



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia

Manual de Operaciones, Planta
Adsorción, Desorción y Reactivación(ADR)
de la Mina El Chanate

“Memoria de Prácticas Profesionales”

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO

Presenta

Rodrigo Martínez Peñuñuri

Hermosillo, Sonora

Octubre del 2012

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia

Manual de Operaciones, Planta
Adsorción, Desorción y Reactivación (ADR)
de la Mina El Chanate

“Memoria de Prácticas Profesionales”

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO

Presenta

Rodrigo Martínez Peñuñuri

Hermosillo, Sonora

Octubre del 2012

VOTOS APROBATORIOS

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora, por los conocimientos brindados en este privilegiado periodo de tiempo que pasé formando parte activo de él.

A mis padres, que siempre me han dado su apoyo incondicional y a quienes debo este triunfo profesional, por el esfuerzo que han hecho para que pueda alcanzar y culminar satisfactoriamente esta etapa de mi vida.

A mis hermanos, amigos y seres queridos por su apoyo y confianza hasta el final.

A mi Director y Miembros del Jurado Calificador del trabajo por su colaboración, consejos y paciencia en la elaboración y conclusión del presente trabajo.

A todos mis maestros que me formaron a lo largo de la carrera, por sus enseñanzas, por su disposición y ayuda brindada.

A mi compañero Luis Daniel, con el que realice el proyecto del Manual de Operaciones en la Mina El Chanate durante nuestro periodo de Prácticas Profesionales.

Al personal de Mina El Chanate que amablemente nos respondió y aclaró todas nuestras dudas, así como también nos brindó apoyo para culminar el trabajo que hoy presentamos como Memoria de Prácticas.

A todos mis queridos compañeros, que me acompañaron en esta hermosa experiencia y formación en la Universidad de Sonora.

A Dios principalmente por la infinidad de maravillas mostradas a mi vida.

A TODOS, GRACIAS.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
RESUMEN.....	x
I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1. Introducción al Manual de Operaciones.....	2
1.2. Objetivo General.....	4
1.3. Objetivos Específicos.....	4
II. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO.....	5
2.1. Lixiviación con Cianuro.....	6
2.2. Columnas de Adsorción.....	7
2.3. Carbón Activado.....	8
2.4. Reactivación del Carbón Activado.....	9
2.5. Trayectoria de la Solución.....	10
2.6. Trayectoria del Carbón.....	12
2.6.1. Planta grande.....	12
2.6.2. Planta chica.....	15
2.7. Especificaciones.....	18
2.7.1. Preparación y uso del cianuro de sodio.....	18
2.7.2. Preparación y uso del ácido clorhídrico.....	19
2.7.3. Preparación y uso de hidróxido de sodio.....	21
III. DESARROLLO OPERACIONAL DE LA PLANTA.....	23
3.1. Panorama General Planta ADR.....	24
3.2. Paro del Tanque de Despojo.....	25

3.3. Inicio del Tanque de Despojo.....	26
3.4. Movimiento de Carbón Activado Planta Chica.....	26
3.4.1. Columna 1 a tanque de lavado ácido.....	27
3.4.2. De tanque de lavado ácido a tanque de despojo.....	29
3.4.3. Preparación del tanque de despojo.....	31
3.4.4. De columna 2 a 1.....	32
3.4.5. De columna 3 a 2.....	33
3.4.6. De columna 4 a 3.....	33
3.4.7. De columna 5 a 4.....	33
3.4.8. De columna 6 a 5.....	34
3.4.9. Movimiento del carbón despojado.....	34
3.5. Movimiento de Carbón Planta Grande.....	36
3.5.1. Columna 1 a tanque de lavado ácido.....	36
3.5.2. De tanque de lavado ácido a tanque de despojo.....	39
3.5.3. Preparación del tanque de despojo.....	41
3.5.4. Movimiento entre columnas.....	43
3.5.4.1. De columna 2 a 1.....	43
3.5.4.2. De columna 3 a 2.....	43
3.5.4.3. De columna 4 a 3.....	43
3.5.4.4. De columna 5 a 4.....	44
3.5.5. De tanque de apagado a columna 5.....	45
IV. PROGRAMA DE MUESTREO Y BALANCES METALÚRGICOS.....	46
4.1. Valor del Correcto Muestreo.....	47
4.2. Muestras Puntuales.....	47
4.3. Balance Global.....	50
4.4. Planta Grande.....	52
4.5. Planta Chica.....	53
4.6. Eficiencia de Columnas en Planta Grande.....	54
4.7. Eficiencia de Columnas en Planta Chica.....	55
4.8. Resultados Generales.....	56
4.9. Resultados de Columnas.....	56

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
5.1. Conclusiones Generales.....	58
5.2. Conclusiones Particulares.....	58
5.3. Aportaciones.....	59
5.4. Recomendaciones.....	60
VI. APÉNDICE.....	61
6.1. Programa de Muestreo en Planta ADR.....	62
6.1.1. Muestreo de soluciones.....	62
6.1.2. Muestreo de carbones.....	64
6.1.3. Muestreo de tratamiento de anti incrustante.....	66
6.1.4. Muestreo de dore y escorias.....	67
6.2. Programa de Monitoreo en Planta ADR.....	68
6.2.1. Reporte del tanque de despojo.....	68
6.2.2. Reporte diario de operación.....	69
6.2.3. Reporte diario de columnas.....	70
6.2.4. Lectura del horno regenerador de carbón activado.....	71
6.2.5. Reporte de gas en planta.....	72
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Pág.
Figura 1.	Ubicación Mina El Chante.....	2
Figura 2.	Diagrama de flujo del proceso general de mina.....	10
Figura 3.	Recorrido de la solución de cianuro de sodio.....	11
Figura 4.	Recorrido del carbón activado en planta grande.....	15
Figura 5.	Recorrido del carbón activado en planta chica.....	17
Figura 6.	Tanque de preparación y depósito de almacenamiento de cianuro de sodio.....	19
Figura 7.	Tanque de preparación y depósito de almacenamiento de ácido clorhídrico.....	20
Figura 8.	Tanque de despojo y depósito de almacenamiento de sosa.....	22
Figura 9.	Parte superior del tanque de lavado ácido.....	27
Figura 10.	Válvulas divergentes.....	27
Figura 11.	Muestreo de carbón activado cargado.....	28
Figura 12.	Carbón activado en tanque de lavado ácido.....	28
Figura 13.	Bombas del circuito de planta chica.....	29
Figura 14.	Válvula de entrada múltiple.....	30
Figura 15.	Movimiento del carbón activado.....	30
Figura 16.	Depósitos de almacenamiento de los principales reactivos.....	32
Figura 17.	Válvula de salida del tanque.....	33
Figura 18.	Conducción de la solución rica.....	34
Figura 19.	Tolva del horno.....	35
Figura 20.	Horno regenerador de carbón activado.....	35
Figura 21.	Movimiento del carbón reactivado hacia columnas.....	36
Figura 22.	Movimiento del carbón activado en planta grande.....	37
Figura 23.	Toma de muestra de carbón activado para análisis.....	37
Figura 24.	Carbón activado en tanque de despojo.....	37
Figura 25.	Cribado del carbón activado.....	39

Figura 26.	Tanque de lavado con ácido.....	40
Figura 27.	Tubería de tanque de lavado ácido.....	40
Figura 28.	Controladores de presión y flujo.....	42
Figura 29.	Preparación de reactivos principales.....	42
Figura 30.	Mecanismo de movimiento de carbón activado entre columnas..	44
Figura 31.	Tanque de apagado de carbón activado.....	45
Figura 32.	Balance de materia en planta grande.....	52
Figura 33.	Balance de materia en planta chica.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág.
Tabla I.	Programa de muestreo.....	48
TablaII.	Registro de solución rica.....	51
TablaIII.	Ejemplo de registro de solución rica.....	51
TablaIV.	Resultados del balance general.....	56
TablaV.	Resultados del balance específico.....	56
TablaVI.	Muestreo de soluciones.....	62
TablaVII.	Muestreo de carbones.....	64
TablaVIII.	Muestreo de tratamiento de anti incrustante.....	66
TablaIX.	Muestreo de dore y escorias.....	67
TablaX.	Reporte del tanque de despojo.....	68
TablaXI.	Reporte diario de operación.....	69
TablaXII.	Reporte diario de columnas.....	70
TablaXIII.	Lectura del horno regenerador de carbón activado.....	71
TablaXIV.	Reporte de gas en planta.....	72

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el propósito de aportar un documento en el cual se describiera las principales características del proceso de adsorción, desorción y reactivación de la planta de recuperación de oro y plata; así como la descripción general de las operaciones en Mina El Chanate.

El proceso de la Mina El Chanate inicia con la obtención del mineral del tajo, al cual se le prepara dejándolo con las características granulométricas óptimas, se le añaden en la banda transportadora cal como modificador de pH y cemento como aglomerante, en el transcurso del recorrido del mineral por las bandas se adaptaron aspersores y pliegues que favorecen a la aglomeración de las partículas finas. La banda transportadora al final de su recorrido forma los patios, en los cuales se lleva a cabo la operación esencial de extracción de los valores del mineral, la lixiviación.

Mediante la lixiviación se obtienen los valores en solución de oro y plata, dicha solución es dirigida por medio de canales hacia la pila en el interior de planta de recuperación. Desde esta pila se bombea la solución con los valores hacia las columnas de adsorción.

En dichas columnas inicia la operación de adsorción de los valores de oro y plata, una vez cargado el carbón activado con los valores de oro y plata en sus poros y sitios activos, el carbón activado es enviado a un tanque en el cual se le da un tratamiento con ácido clorhídrico, con el propósito de limpiar y remover material indeseable del carbón activado cargado. Dicho tratamiento es hecho con el propósito de llevar a condiciones óptimas de operación al carbón activado para dar paso a la desorción.

La desorción es la operación por la cual se da la obtención de los valores de oro y plata de los poros y sitios activos del carbón activado. La operación de desorción se lleva a cabo poniendo en contacto al carbón activado cargado con solución de sosa cáustica y cianuro de sodio, en condiciones de alta temperatura y presión.

Una vez que el oro y la plata son removidos de los poros y sitios activos del carbón activado, se recuperan los valores de la solución de cianuro cáustico por medio de operaciones electro y pirometalúrgicas.

Al término de la desorción del carbón activado es necesario realizar el proceso de reactivación del carbón, proceso cuyo fin es de gran importancia, ya que al someter al carbón a altas temperaturas los poros y sitios activos se reactivan, habilitando al carbón activado para la posterior operación de adsorción.

Se demuestra la importancia de un muestreo adecuado y su influencia en los posteriores cálculos y toma de decisiones a favor de la mina. Debido a que, junto con el monitoreo, es parte fundamental en aspectos operacionales en planta se realizaron modificaciones y mejoras a dichos programas. A su vez se señala la eficiencia del trabajo en planta, por medio de balances de materia específicos y globales.

En general este trabajo pretende contribuir en las posibles mejoras que beneficien al proceso de adsorción, desorción y reactivación. Todo esto se realizó en el tiempo que se nos permitió trabajar en las instalaciones de la mina El Chanate.

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción al Manual de Operaciones

La planta de procesamiento El Chanate, se encuentra ubicada en el desierto de Altar, a ocho kilómetros del Ejido 16 de Septiembre por la carretera Santa Ana-Caborca kilómetro 81, municipio de Altar Sonora, la mina es subsidiaria de Aurico Gold, firma canadiense que cuenta con otros proyectos tanto en operación como exploración en México como podemos observar en la Figura 1. La mina El Chanate cuenta con características ideales de ubicación, como son la cercanía a ciudades y vialidades importantes y de fácil acceso.



Figura 1. Ubicación Mina El Chanate

La Mina El Chanate de la empresa Minera Santa Rita tiene como objetivo elevar la productividad y crecer en materia de seguridad, cuidados de medio ambiente y responsabilidad social.

Minera Santa Rita inició sus operaciones en Julio del 2007, desde entonces hasta la fecha la producción se ha incrementado en un cien por ciento. Este incremento se ve reflejado en la capacidad inicial de la planta, de cinco a ocho mil metros cúbicos por día, alcanzado actualmente los quince mil metros cúbicos diarios. De igual manera, la trituración aumentó de siete mil a quince mil toneladas de mineral diarias. En

movimientos totales en la mina se tiene alrededor de cincuenta mil toneladas de mineral al día.

Actualmente tiene calculada una reserva de 1 millón 150 mil onzas de oro, otorgándole a la unidad minera una vida útil mayor a los diez años.

La mina cuenta con 190 empleados, del 2007 a la fecha ha crecido hasta en un cuarenta por ciento en empleos directos e indirectos.

Recientemente en el taller organizado por La Cámara Minera de México (CAMIMEX), entre autoridades ambientales y del sector minero en el puerto de Ensenada, Minera Santa Rita recibió un reconocimiento de Industria Limpia como resultado del esfuerzo colectivo y de la prioridad mostrada por parte de la empresa de cumplir con la normatividad ambiental, así como como crear una cultura de responsabilidad ambiental entre trabajadores y localidades vecinas.

En el mes de Julio del año 2010 se logró acumular una cantidad mayor a las 500 mil horas de trabajo/hombre sin accidentes, destacando la búsqueda de "cero" accidentes.

En la actualidad la extracción de metales preciosos, requiere día a día mejorar y aumentar la eficiencia de las técnicas de extracción del mineral, hasta la obtención del metal, debido a que la ley de los minerales se encuentra en claro descenso. Para contrarrestar esto, es necesario operar grandes volúmenes de mineral, para hacer atractiva esta operación, tal como se pretende realizar en Mina El Chanate.

El método de lixiviación en montones, es una alternativa factible para resolver esta problemática, ya que requiere de una inversión inicial (por tonelada de mineral tratado), menor que cualquier otro proceso actualmente en operación. Así mismo, sus rendimientos en términos de recuperación de valores son igualmente satisfactorios [1].

Se pretende que el presente manual le sea de utilidad a personal de la industria minero-metalúrgica como ingenieros, supervisores, operadores y personal en capacitación para el control y operación de planta.

1.2. Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es el mutuo beneficio y contribución para las partes involucradas, por una parte en mi crecimiento como profesionalista al poder obtener el título de Ingeniero Químico y a su vez contribuir en la mejora de la calidad de los procedimientos realizados en la Planta de Adsorción, Desorción y Reactivación (Planta ADR) de la Mina El Chanate.

1.3. Objetivos Específicos

Describir detalladamente las operaciones realizadas en La Planta de Adsorción, Desorción y Reactivación (Planta ADR) de inicio a fin del proceso.

Contribuir en las posibles mejoras en el programa de monitoreo y muestreo de los puntos importantes a tener actualizados en Planta ADR.

Buscar que el presente manual sea un instrumento teórico básico, donde se encuentre la razón de realizar en campo una u otra función; y de respaldo, como guía para la solución de problemas o situaciones críticas, para el entrenamiento y/o capacitación de cualquier operador/trabajador de la planta.

II. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO

2.1. Lixiviación con Cianuro

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico, el cual consiste en la obtención de diversos metales que se encuentra en minerales oxidados, en este caso será en búsqueda de la obtención de los metales preciosos oro y plata. Dichos metales preciosos se separan a través de la aplicación de una solución de cianuro de sodio.

La reacción química primordial en la lixiviación del oro y plata es la disolución de los mismos en la solución acuosa. Para esto es necesario de un compuesto que sea disolvente y oxidante para obtener una tasa de lixiviación aceptable. Sólo existe un número limitado de compuestos solventes con la suficiente estabilidad para ser usados en la extracción de oro y plata. El cianuro de sodio es utilizado debido a su relativamente bajo costo, su gran efectividad para disolver oro y plata, y su selectividad hacia los mismos por sobre otros metales. El agente oxidante más comúnmente utilizado en la lixiviación de oro y plata con cianuro es el oxígeno disuelto en la solución, el cual proviene del aire, provisionando a esta técnica mayor atractivo al momento de decidirse por un proceso económico [2].

