Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química
Intensificación en Ingeniería de Procesos

Estudio, creación e implementación de la calidad seis sigma en los analizadores en continuo de una planta hidrometalúrgica

Autor: José Miguel de Aranda Sánchez

Tutor: D. Benito Navarrete Rubia

Dep. Ingeniería química y medioambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

La realización de este Trabajo Fin de Grado se ha basado en las tareas llevadas a cabo por el alumno en las prácticas en empresa realizadas en Cobre Las Cruces. Este conjunto minero cuenta con un programa de becas para estudiantes en el que se ofrece la posibilidad de realizar un proyecto propuesto por parte de la compañía durante el periodo becado.

La empresa beca a los alumnos seleccionados con objeto de llevar a cabo un proyecto que pueda resultar de interés para la mejora de procesos, implantación de nuevos equipos, metodologías de trabajo o rutinas de operación y control, que previamente deben ser aprobados por la Dirección. De esta manera, se le ofrece al estudiante la posibilidad de realizar un Trabajo Fin de Grado de indudable utilidad y aplicabilidad práctica, poniendo a su disposición el know how de la instalación y sus procesos, los recursos necesarios y la formación adecuada para realizar el proyecto en cuestión. De otro lado, la empresa desarrolla distintas iniciativas con estos alumnos becados que de otro modo le resultaría difícil de encajar en la planificación de tareas de su personal técnico, ocupado casi en exclusiva en actividades de producción y con dificultades para llevar a cabo sólo con medios propios los proyectos propuestos, por lo que ambas partes resultan beneficiadas con este programa.

Para preservar los derechos de propiedad intelectual e industrial de los procesos, equipos y procedimientos de operación del conjunto minero, este proyecto se presenta con carácter confidencial y los datos que figuran en el proyecto o en los anexos son orientativos y no siempre reflejan valores reales de las variables del proceso de producción en el momento actual, aunque ello no afecta en ningún caso a la metodología propuesta, a los resultados del trabajo ni a las conclusiones.

Por último, quiero agradecer en este punto la oportunidad que me ha brindado la compañía Cobre Las Cruces, no sólo por la beca concedida, sino por contribuir de forma muy enriquecedora a mi última etapa de formación en el Grado de Ingeniería Química facilitándome la idea original y los medios para la realización del proyecto y permitiéndome la publicación de éste estudio, realizado en gran parte con los datos obtenidos en mi trabajo en planta.

Índice

Índice 3
1. Introducción: Importancia del sector minero 4
2. Descripción del proceso 9
2.1. Trituración. 9
2.2 Molienda 16
2.3 Lixiviación 18
2.4 Neutralización y pre-neutralización 22
2.5 Extracción por solventes 23
2.6 Electro-Obtención o Electrowinning. 27
3 El control del proceso y el control de calidad 30
3.1 Analizadores Courier 31
3.2 Control de calidad 32
4 Motivación del proyecto: Calibraciones de los sistemas de medida. 34
4.1 Calibraciones del sistema de medida 35
5 Ámbito y alcance del proyecto 38
5.1 Punto de partida: Estadística de control 38
6 HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA 41
6.1 Definición de la primera optimización de las cartas de control. Metodología a seguir 44
6.2 Análisis de herramientas y resultados. Primeras conclusiones**.** 44
6.3 Obtención de las cartas de control finales. Metodología aplicada. 45
6.4 Metodología a seguir para el correcto control de la calidad. 50
7 HERRAMIENTAS AUXILIARES 52
7.1 Matriz de rebose de ciclón 52
7.2 Seguimiento de ácido 52
7.3 Gráficas EWMA 53
8 RESULTADOS DEL MÉTODO 54
8.1 Implantación en el sistema de calidad de la empresa 54
9 CONCLUSIONES 57
10 ASPECTOS DE MEJORA 60
11 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA 61

1. Introducción: Importancia del sector minero

La minería en la región de Andalucía es y ha sido un sector de gran peso. Los recursos existentes son además de gran calidad y es por ello que históricamente, nuestra comunidad ha estado ligada a la minería.

La historia minera en Andalucía se encuentra estrechamente ligada a los diferentes pueblos y civilizaciones que se han asentado en nuestra región o la han utilizado como base productiva y comercial a lo largo de los siglos. Los orígenes de las explotaciones mineras en Andalucía están relacionados con la aparición de las culturas prehistóricas del Paleolítico y la búsqueda de metales para diferentes usos domésticos.

Los trabajos mineros más antiguos se remontan al cuarto y tercer milenio a.C., tanto al suroeste de Andalucía, relacionados con el cobre y los metales preciosos de Huelva, como en el sureste, por la plata de Almería. En Huelva fue igualmente donde se produjo la primera obtención de cobre a partir de la fusión de minerales, lo cual supuso un hecho de vital importancia para los pueblos ya dentro de la cultura de la Edad de Cobre.

Entre el siglo X y el VI a.C., el pueblo de los tartesios se caracterizó por disponer de abundante plata, estaño, plomo y oro, lo cual deja constancia de la importancia que esta civilización otorgó a la minería. Las principales explotaciones mineras fueron las de Riotinto (Huelva), de las que extraían cobre, plata y oro de los yacimientos piríticos. Igualmente, los tartesios realizaron la explotación de diferentes minas en la provincia de Córdoba, como las de cobre de Cerro Muriano y las de plata de Fuenteovejuna, y en la provincia de Almería, en las que extraían plomo de las minas de Sierra de Gádor, Berja y Dalías.

Los fenicios, asentados en el litoral andaluz entre los siglos XIV y XII a.C. aportaron no sólo nuevas técnicas para el aprovechamiento de los recursos minerales, sino también mejores sistemas comerciales para distribuir los metales de los tartesios por el mercado mediterráneo, a través de factorías y asentamientos costeros. El distrito minero de Huelva, con la localidad de Tharsis a su cabeza, alcanzó una gran importancia como centro comercial de distribución de metales por las costas y el interior andaluz. La expansión minera de los fenicios alcanzó también las minas de plomo de Almería y la provincia de Jaén, en cuyas minas extraían la plata contenida en el plomo.

A partir de los siglos VII y VI a.C., los griegos tomaron contacto con Cádiz, instalando nuevas colonias en las zonas mineras existentes o potenciando las de origen fenicio. De esta manera, realizaron la explotación de las minas se Sierra de Lújar, en Granada, de las sierras almerienses de Gádor y Almagrera, y la explotación del oro de los filones de cobre aurífero de Cerro Muriano (Córdoba).

Con el dominio de los cartagineses sobre los tartesios, fenicios y griegos, a finales del siglo VI a.C., se abandonaron un gran número de minas de cobre, como las de Huelva, y de bronce, a cambio de la explotación de yacimientos de hierro. Sin embargo, continuó la explotación de las minas de plata como la de Cástulo, en Jaén, y de las minas de plomo de Sierra de Lújar (Granada).

La derrota de los cartagineses a manos del Imperio romano en el siglo III a.C. supuso un nuevo resurgimiento de la actividad minera en Andalucía, gracias a la aplicación de nuevas técnicas de arranque y profundización de labores. Son ejemplos de la gran actividad minera de la época romana el distrito minero de Linares-La Carolina, donde se promulgaron leyes para proteger los derechos de propiedad minera, la mina de galena argentífera de El Centillo, las elevadas producciones de plata y oro de Riotinto, así como la explotación de las minas de cobre de Tharsis (Huelva). En el resto de las provincias andaluzas se encuentran igualmente vestigios de antiguas actividades mineras romanas. Entre las nuevas técnicas empleadas para la explotación minera destacan el uso de tornillos de Arquímedes para la perforación de galerías y las instalaciones hidráulicas ingeniadas para el desagüe de las minas en caso de inundación.

Con la llegada de los visigodos a Andalucía a partir del siglo V se abandonaron prácticamente todos los trabajos mineros existentes hasta el momento, excepto ciertas actividades en Jaén y Riotinto.

Ya en el siglo VII, los musulmanes imprimieron una ligera recuperación a la minería andaluza, aunque fue a partir del siglo X cuando se alcanzó un mayor esplendor, sin llegar al auge minero de las épocas anteriores. La explotación minera musulmana se centró en las minas de oro, plata e incluso piedras preciosas. El resto de actividades mineras tan ampliamente desarrolladas por los romanos quedaron abandonadas casi en su totalidad.

Desde finales del siglo XIII, la repoblación cristiana del territorio andaluz contribuiría a una nueva recuperación del sector minero, pasando a ser las minas propiedad del rey. Existen indicios durante esta época de la explotación de minas de oro, plomo y carbón.

A partir del siglo XVI, la intervención estatal en el ámbito minero perseguía el objetivo de recuperar la ferviente actividad minera desarrollada en Andalucía en siglos anteriores abandonada desde la época visigoda. La promulgación de una verdadera ley de minas durante el reinado de Felipe II contribuyó durante el siglo XVI y XVII a potenciar esta actividad minera, cediéndose numerosas concesiones mineras a particulares, de las que el rey era propietario en último término. En esta ligera recuperación de la minería andaluza destaca por su importancia en cuanto a producción y nuevas técnicas utilizadas el yacimiento de plata de Guadalcanal (Sevilla). Igualmente se reactivaron y explotaron durante el siglo XVI y XVII antiguas explotaciones mineras en el resto de las provincias de Andalucía, entre las que se pueden nombrar las siguientes: las minas de las sierras almerienses de Gádor, Cabrera y María, minas de oro y plata en la Serranía de Ronda (Málaga), distrito minero de Linares-La Carolina (Jaén), las minas de Güejar-Sierra de la zona minera de Sierra Nevada, minas de plomo en Córdoba y minas de carbón en Villanueva del Río (Sevilla).

A pesar de este ligero resurgimiento producto de la intervención estatal, la minería se encontraba al finalizar el siglo XVII en un profundo declive, conservándose actividad minera únicamente en las minas de Guadalcanal, Riotinto y Linares, así como en una mina de grafito de Málaga.

