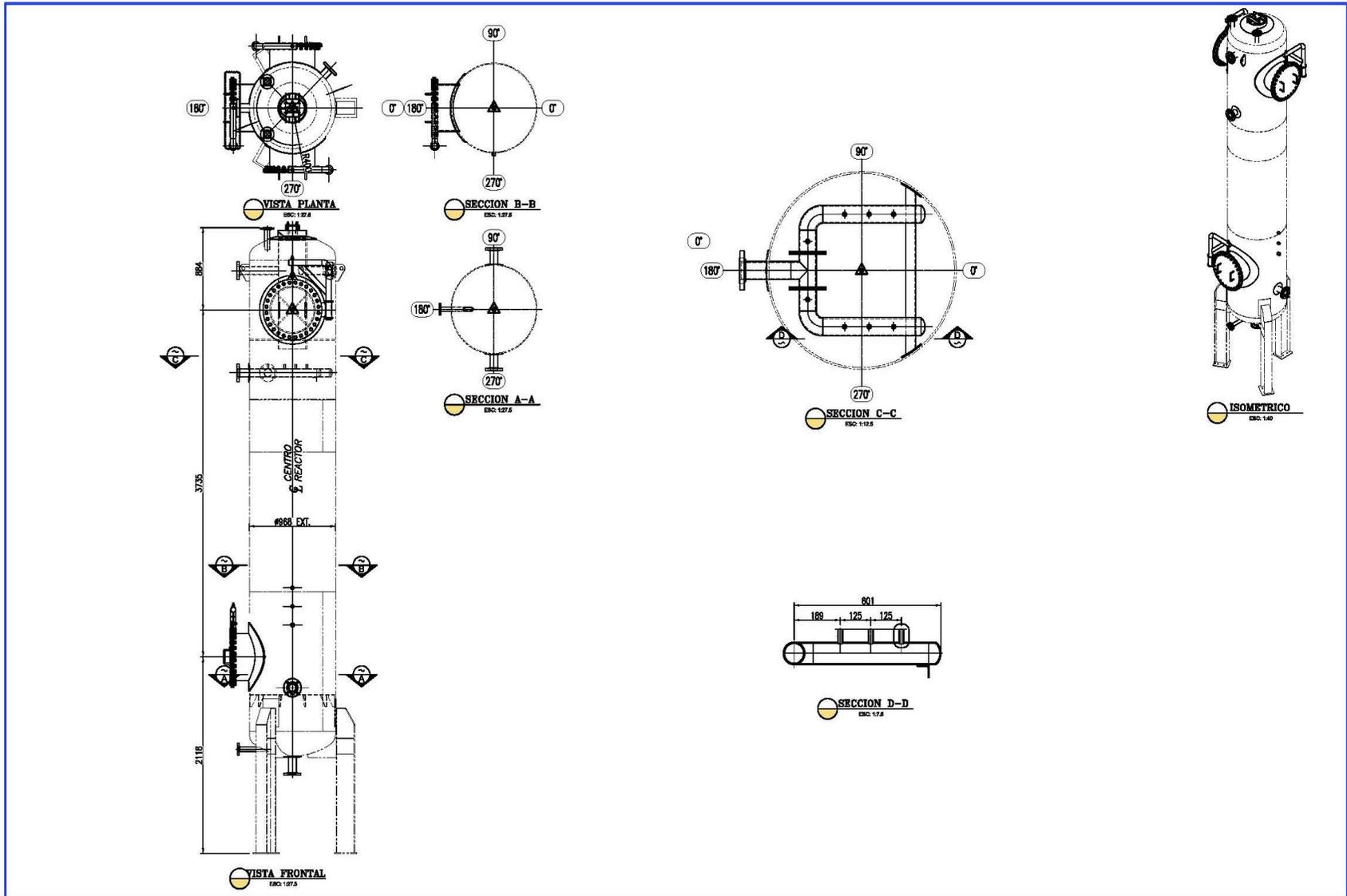
Fotografía N° 07: Diseño de pantalla SCADA sistema de desorción de carbón fino