El mineral que se extrae de la mina a tajo abierto es fragmentado mediante las quebradoras primaria, secundaria y terciaria respectivamente y cuyo objetivo es obtener un material mineralizado de un tamaño de menos un cuarto de pulgada. Este tamaño es suficiente para dejar expuesto el oro a la infiltración de la solución cianurante, en la ecuación 1 podemos observar la reacción de la solución de cianuro de sodio con los valores de oro y plata en el mineral [3-6].



El material triturado es transportado mediante bandas hacia el lugar donde se lleva a cabo la formación de la pila. El amontonar el mineral sobre una base impermeable y luego lixiviarla con una solución de cianuro es un proceso muy simple. El mineral necesita tener cierto grado de porosidad de manera que no se requiera molerlo a un tamaño más fino para exponer los metales a la solución [7]. Al formar las pilas por medio de maquinaria se forma el patio de lixiviación, estos miden aproximadamente 90 m de ancho por 360 m de largo y la altura de los bancos varía entre 6 y 9 m.

Sobre el patio de lixiviación se instala un sistema de riego por goteo y aspersores, que van cubriendo toda el área expuesta. Bajo los patios de lixiviación se instala previamente una membrana impermeable cuyo propósito es el de evitar la contaminación del medio ambiente al dejar percolar la solución de cianuro a mantos acuíferos o suelo en general [8].

Sobre dicha membrana se dispone de sistema de drenes (tuberías ranuradas) que permiten recoger las soluciones que se infiltran a través del material.

En resumen, una vez instalado el sistema de riego por goteo y aspersores se vierte lentamente la solución de cianuro sobre los patios, la cual se infiltra hasta su base. La solución de cianuro disuelve el oro y la plata y lo mantiene en solución, la cual pasa por un sistema de drenaje y es llevada fuera del sector de los patios por medio de canales impermeables [9].

2.2. Columnas de Adsorción

Las columnas de adsorción tienen la finalidad de lograr la recuperación de los valores de oro y plata disueltos en la solución de cianuro. En el inicio de operaciones la mina contaba con un flujo de solución de alrededor de 8 mil metros cúbicos por hora, los cuales eran dirigidos hacia las columnas de adsorción de Planta Chica. Dicha planta cuenta con 6 columnas con capacidad de una tonelada de carbón activado cada una.

La Planta Chica cumplía con lo necesario para una excelente recuperación de oro y plata, sin embargo con incremento en el volumen de solución de cianuro irrigado, recolectado y dirigido hacia la planta a consecuencia de la construcción de una nueva sección de patios, alcanzó un flujo de 15,000 m³ por día y fue necesario la instalación de una nueva planta de adsorción.

A la planta recién instalada se le denominó Planta Grande, esto debido a su capacidad de carbón activado en las 5 columnas, la primera con tres y las cuatro restantes con dos toneladas de carbón activado respectivamente.

Con dicha planta se logró el cometido de procesar la solución de cianuro rica proveniente de la nueva y vieja sección de patios de lixiviación.

La solución de cianuro cargada de valores corre por un canal al costado de los patios y desemboca en una pila llamada “pila rica”, ya que en ésta se encuentra el oro a mayor concentración. De esta pila, la solución es bombeada hacia un filtro para eliminar impurezas y posteriormente alimentar la solución limpia a la columna 1 para ambas plantas.

Después por rebosamiento y gravedad la solución que sale de la columna 1 alimenta a la columna 2 y de esta manera sucede hasta la columna 5, en el caso de la planta grande y hasta la 6 en la planta chica.

Al terminar su trayecto por las columnas la solución pasa por un filtro cuyo objetivo es atrapar el carbón fino que se mantiene en suspensión y sale de las columnas; una vez filtrada la solución, también por gravedad desemboca en una pila llamada “pila pobre” ya que la solución tiene oro en muy bajas concentraciones. De la solución de la pila pobre se analiza el cianuro y se añade el cianuro necesario para obtener la concentración que se maneja en la solución lixivante, posteriormente la solución es bombeada a los patios para dar inicio nuevamente al proceso de lixiviación [10].

2.3. Carbón Activado

El mecanismo de adsorción del oro de las soluciones cianuradas involucra los fenómenos simultáneos de difusión en los poros y adsorción en los sitios activos o áreas del carbón que tiene una afinidad por el oro y la plata. La adsorción es un proceso por el cual los átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos.

Los carbones activados se utilizan por su parte debido a su estructura granular, ya que tienen una gran superficie específica que permiten un alto grado de adsorción de oro y plata, desde las soluciones cianuradas ricas a la superficie de estos carbones. A nivel industrial el método de adsorción por carbón activado es el más común [11].

El carbón activado se fabrica a partir de la corteza de coco debido a que su dureza lo hace más resistente a la abrasión y la rotura, además su capacidad de adsorción es mayor que otros carbones activados fabricados a partir de otros materiales [12].

En estas operaciones se hacen pasar las soluciones que percolan de las pilas de lixiviación por las columnas, las cuales en su interior contienen el carbón activado.

La alimentación de las columnas se hace a contracorriente, lo que mantiene las partículas de carbón en suspensión evitando que el lecho se compacte. La cantidad de oro que puede cargar un carbón activado depende de la cantidad de cianuro libre que se encuentre en la solución, de las impurezas y del pH de la solución, así como también del tiempo de contacto o dicho de otra forma del flujo de alimentación [13].

El carbón de la columna uno se pasa primero a un tanque de lavado con ácido clorhídrico y después se manda al tanque de despojo, aquí el carbón es puesto en contacto a presión y temperatura elevada con una solución de sosa cáustica y cianuro de sodio, donde la solución se alimenta por la parte inferior de la columna y sale por la parte superior como solución rica. El proceso por el cual se despoja al oro y la plata del carbón se le conoce como desorción el cual básicamente es el mecanismo inverso de la adsorción.

La solución resultante del despojo se conduce al área de refinería, donde se encuentran las celdas electrolíticas en las cuales se deposita el oro y la plata.

2.4. Reactivación del Carbón Activado

Al carbón descargado se le realiza un proceso de reactivación que consiste en someterlo a una etapa de reactivación en un horno, elevando su temperatura entre los 600°C y los 700°C durante un recorrido de una hora por el interior del horno, al mismo tiempo que es movido a través de un transportador sin fin, en una atmósfera pobre en oxígeno a fin de eliminar las materias orgánicas contaminantes sin producir combustión [14].

En general, esta es una descripción del proceso llevado a cabo en la planta ADR de la mina El Chanate cuya representación la podemos observar en la Figura 2, este es un proceso sencillo en aspectos generales y complejo al introducirnos a fondo en su operación.

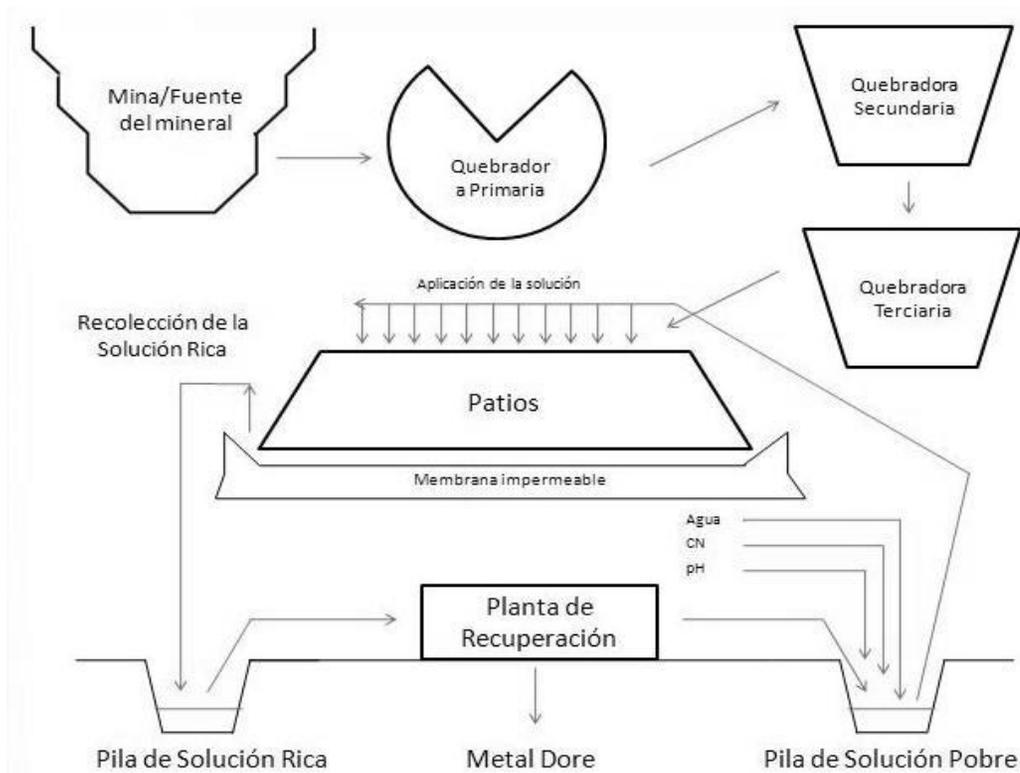


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso general de mina

2.5. Trayectoria de la Solución

La lixiviación se debe al flujo continuo de la solución de cianuro que es irrigado en los patios de lixiviación esta solución percola en el mineral disolviendo el oro presente. La solución es dirigida a una pila llamada “pila rica” debido a que ahí se reúne el lixiviado de los patios con la mayor concentración final de oro y plata. A partir de la pila rica, la solución es bombeada a las plantas ADR.

En el caso de la planta grande el inicio del recorrido es a través de un filtro malla, cuyo trabajo es retirar impurezas o desechos que se encuentre suspendidos en la solución rica, después la solución entra al circuito formado por cinco columnas de

capacidades ya mencionadas. La planta chica sigue el mismo recorrido, sólo con la diferencia de que posee 6 columnas en vez de 5 que tiene la grande, esto es para la mayor retención de oro y la disminución del oro en las colas. Estas características se muestran en la Figura 3, además de otros puntos importantes como son las ubicaciones de filtros y bombas en el circuito de la solución.

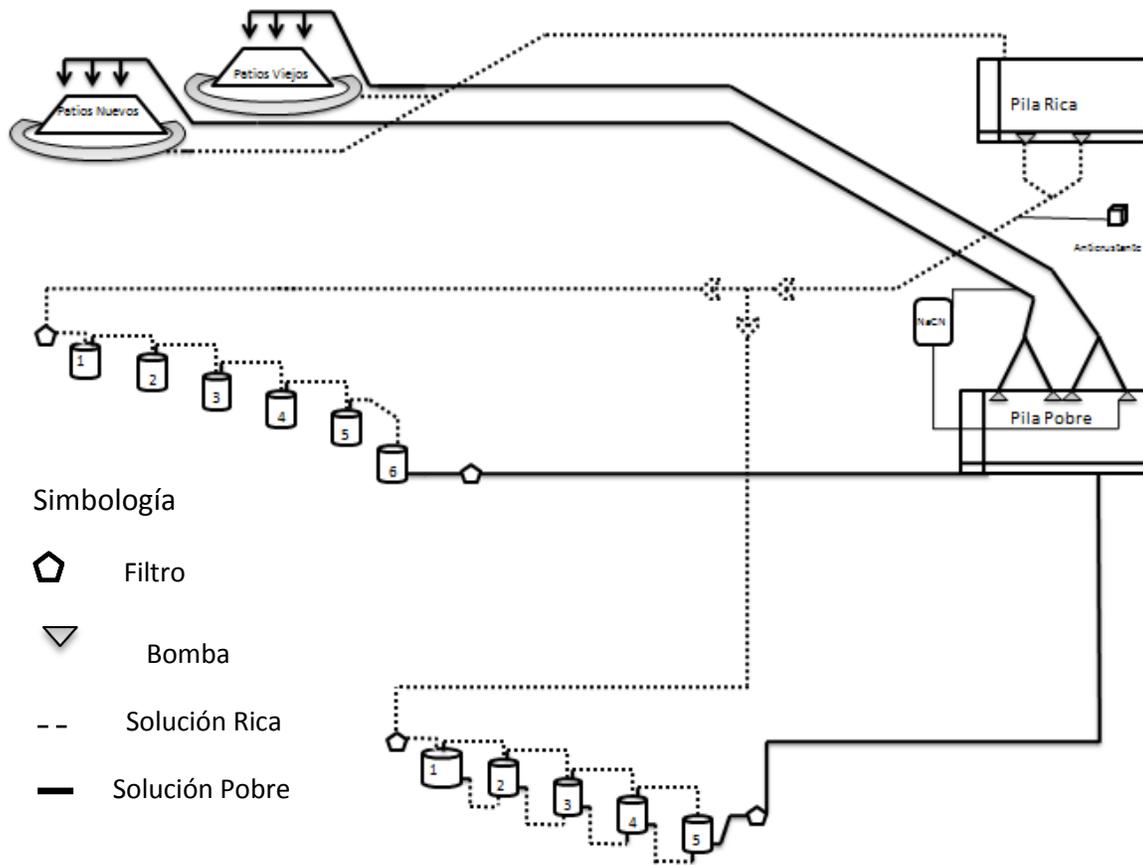


Figura 3. Recorrido de la solución de cianuro de sodio

Una vez filtrada la solución, ésta inicia su recorrido por la parte inferior de la primer columna; pasa a través de unos bulbos cuya función es la de mantener el carbón activado en suspensión, sube hasta desbordar y cae por otra tubería para alimentar a la segunda columna y realizar el mismo recorrido hasta llegar a la quinta columna, esta se filtra de nuevo y es dirigida a “pila pobre” por las bajas concentraciones de oro presentes en la solución. El principio de esta técnica es que el carbón contenido en las columnas vaya adsorbiendo o atrapando al oro presente en solución. La

concentración de oro va disminuyendo al pasar de columna a columna, y al final de la quinta columna es de esperar no encontrarse oro en solución.

Al caer en la pila pobre, la solución es monitoreada constantemente para mantenerla en condiciones adecuadas para la lixiviación de patios, esto se logra regulando la inyección de cianuro a las bombas que mandarían la solución lixivante a los patios. Iniciando de este modo el ciclo del cual forma parte la solución [10].

2.6. Trayectoria del Carbón

El recorrido del carbón puede darse en dos distintos puntos de inicio que hay que considerar, el primero es si la planta se encuentra en vías de arranque de actividades, y el segundo es si éste ya se encuentra en una planta en operación.

2.6.1. Planta grande

El carbón necesita un periodo de acondicionamiento de 24 horas recomendadas para que éste adquiera las características necesarias para poder ser introducido al proceso. Las condiciones a las que se refiere son que obtenga un cierto peso al ser sumergido durante este periodo de tiempo en agua fresca, con el fin de remover el aire que se encuentra en un inicio en los poros del carbón activado y que no se desborde después de que el flujo de solución rica empiece a ser bombeado por la parte inferior de las mismas columnas en donde ya está presente el carbón activado, esto porque ahí es donde se realiza el acondicionamiento mencionado. Además también se le da este tratamiento con el fin de remover la mayor cantidad posible de finos que llegara a traer consigo el carbón activado nuevo [13].

Por otro lado, si la planta ya se encuentra en operación, el carbón activado se introduce una vez que se ha determinado la cantidad necesaria del mismo en las columnas, no sin antes haber recibido el acondicionamiento necesario ya descrito. Durante el proceso y recorrido del carbón activado, éste tiende a deteriorarse y formar finos, los cuales no se pueden recuperar o reutilizar, además, es así como poco a poco se va perdiendo la cantidad necesaria o adecuada por columna. Es

entonces cuando se adiciona el carbón activado faltante para la mayor recolección de los metales preciosos.

Otro indicador que revela la necesidad de carbón activado en el ciclo, es que las colas se encuentren en niveles fuera de lo indicado en cuanto a concentración de oro y plata.

Ya que se encuentre el carbón activado necesario en cada una de las columnas (3 toneladas en la primera columna y 2 toneladas en las demás), el carbón activado inicia el ciclo con el transporte de dos de las tres toneladas de la primera columna hacia el tanque de lavado con ácido clorhídrico, con la finalidad de remover impurezas captadas por el carbón activado en las columnas y las impurezas arrastradas desde los patios por el flujo de solución de cianuro de sodio.