La verdadera reactivación de las explotaciones mineras en Andalucía llegaría con el reinado de Carlos III en el siglo XVIII. Dos factores supusieron este importante resurgimiento de los antiguos distritos mineros y explotaciones andaluzas: por un lado, la intervención de empresarios extranjeros, fundamentalmente alemanes, en la gestión y administración de las explotaciones andaluzas, instaurando un sistema de acciones sobre los beneficios mineros que ya no se perdería. Por otro lado, la introducción de nuevas maquinarias y avances tecnológicos

fruto de la Revolución Industrial, como la máquina de vapor y la utilización de nuevas técnicas de perforación y desagüe de galerías. Las explotaciones más beneficiadas y que experimentaron una mayor actividad fueron las minas de plata de Guadalcanal, las minas de cobre de Riotinto, las minas de grafito de Málaga, los distritos mineros de Linares, entre los que destaca por su gran producción de minerales y plomo la mina de Arrayanes, y las minas de carbón de Peñarroya (Córdoba).

La trayectoria de la actividad minera en Andalucía sufrió un determinante giro a partir de las nuevas legislaciones mineras promulgadas en el siglo XIX. Estas leyes buscaban conseguir la liberalización del sector minero, hasta entonces propiedad de la corona, para permitir la entrada de capitales extranjeros que asumieran la gestión y los costes de la administración y explotación de las minas españolas, y con ellos introducir los nuevos sistemas de producción impuestos en Europa, en los que el carbón y la máquina de vapor eran sus máximos representantes. Como resultado, muchas de las principales y más ricas minas andaluzas pasaron a manos de capitales extranjeros: las minas de cobre de Riotinto y Tharsis, en Huelva, y las explotaciones plúmbicas de Linares (Jaén) y Peñarroya (Córdoba), experimentando un increíble aumento en la producción de minerales y cuantiosos beneficios para sus propietarios.

Sin embargo, puede decirse que la actividad minera en estas zonas quedó definitivamente consolidada gracias a la intervención extranjera en ellas. Entre finales del siglo XIX y principios del XX, la producción minera andaluza se centraba en la extracción de piritas de hierro y cobre en Huelva y Sevilla, para producir azufre, así como en la producción de metales no ferrosos, como el zinc, cobre, plomo y estaño.

Dentro de la minería contemporánea andaluza, los dos sectores que más destacaron fueron los del plomo y el del cobre. Poco a poco, estas dos actividades mineras fueron controladas por los capitales extranjeros invertidos, alcanzando consecuentemente una ingente producción de minerales. Producción que, a finales del siglo XIX, comenzó su inexorable descenso debido al agotamiento de las minas. Prácticamente nada del beneficio económico que se obtenía de las explotaciones mineras era reinvertido en Andalucía, por lo que este gran auge minero del siglo XIX no supuso un crecimiento económico en el conjunto de Andalucía.

El siglo XX caracterizó al panorama minero andaluz por una recuperación del intervencionismo estatal en este ámbito. La promulgación de nuevas leyes mineras y la política económica autárquica franquista consiguieron la nacionalización de las compañías mineras, que hasta entonces eran en gran número de capital extranjero. La minería andaluza se desarrolló durante el primer tercio del siglo XX en el contexto de un elevado incremento de la demanda mundial de recursos mineros, contribuyendo con sustancias como el plomo, el hierro y el cobre. La tendencia generalizada en la mayoría de las comarcas mineras andaluzas fue la de explotación de las mismas por parte de empresas extranjeras, con la finalidad de conseguir una elevada producción en poco tiempo. Cuando irremediablemente comenzó el agotamiento de los filones en la mayoría de las cuencas mineras o los costes de extracción resultaban demasiado elevados, las empresas extranjeras o bien abandonaban las explotaciones, o bien las traspasaban a empresas españolas o quedaban en manos del Estado, lo que condujo al sector minero andaluz a una grave decadencia. Destacan en este periodo la explotación de minas de hierro en la Sierra de lo Filabres y Sierra de Bédar (Almería), filones de plomo y cuarzos auríferos en la comarca minera de Rodalquilar, minas de plomo y plomo argentífero en diversas comarcas de Granada, los criaderos de hierro de Alquife y la Sierra de Baza (Granada), las explotaciones de plomo de la zona de Villanueva del duque en Córdoba, las minas de cobre de Cerro Muriano y las de

carbón de Peñarroya (Córdoba), con una elevada producción de mineral, o las explotaciones de piritas de cobre en Riotinto y Tharsis (Huelva). El distrito minero plúmbico de Linares-La Carolina, con la famosa mina de Arrayanes, entró en decadencia a principios de siglo, debido al agotamiento de los filones y a los elevados costes de extracción de mineral. Poco a poco, pequeñas empresas andaluzas y españolas fueron apareciendo en el mercado minero y haciéndose cargo de las explotaciones abandonadas por las empresas extranjeras. Sin embargo, el agotamiento de los filones era un hecho consumado, y ni siquiera la intervención del Estado logró sacar a la minería andaluza de la decadencia en la que había ido entrando en este primer tercio del siglo XX.

En el segundo tercio del siglo XX se acentuaron los problemas que se venían arrastrando desde las décadas anteriores. Un gran número de empresas extranjeras abandonaron definitivamente sus actividades y negocios mineros, a la vez que se buscaba la nacionalización de otras empresas para garantizar el aprovisionamiento de materias primas mineras. Un importante número de explotaciones mineras quedaron inactivas debido a su agotamiento, manteniéndose la actividad minera en unos pocos enclaves dispersos por el territorio andaluz: algunas minas como la de Arrayanes y El Centillo en el distrito de Linares-La Carolina, algunas minas de la zona de Fuenteovejuna (Córdoba), las minas de oro de Rodalquilar y las de hierro de la Sierra de los Filabres (Almería), y las minas de Riotinto (Huelva) y Aznalcollar (Sevilla), que fueron traspasadas desde empresas extranjeras a empresas de titularidad españolas.

El último tercio del siglo XX significó el fin de la minería andaluza, debido al agotamiento de los filones después de 3.000 años de explotación. Muchas de las explotaciones que continuaban activas en Andalucía en las décadas anteriores quedaron definitivamente paralizadas. Este hecho, sumado al gran número de explotaciones abandonadas con anterioridad, provocó que entre las décadas de 1980 y 1990 quedaran inactivas la práctica totalidad de las minas andaluzas.

El tránsito al siglo XXI no supuso cambio alguno para el sector minero en Andalucía. La decadencia en la que había entrado en el último tercio del siglo anterior se hizo patente en estos últimos años con el declive de los sectores metálico y energético de la minería, debido fundamentalmente a dos factores: la escasez de recursos minerales debido al agotamiento de las minas y la grave problemática que supone la minería sobre el medio ambiente y la seguridad; la rotura de la balsa de la mina de Aznalcollar, en 1998, y sus graves consecuencias sobre el medio y la contaminación, dejó constancia de las principales problemáticas que suponen las explotaciones mineras sobre su entorno. Como contrapunto a este declive generalizado de la minería andaluza, se ha experimentado en los últimos años un incremento en la producción de rocas industriales y ornamentales, debido al auge que la construcción ha experimentado en los últimos años en Andalucía, especialmente en las zonas costeras de la comunidad.

El comienzo del siglo XXI trajo consigo una tendencia, continuada desde los últimos años de la década de los 90, alentadora para el sector minero en Andalucía. En los últimos años el precio de los metales, especialmente del cobre, han subido de tal manera que garantizan la reactivación de numerosas minas de la franja pirítica y la mina de Alquife.

En la siguiente lista se muestra las minas que volverán a producir hierro, cobre y zinc entre otros metales.

Mina	Provincia	Vida	Periódo	Situación	Compañía
Riotinto (Cerro Colorado)	Huelva	14 - 25 años	2015 - 2029	Autorizada (operativa a mediados de 2015)	EmedTartessus (Emed Mining)
Cobre Las Cruces	Sevilla	15 años	2009 – 2025	Operativa	Inmet Mining
Alquife	Granada	20 años		Proyectada (2016)	Minas de Alquife Holding
Aguas Teñidas	Huelva	11 años	2009 - 2020	Operativa	Trafigura (Matsa)
Masa Valverde	Huelva			En estudio	Cambridge Mineral Resources PLC
La Zarza	Huelva	15 años		Proyectada	Ormonde mining
San Telmo y Lomero-Poyatos	Huelva	15 años		Proyectada	Petaquilla Minerals
Tharsis	Huelva			En estudio	Ormonde mining
Extracción de hierro y cobre de los residuos de las minas de Tharsis	Huelva	4 años		Autorizada	Maprise SA
Sotiel Coronada	Huelva	8 años	2015 - 2023	Operativa	Trafigura (Matsa)
Aznalcóllar	Sevilla	19 años	2015 - 2034	Autorizada	México-Minorbis (Magtel)
Mina Magdalena	Huelva	15 años	2016 - 2031	Operativa (inicio producción 2016)	Trafigura (Matsa)
Minas de Cala	Huelva			Proyectada	

Tabla 1: Principales actividades mineras siglo XXI

Entre estas explotaciones, se encuentra Cobre Las Cruces, donde se encuadra el presente proyecto. Actualmente, Cobre Las Cruces es propiedad de First Quantum Minerals, tras la absorción de Inmet.

Esta mina presente en la provincia de Sevilla, muy cerca de Gerena tiene dos características que la distinguen del resto: Por un lado, la ley de cobre (% de cobre presente por tonelada de mineral procesado) es de las más altas del mundo, promediando casi un 6%, aunque dependiendo de la zona de explotación puede llegar a tener más de un 12% de ley, mientras que las minas de cobre más usuales, rondan una ley inferior al 1%. La otra cualidad es la pureza del cobre extraído, que es de un 99,999%, por lo que es conocida como la mina de “los cinco nueves”.

Como puede verse, empieza a notarse la importancia de la ley de cobre presente en el mineral, por lo que su control y seguimiento es de vital importancia durante el proceso de obtención de cobre. Es por ello, que durante todo el proceso, este parámetro está controlado y ese control férreo motiva el presente proyecto.

2. Descripción del proceso

2.1. Trituración.

Esta es la primera etapa operativa dentro del proceso productivo y su relevancia en la obtención de una buena liberación del elemento es imperativa.

La reducción de tamaño es la operación que se realiza con el objetivo de:

Obtener un tamaño del mineral para facilitar el transporte o el tratamiento de los productos

Facilitar operaciones puramente físicas, tales como distribución, dosificación, mezclas, aglomeraciones, etc.

Producir la liberación del elemento valioso, el cual se encuentra ligado íntimamente con el material estéril.