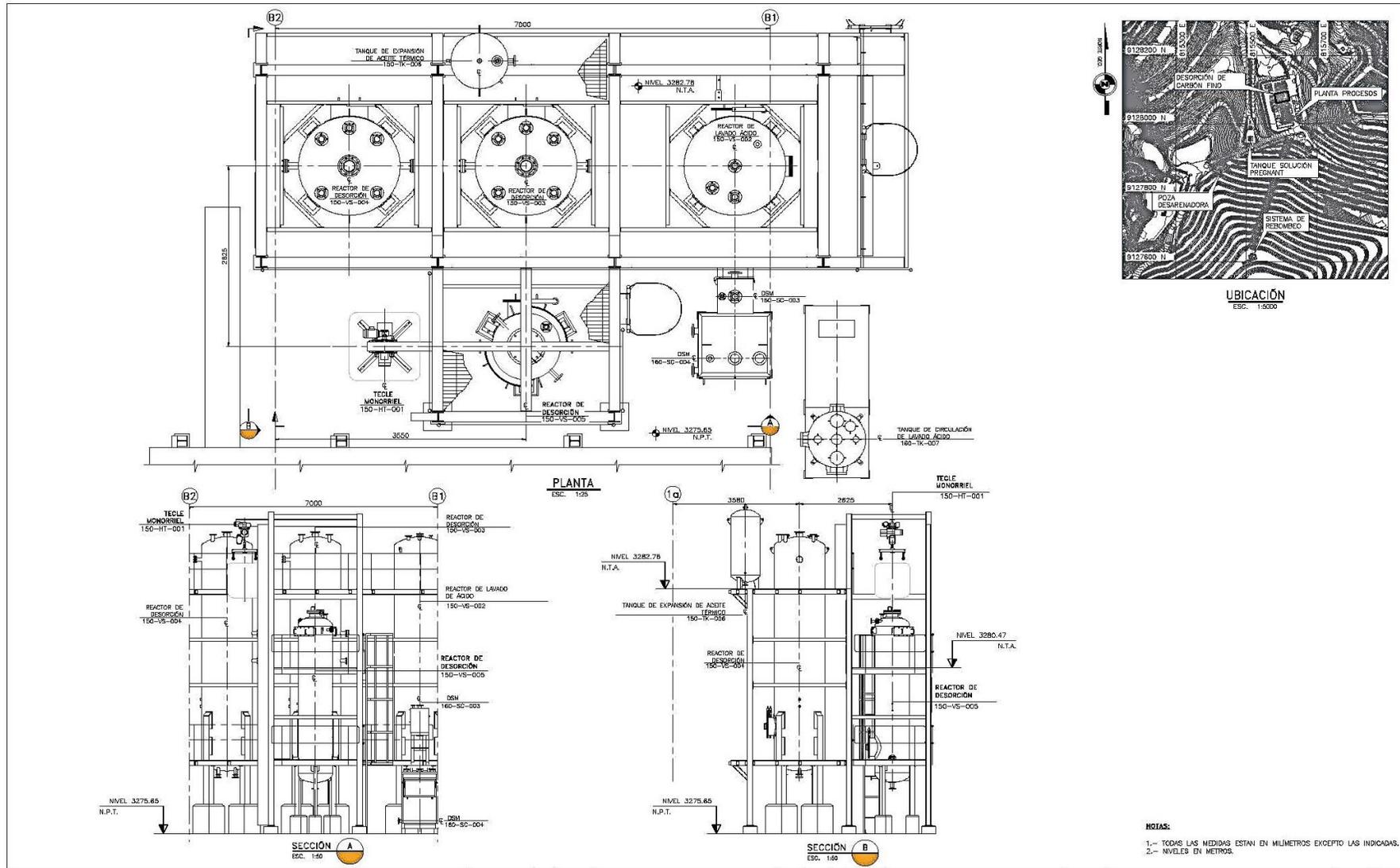
Fotografía N° 09: Pantalla sistema de desorción de carbón fino en operación