Una vez que las impurezas han sido removidas, a causa del lavado, el ácido es drenado de la columna de lavado hacia un tanque almacenador. Es importante tener en cuenta que el ácido puede ser utilizado de 3 a 4 ocasiones siempre y cuando el pH sea menor de 2, si no es así es conducido y derramado en pila pobre.

En cuanto al carbón activado, éste es conducido del tanque de lavado ácido por medio de flujo de agua al tanque de despojo, ahí el carbón activado es sometido al flujo constante de una solución de cianuro cáustico con el fin de extraer el oro de los poros del carbón activado.

Después de que los metales preciosos son despojados de los sitios activos y poros del carbón activado, encontrados en la solución de cianuro cáustico, esta solución es enviada a refinería, lugar donde se encuentran las celdas de electrodeposición, donde se atrapan los metales preciosos y es ante sala al paso final del proceso [15, 16].

Una vez despojado del contenido de leyes, el carbón activado se encuentra siendo conducido por flujo de agua del tanque de despojo a la criba vibratoria y de ese punto a la tolva de almacenamiento del horno reactivador.

Por medio del alimentador sin fin el carbón activado es conducido de la tolva a través del horno hacia el tanque de apagado. El carbón activado baja la temperatura debido al contacto inmediato con un gran volumen de agua del cual está provisto el tanque de apagado. El carbón activado sale del horno aproximadamente a 700°C. Ya regenerado el carbón activado es transportado del tanque de apagado hacia la columna 5.

El movimiento de carbón activado entre las columnas se realiza con eductores, los cuales funcionan por medio de agua a presión, la cual fluye por su parte superior causando una diferencia de presiones entre el eductor y el carbón en solución en la columna, de este modo el carbón es succionado y removido hacia la columna superior.

Un punto de referencia para el inicio del movimiento del carbón activado por las columnas será la concentración de oro que presente la solución en el tanque de despojo, esto es si en las pruebas de laboratorio realizadas se determina una cantidad igual o menor a 30 ppm de oro en la cabeza. En ese momento inicia una pauta de aproximadamente 3 horas en las cuales se deberá iniciar el recorrido de carbón activado por las columnas.

En este periodo de tiempo, el carbón activado que antes se encontraba en la columna uno debió de haber sido llevado al lavado de ácido clorhídrico, para que en el momento en el cual el carbón activado que se encontraba en el tanque de despojo fuera llevado al horno reactivador y de ahí a la columna cinco, permitiera que el carbón activado pase del lavado ácido al despojo y así el ciclo de captura de oro continúe sin detenerse. El ciclo de movimiento de carbón en planta grande se ilustra en la Figura 4.

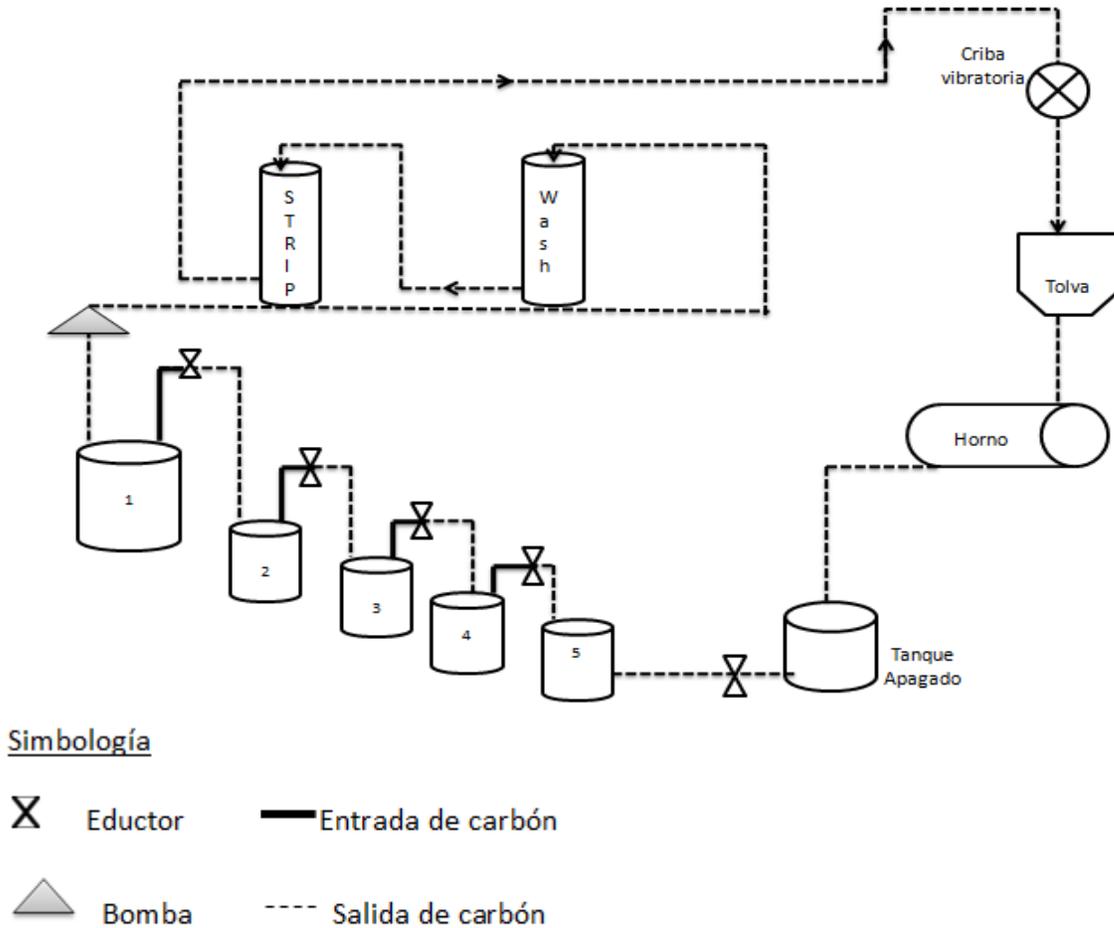


Figura 4. Recorrido del carbón activado en planta grande

2.6.2. Planta chica

Se procede de la misma manera que en la planta grande en caso de un arranque de actividades y en cuanto al acondicionamiento del carbón activado. De la misma manera si la planta ya se encuentra en operación, el carbón activado se introducirá según se vaya presentando la necesidad de nuevo carbón activado al ciclo con previo acondicionamiento. Los indicios de la necesidad de carbón activado serán los mismos, la presencia de colas con altos contenidos de oro y la disminución de la cantidad de carbón activado en las columnas.

En las columnas de la planta chica hay presentes en cada una de ellas aproximadamente una tonelada de carbón. Ya que cada columna contenga el carbón activado suficiente el ciclo inicia, la tonelada de la columna número 1 pasa por medio de la ayuda de una bomba hacia el lavado de ácido clorhídrico quitando de este toda impureza que pueda contener.

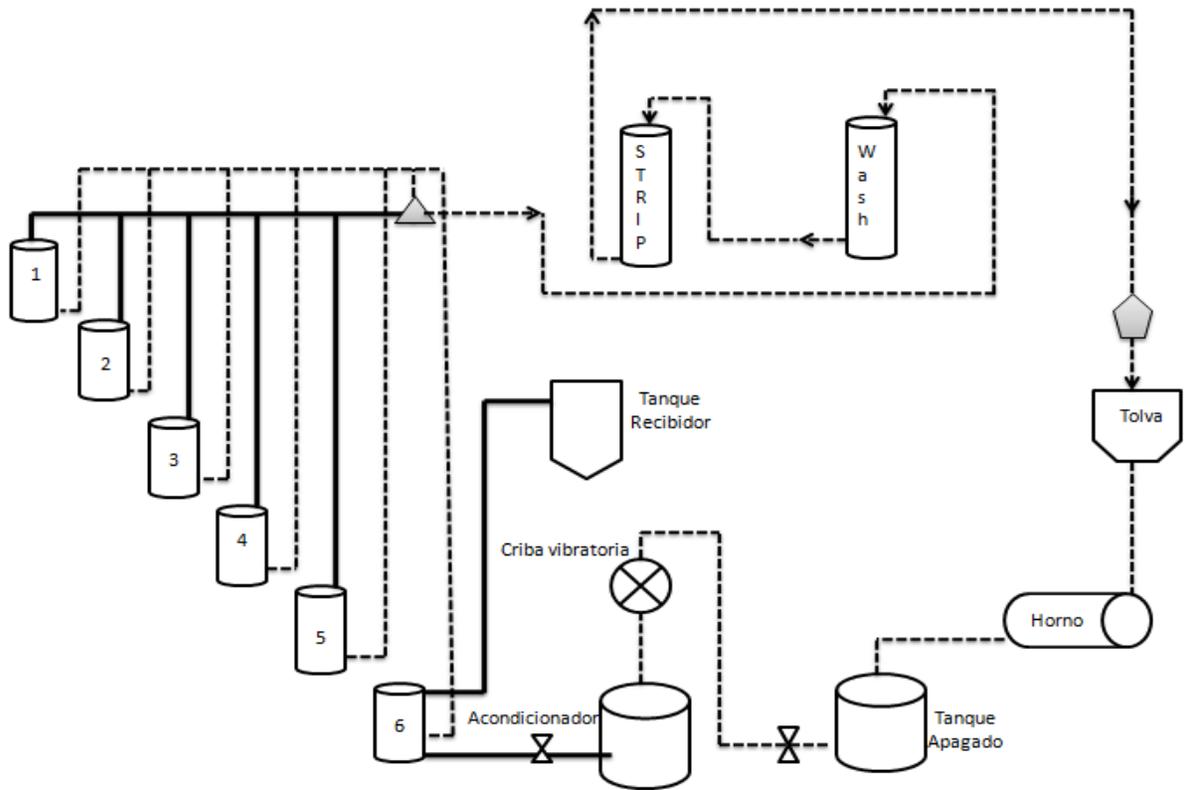
Una vez lavado el carbón activado se transporta por flujo de agua del tanque de lavado ácido al tanque de despojo, la sosa y el cianuro son vertidos en el tanque y de esta forma inicia el circuito de despojo del oro y plata de los poros el carbón activado. El cianuro cáustico fluye en un ciclo que consta desde el tanque de acondicionamiento y almacenaje de ésta hacia el tanque de despojo pasando por el carbón activado, atrapando el oro y llevándolo hacia las celdas electrolíticas donde el oro es retenido y la solución de cianuro cáustico sale hacia el tanque de acondicionamiento y almacenaje, se deja en continuo flujo por un período aproximado de 8 a 12 horas, dependiendo de los resultados del laboratorio en cuanto a cabeza (solución rica proveniente del despojo) y colas (solución pobre proveniente de las celdas).

El cianuro cáustico es drenado al tanque de almacenamiento una vez que se determina por laboratorio que el oro ha sido removido en lo máximo de los poros del carbón activado. El carbón activado pasa al tanque de despojo a presión de flujo de agua, se dirige hacia un cernidor el cual separa al carbón activado uniformemente, posterior a ello se traslada a una tolva, de la cual el carbón activado poco a poco es introducido y recorre lo largo del horno regenerador, por medio de un transportador sin fin. A la salida del horno se encuentra un depósito al que cae el carbón (tanque de apagado), el cual tiene la tarea de reducir la temperatura del carbón activado adquirida debido a su paso por el horno.

Después del tanque de apagado, el carbón activado se hace pasar por una criba vibratoria para separar los finos que puedan venir en el flujo de carbón activado. Al ser cribado el carbón activado cae a un tanque de acondicionamiento el cual contiene agua para recibir al carbón activado regenerado y cribado. Por medio de un eductor el carbón activado se pasa del tanque de acondicionamiento a la columna

número seis, siempre y cuando previamente se haya llevado a cabo el movimiento de columnas.

A manera de resumen, se presenta el circuito del carbón activado en la Figura 5, este procedimiento se reproduce una y otra vez, la pauta y los tiempos son dados por el carbón despojado y la carga del carbón a despojar.



Simbología

- | | | | |
|--|---------|--|--------------------------|
| | Bomba | | Entrada de carbón |
| | Eductor | | Salida de carbón |
| | Filtro | | Presión de Flujo de agua |

Figura 5. Recorrido del carbón activado en planta chica

2.7. Especificaciones

En los procedimientos llevados a cabo en Planta ADR intervienen ciertos compuestos principales para cada etapa. El agente lixiviante en este caso es el cianuro de sodio por sus características ideales y afinidad hacia el oro y la plata. El ácido clorhídrico es el reactivo utilizado para realizar el lavado del carbón previo a la desorción.

El hidróxido de sodio tiene dos importantes funciones en el proceso, las cuales son regular el pH de la solución y la desorción del oro y la plata de los sitios activos del carbón.

2.7.1. Preparación y uso de cianuro de sodio

El cianuro es la sustancia química elegida para la recuperación de oro. Debido a que es uno de los pocos reactivos químicos que disuelven el oro en agua. Es una sustancia química industrial común que se consigue fácilmente a un precio razonablemente bajo. Por razones técnicas y económicas, el cianuro es la sustancia química elegida para la recuperación del oro del mineral. Ha sido utilizado en la extracción de metales desde 1887, y actualmente se le utiliza y maneja en forma segura en la recuperación de oro en todo el mundo. Las operaciones mineras para la extracción de oro utilizan soluciones muy diluidas de cianuro de sodio, típicamente entre 0.01% y 0.05% de cianuro (100 a 500 ppm).

El cianuro de sodio se disuelve en agua donde, en condiciones ligeramente oxidantes, disuelve el oro contenido en el mineral. La solución resultante que contiene oro se denomina "solución rica". Dicha solución se hace fluir a través del carbón activado. La solución residual o "pobre", es decir carente de oro, se recircula a patios de lixiviación para extraer de nuevo los metales preciosos.

La preparación de cianuro de sodio (NaCN) es de suma importancia ya que es necesario tener el control de su nivel (300 a 500 ppm) en los flujos de riego para una mejor y eficiente disolución del oro encontrado en los patios. Consta de disolver una tonelada de cianuro de sodio en aproximadamente tres cuartas partes del tanque,

cuya capacidad total es de cinco mil litros, es decir tres mil setecientos cincuenta litros de agua para una tonelada de cianuro de sodio. En la Figura 6 se muestra el tanque de preparación de solución de cianuro y el contenedor de las briquetas de cianuro.



Figura 6. Tanque de preparación y depósito de almacenamiento de cianuro de sodio

2.7.2. Preparación y uso de ácido clorhídrico

El ácido clorhídrico es una disolución acuosa del gas cloruro de hidrógeno (HCl). Esta disolución resulta un líquido transparente o ligeramente amarillo que en estado concentrado produce emanaciones de cloruro de hidrógeno, las que combinadas con el vapor de agua del aire son muy cáusticas y corrosivas de color blanquecino y muy irritante a las vías respiratorias. El ácido clorhídrico reacciona con los metales activos o sus sales de ácidos más débiles para formar cloruros. Casi todos los cloruros son solubles en agua, por eso el ácido clorhídrico encuentra aplicación como eliminador de los sedimentos, carbonatos de calcio, magnesio, hierro [17,18].

Puede obtenerse haciendo reaccionar ácido sulfúrico con sal común (cloruro de sodio) según la ecuación 2:



Durante la reacción se forma el ácido y sulfato de sodio (Na_2SO_4). Industrialmente se producen grandes cantidades de ácido clorhídrico haciendo reaccionar el cloro y el hidrógeno, procedentes de la cuba electrolítica de cloruro de sodio, utilizada para la producción de sosa caustica.

El ácido clorhídrico tiene una función muy importante en el proceso realizado en las plantas para la obtención del oro, éste se encarga de limpiar o quitar las impurezas que el carbón activado haya captado a lo largo del recorrido de columnas [1].

Es importante tener en cuenta su preparación y su nivel de pH para su correcto funcionamiento. El pH debe de ser siempre inferior a 2 para que de esta manera pueda actuar eficazmente y remover toda impureza y mineral captado sin valor.