Permitir o facilitar reacciones químicas, cuya velocidad es normalmente función de la superficie expuesta, es decir, del grado de división de las materias sólidas.

El mineral de alimentación a la planta es transportado desde la mina por medio de camiones (Dumper) de 90 toneladas métricas y descargado en la Tolva de Alimentación, la cual tiene una capacidad de 135 toneladas vivas, que a su vez cuenta con una parrilla fija para retirar las piedras con sobretamaño.

En el proceso, se realizan dos operaciones con el fin de disminuir el tamaño, primero se realiza un machaque y, posteriormente, dos etapas de trituración.

Los equipos se dividen en machacadoras, trituradoras, molinos, molinos ultra finos y máquinas cortadoras. Las machacadoras y los trituradores realizan el trabajo más duro, romper grandes trozos de material sólido y transformarlos en pedazos pequeños.

Las principales máquinas de reducción de tamaño son las machacadoras de mandíbulas (tipo Dodge y tipo Blake) y las trituradoras secundarias y terciarias.

2.1.1 Machaque

Esta operación es la primera a la que se enfrenta el mineral. Posteriormente a la tolva de alimentación, se encuentra la machacadora de mandíbulas, cuyo objetivo es reducir el material desde un tamaño máximo de 1000 mm hasta el máximo posible, facilitando la posterior trituración. En una trituración/machaque primaria o gruesa, se reduce la piedra de 40" hasta 6-4".

La trituración es una operación mecánica, en la cual se aplica la fuerza suficiente a las partículas sólidas, de forma de que fallen las fuerzas de enlace de las partículas y estas se rompan. Las fuerzas inducidas normalmente son principalmente de compresión y de corte.

Para cumplir el objetivo de la reducción de tamaño, suelen emplearse equipos cuyas superficies de trituración se aproximan alternativamente, como en el caso de las mandíbulas y los conos giratorios.

Además, una máquina de trituración no solamente debe quebrar la roca sino también proveer la forma de exponer el material no triturado en la zona de fuerzas y por el otro lado descargar en forma continua el material triturado.

Con el fin de evitar altos consumos de energía, exceso de material muy fino en el producto y fallos mecánicos en las máquinas trituradoras, el proceso de trituración se divide en: trituración primaria, secundaria y terciaria

Machacadora de mandíbulas

Estos equipos se distinguen por tener dos placas que se abren y cierran como mandíbulas de animal. Las mandíbulas están dispuestas en un ángulo agudo y una es pivoteada de tal forma que se mueve respecto de la otra fija.

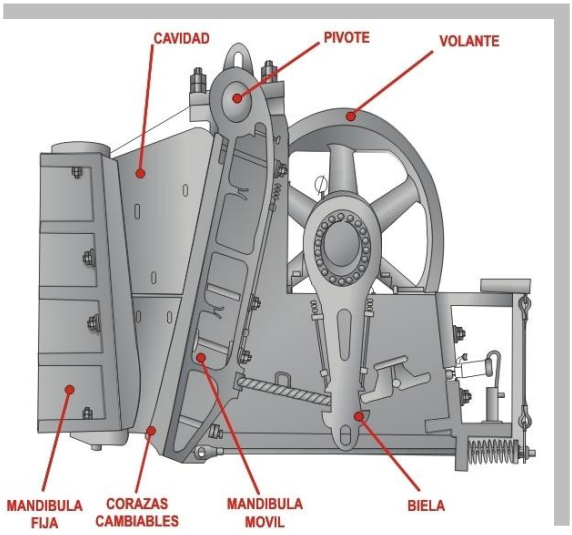


Imagen 1: Machacadora de mandíbulas

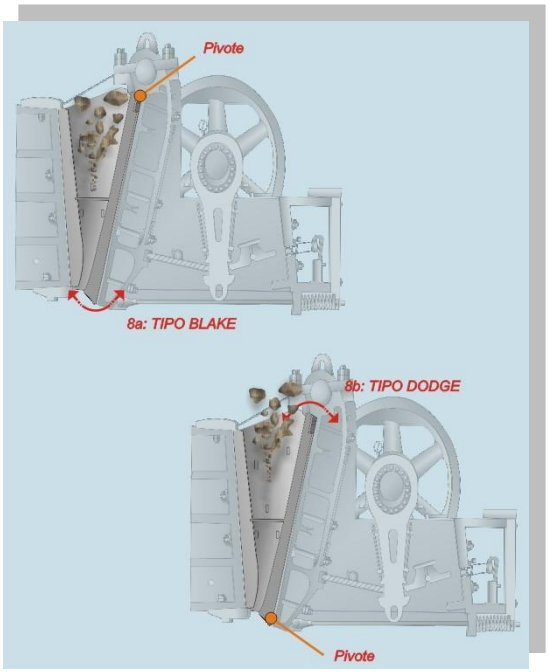


Imagen 2: Tipos de machacadoras

La capacidad de una machacadora de mandíbula es afectada por el área de la abertura de descarga en su posición abierta y por algunos factores tales como: característica de la roca, contenido de humedad, carrera de la mandíbula móvil, ángulo entre las mandíbulas y método de alimentación

2.1.2 Trituración

El producto del machaque primario se descarga a una criba secundaria y terciaria, previa clasificación. Del cribado y la clasificación, se hablará con posterioridad.

En la trituración intermedia o secundaria se reduce de 8-6" hasta ½-3/8 ", mientras en la tercera etapa o trituración fina se reduce a 1/4" o menos, aunque los límites especificados entre etapas no son absolutos.

Realmente, las razones de reducción comunes son de 8:1 para trituración primaria 6-8:1 para trituración secundaria y 4 - 6:1 para trituración terciaria, siendo los tamaños anteriores orientativos.

En principio, se aplica la trituración secundaria y en los casos en que la reducción de tamaño no alcance lo requerido por el proceso, es factible agregar una etapa terciaria antes de llevar el mineral al circuito de molienda, se trata del triturador terciario antes mencionado. Para todos los propósitos, los trituradores terciarios son de igual diseño que los secundarios excepto que tienen una abertura más cerrada.

El equipo más usado para la reducción de tamaño intermedio de minerales es el triturador de cono

Triturador giratorio cónico

Estos trituradores son Trituradores giratorios de cono. Los trituradores giratorios fragmentan los materiales por compresión, entre una pared cónica con movimiento excéntrico en el interior del espacio limitado, por la pared de un tronco de cono invertido.

El modo de acción del triturador giratorio es exactamente el mismo que el del machacador de mandíbulas, salvo que, gracias a un movimiento mecánico continuo se obtiene una sucesión ininterrumpida de acciones alternadas de presión.

El triturador giratorio trabaja de continuo en una mitad de su volumen, mientras que el machacador de mandíbula trabaja la mitad del tiempo en la totalidad de su volumen.

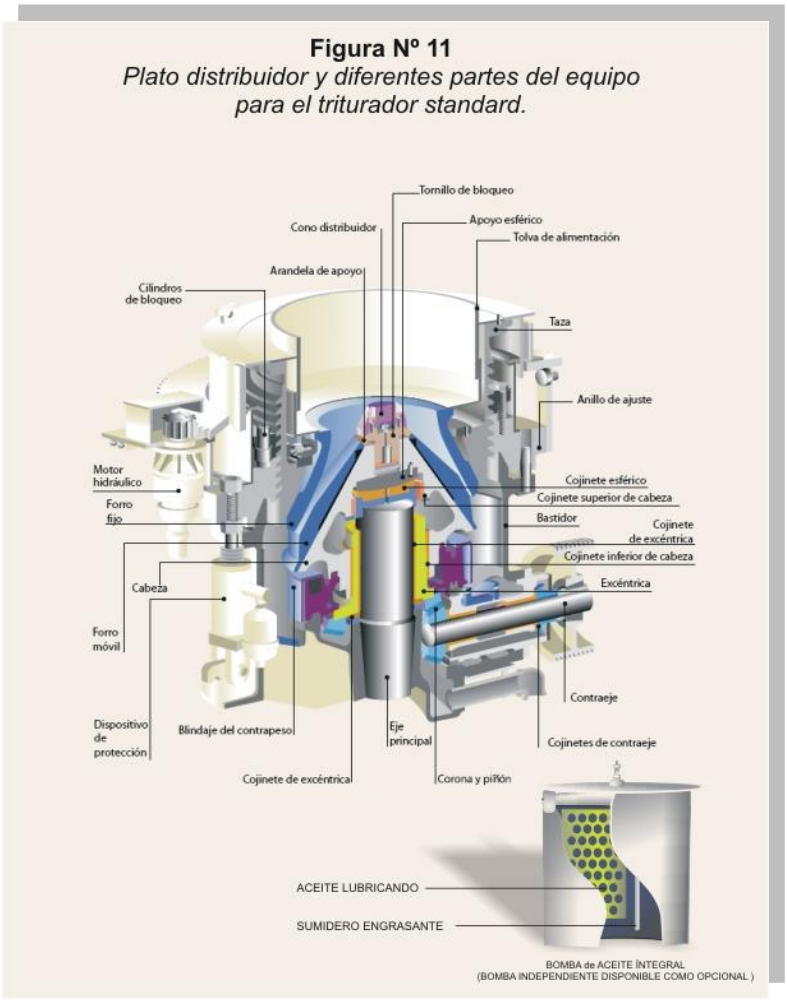


Imagen 3: Triturador giratorio cónico

2.1.3 Cribado

Dentro de la trituración del material, uno de los objetivos es la consecución de una alimentación de granulometría lo más homogénea posible, por ello para tal efecto se realiza la operación de cribado.

El cribado es el proceso en el cual una mezcla de partículas es separada en dos o más grupos según el tamaño de las partículas.

La separación se lleva a cabo haciendo pasar el material por una criba con orificios, las partículas de dimensiones inferiores a los agujeros pasan por los mismos y son clasificados como tamaños pequeños, mientras que los fragmentos mayores pasan por la superficie de la criba y se clasifican como tamaños grandes.

Como plataformas de cribado se emplean tamices de rejilla muy variable, desde grandes vigas de acero hasta rejillas finas con alambre, de un diámetro de hasta 0,001".

Los principales objetivos de esta operación son: prevenir la entrada de material fino al triturador, que el material grueso pase a la próxima etapa y que la granulometría final sea de tamaño uniforme.