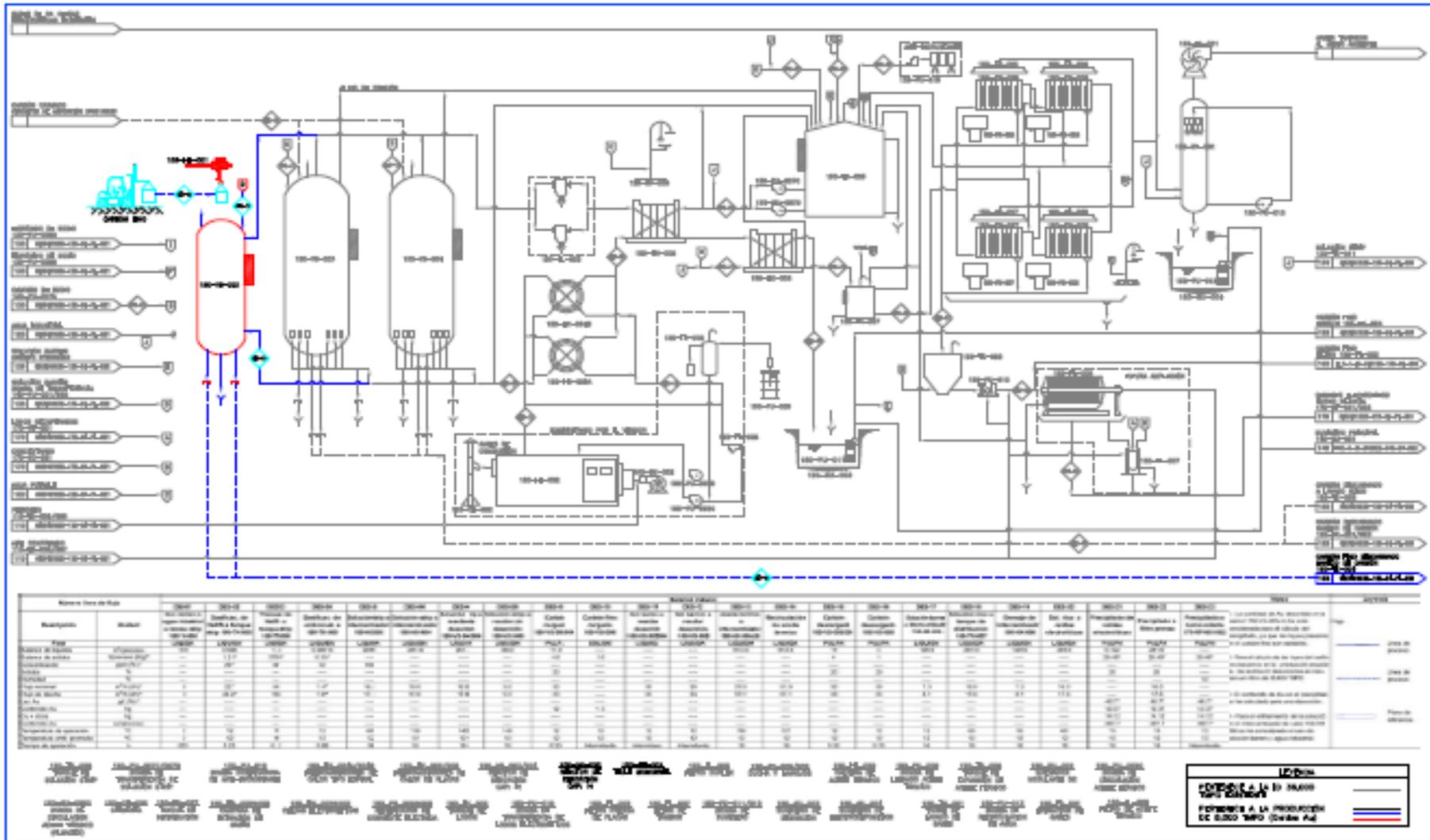
Plano N° 01 Diagrama de tuberías e instrumentación



Plano N° 02 Diseño de reactor de carbono fino



Plano N° 003 Arreglo mecánico de sistema de desorción



Plano N° 004 Diagrama flujo de sistema de desorción