La preparación e inserción al ciclo de ácido nuevo se observa en la Figura 7. Se realiza una vez que éste ha superado las dos unidades de pH debido a que ha sido utilizado en repetidas ocasiones (de 3 a 4), y se ha ido neutralizando con los componentes alcalinos provenientes de la solución encontrada en los poros del carbón activado. Es entonces cuando se lleva acabo de la siguiente manera, en el tanque de almacenamiento del ácido clorhídrico su preparación, son vertidos 500 litros de ácido clorhídrico al 37%, aforado a 2270 litros con agua fresca, procurando hacerlo al mismo tiempo para lograr una mezcla más homogénea. La solución tendrá una concentración del 8% de ácido clorhídrico disuelto en agua.

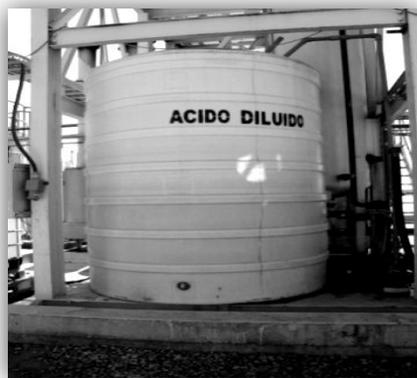


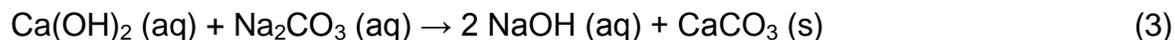
Figura 7. Tanque de preparación y depósito de almacenamiento de ácido clorhídrico

2.7.3. Preparación y uso de hidróxido de sodio

El hidróxido de sodio (NaOH), también conocido como sosa cáustica, es un hidróxido cáustico usado en la industria (principalmente como una base química) en la fabricación de papel, tejido, y detergentes.

A temperatura ambiente el hidróxido de sodio es un sólido blanco cristalino, sin olor que absorbe humedad del aire (higroscópico). Es una sustancia manufacturada. Cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera una gran cantidad de calor que puede ser suficiente como para encender materiales combustibles. El hidróxido de sodio es muy corrosivo. Generalmente se usa en forma sólida o como una solución al- 50% [17-19].

El hidróxido sódico, en su mayoría, se fabrica por el método de caustificación, es decir, haciendo reaccionar otro hidróxido con un compuesto de sodio (3):



Aunque modernamente se fabrica por electrólisis de una solución acuosa de cloruro sódico o salmuera, es un subproducto que resulta del proceso que se utiliza para producir cloro(4).



Al ir progresando la electrólisis se van perdiendo los cloruros siendo sustituidos por iones hidróxido, que combinados con los cationes sodio presentes en la disolución forman el hidróxido sódico. Los cationes sodio no se reducen a sodio metálico debido a su bajísimo potencial [1].

Es fundamental para la eficiencia del despojo del oro y plata de los poros del carbón el estado en el que se encuentra la solución de sosa y cianuro, es por ello que su preparación y condiciones a las que se encuentre deben de ser muy precisas.

Además de su esencial función en el despojo de los metales preciosos, el hidróxido de sodio se utiliza para regular el pH de la solución lixivante que se retorna a los patios de lixiviación.

El hidróxido de sodio debe de encontrarse en una concentración de entre 20,000 y 25,000 ppm y esto es controlado por medio del bombeo de sosa en solución al 50%, según la necesidad de su concentración y como respuesta a los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio de cabeza y cola del tanque de despojo. En la Figura 8 se observa el tanque de despojo en planta ADR y el depósito de solución concentrada de sosa.



Figura 8. Tanque de despojo y depósito de almacenamiento de sosa

III. DESARROLLO OPERACIONAL DE LA PLANTA

3.1. Panorama General de Planta ADR

A continuación se detalla paso por paso la manera de proceder en cada una de las etapas implicadas en la operación y desarrollo del proceso en esta planta, para ello se hará uso de diagramas de flujo, fotografías, tablas, esquemas y demás herramientas, para plasmar en este manual y específicamente en este apartado, cómo es que funciona y de qué manera se opera la Planta ADR (Adsorción, Desorción y Regeneración) de la Mina El Chanate.

Es importante que cada mina cuente con su manual de operación, ya que éste es de gran valor, sobre todo cuando se trata de tener un respaldo teórico básico al cual acudir en determinadas circunstancias. Cada mina tiene de alguna u otra manera especificaciones o una forma de operar característica de la mina, sin embargo en esencia los procesos siguen teniendo más cosas en común que diferencias.

La planta de ADR, debido a sus características manuales de operación, requiere de un conocimiento preciso y profundo de cada labor a realizar. El conocimiento de las especificaciones se requiere debido a que en plantas como esta, en la cual el factor humano para el desarrollo del proceso es primordial, es necesario trabajar con un alto grado de precisión.

Para poder operar la planta, no sólo basta tener una idea general de que se trata o para que es una u otra cosa, si no tener presente el principio y el fin de lo que harán nuestras acciones. Básicamente conocer la función de cada válvula, el origen y destino de cada tubería, lo que conduce cada tubería, las capacidades de las tuberías en cuanto a volumen y presión, capacidad de las bombas y equipos utilizados para el transporte de solución o carbón, hasta el mínimo detalle, para que cualquiera que fuese la circunstancia que se presente saber que acción emprender.

Iniciamos demostrando los pasos a seguir para el paro y arranque de la planta, a manera de señalar como es que se debe actuar sin caer en un régimen estricto del cómo proceder pero puntualizando lo recomendable a llevar a cabo [25].

3.2. Paro del Tanque de Despojo

El tanque de despojo, entra en paro en el momento en que refinería lo requiere y lo solicita esto se puede deber a que las celdas electrolíticas requieren de limpieza, alguna reparación o un servicio. Para que el tanque entre en paro se recomienda seguir estos pasos para realizarlo de la manera correcta.

1. Apagar calderas.
2. Cerrar gas.
3. Apagar rectificador.
4. Poner a recircular la solución.
5. Cerrar la válvula que alimenta a celdas.
6. Se apaga la bomba de recirculación de solución.

El tanque de despojo también puede ser llevado a un paro si éste llegará a necesitar algún servicio, debido a alguna fuga o que algún difusor necesite de reparación. Para ello las indicaciones son diferentes, a continuación se describen.

1. Drenar solución al tanque de recirculación.
2. Despresurizar columna.
3. Enviar carbón activado a columna de lavado.

Una razón más por la que el tanque de despojo entre en paro, es que las tuberías se tapen o lleguen a necesitar de alguna reparación o servicio. Para esto se recomienda seguir los siguientes pasos:

1. Desviar flujo hacia tanque o recircularlo o cerrar válvulas de salida y entrada de columna de despojo para detener flujo.
2. Cerrar válvulas correspondientes al lugar afectado o dañado.
3. Despresurizar abriendo válvula de escape correspondiente.
4. Retirar tramo dañado.

3.3. Inicio Tanque de Despojo

El arranque de operaciones del tanque de despojo, después de que haya entrado en paro por alguna de las razones anteriores que se mencionó o considerando un arranque inicial de la planta, se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. Abrir válvula de recirculación.
2. Encender bombas.
3. Abrir gas.
4. Encender calderas.
5. Abrir válvula que alimenta al tanque de despojo.
6. Cerrar válvula de recirculación.
7. Se presuriza a 75-80 PSI (Planta Grande) y 65-70 PSI (Planta Chica).
8. Abrir válvula que alimenta a celda.
9. Regular flujo que alimenta a celda.
10. Regular flujo y presión a Planta grande $5.5 \text{ m}^3/\text{h}$ y a Planta chica $3.2 \text{ m}^3/\text{h}$.
11. Se drena válvula de cola y se espera salida de solución.
12. Una vez llena la celda se prende el rectificador.
13. Inicia el despojo.

3.4. Movimiento de Carbón Activado en Planta Chica

Para realizar el movimiento de carbón activado a través de las tuberías de columna a columna, de columna a lavado, de lavado al tanque de despojo, del despojo a tolva, de tolva a tanque de acondicionamiento, y finalmente para cerrar el ciclo de movimiento del carbón activado y dar inicio a otro, se mueve el carbón activado del tanque de acondicionamiento a columna 6, para ello se realizan los siguientes procedimientos:

3.4.1. Columna 1 a tanque de lavado de ácido

1. Abrir válvula de desagüe
2. Abrir válvula de entrada de carbón activado hacia lavado y válvula de aire como se muestra en la Figura 9 (la que se encuentra en la parte superior del tanque).



Figura 9. Parte superior del tanque de lavado ácido

3. Abrir válvulas de transferencia del carbón activado de bomba hacia lavado de ácido, y asegurarse de que se encuentre cerrada la válvula que se dirige hacia las columnas como se observa en la Figura 10.

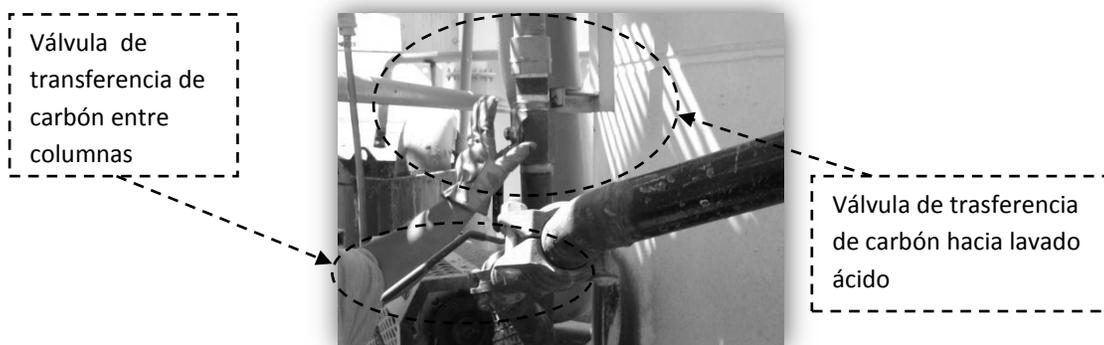


Figura 10. Válvulas divergentes

4. Abrir válvula de agua ligeramente a tanque de lavado de ácido.
5. Encender bomba.
6. Abrir válvula de compuerta de columna 1.

7. Esperar la alimentación de columna de lavado hasta 65 centímetros antes del llenado total.
8. Se toma la muestra de carbón activado del que entra al lavado para enviar a laboratorio, la muestra corresponde a la muestra de cabeza como se observa en la Figura 11.



Figura 11. Muestreo de carbón activado cargado

9. Al encontrarse el carbón activado en la cantidad requerida en el tanque de lavado, se procede a cerrar válvula de compuerta de salida de carbón activado de la columna 1, como se observa en la Figura 12.

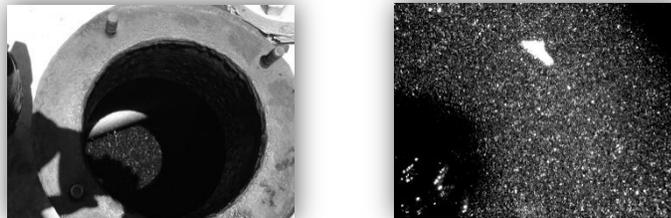


Figura 12. Carbón activado en tanque de lavado ácido

10. Una vez que todo el agua haya sido drenada se abre la válvula de entrada de ácido clorhídrico.
11. Se cierran válvula de desfogue, válvula de desagüe y válvula de entrada de carbón activado.
12. Se abre la válvula que permite el paso al ácido del tanque contenedor hacia la bomba y ésta suministra solución de ácido al tanque de lavado.
13. Abrir válvula de retorno de ácido de lavado al tanque contenedor.

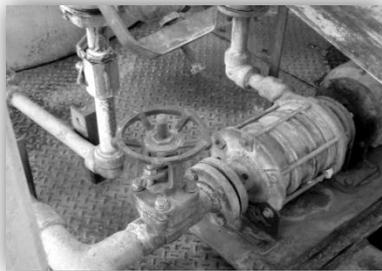
14. Encender bomba de lavado de ácido.
15. Se lava carbón activado durante una hora con ácido clorhídrico.
16. Una vez lavado el carbón activado, el ácido se retorna al tanque contenedor cerrando las válvulas que se dirigen a la bomba (las válvulas anteriormente mostradas).
17. Se cierra válvula que permite el paso del ácido al tanque de lavado.
18. Se abre la válvula que va al tanque contenedor.

NOTA* Siempre se debe cerciorar de que estén abiertas las válvulas adecuadas antes de prender la bomba para evitar posibles problemas o riesgos tanto materiales como físicos.

NOTA** Es recomendable para funciones de tiempo, llevar acabo el movimiento de columnas a la par del llenado del tanque de lavado.

3.4.2. De tanque de lavado ácido a tanque de despojo

1. Apagar rectificador.
2. Apagar caldera y se cierra válvula de gas.
3. Apagar bomba de anti incrustante.
4. Apagar bombas del tanque de despojo que se muestran en la Figura 13.
5. Cerrar válvulas.
 - 5.1. Válvula de salida de tanque de solución pobre.
 - 5.2. Válvula que entra a la bomba.



Bomba No. 1



Bomba No. 2

Figura 13. Bombas del circuito de planta chica

5.3. Válvula que sale a la bomba.

5.4. Válvula de filtro 1 (chico).

5.5. Válvula de alimentación a celdas.

Abrir válvula de múltiples entradas como se observa en la Figura 14, para desfogar tanque de despojo (La solución retorna al tanque de solución pobre. Dejar por un período de 20 minutos aproximadamente).



Figura 14. Válvula de entrada múltiple

6. Abrir válvula de desfogue (despresurizar).

7. Inyectar agua fresca para enfriar carbón activado recién despojado.

8. Una vez que la temperatura del carbón activado sea la adecuada, se pasa a la tolva de horno a presión de flujo de agua como se muestra en la Figura 15 (sólo 700 kg a la tolva el resto se conduce al acondicionador o a columna 6).



Figura 15. Movimiento del carbón activado

9. Se toma la muestra de carbón activado del enviado a tolva para enviar a laboratorio (cola).

10. Se drena toda el agua del tanque de despojo.
11. Se enjuaga con agua fresca el carbón activado que fue lavado con ácido.
12. Una vez preparado el tanque de despojo, se procede a pasar el carbón activado lavado con anterioridad a éste.
13. Se conecta la manguera de la salida del tanque lavado a la entrada del tanque de despojo.
14. Se cierra la válvula de desfogue y del desagüe del tanque de despojo.
15. Abrir válvula de agua fresca de empuje del tanque de lavado.
16. Abrir válvula de salida de carbón del tanque de lavado ácido.

NOTA* Puede presentarse la ocasión en la cual el carbón activado puede transferirse a diferentes destinos una vez despojado, esto puede darse debido a distintos momentos del carbón activado o de la maquinaria, entre ellos, que el carbón activado sea nuevo y no necesite de reactivación, o que el horno no se encuentre en funcionamiento, en ese momento el carbón activado será transferido del tanque de despojo a la columna 6.

NOTA** La muestra de carbón activado puede ser tomada tanto en la tolva como en la columna 6, esto dependerá de a donde se le haya mandado.

NOTA*** En el caso de las bombas únicamente se requiere de una y la otra se encuentra de respaldo para entrar en caso de algún desperfecto en la otra bomba.

NOTA**** Al realizar el movimiento de carbón activado del tanque de lavado al tanque de despojo, se debe abrir la válvula de salida de carbón activado lentamente para evitar desperfectos en la manguera en las tomas.

3.4.3. Preparación del tanque de despojo

1. Abrir válvulas:
 - 1.1. Válvula del tanque de solución pobre de salida.
 - 1.2. Válvula de la bomba.
 - 1.3. Válvula del filtro 1 (filtro chico).
 - 1.4. Válvula de entrada del tanque de solución pobre.