Si se persigue la eficiencia máxima de esta operación, aproximadamente 95%, la capacidad se reducirá en aproximadamente un 25%. En la práctica puede considerarse normal una eficiencia del cribado del 85 – 90 %.

Criba de vaivén con vibrador de un eje

Este es la criba más ampliamente usado en la minería para separar tamaños intermedios.

Este tipo de criba está sostenida solamente por resortes y es accionado por un eje con pesos excéntricos apoyados en dos cojinetes, en la bandeja de la criba

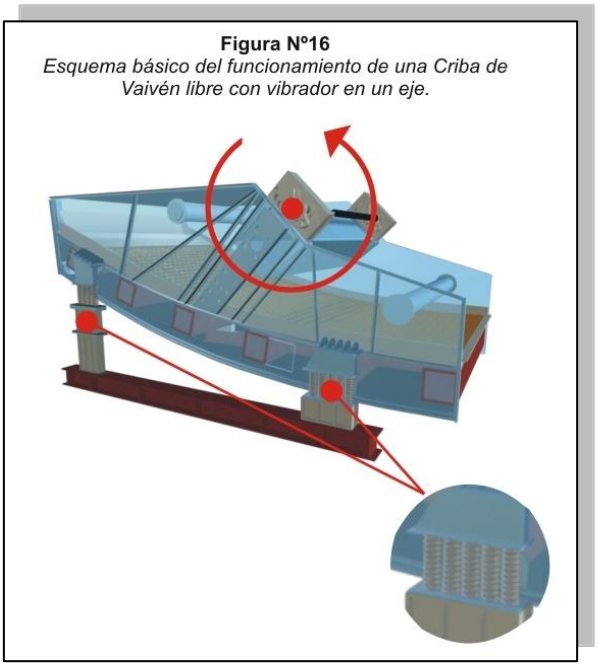


Imagen 4: Criba de vaivén

2.1.4 Variables de proceso

Durante la reducción del tamaño del mineral, existen una serie de perturbaciones que afectan al proceso, la perturbación principal es la calidad del mineral, otras perturbaciones son: la humedad del mineral, el contenido de arcillas, los cambios granulométricos, que afectan a la eficiencia de los equipos.

Hay que tener en consideración que el proceso de trituración es continuo, de modo que todas estas perturbaciones deben ser subsanadas durante la operación.

2.1.5 Equipamiento auxiliar

- Cintas transportadoras:

Son el equipamiento que permite transportar el mineral por las diferentes secciones del área de trituración. Las cintas transportadoras no tienen competencia en cuanto a capacidad de transporte. A una velocidad de 5 m/s, y un ancho de cinta de 1600mm, ésta puede descargar más de 100 toneladas métricas por minuto de material.

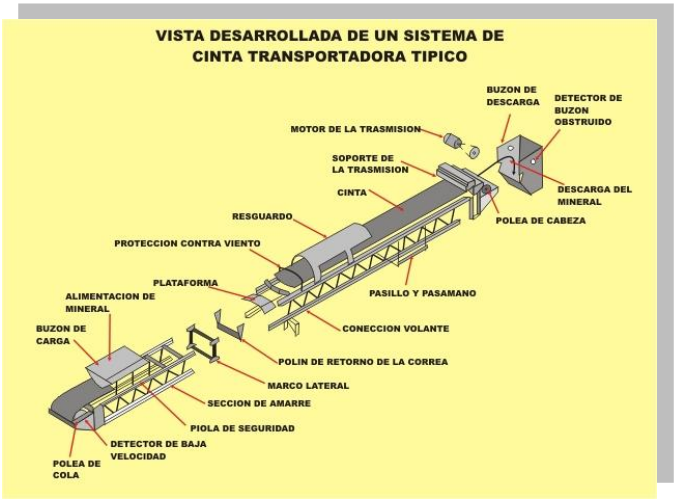


Imagen 5: Cinta transportadora

- Detector de metales:

Los Detectores de Metal, son equipos basados en tecnología de campos magnéticos y son utilizados en la minería para proteger los puentes ejes y las mandíbulas de los Trituradores de trozos metálicos que trae el mineral.

Imagen 6: Detector de metal

Para la retirada de los elementos metálicos se utilizan electroimanes.

- Alimentador de placas:

Es el alimentador de mejor servicio para productos gruesos. Son unas placas unidas articuladamente que se deslizan arrastradas mediante un tambor de cabeza motriz y retornan por otro tambor de cola.

Si está debidamente dimensionado, puede trabajar en el fondo de la tolva y no tiene dificultad para trabajar con materiales pegadizos.

Imagen 7: Alimentador y tolva

Imagen 8: Cinta y tambor

- Báscula

Una báscula está compuesta por una estación de pesaje montada en la cinta donde se transporta el mineral y posee un medidor de velocidad, entregando una señal al integrador que calcula la velocidad de la cinta transportadora, el flujo másico y el peso totalizado.

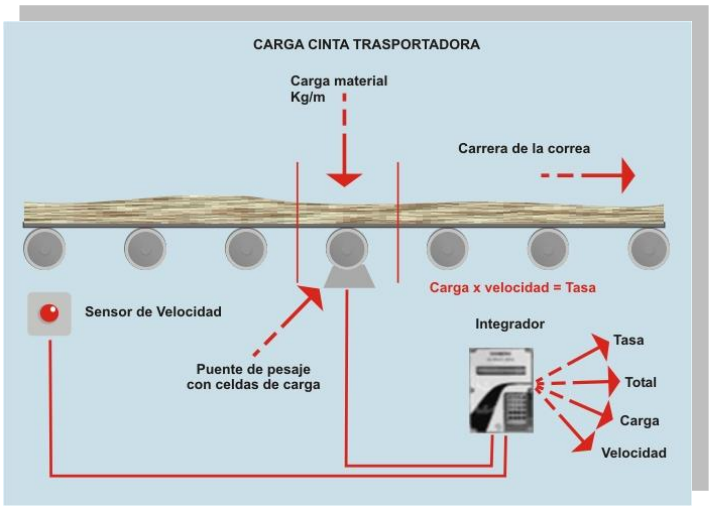


Imagen 9: Báscula

2.2 Molienda

La molienda es la última etapa en un proceso de reducción de tamaños. En esta etapa las partículas se reducen en tamaño por una combinación de impacto y abrasión, en este caso, por vía húmeda.

La operación se realiza en recipientes cilíndricos rotatorios llamados molinos de volteo. El medio de molienda puede estar compuesto de barras de acero, bolas, roca dura o en algunos casos, de trozos mismos de mineral. Siendo en este caso

En el proceso de molienda, partículas entre 5 a 20 mm se reducen en tamaño hasta partículas de 10 a 300 micras.

Esta operación tiene el objetivo de reducir el tamaño del mineral para liberar las partículas mineralizadas de la ganga o bien dejar las partículas expuestas para la acción de procesos de extracción o ataque químico posteriores.

La separación entre partículas que contienen el mineral (cobre) y el resto del material, ocurre en las etapas siguientes a la molienda que puede ser flotación o lixiviación.

La importancia de esta operación queda demostrada por el hecho que gran parte de la energía gastada en el procesamiento de un mineral es ocupada por la molienda.

Hasta el momento, todo el proceso de reducción de tamaño ha sido por vía seca, sin embargo, es ahora cuando, sobre todo por facilidad de manejo, se introduce agua, de modo que se forme una pulpa que puede ser bombeada. Esta pulpa se forma dentro del molino, donde se adiciona agua, el mineral a moler y otros componentes, como lechada de cal, para favorecer reacciones posteriores. Aproximadamente un 70% es el contenido en sólidos de la pulpa.

Molino de bolas

Los molinos, en general consisten en una carcasa cilíndrica o cónica que rota sobre su eje horizontal y que está cargada con medios de molienda, en este caso bolas de 80mm acero.

Los molinos de bolas pueden clasificarse según su medio de descarga, existiendo molinos de parrilla o molinos de rebose. El molino con descarga por rebose es el que se usa para la mayoría de las aplicaciones, debido a que es más simple de operar, como en este caso. Además presenta hasta un 15% menos de consumo eléctrico.

Varios factores afectan a la eficiencia de estos molinos. La densidad de la pulpa de alimentación debería ser tan alta como sea posible consistente con un flujo fácil a través del molino.

Es esencial que las bolas estén cubiertas con una capa de mineral. Una pulpa muy diluida incrementa al contacto metal-metal, dando un aumento de consumo de acero y una reducción de la eficiencia.

Los molinos de Bolas deberían operar entre 65-80% de concentración de sólidos (en peso), dependiendo del mineral, como en este caso, que operamos con un 70%.

La molienda que realiza el molino se denomina *semiautógena*, puesto que el mineral triturado se somete a reducción de tamaño en un molino adicionando bolas de acero como medio de molienda.

Los circuitos de molienda se dividen en *cerrados* y *abiertos*. En la industria minera casi siempre se usa circuito cerrado (molino de bolas) en el cual el material del tamaño requerido se remueve en un clasificador, retornando los tamaños mayores al molino.

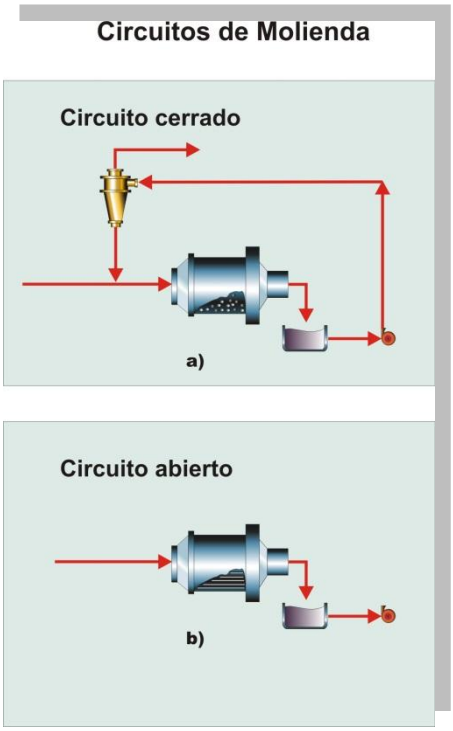


Imagen 10: Circuitos de molienda

2.2.1 Clasificación: Hidrociclones

El hidrociclón corresponde a la categoría de separador hidráulico que utiliza la "fuerza centrífuga" como base de la separación. El hidrociclón se puede definir como un dispositivo que permite la clasificación de partículas sólidas en base a las características de tamaño y densidad.