2. Encender bomba.
3. Encender caldera y abrir válvula de gas.
4. Se recircula la solución pobre para que alcance la temperatura adecuada de trabajo.
5. Una vez que se haya alcanzado la temperatura de 120°C se abre la válvula que va hacia el tanque de despojo y se cierra la que se dirige al tanque de solución pobre.
6. Cierre de válvulas:
 - 6.1. Válvula de entrada de carbón activado (la cual también tiene el uso de ser desfogüe).
 - 6.2. Válvula de desagüe.
7. Lo anterior se realiza para que el tanque de despojo alcance una presión entre 65 y 70 psi.
8. Una vez presurizado se abre válvula que va hacia celdas electrolíticas.
9. Se enciende rectificador.
10. Encender bomba de anti incrustante.
11. Agregar 80 litros de sosa al tanque de solución pobre y 50 litros de NaCN, los depósitos contenedores de dichos reactivos se observan en la Figura 16.



Figura 16. Depósitos de almacenamiento de los principales reactivos

3.4.4. De columna 2 a 1

1. Cerrar válvula de bomba de transferencia de carbón activado que alimenta al tanque de lavado ácido.
2. Abrir válvula de bomba que alimenta columnas.

3. Abrir válvula de línea principal de alimentación que va a columna 1 de entrada de carbón activado.
4. Abrir válvula de salida de carbón activado de columna 2.

3.4.5. De columna 3 a 2

1. Una vez llena la columna 1 se cierra la válvula de salida de carbón activado de la columna 2, como se observa en la Figura 17.



Figura 17. Válvula de salida del tanque

2. Se abre la válvula de entrada de carbón activado de la columna 2.
3. Cierra la válvula de carbón activado que alimenta columna 1.
4. Se abre la válvula de salida de carbón activado de columna 3.

3.4.6. De columna 4 a 3

1. Una vez llena la columna 2 se cierra la válvula de salida de carbón activado de la columna 3.
2. Se abre la válvula de entrada de carbón activado de la columna 3.
3. Cierra válvula de carbón activado que alimenta columna 2.
4. Se abre válvula de salida de carbón activado de columna 4.

3.4.7. De columna 5 a 4

1. Una vez llena la columna 3 se cierra la válvula de salida de carbón activado de la columna 4.
2. Se abre la válvula de entrada de carbón activado de la columna 4.
3. Cierra válvula de carbón activado que alimenta columna 3.

4. Se abre válvula de salida de carbón de columna 5.

3.4.8. De columna 6 a 5

1. Una vez llena la columna 4, se cierra la válvula de salida de carbón activado de columna la columna 5.
2. Se abre válvula de agua para limpiar tubería en un intervalo de tiempo pequeño (10 segundos).
3. Se apaga la bomba de columnas.
4. Cerrar válvula de carbón activado que alimenta las columnas (válvula que alimenta a columnas 1, 2, 3,4 y columna 5).
5. Se abre válvula de agua para la salida del carbón activado por columna 6 a su paso por eductor y con entrada a columna 5 como se observa en la Figura 18.



Figura 18. Conducción de la solución rica

6. Se cierra válvula de agua después del pase del carbón activado de la columna 6 a la 5.

3.4.9. Movimiento del carbón activado despojado

1. Conectar manguera de salida de carbón activado del tanque de despojo a entrada de tubería que transferirá al carbón a la tolva de horno.
2. Abrir válvula de agua que ayudara al movimiento del carbón, sucesivamente abrir válvula de entrada de carbón activado a tolva de horno visto en la Figura 19 y abrir válvula de salida de carbón activado del tanque de despojo.



Figura 19. Tolva del horno

3. A presión de flujo de agua es trasferido el carbón activado hacia la tolva del horno.
4. Una vez en la tolva del horno el carbón activado es conducido por medio de un transportador sin fin al interior del horno el cual se observa en la Figura 20, es ahí donde es reactivado el carbón activado.



Figura 20. Horno regenerador de carbón activado

5. Encender Criba vibratoria.
6. Al salir del horno cae a un tanque de apagado que por medio de un eductor y flujo de agua es conducido de ese lugar a la criba vibratoria.
7. Una vez cribado el carbón activado cae a un tanque de acondicionamiento.
 - 7.1. Conectar manguera del destino a donde será transferido el carbón activado.
 - 7.2. Abrir válvula de conducto de trasferencia.
 - 7.3. Abrir válvula de agua.

7.4. Abrir válvula de salida de carbón activado, ver Figura 21.

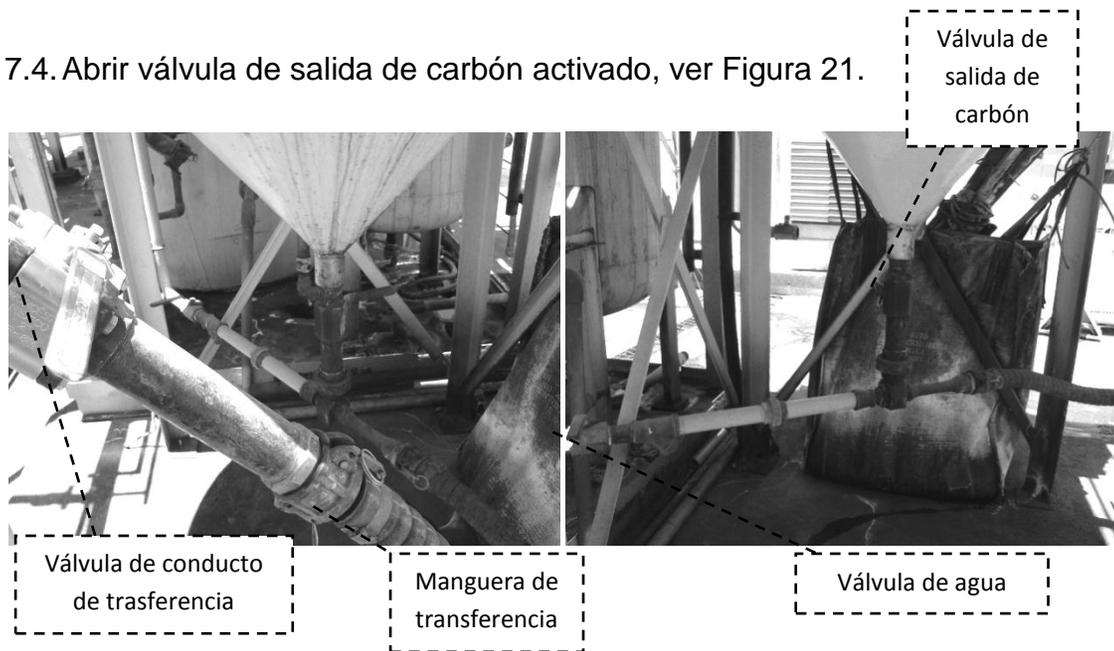


Figura 21. Movimiento del carbón reactivado hacia columnas

NOTA* La tolva del horno solo tiene capacidad para aproximadamente 700 kg de carbón activado es por ello que el resto carbón activado se trasfiere a la columna 6 sin ser reactivado.

3.5. Movimiento de Carbón Activado en Planta Grande

La transferencia de carbón activado a lo largo de la operación y trabajo en planta grande es similar al trabajo realizado en planta chica, solo con algunas diferencias que de igual modo es importante mencionar y plantearlos en un procedimiento a seguir.

3.5.1. Columna 1 a tanque de lavado de ácido

1. Cerciorarse de que la válvula de desagüe y la válvula de cargado de carbón activado se encuentre abiertas.
2. Se coloca la manguera de la bomba que impulsara al carbón activado hacia la entrada del tanque de lavado de ácido como se muestra en la Figura 22.



Figura 22. Movimiento del carbón activado en planta grande

3. Se acciona bomba de transferencia de carbón activado de columna 1 a lavado ácido.
4. Retirar compósito para evitar error en lecturas de laboratorio.
5. Abrir levemente válvula del agua que va hacia bomba.
6. Abrir válvula de desagüe del lavado de ácido.
7. Abrir válvula de descarga de carbón activado de columna 1.
8. Tomar muestra de carbón activado para enviar a laboratorio correspondiente a la muestra de cabeza como se observa en la Figura 23.



Figura 23. Toma de muestra de carbón activado para análisis

9. Espere a que el tanque llegue a su capacidad requerida de llenado, la cual se acercará a las 2 toneladas de carbón activado como se muestra en Figura 24.

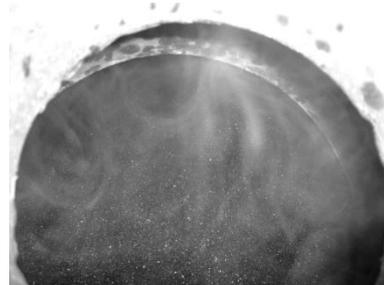


Figura 24. Carbón activado en tanque de despojo

10. Una vez que llegue a la capacidad de carbón requerida, se cierra la válvula de salida de carbón activado de la columna 1.
11. Abrir válvula de agua al máximo con el fin de mover todo el carbón que haya podido quedar en el interior de la manguera hacia el tanque de lavado.
12. Drenar el agua que se encuentre en el tanque de lavado.
13. Después de drenada el agua se cierra la válvula de desagüe.
14. Se apaga la bomba.
15. Abrir válvula de recirculación del ácido.
16. Abrir válvula de salida del ácido del tanque contenedor hacia la bomba.
17. Abrir válvula de bomba a lavado de ácido.
18. Antes de iniciar el lavado de ácido asegurarse de que la válvula de entrada de carbón activado y la válvula de desfogue se encuentren cerradas.
19. Se enciende la bomba de ácido y se espera a que el carbón activado se lave en aproximadamente una hora.
20. Una vez lavado el carbón activado, se procede a regresar el ácido que se encuentra en el tanque de lavado a su tanque contenedor, para ello se necesita abrir la válvula que va del tanque de lavado a bomba.
21. Abrir válvula de bomba al tanque contenedor.
22. Una vez abiertas las válvulas que permitirán el regreso del ácido, al tanque contenedor se cierra la válvula que va del tanque contenedor a la bomba, y la que va de la bomba a lavado con el fin de detener la inyección de ácido al tanque de lavado.
23. Una vez que todo el ácido ha regresado al tanque, se procede al apagado de la bomba y el cierre de las válvulas (de lavado a bomba y de la bomba al tanque contenedor).
24. Se abre el desagüe.
25. Se abre la válvula de agua para enjuagar el carbón activado.
26. Una vez que el tanque de despojo haya sido preparado, se pasa el carbón a presión de flujo de agua del tanque de lavado.

3.5.2. De tanque de lavado ácido a tanque de despojo

Cuando el despojo se ha completado y ya se ha llevado a cabo el lavado con ácido al carbón activado, se debe continuar con el despojo pero para ello es necesario seguir los siguientes pasos para transferir el carbón recién lavado al tanque de despojo, para continuar con la recuperación del mineral.

1. Apagado de rectificador.
2. Apagado de calderas y cerrar válvula de gas.
3. Apagar bomba de anti incrustante.
4. Apagar bomba del tanque de despojo.
5. Cerrar válvulas:
 - 5.1. Válvula de salida de tanque de solución pobre.
 - 5.2. Válvula que entra a la bomba.
 - 5.3. Válvula que sale a la bomba.
 - 5.4. Válvula de filtro 1 (chico).
 - 5.5. Válvula de alimentación a celdas.
6. Abrir válvula de entrada múltiple para desfogar tanque de despojo.
7. Cerrar válvula de retorno a tanque de solución pobre.
8. Inyectar agua fresca para enfriar carbón activado recién despojado.
9. Encenderla criba vibratoria.
10. El carbón activado se pasa a la criba a por flujo de agua y de ahí cae a la tolva.
11. Se toma la muestra de carbón activado del enviado a tolva para enviar a laboratorio la muestra de cola como se puede observar en la Figura 25.



Figura 25. Cribado del carbón activado

12. Cerrar la válvula del agua.
13. Se drena toda el agua del tanque de despojo.
14. Una vez preparado la columna de despojo, se procede a pasar el carbón activado lavado con anterioridad al tanque de despojo.
15. Antes se enjuaga el carbón activado contenido en columna de lavado con agua fresca como se muestra en la Figura 26.

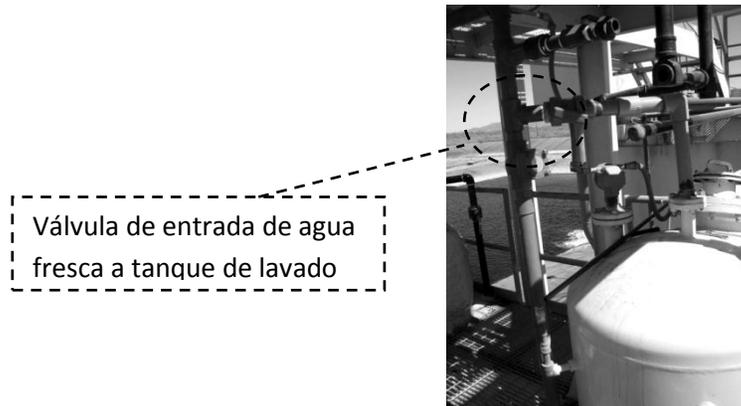


Figura 26. Tanque de lavado con ácido

16. Revisar que la válvula de desfogue y de desagüe del tanque de despojo se encuentren cerradas.
17. Abrir válvula de agua fresca del tanque de lavado para presurizar.
18. Abrir válvula de salida de carbón activado del tanque de lavado de ácido y válvula de tubería de tanque de lavado a tanque de despojo (Figura 27).

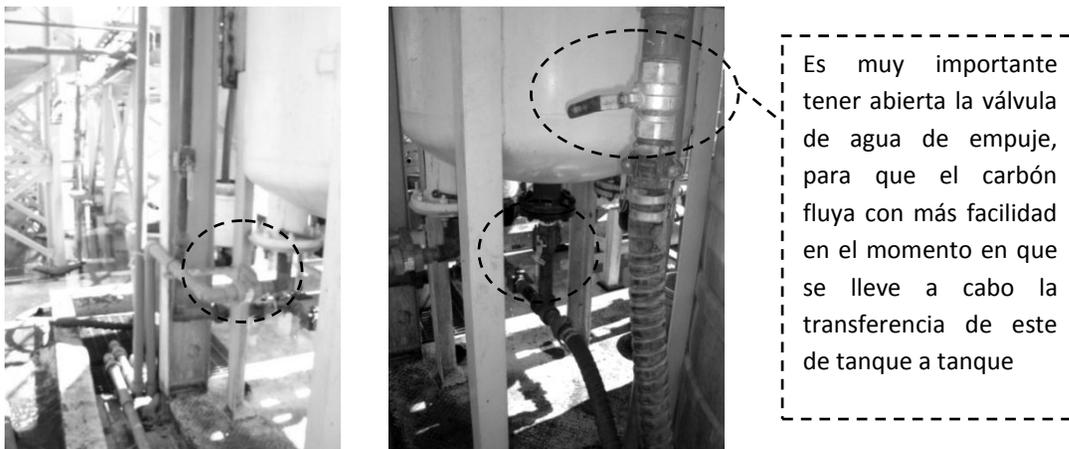


Figura 27. Tubería de tanque de lavado ácido

19. Una vez transferido el carbón activado al tanque de despojo, se cierran:
 - 19.1. Válvula de agua del tanque de lavado.
 - 19.2. Válvula de carbón activado.
 - 19.3. Válvula de agua de ayuda para presión.
20. Se abre válvula de desagüe del tanque de lavado para drenar toda el agua y así prepararlo para la siguiente carga de carbón a lavar.

NOTA* Si falta nivel a tanque de solución pobre se puede dar nivel desde el tanque de despojo al enfriarse el carbón (puntos 7 y 8).

3.5.3. Preparación del tanque de despojo

Los siguientes pasos se realizan una vez que el carbón activado recién despojado ha sido transferido a tolva del horno y el tanque de despojo se encuentra libre para recibir una nueva carga de carbón activado.