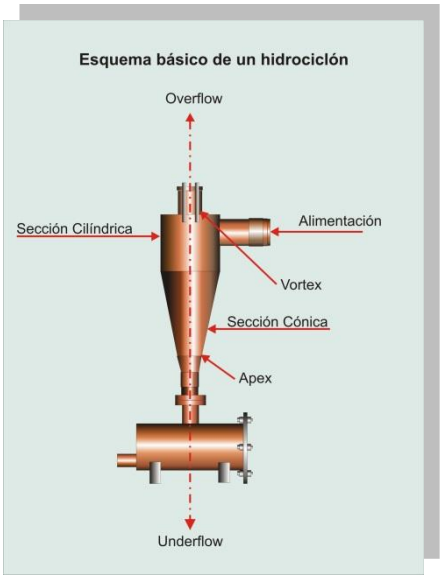


Imagen 11: Hidrociclón

No posee elementos móviles, lo que implica una gran ventaja en cuanto a costos de operación y mantenimiento.

El overflow o rebose es el material fino, que cumple especificaciones de tamaño y que continúa el proceso, mientras que el underflow o hundido, se recircula y vuelve a entrar en el molino para reducir su tamaño.

En este caso el rebose de ciclón es el material que continuaría el proceso y es donde se produce uno de los controles más férreos en cuanto a los analizadores objeto del presente proyecto se refiere, puesto que es aquí donde se produce la medición de la Ley de cobre que entra en el proceso.

2.2.2 Equipos anexos

En esta etapa del proceso existen otros equipos necesarios como son:

- Bombas: Existen 2 bombas centrífugas de tipo axial por cada línea que bombean la pulpa a lo largo del circuito de molienda.
- Espesador de Molienda: A este equipo llega la pulpa rebosante del clasificador de ciclones, fluyendo por gravedad. Al espesador se agrega floculante. Los sólidos se decantan en el fondo del espesador y el hundido de este es bombeado al tanque de alimentación a lixiviación. El rebose del espesador es parte del agua del proceso reciclada y devuelta al circuito de molienda. El objetivo de este equipo es concentrar la pulpa que proseguirá por la planta, de modo que esté entorno a unos 2200 g/l.
- Analizadores de tamaño: Equipos dedicados a analizar la distribución granulométrica de la pulpa del circuito, tanto a la entrada del clasificador de ciclones, como a la salida del rebose del ciclón, controlando así el tamaño de partículas que pasarán posteriormente a lixiviación.
- Analizador Courier 5SL: Este analizador es objetivo del presente proyecto, cuya función es analizar el contenido de Cobre, Hierro y otros minerales minoritarios en la alimentación a la lixiviación. Con posterioridad, se describirá este equipo con mayor detalle.

2.3 Lixiviación

El principal objetivo del proceso de lixiviación es disolver el cobre, contenido principalmente en forma de *Calcopirita* ($CuFeS_2$), *Calcosina* (Cu_2S), *Covelina* (CuS), bajo condiciones atmosféricas. Para la estimación del balance de masas, se ha utilizado una ley de cobre en torno a un 6%.

Las principales reacciones de lixiviación son:

$$Cu_2S + 2Fe_2(SO_4)_3 \Rightarrow 2CuSO_4 + S + 4FeSO_4$$

$$CuS + Fe_2(SO_4)_3 \Rightarrow CuSO_4 + S + 2FeSO_4$$

$$S + 3Fe_2(SO_4)_3 + H2O \Rightarrow 6FeSO_4 + 4H_2SO_4$$

$$2FeSO_4 + H_2SO_4 + ½\ O_2 \Rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + H_2O$$

$$FeS_2 + H_2O + 3\,½\,O_2 \Rightarrow FeSO_4 + H_2SO_4$$

El mineral molido es bombeado desde el espesador de molienda, al circuito de lixiviación. La lixiviación se llevara a cabo en ocho reactores de lixiviación atmosférica conectados en serie. Dependiendo de las disponibilidades y requerimientos normales de mantención, 7 siete de ellos estarán en operación la mayor parte del tiempo

La lixiviación se lleva a cabo a 90ºC bajo condiciones de oxidación ácidas, usando una corriente de [1]refino circulante proveniente del circuito de extracción por solventes que más tarde será explicado con detalle.

La alimentación para los reactores de lixiviación se prepara en el tanque de alimentación, en contacto con el espesador de molienda.

El refino que entra en el circuito de lixiviación está dividido entre el tanque de alimentación a lixiviación y el primer reactor de lixiviación. La temperatura de este refino es de 87ºC.

Durante el proceso de lixiviación se busca un tiempo de residencia de unas 7-8 horas para lograr una extracción de cobre del 92,5% y una recuperación del 91,7% en los cátodos de cobre.

La pulpa fluye por gravedad a través de la cascada de reactores de lixiviación.

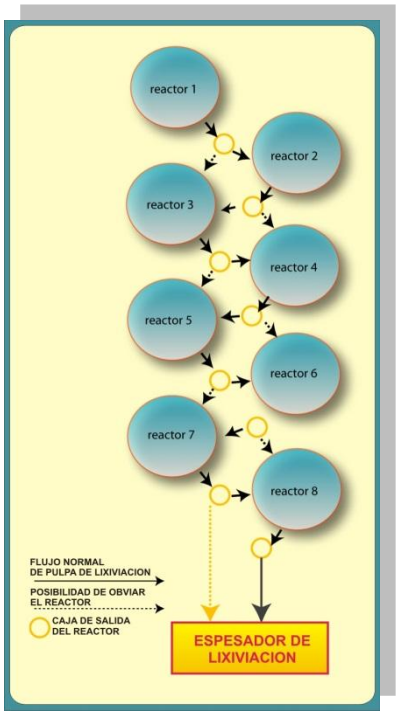


Imagen 12: Flujo de lixiviados

La recuperación de calor en la lixiviación es económicamente importante para el ahorro de vapor en el precalentamiento de refino. La reacción de oxidación de pirita genera la mayor parte del calor que se usa en la planta de proceso. El exceso de calor es extraído por un circuito de agua de refrigeración, que luego es utilizada para calentar las corrientes de refino, [2]PLS primario y agua de lavado de filtros.

Por último, el lixiviado de los reactores pasa al espesador de lixiviación, donde el rebose se envía a una serie de torres de enfriamiento, para mantener la solución a unos 34ºC, para evitar la degradación del solvente orgánico que usaremos en la siguiente etapa del proceso.

La solución enfriada pasa a un espesador de yeso, cuya función básicamente es clarificar la solución de PLS que entra a la primera etapa de extracción por solventes.

Existe un proceso paralelo llamado biolixiviación. La biolixiviación se define como el ataque y solubilización de un mineral por acción bacteriana, cuando la superficie del mineral donde reside la bacteria se humedece, ésta desarrolla toda su actividad oxidando espontáneamente a la pirita y a otros sulfuros metálicos, generando Fe(III), sulfatos solubles y ácido sulfúrico.

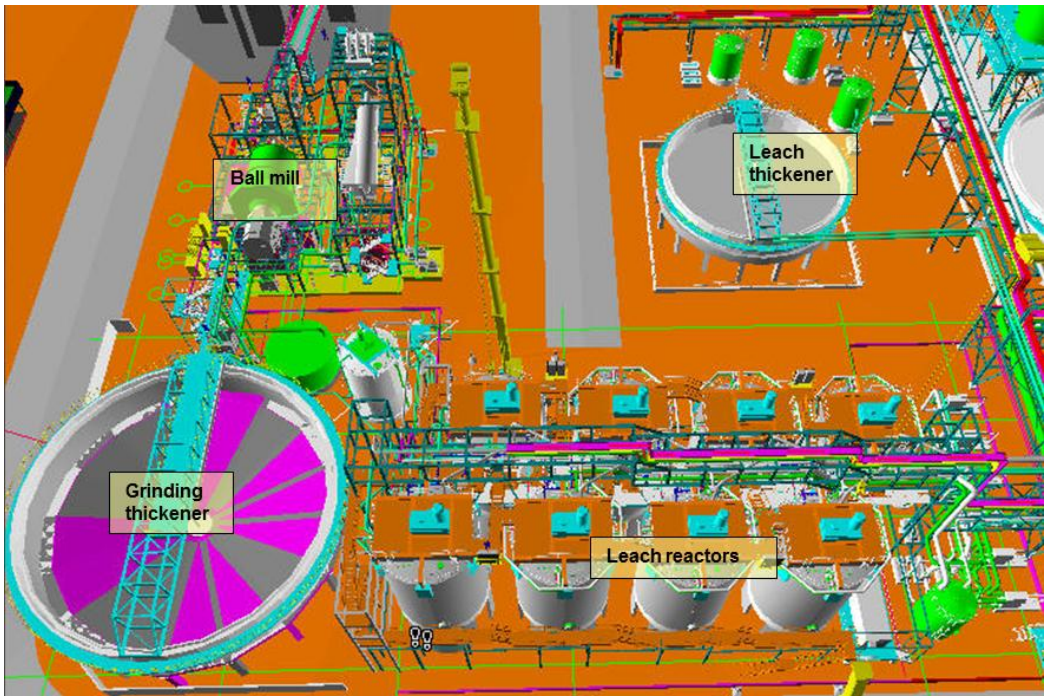


Imagen 12: Área de lixiviación

Tanque de alimentación a lixiviación.

En este tanque se prepara la alimentación a los reactores de lixiviación. Parte de la reacción de lixiviación se producirá en este tanque. Aquí se agrega la mayor parte del ácido sulfúrico, lo que causará un leve aumento de la temperatura. El objetivo es disolver los minerales de carbonato lo más completamente posible, estando la temperatura del tanque sobre los 73ºC.

Este tanque es de hormigón, recubierto de goma/ladrillos refractarios, con una capacidad de 80m^3, lo que conlleva un tiempo de residencia de unos 30 min. Consta de un agitador y de deflectores.

En este tanque se produce gran parte de la lixiviación de los carbonatos, lo que da origen a una importante cantidad de gases, que deben ser evacuados.