1. Abrir válvulas:
 - 1.1. Válvula del tanque de solución pobre de salida.
 - 1.2. Válvula de la bomba.
 - 1.3. Válvula del filtro 1 (filtro chico).
 - 1.4. Válvula del tanque de solución pobre de entrada.
2. Encender bomba.
3. Abrir válvula de gas y encender caldera.
4. Se recircula la solución pobre para que alcance la temperatura adecuada de trabajo.
5. Una vez que se haya alcanzado la temperatura de 120°C se abre la válvula que va hacia el tanque de despojo y se cierra la que se dirige al tanque de solución pobre.
6. Cierra válvulas:
 - 6.1. Válvula de entrada de carbón activado.
 - 6.2. Válvula de desfogue.
 - 6.3. Válvula de desagüe.
 - 6.4. Válvula hacia celdas.

7. Lo anterior se realiza para que el tanque de despojo alcance una presión entre 70 y 80 psi y un flujo de 5 a 5.5 m³/h realizado en la Figura 28.
8. Una vez presurizado se abre válvula que va hacia celdas electrolíticas.

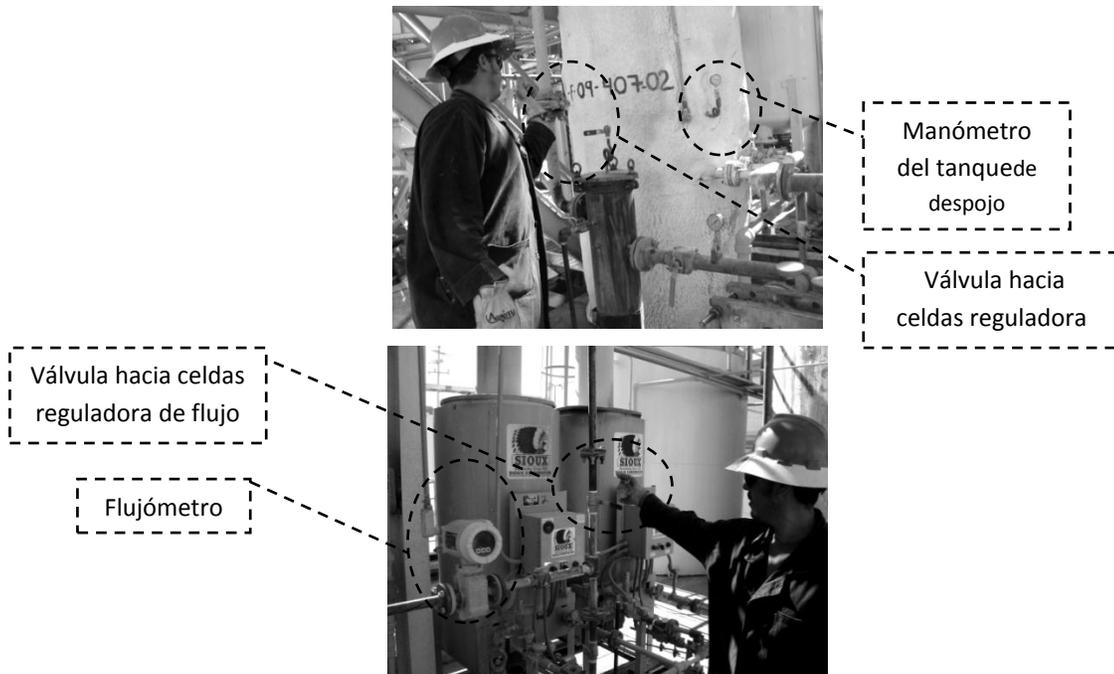


Figura 28. Controladores de presión y flujo

9. Se enciende rectificador.
10. Encender bomba de anti incrustante.
11. Agregar lo necesario de sosa al tanque de solución pobre con el fin de que se encuentre en 20,000 ppm y agregarla cantidad necesaria de cianuro de sodio para que se encuentre en 1 000 ppm como se muestra en la Figura 29.



Figura 29. Preparación de reactivos principales

NOTA* Al regresar la solución a tanque de despojo poner atención a que esté cerrada la válvula de desfogue (ver punto 5 de sección 3.5.3.).

NOTA** Al llenado de solución de tanque de despojo se le deja abierta la válvula de salida de solución rica (cabeza) para que no se presurice con aire en vez de solución (ver punto 6 de sección 3.5.3.).

3.5.4. Movimiento entre columnas

Dicho movimiento se realiza en el tiempo en que el carbón cargado está recibiendo el lavado ácido.

3.5.4.1. De columna 2 a 1

1. El carbón activado es transferido de columna a columna por medio de un eductor [20-21].
2. Para ellos se abre válvula de agua en eductor de columna 2 a 1.
3. Una vez transferido todo el carbón de la columna 2 a la 1 se cierra la válvula de agua.

3.5.4.2. De columna 3 a 2

1. El carbón activado es transferido de columna a columna por medio de un eductor.
2. Para ellos se abre válvula de agua en eductor de columna 3 a 2.
3. Una vez transferido todo el carbón de la columna 3 a la 2 se cierra la válvula de agua.

3.5.4.3. De columna 4 a 3

1. El carbón activado es transferido de columna a columna por medio de un eductor.
2. Para ellos se abre válvula de agua en eductor de columna 4 a 3.
3. Una vez transferido todo el carbón de la columna 4 a la 3 se cierra la válvula de agua.

3.5.4.4. De columna 5 a 4

1. El carbón activado es transferido de columna a columna por medio de un eductor.
2. Para ellos se abre válvula de agua en eductor de columna 5 a 4.
3. Una vez transferido todo el carbón de la columna 5 a la 4 se cierra la válvula de agua como se muestra en la Figura 30.

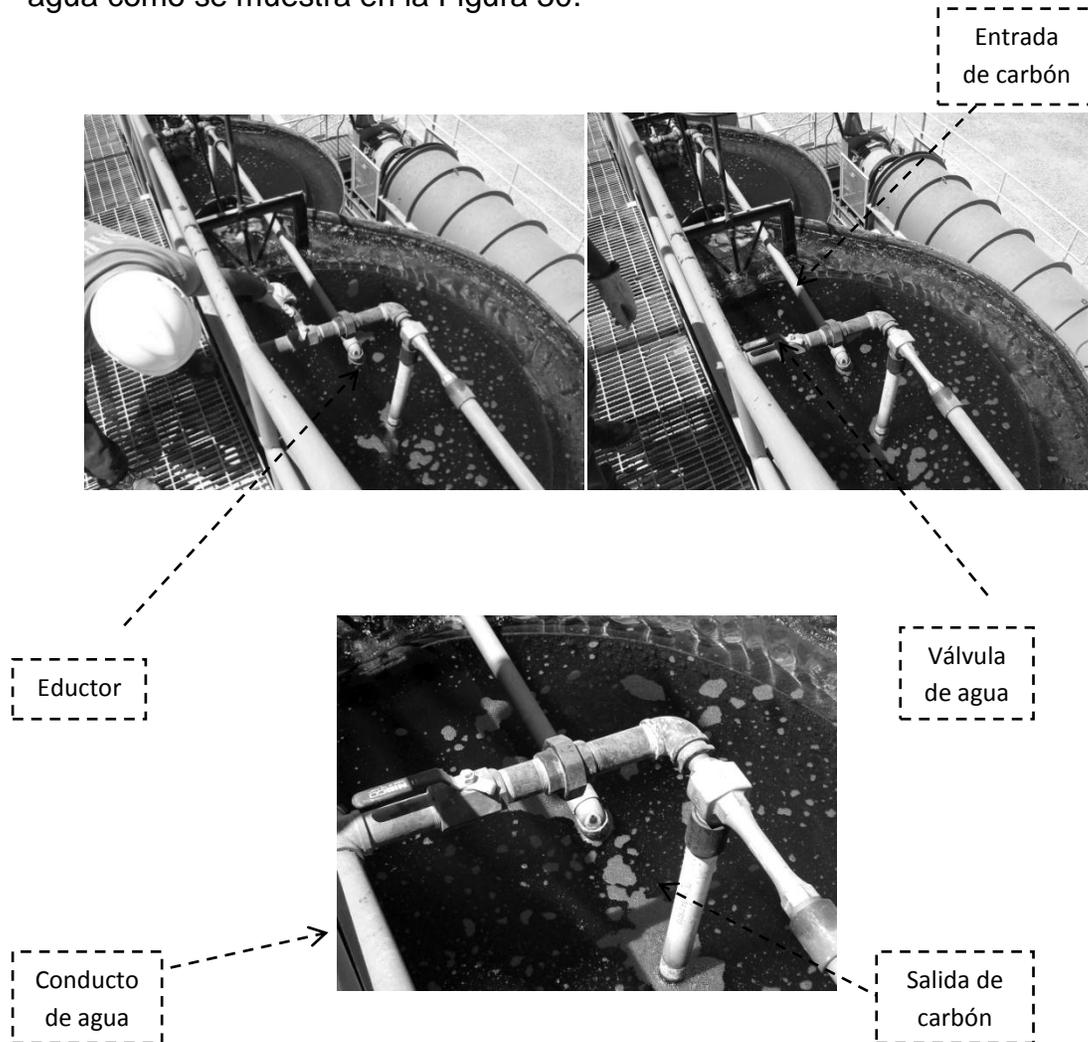


Figura 30. Mecanismo de movimiento de carbón activado entre columna

3.5.5. De tanque de apagado a columna 5

1. El carbón activado es transferido del tanque de apagado a la columna 5 por medio de un eductor.
2. Para ello se abre válvula de agua la cual fluye a través del eductor arrastrando al carbón activado proveniente del tanque de apagado y con destino a la columna 5.
3. Una vez transferido todo el carbón del tanque de apagado a la columna 5 se cierra la válvula de agua. El tanque de apagado se muestra en la Figura 30.
4. En ocasiones la columna 5 no alcanza a llenarse con el carbón regenerado ubicado en el tanque de apagado y es entonces cuando se pasa carbón activado por medio de presión de flujo de agua del tanque de despojo a la columna 5.



Figura 31. Tanque de apagado de carbón activado

IV. PROGRAMA DE MUESTREO Y BALANCES METALÚRGICOS

4.1. Valor del Correcto Muestreo

Para poder regular el proceso y los costos, realizar el balance metalúrgico y para datos requeridos en funciones administrativas y de gerencia, se requiere de un conocimiento exacto y continuo de las operaciones de la planta de beneficio. La toma de muestras y análisis de éstas, son la parte clave de todas las operaciones del proceso y se deben de realizar de manera adecuada.

A continuación se apunta el equipo básico requerido para llevar a cabo un correcto muestreo:

- Guantes
- Bolsas de plástico
- Etiquetas
- Marcadores
- Cubetas para muestreo
- Tubos muestreadores
- Recipientes de muestreo
- Compósitos

4.2. Muestras Puntuales

Son las muestras recogidas a mano a un tiempo específico y en puntos estratégicos de una corriente del proceso.

Este tipo de muestreo se realiza dónde:

- a) Se requiere información rápida de las condiciones del proceso.
- b) Se necesita monitorear constantemente para mantener el proceso estable.
- c) Donde no se pueden instalar muestreadores automáticos y que es necesario asegurar que la muestra que se toma es representativa del material o sustancia muestreada [22].

Recomendaciones:

1. Asegúrese que el equipo de toma muestras puntuales sea el indicado para la muestra que ha de recogerse y que los recipientes indiquen el tipo de muestra.
2. Muestree incluso si sucede algo anormal hasta recibir indicaciones del supervisor.
3. En caso de un paro de operaciones, esperar a que todo se encuentre en funcionamiento normal y tomar una nueva muestra.
4. Cuando se toman muestras de válvulas de drenado, asegúrese que la válvula abierta permita fluir lo suficiente para limpiarla de cualquier solución residual que haya en la línea antes de recoger la muestra.

La Tabla I es un resumen de los muestreos que deben realizarse en la planta ADR, el lugar donde se deben tomar las muestras, frecuencia de muestreo, procedimiento, tipo de análisis y el lugar donde deben analizarse.

Tabla I. Programa de muestreo

PROGRAMA DE MUESTREO		
Número de muestra	Código de la muestra	Interpretación
1	SPPV	solución pobre a patios viejos
2	SPPN	solución pobre a patios nuevos
3	SRPR	solución rica a pila rica
4	SRECE-PG	solución rica a la entrada a celdas de electrólisis - planta grande
5	SRECE-PC	solución rica a la entrada a celdas de electrólisis - planta chica
6	SPSCE-PG	solución pobre a la salida de las celdas de electrólisis - planta grande
7	SPSCE-PC	solución pobre a la salida de las celdas de electrólisis - planta chica
8	SACLC-PG	solución de ácido clorhídrico para lavado del carbón - planta grande

9	SACLC-PC	solución de ácido clorhídrico para lavado del carbón - planta chica
10	SRC1-PG	solución rica a columna 1 - planta grande
11	SRC2-PG	solución rica a columna 2 - planta grande
12	SRC3-PG	solución rica a columna 3 - planta grande
13	SRC4-PG	solución rica a columna 4 - planta grande
14	SRC5-PG	solución rica a columna 5 - planta grande
15	SRC1-PC	solución rica a columna 1 - planta chica
16	SRC2-PC	solución rica a columna 2 - planta chica
17	SRC3-PC	solución rica a columna 3 - planta chica
18	SRC4-PC	solución rica a columna 4 - planta chica
19	SRC5-PC	solución rica a columna 5 - planta chica
20	SRC6-PC	solución rica a columna 6 - planta chica
21	CSR	compósito de solución rica
22	CPP	compósito de la pila pobre
23	CC	compósito del canal
24	CSP-PG	compósito de solución pobre en planta grande
25	CSP-PC	compósito de solución pobre en planta chica
26	CCD-PG-L-AÑO	carbón cargado en la planta grande antes del despojo
27	CCD-PC-L-AÑO	carbón cargado en la planta chica antes del despojo
28	CD-PG-L-AÑO	carbón despojado en la planta grande
29	CD-PC-L-AÑO	carbón despojado en la planta chica
30	CA-PG C1-LA	movimiento de carbón columna 1 - lavado ácido en planta grande
31	CA-PG C2-1	movimiento de carbón columna 2 - columna 1 en planta grande
32	CA-PG C3-2	movimiento de carbón columna 3 - columna 2 en planta grande
33	CA-PG C 4-3	movimiento de carbón columna 4 - columna 3 en planta grande
34	CA-PG C5-4	movimiento de carbón columna 5 - columna 4 en planta grande
35	CA-PC C1-LA	movimiento de carbón columna 1 - lavado ácido en planta chica
36	CA-PC C2-1	movimiento de carbón columna 2 - columna 1 en planta chica

37	CA-PC C3-2	movimiento de carbón columna 3 - columna 2 en planta chica
38	CA-PC C4-3	movimiento de carbón columna 4 - columna 3 en planta chica
39	CA-PC C5-4	movimiento de carbón columna 5 - columna 4 en planta chica
40	CA-PC C6-5	movimiento de carbón columna 6 - columna 5 en planta chica
41	CAN	carbón activado nuevo
42	CR-PG	carbón reactivado de la planta grande
43	CR-PC	carbón reactivado de la planta chica
44	TA-STP	tratamiento anti-incrustante al tanque de despojo
45	TA-SRC	tratamiento anti-incrustante de la solución rica a columnas de carbón
46	TA-SPPV	tratamiento anti-incrustante de la solución pobre a patios viejos
47	TA-SPPN	tratamiento anti-incrustante de la solución pobre a patios nuevos
48	D-MH-#-AÑO	dore
49	E-MH-#-AÑO	escorias

4.3. Balance Global

Para llevar a cabo el balance metalúrgico y así poder calcular los beneficios de la planta a corto y largo plazo, es necesario monitorear las columnas constantemente, para conocer la concentración de oro y plata en la solución que llega a la planta de beneficio, además conocer la eficiencia con la que las columnas de carbón están operando.

Para esto se toman muestras cada cuatro horas directamente del flujo de cada columna y se analizan en el laboratorio de planta para conocer la concentración de oro con la que entra y sale de las columnas.

Las muestras se registran en la Tabla II:

Tabla II. Registro de solución rica

HORA	COLUMNAS CHICAS						COLUMNAS GRANDES					PILA RICA	PILA POBRE
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5		
08:00 AM													
12:00 PM													
04:00 PM													
08:00 PM													
12:00 AM													
04:00 AM													

Una vez completo el registro, se realiza el balance con el promedio de los valores obtenidos a lo largo del día.