Reactores de lixiviación.

El propósito es lixiviar cobre a partir del mineral en condiciones atmosféricas, usando solución férrica oxidante ácida y gas de oxígeno.

Los reactores tienen un volumen activo de 350 m^3 y son de hormigón en su carcasa y constan de un revestimiento de goma y ladrillos ácidos.

La comunicación entre los reactores se produce por medio de cajas de transferencia. Los reactores están situados en dos filas, estando sus alturas graduadas de tal modo que cada reactor está 500mm más bajo que su antecesor. Por estas cajas de transferencia fluye la pulpa por gravedad, llegando al siguiente reactor.

Puede verse en la imagen 11 como cualquiera de los reactores puede obviarse por necesidades del proceso o mantenimiento.

Espesador de lixiviación.

Es un espesador de 200m^3 de capacidad, fabricado con una carcasa de hormigón y un revestimiento de goma y ladrillos a prueba de ácido. La finalidad de este espesador es aumentar la densidad de la pulpa a un nivel adecuado para las operaciones de filtración.

Torres de enfriamiento.

Las torres de enfriamiento enfrían la solución de lixiviación hasta los 34ºC. Se realiza con objeto de que no degrade a la fase orgánica posterior en la etapa de extracción por solventes y al mismo tiempo, evaporar agua del circuito de lixiviación. Simultáneamente, se precipita yeso para minimizar la formación de escamas de yeso en los circuitos.

Espesador de yeso.

Es un espesador de tipo [3]Outokumpu. Es mayor que el espesador de lixiviación, con una capacidad de 1760m^3, construido en hormigón y con un revestimiento de goma. La función principal es la clarificación de la solución PLS que entra en el circuito de extracción por solventes.

Filtros de banda al vacío.

Estos filtros son del tipo de banda de goma al vacío. Constan de un lado de vacío, a unos 0,35 bar y de dos zonas de lavado. La humedad de la torta que abandona los filtros está en torno al 10%.

Esta torta es denominada residuo, y la diferencia entre la ley de cobre de entrada y la ley de cobre de esta torta es un balance de materia de cobre que determina la recuperación por lixiviación.

Analizadores en continuo

Los analizadores suministran información de la composición de las corrientes de un modo continuo. Estos datos son muy importantes cuando se trata de mantener el proceso en equilibrio y de asegurar una operación constante. Nuevamente, estos analizadores serán objeto del presente proyecto y se describirán posteriormente con mayor precisión. En esta área se encuentras el Courier de solución, 5HX para ensayos de solución y los valoradores OTI 400 para ácido libre e ión ferroso.

[1]Refino: El refino es una corriente de retorno proveniente del sistema de extracción por solventes, con una temperatura en torno a los 38ºC, para no degradar la fase orgánica y minimizar el riesgo de incendio. Esta corriente se recircula con dos objetivos: maximizar la recuperación de cobre, puesto que esta corriente aún posee cantidades de este metal y aportar hierro y acidez a la solución de lixiviación.

[2]PLS: Es la solución resultante de la lixiviación en los reactores tras su paso por el espesador de lixiviación (el rebose del espesador). Existen dos corrientes de PLS, una primaria o rica que viene directamente del espesador de lixiviación y otra secundaria, menos concentrada, proveniente del espesador de neutralización.

[3]Espesador Outokumpu: Espesador fabricado por la empresa Outotec concretamente para la deposición del yeso.

2.4 Neutralización y pre-neutralización

2.4.1 Pre-neutralización

Con el fin de controlar el balance de agua y el nivel de algunos elementos minoritarios, como el Zn, se extrae una purga de solución del refino de lixiviación del circuito de proceso. La purga es guiada a través del proceso de pre-neutralización hasta el proceso de extracción por solventes secundario con el fin de maximizar la recuperación de cobre. También se realiza idéntico proceso con el agua de lavado del área de extracción por solventes.

El principal objetivo del área de pre-neutralización es ajustar el pH de la alimentación de PLS de la extracción secundaria al nivel apropiado para que se puedan obtener niveles aceptables en la recuperación de cobre. La alimentación de PLS al proceso de extracción secundario consta de purga de refino, agua de lavado del área de extracción por solventes, agua de los filtros de lixiviación y soluciones varias.

La reacción que se produce es:

$$H_2SO_4 + Ca(OH) \Rightarrow CaSO_4{*}2H_2O$$

La operación se produce adicionando hidróxido de calcio o “lechada de cal” al primer reactor de pre-neutralización, donde se utiliza cal excesiva con el fin de que aumente la tasa de precipitación, la pulpa rebosante pasa al segundo reactor de pre-neutralización, donde el pH es ajustado al 1,3 – 1,4 mediante la adición de refino a lo largo de los 2 reactores del área de pre-neutralización.

El rebose de estos tanques pasará al espesador de pre-neutralización, donde se le adiciona un floculante. El rebose de este espesador es bombeado hacia los filtros de pulido, lugar donde se remueven los posibles restos de yeso. La solución filtrada unida al agua de lavado de los filtros constituye la solución PLS secundaria.

En cuanto al hundido del espesador, una parte se recircula a los reactores de pre-neutralización con el fin de ayudar en la deposición de partículas y el resto se rebombea a la alimentación de la lixiviación o al espesador de molienda.

2.4.2 Neutralización

El objetivo de la planta de neutralización es tratar el refino secundario originado en el proceso de extracción por solventes de cobre. La neutralización se lleva a cabo utilizando lechada de cal, oxidación con aire, precipitación de yeso e hidróxidos metálicos, floculación y separación sólido/líquido.

El refino secundario a tratar se bombea a dos reactores instalados en serie. En estos reactores, el refino secundario se combina con una pulpa reciclada y una mezcla de cal para alcanzar la neutralización. El valor de control de pH preestablecido variará entre 8,5 y 9,5. Como resultado de esta neutralización, los metales pesados precipitarán como hidróxidos metálicos y el sulfato, como sulfato de calcio dihidratado.

En estos dos reactores también se inyecta aire para facilitar la oxidación del ión ferroso a férrico.

Después de la neutralización y oxidación, la pulpa rebosa hacia el espesador para la separación sólido/líquido, donde se agrega polímero para mejorar la precipitación y facilitar la clarificación.

El agua clarificada se transfiere hacia un tanque de almacenamiento antes de ser vertida al río Guadalquivir, pudiendo usarse también en la planta de proceso o en el regadío de caminos.

2.5 Extracción por solventes

El principal objetivo de la sección de extracción por solventes es transferir cobre soluble de la alimentación (Solución de Lixiviación Cargada) al lado de circulación de electrolito limpio.

La Extracción por Solventes Primaria consiste de un tren que tiene tres mezcladores-decantadores de extracción operando en serie, dos mezcladores-decantadores de re-extracción, un mezclador-decantador de lavado de orgánico y un tanque de orgánico cargado (TK-001). Los mezcladores-decantadores son del tipo OutoCompact.

La solución PLS clarificada, enfriada y filtrada que contiene alrededor de 40 g/L de cobre es bombeada del tanque de almacenamiento de solución de lixiviación a través de filtros de pulido de solución de lixiviación y de un calefactor de ajuste al área de SX.

El ordenamiento por etapas está dado por el flujo de transferencia de cobre, es decir:

- E1 es la primera etapa en la que la solución de PLS entra a la extracción y el orgánico cargado abandona la etapa de extracción
- S1 es la primera etapa en la que el orgánico cargado es re-extraído por el electrolito y el electrolito rico abandona el circuito de SX.

En la etapa E1, la solución PLS es mezclada con solución orgánica semi-cargada proveniente del mezclador-decantador de E2 y parte del contenido de cobre de la solución PLS es extraído a la fase de orgánico mediante el uso de un reactivo orgánico selectivo en cuanto al cobre (32 v-%) mezclado con un diluyente tipo parafina.

Los mezcladores-decantadores de extracción están diseñados para operar con una razón de fase de orgánico a acuoso cercana a 1:1.

La fase de acuoso proveniente de la etapa E1 continúa a la unidad mezclador-decantador E2, donde hace contacto con la solución de orgánico proveniente del mezclador-decantador E3, donde toma contacto con la solución de orgánico estéril. Alrededor de un 70% del contenido de cobre de la solución PLS es transferido ahora desde la fase de acuoso a la fase de orgánico. La recuperación por extracción varía, dependiendo de la acidez de la solución PLS y del contenido de cobre. La solución de refino que contiene 12 g/L de cobre fluye por gravedad desde la etapa E3 a la corriente del post decantador de refino.

La solución PLS contiene impurezas como el hierro y cloruro, las que son dañinas al proceso de Electro-obtención. La transferencia de estas impurezas al electrolito de cobre se minimiza con la ayuda de limpieza (scrubbing) en el tanque de orgánico cargado y mediante el uso de un mezclador-decantador de lavado. Esto constituye la etapa W.

El objetivo de la etapa W es lavar y diluir las impurezas que han sido transferidas químicamente y en la fase de orgánico en forma de arrastre acuoso.

Una porción del electrolito pobre también puede ser purgada a la etapa de lavado (W) para luego ser cargada al tanque orgánico, donde suministra acidez para la limpieza.

Los flujos lavados de orgánico cargado provenientes de la etapa W son llevados a la etapa de re-extracción S1, donde entran en contacto con la solución de electrolito semi-rica proveniente del mezclador-decantador S2. El cobre es transferido devuelta a la fase acuosa con ayuda de la diferencia de acidez entre las fases. El electrolito rico que contiene cerca de 50 g/L de cobre fluye por gravedad desde la etapa S1 al área del patio de tanques, continuando la solución de orgánico parcialmente re-extraída su curso a la etapa S2, donde es mezclada con solución electrolítica pobre bombeada desde el área del patio de tanques. El electrolito pobre contiene cerca de 34 g/L de cobre y 175 g/L de ácido sulfúrico.

Mezclador-decantador

El mezclador-decantador consta a su vez de 3 equipos distintos:

2.5.1 Unidad DOP

Una unidad DOP (“Dispersión Overflow Pump – Bomba de Rebalse por Dispersión”) consiste de un cilindro de succión con un borde de rebalse cónico, una turbina, un estabilizador de flujo y un tanque externo cilíndrico provisto de un deflector.

Se basa en el uso de una turbina de baja velocidad y de tamaño relativamente grande. Las soluciones de alimentación entran al cilindro de succión de la unidad DOP a través de cañerías horizontales. El primer contacto de micción entre las soluciones acuosa y orgánica tiene lugar en la caja de la turbina, donde comienzan de inmediato y vigorosamente tanto en las reacciones químicas como en las de transferencia de masa.

Un tiempo de retención típico en la caja de la turbina tiene una duración de 3 a 5 segundos, mientras que en el tanque externo ese tiempo dura cerca de un minuto. La intensidad de mezclado en el tanque externo es igual a la de los mezcladores principales. La dispersión fluye al tanque externo, suministrado con estabilizador de flujo y deflectores en la pared externa del tanque. La intensidad de micción en la unidad DOP es del mismo nivel que la de las unidades mezcladoras. La dispersión fluye a través de un canal de salida a la unidad mezcladora.

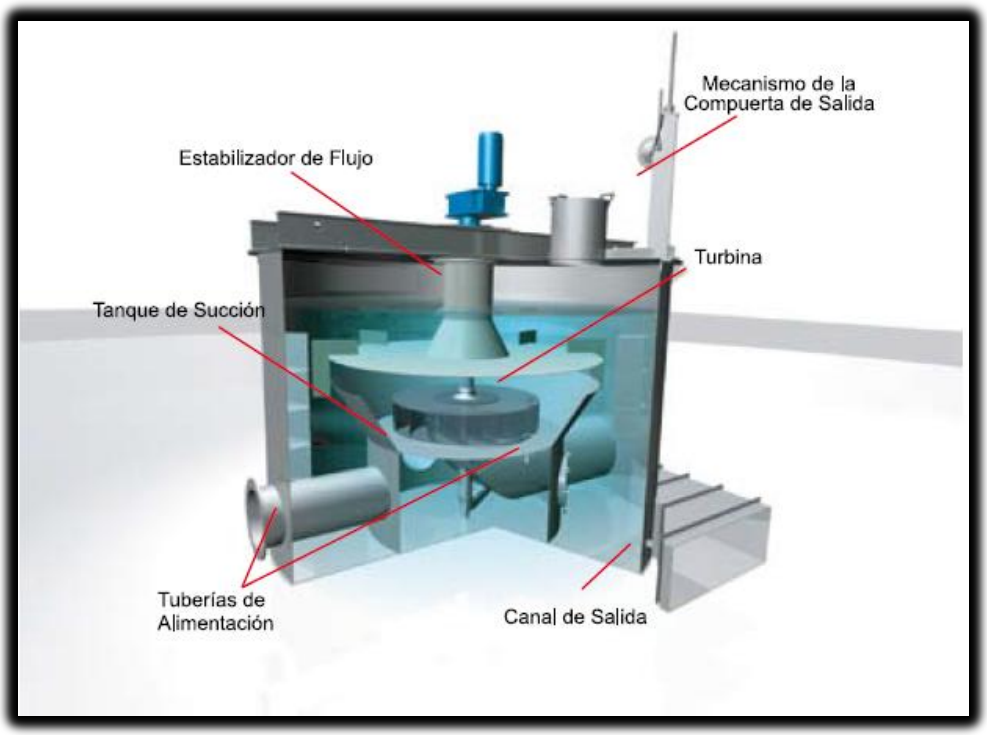


Imagen 13: Unidad DOP

2.5.2 Mezclador Spirok

Los mezcladores Spirok están diseñados para asegurar una operación de mezcla suave y uniforme al nivel necesario para la debida formación de dispersión que se traducirá en la debida tasa de transferencia de masa. Grandes agitadores helicoidales mantienen una circulación vertical a través de la totalidad de los mezcladores a bajas velocidades de rotación.

La unidad mezcladora consiste en dos tanques mezcladores cilíndricos provistos de deflectores y equipados de agitadores Spirok helicoidales dobles y de un canal de subida, conectando este último el último tanque del mezclador con el decantador. La estructura copa en- copa de la

cubierta del tanque del mezclador impide que el aire sea incorporado al interior de la zona de dispersión.

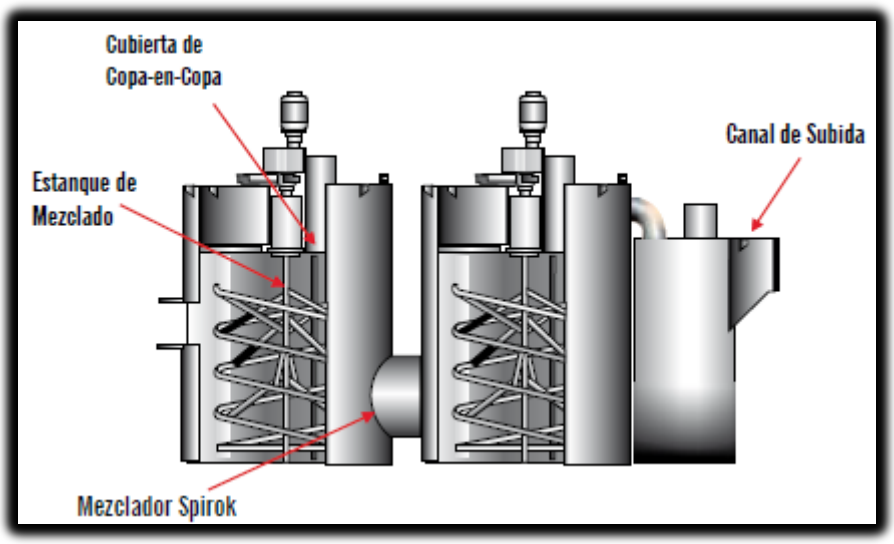


Imagen 14: Mezclador

2.5.3 Decantador Outocompact

La filosofía de operación del decantador OutoCompact se basa en la idea de lograr una capa de dispersión profunda y densa en el extremo de alimentación del decantador. Esta capa de dispersión filtra pequeñas gotitas, entregando una mayor flexibilidad para que se puedan manejar flujos de alimentación mayores al no permitir que la dispersión y la fase orgánica separada se esparzan por todo el área de decantación en forma de capas de grosor uniforme. El decantador OutoCompact también contribuye a que se logren altas eficiencias de etapa debido a un tiempo prolongado de retención de dispersión y a una decantación óptima de las capas de dispersión gruesas.

Un canal de subida vertical y una distribución guiada de la alimentación de dispersión.

- Un tanque de decantación profundo
- Distribuidor de Flujo y barreras
- DDG (varios conjuntos)
- Cañería(s) de recirculación acuosa separada (s) del resto del decantador
- Fondo del decantador inclinado
- Corriente abajo, canaletas libres de filtraciones para fases separadas de orgánico y acuoso.
- Cañerías de overflow conectadas para la solución acuosa separada.
- Salidas horizontales laterales para soluciones de descarga.

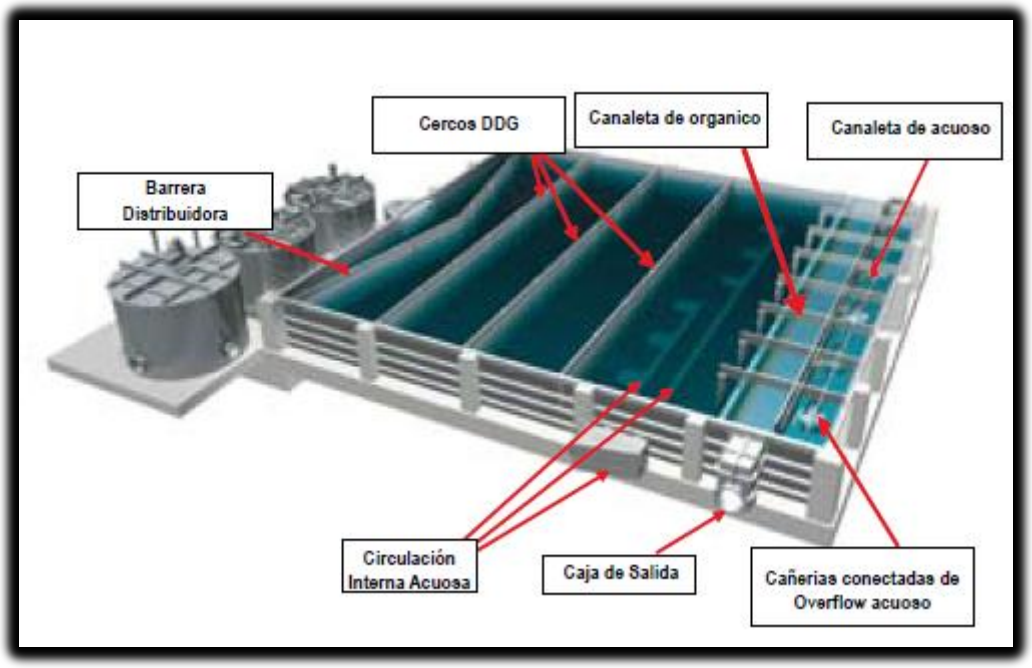


Imagen 15: Decantador Outocompact

2.6 Electro-Obtención o Electrowinning.

Este es el último proceso de la planta. En este paso, el cobre que viene en disolución electrolítica, se deposita en los cátodos mediante la aplicación de una corriente eléctrica, llegando al producto final, las placas de cobre puro que se venden comercialmente.

El electrólito proveniente de SX, y que ingresa a las celdas de EW (Electro Winning) de cobre presenta por lo general la siguiente composición química:

Cobre : 40 – 48 gpl

Ácido : 140 – 180 gpl

Fe total : 0,5 – 1,5 gpl

Cloruro : < 30 ppm

Mn : 30 – 80 ppm

Las reacciones químicas que se producen son las siguientes:

- En el cátodo: $Cu^{2+} + 2e^- = Cu$, con 0,34 V
  $Fe^{3+} + e^- = Fe^{2+}$, con 0,77 V
  Y de forma secundaria: $2H^+ + 2e^- = H_2$, con 0 V

- En el ánodo: $H_2O = 1/2O_2 + 2H^+ + 2e^-$, con 1,23 V.
  $Fe^{2+} = Fe^{3+} + e^-$, con 0,77 V.
  Y de forma secundaria: $Pb + SO^{-4} = PbSO_4 + 2e^-$, con -0,36 V
  $Pb^{\pm 2} + 2H_2O = PbO_2 + 4H+ + 2e^-$, con 1,46 V
  $Mn^{+2} + 4H_2O = MnO_4^- + 8H^+ + 5e^-$, con 1,51 V

$$2Cl^- = Cl2 + 2e$$
$$Co+2 = Co+3 + e$$

La presencia de hierro se justifica puesto que favorece la conducción de la electricidad, siempre teniendo en cuenta que las concentraciones están controladas.