En la Tabla III se muestra un ejemplo del promedio de las muestras analizadas.

Tabla III. Ejemplo de registro de solución rica

HORA	COLUMNAS CHICAS						COLUMNAS GRANDES					PILA RICA	PILA POBRE
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5		
Promedio	0.32	0.22	0.14	0.07	0.05	0.01	0.24	0.16	0.09	0.04	0.01	0.47	0.01

Con estos datos podemos obtener un estimado muy exacto de lo que se obtendrá en la planta de beneficio, también podremos observar cómo se comportan las columnas de carbón, que tan eficientes son, y qué variables tenemos que tomar en cuenta para una buena recuperación [23,24].

4.4. Planta Grande

En la Figura 32 se presenta el diagrama con la información necesaria para llevar a cabo el balance de materia en planta grande.

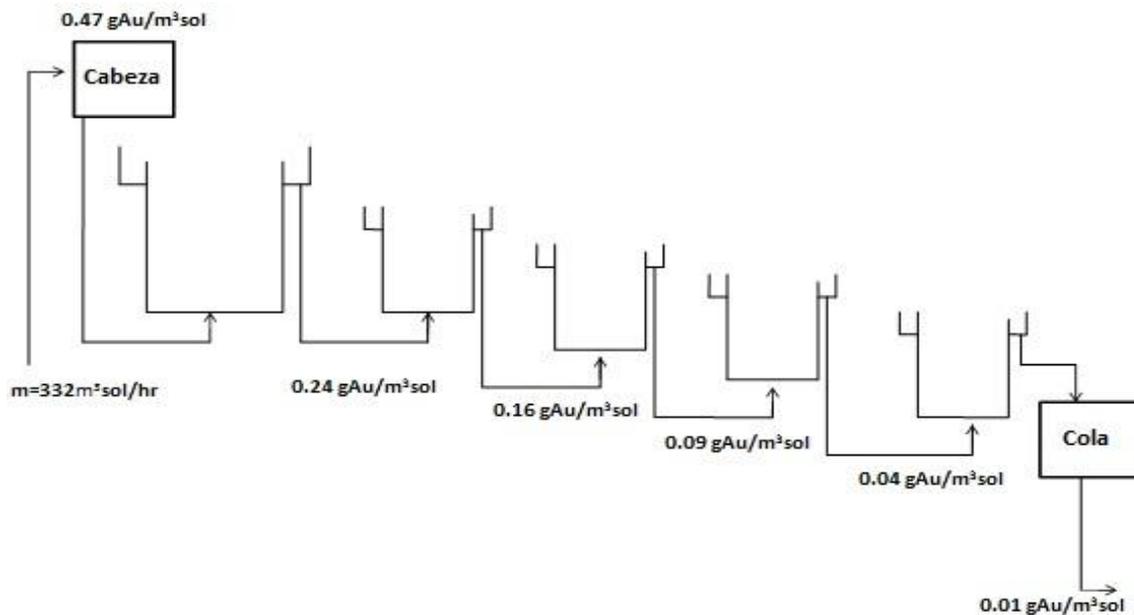


Figura 32. Balance de materia en planta grande

Para conocer lo que se obtiene de oro en la planta grande se realiza el siguiente balance.

DATOS: Flujo: $332 \frac{m^3 sol}{hr}$ Cabeza: $0.47 \frac{gAu}{m^3 sol}$ Cola: $0.01 \frac{gAu}{m^3 sol}$

Oro recuperado = entra - sale

$$\left(332 \frac{m^3 sol}{hr}\right) \left(0.47 \frac{gAu}{m^3 sol}\right) - \left(332 \frac{m^3 sol}{hr}\right) \left(0.01 \frac{gAu}{m^3 sol}\right) =$$

$$156.04 \frac{gAu}{hr} - 3.32 \frac{gAu}{hr} = 152.72 \frac{gAu}{hr}$$

$$\left(152.72 \frac{gAu}{hr}\right) \left(24 \frac{hr}{dia}\right) = 3665.28 \frac{gAu}{dia} \left(3665.28 \frac{gAu}{dia}\right) \left(\frac{1 OzAu}{31.1035 gAu}\right) = \mathbf{117.84 \frac{OzAu}{dia}}$$

$$156.04 \text{ ----- } 100\%$$

$$152.72 \text{ ----- } ?$$

La planta grande tiene una eficiencia de 97.87%

4.5. Planta Chica

En la Figura 33 observamos los datos requeridos para realizar el balance de materia en planta chica.

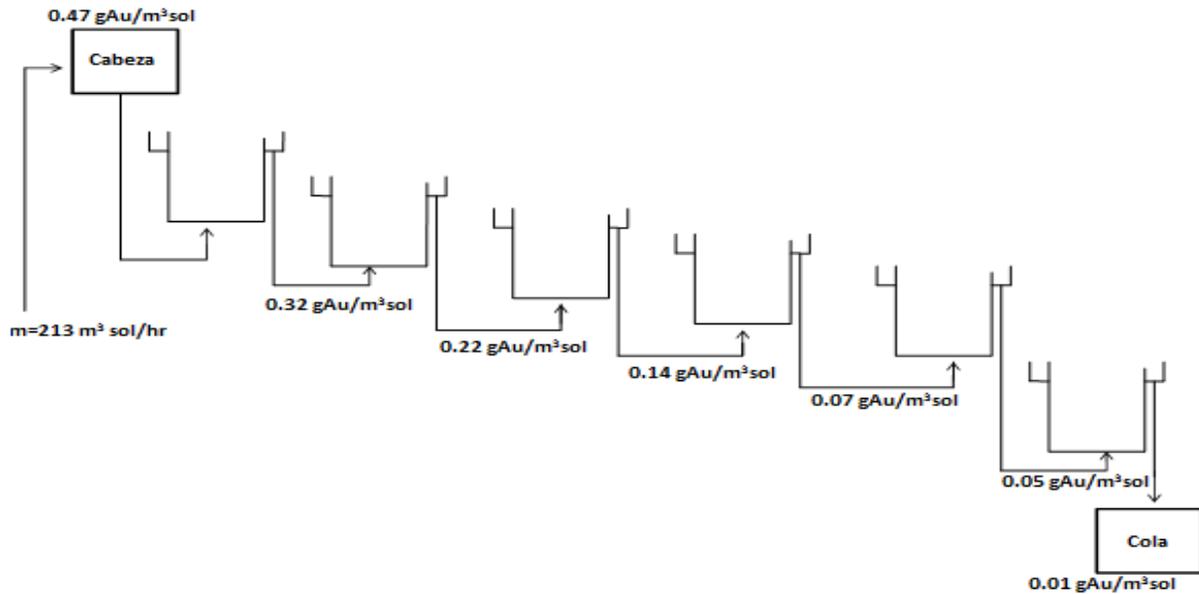


Figura 33. Balance de materia en planta chica

Para conocer lo que se obtiene de Au en la planta chica se realiza el siguiente balance.

DATOS: Flujo: $213 \frac{m^3 sol}{hr}$ Cabeza: $0.47 \frac{gAu}{m^3 sol}$ Cola: $0.01 \frac{gAu}{m^3 sol}$

Oro recuperado = entra - sale

$$\left(213 \frac{m^3 sol}{hr}\right) \left(0.47 \frac{gAu}{m^3 sol}\right) - \left(213 \frac{m^3 sol}{hr}\right) \left(0.01 \frac{gAu}{m^3 sol}\right) = 100.11 \frac{gAu}{hr} - 2.13 \frac{gAu}{hr} = 97.98 \frac{gAu}{hr}$$

$$\left(97.98 \frac{gAu}{hr}\right) \left(24 \frac{hr}{dia}\right) = 2351.52 \frac{gAu}{dia}$$

$$\left(2351.52 \frac{gAu}{dia}\right) \left(\frac{1 OzAu}{31.1035 gAu}\right) = 75.60 \frac{OzAu}{dia}$$

100.11 ----- 100%

97.98 ----- ?

La planta chica tiene una eficiencia de 97.87%

4.6. Eficiencia de Columnas en Planta Grande

A continuación se muestra el balance particular o local de la planta grande para la primera y última columna, las demás columnas siguen el mismo procedimiento para la obtención de la eficiencia, la cual se observa en la Tabla V.

COLUMNA 1

Se realiza un balance local en la columna 1

$$\left(332 \frac{m^3 sol}{hr}\right) \left(0.47 \frac{gAu}{m^3 sol}\right) - \left(332 \frac{m^3 sol}{hr}\right) \left(0.24 \frac{gAu}{m^3 sol}\right) = 156.04 \frac{gAu}{hr} - 79.78 \frac{gAu}{hr}$$
$$= 76.36 \frac{gAu}{hr}$$

$$\left(76.36 \frac{gAu}{hr}\right) \left(\frac{24 hr}{dia}\right) = 1832.64 \frac{gAu}{dia}$$

$$\left(1832.64 \frac{gAu}{dia}\right) \left(\frac{1 OzAu}{31.1035 gAu}\right) = 58.92 \frac{OzAu}{dia}$$

156.04 ----- 100%

76.36 ----- ?

La columna 1 tiene una eficiencia de 48.94%

COLUMNA 5

Se realiza un balance local en la columna 5

$$\left(332 \frac{m^3 sol}{hr}\right) \left(0.04 \frac{gAu}{m^3 sol}\right) - \left(332 \frac{m^3 sol}{hr}\right) \left(0.01 \frac{gAu}{m^3 sol}\right) = 13.28 \frac{gAu}{hr} - 3.32 \frac{gAu}{hr} = 9.96 \frac{gAu}{hr}$$

$$\left(9.96 \frac{gAu}{hr}\right) \left(\frac{24 hr}{dia}\right) = 239.04 \frac{gAu}{dia}$$

$$\left(239.04 \frac{gAu}{dia}\right) \left(\frac{1 OzAu}{31.1035 gAu}\right) = 7.685 \frac{OzAu}{dia}$$

13.28 ----- 100%

9.96 ----- ?

La columna 5 tiene una eficiencia de 75%

4.7. Eficiencia de Columnas en Planta Chica

Se muestra la eficiencia en dos de las seis columnas, ya que el procedimiento para la obtención de la eficiencia es el mismo en las 6 columnas.

COLUMNA 1

Se realiza un balance local en la columna 1

$$\left(213 \frac{m^3 sol}{hr}\right) \left(0.47 \frac{gAu}{m^3 sol}\right) - \left(213 \frac{m^3 sol}{hr}\right) \left(0.32 \frac{gAu}{m^3 sol}\right) = 100.11 \frac{gAu}{hr} - 68.16 \frac{gAu}{hr}$$
$$= 31.95 \frac{gAu}{hr}$$

$$\left(31.95 \frac{gAu}{hr}\right) \left(\frac{24 hr}{dia}\right) = 766.80 \frac{gAu}{dia}$$

$$\left(766.80 \frac{gAu}{dia}\right) \left(\frac{1 OzAu}{31.1035 gAu}\right) = 24.65 \frac{OzAu}{dia}$$

100.11 ----- 100%

31.95 ----- ?

La columna 1 tiene una eficiencia de 31.91%

COLUMNA 6

Se realiza un balance local en la columna 6

$$\left(213 \frac{m^3 sol}{hr}\right) \left(0.05 \frac{gAu}{m^3 sol}\right) - \left(213 \frac{m^3 sol}{hr}\right) \left(0.01 \frac{gAu}{m^3 sol}\right) = 10.65 \frac{gAu}{hr} - 2.13 \frac{gAu}{hr} = 8.52 \frac{gAu}{hr}$$

$$\left(8.52 \frac{gAu}{hr}\right) \left(\frac{24 hr}{dia}\right) = 204.48 \frac{gAu}{dia}$$

$$\left(204.48 \frac{gAu}{dia}\right) \left(\frac{1 OzAu}{31.1035 gAu}\right) = 6.57 \frac{OzAu}{dia}$$

10.65 ----- 100%

8.52 ----- ?

La columna 6 tiene una eficiencia de 80%

4.8. Resultados Generales

En la Tabla IV observamos el resultado del balance global para ambas plantas, lo cual es corroborado por el balance local realizado en cada columna.

Tabla IV. Resultados del balance general

PLANTA	EFICIENCIA	Oz RECUPERADAS
Grande	97.87%	117.84
Chica	97.87%	76.6
		Total: 194.44

Con esta ley y este flujo se recuperan 193.44 Oz diarias.

4.9. Resultados de Columnas

En la Tabla V se muestra el concentrado de resultados.

Tabla V. Resultados del balance específico

PLANTA	COLUMNAS	EFICIENCIA (%)	% DE RECUPERACIÓN	Oz RECUPERADAS
GRANDE	1	48.94	48.94	58.92
	2	33.33	17.02	20.49
	3	43.75	14.89	17.93
	4	55.55	10.63	12.80
	5	75	6.38	7.685
CHICA	1	31.91	31.91	24.65
	2	31.25	21.27	16.43
	3	36.36	17.02	13.15
	4	50	14.89	11.50
	5	28.57	4.25	3.28
	6	80	8.51	6.57

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones Generales

Fue un gran resultado para ambas partes involucradas ya que ahora se cuenta con un documento que cumple con las necesidades en contenido y calidad, cumpliendo ambos objetivos: la obtención del grado de Ingeniero Químico y la elaboración documento claro y práctico de respaldo para las actividades realizadas en Planta ADR.

En general es grato saber que se pudo contribuir en la mejora de una gran empresa como lo es Minera Santa Rita y específicamente para Mina El Chanate. Saber que dicho trabajo puede ser instituido como un documento para la formación de nuevo personal, la constante y necesaria capacitación, las posibles mejoras al desarrollo del proceso, y el probable beneficio económico reflejado tras la aplicación de este manual es una experiencia que nos alegra haber obtenido.

5.2. Conclusiones Particulares

La necesidad de un documento en el cual se encontrara información ordenada y práctica sobre los aspectos más importantes en el desarrollo operacional de la planta, metodologías para el monitoreo y muestreo adecuado, metodologías en laboratorio e información básica para el conocimiento de cualquier personal ya sea operador o encargado de planta, fueron los puntos que dieron por consecuencia el desarrollo de este material.

Se describe paso a paso el desarrollo operacional, arranque de operaciones de inicio y arranque al haber sufrido una contingencia. Se menciona de igual forma el movimiento del carbón en ambas plantas entre cada columna detallando abertura de válvulas y flujo en las tuberías. Otra de las cosas esenciales del proceso es el lavado del carbón con ácido clorhídrico y despojo del oro en los poros del carbón activado con cianuro cáustico. Todo se realizó pensando en la gran herramienta que sería para capacitación del operador de recién ingreso en planta.

El muestreo y monitoreo continuo es un punto de suma importancia para el funcionamiento adecuado y correcto de planta, es por ello que se rediseñaron los formatos ya existentes.

En cuanto al trabajo realizado en laboratorio de planta se concluye reconociendo lo importante que es alcanzar los resultados exactos ya que de ellos depende la toma de decisión sobre las concentraciones de los reactivos principales en todo el proceso, hablando puntualmente de la concentración de cianuro de sodio, es por ello que se incluyen las secciones del uso adecuado y las metodologías correctas para laboratorio y el uso del equipo en planta.

A partir de toda la información previa obtenida en laboratorio es posible realizar los balances de materia los cuales son de gran valor para conocer si la producción es la adecuada según los requerimientos económicos que se piden, ya que es fundamental tomar en cuenta el aspecto de la recuperación sobre cualquier otro punto exceptuado la seguridad del personal y ambiental.

En general el trabajo muestra un panorama específico del funcionamiento desde el punto de vista práctico hasta las metodologías para el análisis y el balance de materia para encontrar los porcentajes de recuperación obtenidos por hora en cada planta y en la salida a cada columna.

5.3. Aportaciones

Beneficio directo y personal en base a la experiencia que se ganó en el transcurso de la realización del Manual de Operaciones de la Planta ADR y que a la vez nos muestra la oportunidad de la elaboración del documento que ahora se presenta como un trabajo de prácticas profesionales hacia la obtención del Título Profesional como Ingeniero Químico.

A su vez es en beneficio para la Mina El Chanate ya que ahora cuenta con un documento que describe de forma práctica los procesos ahí realizados. Este documento enmarca un panorama general de lo que día a día se realiza en la mina para la obtención del producto final deseado.

5.4. Recomendaciones

Son muchas las cosas por mejorar en planta ADR y muchas otras que son ejemplo para otros lugares, en cuanto a aspectos de funcionamiento, seguridad, innovación tecnológica entre otros puntos que pueden ser de beneficio para el proceso descrito. Como recomendación la automatización de planta puede ser un punto importante a discutirse pensando en mejorar la calidad del proceso y aumentar la eficiencia del mismo.

La identificación precisa de cada válvula, tanques y equipos en planta ayudaría a facilitar la operación de la misma con menor margen de error.

Prestar más importancia a la capacitación de los operadores y supervisor con el fin de que conozcan la importancia de realizar con mayor conocimiento los ensayos realizados en laboratorio, las lecturas en el equipo de absorción atómica y que conozcan la importancia de seguir al pie de la letra los señalamientos de seguridad en planta.

VI. APÉNDICE

6.1. Programa de Muestreo Planta ADR

El programa de muestreo establece número y códigos para el muestreo a realizar, además enlista el procedimiento de muestreo, las soluciones a analizar y el lugar donde se llevara dicho análisis.

6.1.1. Muestreo de soluciones

Tabla VI. Muestreo de soluciones

Lugar de toma de la muestra	Número de muestra	Código de la muestra	Procedimiento	Analizadas para					
				Au	Ag	NaCN	SOSA	pH	Realizar análisis en:
Solución pobre a patios viejos	01	SPPV	Tomar muestra del compósito de patios viejos	-	-	x	-	X	Laboratorio de planta
Solución pobre patios nuevos	02	SPPN	Abrir válvula de la tubería a patios nuevos	-	-	X	-	X	Laboratorio de planta
Solución rica a pila rica (canal)	03	SRPR	Tomar muestra directamente del canal	-	-	x	-	X	Laboratorio de planta
Solución rica a la entrada a celdas de electrólisis-PG	04	SRECE-PG	Abrir válvula y tomar la muestra directamente	x	x	Cada 2 horas	Cada 2 horas	-	Laboratorio de planta
Solución rica a la entrada a celdas de electrólisis-PC	05	SRECE-PC	Abrir válvula y tomar la muestra directamente	x	x	Cada 2 horas	Cada 2 horas	-	Laboratorio de planta
Solución pobre a la salida de celdas de electrólisis-PG	06	SPSCE-PG	Abrir válvula y tomar la muestra directamente	x	-	-	-	-	Laboratorio de planta
Solución pobre a la salida de celdas	07	SPSCE-PC	Abrir válvula y tomar la muestra directamente	X	-	-	-	-	Laboratorio de planta
Solución de HCl para lavado del carbón-PG	08	SACLC-PG	Toma directo del tanque de preparación	-	-	-	-	X	Laboratorio de planta

Solución de HCl para lavado del carbón-PC	09	SACLC-PC	Toma directo del tanque de preparación	-	-	-	-	X	Laboratorio de planta
Solución rica a columnas de carbón-PG	10	SRC1-PG	Directamente de cada columna	x	x	-	-	-	Laboratorio metalúrgico
	11	SRC2-PG							
	12	SRC3-PG							
	13	SRC4-PG							
Solución rica a columnas de carbón-PC	14	SRC5-PG	Directamente de cada columna	x	x	-	-	-	Laboratorio metalúrgico
	15	SRC1-PC							
	16	SRC2-PC							
	17	SRC3-PC							
	18	SRC4-PC							
	19	SRC5-PC							
20	SRC6-PC								
Compósito de solución rica	21	CSR	Directamente del compósito previamente agitado	x	x	-	-	-	Laboratorio metalúrgico
Compósito de pila pobre	22	CPP	Directamente del compósito previamente agitado	x	x	-	-	-	Laboratorio metalúrgico
Compósito del canal	23	CC	Directamente del compósito previamente agitado	x	x	-	-	-	Laboratorio metalúrgico
Compósito de solución pobre-PG	24	CSP-PG	Directamente del compósito previamente agitado	x	x	-	-	-	Laboratorio metalúrgico
Compósito de solución pobre-PC	25	CSP-PC	Directamente del compósito previamente agitado	x	x	-	-	-	Laboratorio metalúrgico

6.1.2. Muestreo de carbones

Tabla VII. Muestreo de carbones

Lugar de toma de la muestra	Número de la muestra	Código de la muestra	Manera de tomar la muestra	Frecuencia de muestreo	Procedimiento	Analizada para:			
						Actividad	Au	Ag	Realizar análisis en:
Carbón activado cargado antes del despojo-PG	26	CCD-PG-L-AÑO	Puntual	Cada despojo	Se toma la muestra antes del lavado ácido	-	X	X	Laboratorio metalúrgico
Carbón activado cargado antes del despojo-PC	27	CCD-PC-L-AÑO	Puntual	Cada despojo	Se toma la muestra antes del lavado ácido	-	-	-	Laboratorio metalúrgico
Carbón activado despojado-PG	28	CD-PG-L-AÑO	Puntual	Cada despojo	Se toma la muestra del tanque de despojo	-	X	X	Laboratorio metalúrgico
Carbón activado despojado-PC	29	CD-PC-L-AÑO	Puntual	Cada despojo	Se toma la muestra del tanque de despojo	-	-	-	Laboratorio metalúrgico
Carbón activado durante el movimiento de columnas-PG	30 31 32 33 34	CA-PG - C1-LA CA-PG - C2-C1 CA-PG - C3-C2 CA-PG - C4-C3 CA-PG - C5-C4	Puntual Puntual Puntual Puntual	Cada domingo	Se toma la muestra directamente de cada columna	-	X	X	Laboratorio metalúrgico
Carbón activado durante el movimiento de columnas-PC	35 36 37 38 39 40	CA-PC - C1-LA CA-PC - C2-C1 CA-PC - C3-C2 CA-PC	Puntual Puntual Puntual Puntual Puntual	Cada domingo	Se toma la muestra directamente de cada columna	-	X	X	Laboratorio metalúrgico

Carbón activado nuevo	41	CAN	Puntual	Cada vez que se introduce al proceso	Se toma directamente del tanque acondicionador	X	-	-	Laboratorio metalúrgico
Carbón reactivado – PG	42	CR-PG	Puntual	Cada lote	Se toma la muestra directamente del tanque de apagado	X	-	-	Laboratorio metalúrgico
Carbón reactivado – PC	43	CR-PC	Puntual	Cada lote	Se toma la muestra directamente del tanque de apagado	X	-	-	Laboratorio metalúrgico

6.1.3. Muestreo de Tratamiento de Anti incrustante

Tabla VIII. Muestreo de tratamiento de anti incrustante

Lugar de toma de la muestra	Número de muestra	Código de la muestra	Manera de tomar la muestra	Frecuencia de muestreo	Procedimiento	Analizada para				
						Alcalinidad		pH	Sólidos totales disueltos	Realizar análisis en:
						<i>P - Alk</i>	<i>M - Alk</i>			
Tanque de despojo	44	TA-STP	Puntual	Mensual	Se toma una muestra simple, directamente donde haya dosificación	x	x	x	x	Laboratorio de planta
Solución rica a columnas de carbón	45	TA-SRC	Puntual	Mensual	Se toma una muestra simple, directamente donde haya dosificación	x	x	x	x	Laboratorio de planta
Solución pobre a patios viejos	46	TA-SPPV	Puntual	Mensual	Se toma una muestra simple, directamente donde haya dosificación	x	x	x	x	Laboratorio de planta
Solución pobre a patios nuevos	47	TA-SPPN	Puntual	Mensual	Se toma una muestra simple, directamente donde haya dosificación	x	x	x	x	Laboratorio de planta

- La toma de muestras y el análisis de éstas, son realizadas por el proveedor del anti-incrustante.

6.1.4. Muestreo de Dore y Escorias

Tabla IX. Muestreo de dore y escorias

Lugar de toma de muestra	Número de muestra	Código de muestra	Manera de tomar la muestra	Frecuencia de muestreo	Procedimiento	Analizada para			
						% Au	% Ag	% contaminación	Realizar análisis en:
Dore	48	D-MH-#-AÑO	Puntual	Cada fundición	Barrenación	x	x	x	Laboratorio
Escorias	49	E-MH-#-AÑO	Puntual	Cada fundición	Barrenación	x	x	x	Laboratorio

6.2.2. Reporte diario de operación

Tabla XI. Reporte diario de operación

HORA	SOLUCIÓN RICA A PLANTA CHICA		SOLUCIÓN RICA A PLANTA GRANDE		SOLUCIÓN RICA DE PATIOS		SOLUCIÓN POBRE DE PATIOS				AGUA	ANTI - INCRUSTANTE	
	m ³ /hr	Total	m ³ /hr	Total	CN ppm	pH	CN ppm	pH	m ³ /hr	Total	Total	Pila rica	Pila pobre
07:00													
08:00													
09:00													
10:00													
11:00													
12:00													
01:00													
02:00													
03:00													
04:00													
05:00													
06:00													
07:00													
08:00													
09:00													
10:00													
11:00													
12:00													
01:00													
02:00													
03:00													
04:00													
05:00													
06:00													
07:00													

REPORTE	1er TURNO		2do TURNO	
	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
PILA POBRE				
PILA RICA				
PILA EMERGENCIA				
CALDERA #1				
CALDERA #2				
CALDERA #3				

LOTE DE CARBÓN	1er TURNO	2do TURNO
Tanque de despojo Planta chica		
Tanque de despojo Planta grande		
Lavado ácido Planta chica		
Lavado ácido Planta grande		
Regenerador 1 Tonelada		
Regenerador 2 Toneladas		

6.2.3. Reporte diario de columnas

Tabla XII. Reporte diario de columnas

FECHA: _____

TURNO #1 _____

TURNO #2 _____

HORA	COLUMNAS CHICAS						COLUMNAS GRANDES					PILA RICA	PILA POBRE
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5		
08:00 AM													
12:00 PM													
04:00 PM													
08:00 PM													
12:00 AM													
04:00 AM													

COMENTARIOS _____

6.2.4. Horno regenerador de carbón activado

Tabla XIII. Lectura del horno regenerador de carbón activado

HORA	HOROMETRO	MONIT. DE AIRE	TEMPERATURA #4	TEMPERATURA #3	TEMPERATURA #2	TEMPERATURA #1
07:00 AM						
08:00 AM						
09:00 AM						
10:00 AM						
11:00 AM						
12:00 PM						
01:00 PM						
02:00 PM						
03:00 PM						
04:00 PM						
05:00 PM						
06:00 PM						
07:00 PM						
08:00 PM						
09:00 PM						
10:00 PM						
11:00 PM						
12:00 AM						
01:00 AM						
02:00 AM						
03:00 AM						
04:00 AM						
05:00 AM						
06:00 AM						
07:00 AM						

6.2.5. Reporte de gas en planta

Tabla XIV. Reporte de gas en planta

TURNO #1 FECHA: _____

OPERADORES: _____ SUPERVISOR: _____

REPORTE		ENTRADA	SALIDA	TOTAL/HRS
HOROMETRO	CALDERA 1			
	CALDERA 2			
	CALDERA 3			
HORNO	1			
	2			
				TOTAL/LTS
GAS DE STP	1			
	2			
HORNO	1			
	2			

TURNO #2 FECHA: _____

OPERADORES: _____ SUPERVISOR: _____

REPORTE		ENTRADA	SALIDA	TOTAL/HRS
HOROMETRO	CALDERA 1			
	CALDERA 2			
	CALDERA 3			
HORNO	1			
	2			
				TOTAL/LTS
GAS DE STP	1			
	2			
HORNO	1			
	2			

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Castrejón L. R., Díaz G. H., Corrales G. G., “Lixiviación en Montones”, Universidad de Sonora Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia 1993, pp. 1-64.
- [2] Marsden J., House I., “The Chemistry of Gold Extraction” SME. 2006. pp. 233-280.
- [3] Hiskey J. B. “Gold and Silver Extraction: the Application of Heap Leaching Cyanidation” Vol. 15, Arizona Bureau of Geology and Mineral Technology Field notes 1985, pp. 1-5.
- [4] The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), “The Minerals Metals & Materials Society 2011, 140th Annual Meeting and Exhibition, Materials Processing and Energy Materials 2011”, pp. 267-269.
- [5] Aguayo S. S., Encinas R. M., “Tratamiento de Residuos y Jales de Proceso de Cianuración”, Colección Textos Académicos Universidad de Sonora 2004, pp. 9-22.
- [6] Heinen H. J., McClelland G. E., “Enhancing Percolation Rates in Heap Leaching of Gold-Silver Ores”, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines. 1979, pp. 1-25.
- [7] Millar C. F., “Lixiviación en Montones Manual Práctico”, Hermosillo, Sonora, México Agosto de 1997, pp. 11-13.
- [8] Spiro T. G., Stigliani W. M., “Química Medioambiental” Segunda Edición, Pearson Educación 2004, pp. 339-351.
- [9] Félix Badilla E. “Lixiviación de Minerales de Oro y Plata, Oxidados y Sulfurosos, con soluciones de Cianuro de Sodio y Bio-D Leachient. Teoría y Práctica”, Universidad de Sonora Octubre de 1990, pp. 8-12.

- [10] McCabe W. L., Smith J. C., Harriot P. "Operaciones Unitarias en Ingeniería Química", Séptima Edición, McGraw Hill Interamericana Editorial 2007, pp. 799-828.
- [11] Geankoplis C. J. "Procesos de Transporte y Principios de Procesos de Separación", Cuarta Edición, CECSA Editorial México 2006, pp. 773-783.
- [12] Clark R. M., Lykins B. W. "Granular Activated Carbon", Lewis Publishers Inc. 1989, pp. 31-57.
- [13] Díaz G. H., Aguayo S. S., "Fundamentos de la Reactivación de Carbón" Primera Edición, Universidad de Sonora, Great Western de México S.A. de C.V. 1999, pp. 11-21.
- [14] Hassler J. W. "Active Carbon the Modern Purifier", Industrial Chemical Sales Division West Virginia 1941, pp. 58-61.
- [15] Crow D.R. "Principles and Applications of Electrochemistry" Fourth Edition. Chapman and Hall/CRC 1994, pp. 217.
- [16] Popov K. I., Djokic S. S., Grgur B. N., "Fundamental Aspects of Electrometallurgy", Kluwer Academic / Plenum Publishers 2002, pp. 145-156.
- [17] Raymond C., "Química General" Séptima Edición, McGraw-Hill Editora 2002. pp. 607-610.
- [18] Brown T.L., LeMay H.E., Bursten E. B., Marphy C.J., "Química la Ciencia Central" Decimoprimer Edición, Pearson Prentice Hall Editorial 2009, pp. 128-133.
- [19] Timberlake K. C., Timberlake W., "Química" Segunda Edición, Pearson Educación 2008, pp. 453-478.

- [20] Mataix C. "Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas" Segunda Edición, Oxford University Press. Alfaomega Editorial 2007, pp. 198-202.
- [21] Streeter L. V., Wylie E. B., Bedford K. W. "Mecánica de Fluidos" Novena Edición, McGraw-Hill Interamericana, S.A. 2001, pp. 202-208.
- [22] Keith L. H., "Principles of Environmental Sampling", ACS Professional Reference Book American Chemical Society 1988, pp. 101-107.
- [23] Himmelbalu D.M., "Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química" Sexta Edición, Pearson Educación 2002, pp. 142-227.
- [24] Fine H. A., Geiger G. H. "Handbook on Material and Energy Balances Calculations in Metallurgical Processes", TMS 1993, pp. 135-179.
- [25] Ballester A., Verdeja L. F., Sancho J., "Metalurgia Extractiva", Editorial Síntesis 2002, pp. 19-36, 355-381.