Lo mismo ocurre con las impurezas, elementos como el Cloro, pueden producir "pitting", que es un efecto por el cuál las placas de cobre ya depositado se quedan adheridas al acero del cátodo, dificultando mucho su despegue, o el Azufre, que disminuye la calidad de los cátodos y presenta un impacto ambiental, sobre todo cuando el cobre se funde posteriormente. Existen diversos métodos para eliminar estas impurezas, como puede la adición de un agente precipitante en el caso del Cloro o lavados a 70-80ºC del cátodo para la eliminación del azufre.

Celdas de electro-obtención o electrolíticas.

Cuando se habla de cátodos, nos referimos a una parte de las celdas de electro-obtención. Como se explicó anteriormente, basándonos en el potencial redox de las sustancias, se aplica una corriente eléctrica tal que deposite el cobre. Esta corriente se aplica a unas celdas, las cuales están en contacto con la solución ácida que contiene el cobre. Dichas celdas contienen una serie de ánodos (donde algunos elementos se oxidan) y de cátodos (donde se reduce y queda adherido el cobre).

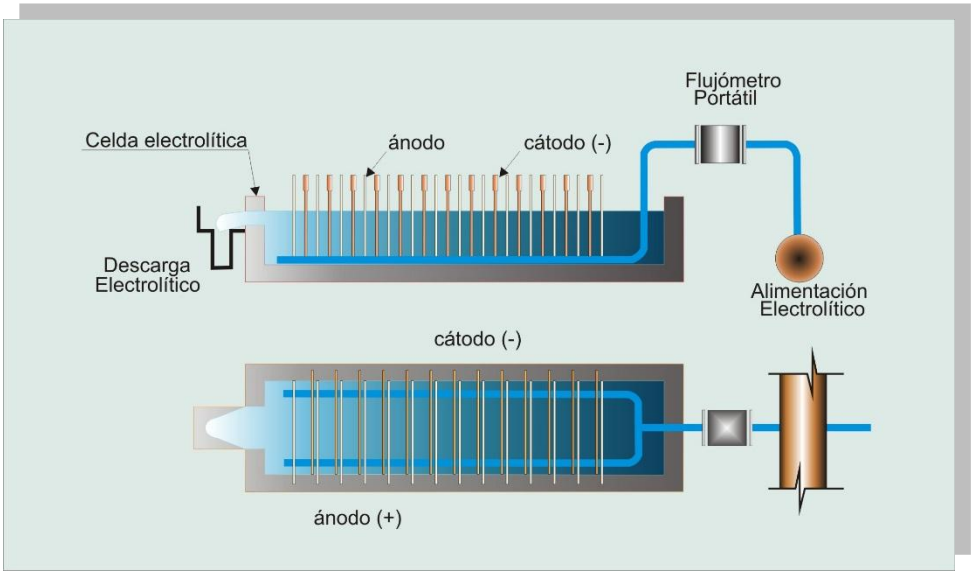


Imagen 16: Celda electrolítica

Cada placa de cobre adherida a los cátodos tiene $1m^2$ de área y un grosor de unos 0,7mm. Un polipasto lleva los cátodos a una zona donde se cimbrea y se separa la placa de cobre del cátodo, para que pueda volver a ser utilizado.

Tanto los cátodos como los ánodos son de acero inoxidable 316L de entre 3 y 3,3m de grosor y 1,2 m^2 de superficie.

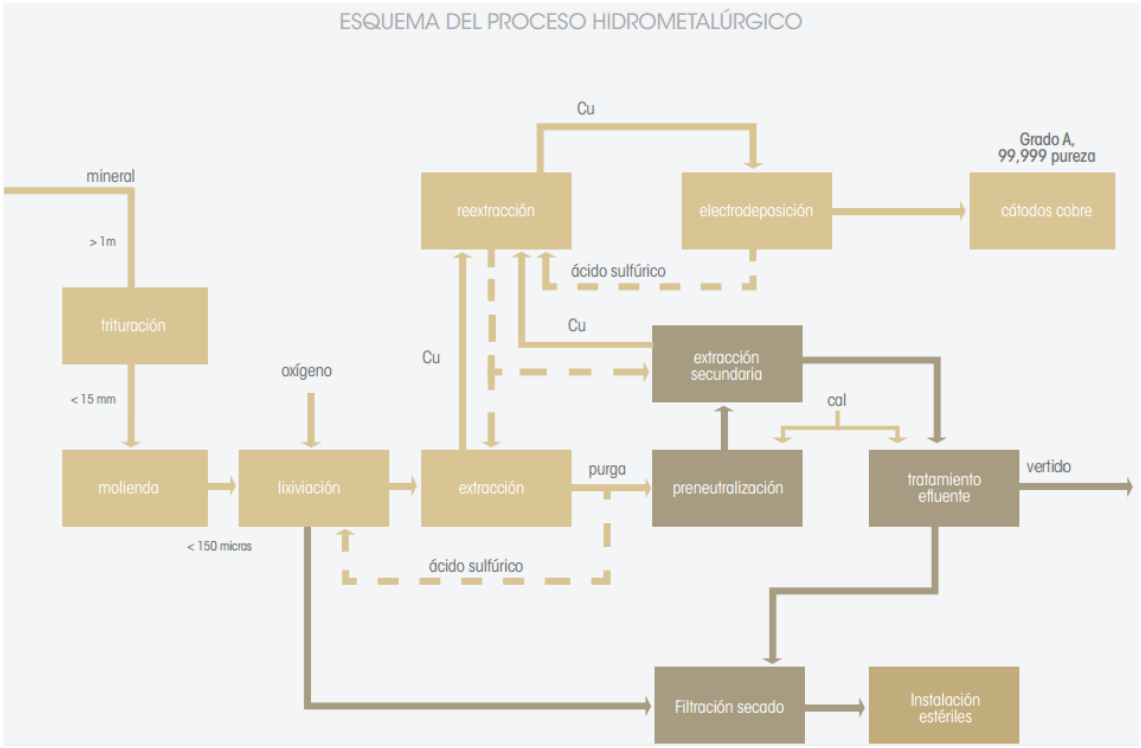


Imagen 17: diagrama general de proceso

3 El control del proceso y el control de calidad

Durante la operación de extracción por solventes y la electro-deposición, los ratios de rendimiento son altísimos, sobre un 91,7%, debido principalmente a que son procesos muy extendidos en el mundo de la metalurgia y tienen un largo bagaje industrial. Además, en el caso de la extracción por solventes, la fase orgánica está especialmente diseñada para las condiciones de operación de la planta. Esto nos lleva a pensar, que la etapa más crítica en la planta es la de lixiviación. Es un proceso novedoso, que requiere del control de muchos parámetros y que debe ajustarse muy bien según cuales sean las condiciones de proceso.

Las condiciones de proceso, en general, se intentarán que siempre sean las mismas, pero la naturaleza del mineral puede cambiar durante la evolución y el avance del proceso extractivo, por lo que ello hace que las condiciones sean cambiantes y, por tanto, la lixiviación puede verse afectada.

Los parámetros que fundamentalmente alteran la lixiviación son: la ley de cobre y el ratio Ferroso/Férrico. El primero, como no podía ser de otra forma, nos indica cómo va a producirse la reacción y el segundo es un parámetro importantísimo, puesto que cataliza (el ferroso) la lixiviación del cobre.

En cuanto a la ley de cobre, nos indica cómo va a producirse la reacción puesto que el diseño de la planta está pensado para que la lixiviación del cobre ocurra entre los 3 primeros reactores, siempre que la ley de cobre se encuentre en torno al 5%, dándose en el resto reacciones secundarias, antes expuestas, algunas de ellas importantes, como el paso de ferroso a férrico, con el fin de reintroducirlo luego a la lixiviación por medio de las corrientes de refino.

Como puede verse, el control de estos parámetros es fundamental para llevar a cabo una correcta lixiviación y es aquí donde los analizadores Courier juegan un papel muy importante.

Estos analizadores en continuo reflejan estos parámetros para que, desde el control de operaciones, se puedan realizar las operaciones necesarias. Existe un Courier (5SL) para Sólidos (pulpa) y otro para las corrientes puramente líquidas (Courier 5HX). El de sólidos se encuentra instalado antes de los reactores de prealimentación, es decir, entre ellos y la salida de finos del ciclón (rebose de ciclón), por lo que controla la entrada a la lixiviación del mineral. El Courier de líquidos se encuentra situado tras el tren de reactores, antes del espesador de lixiviación.

3.1 Analizadores Courier

Los muestreadores primarios del equipo se usan para muestrear el proceso. Una muestra primaria representativa de70-300 l/min circula en modo "fast loop" hasta el muestreador secundario y retorna a un punto adecuado del proceso. La pérdida de carga de la muestra es de solo 1 metro. Las muestras primarias no se cruzan entre sí, por lo que pueden procesarse de modo normal.

Para el adecuado control del proceso, cada corriente controlada por este analizador debe reportar un dato cada 15 minutos. En este tiempo el equipo debe seleccionar una muestra, medirla, devolverla al proceso y lavar la línea. Por ello, el equipo se implementa con un sistema multiplexor que ajusta los tiempos, de modo que, usando valvulería controlada por el propio equipo, pueda ejecutar tal cantidad de órdenes. La operación de multiplexión está diseñada para reducir al mínimo los tiempos de permutación de muestra en sistemas grandes. Mientras una muestra todavía está siendo medida en un dispositivo de multiplexión, la próxima muestra ya está siendo acondicionada en la segunda unidad de multiplexión, permitiendo así un ciclo de medición rápido para todos los flujos. También existe la posibilidad de introducirle mediante software, una secuencia concreta, muestras manuales, muestras de calibración…

Una vez seleccionada la muestra, es llevada a una celda de medición, donde es analizada por el método de fluorescencia por dispersión de rayos x. Irradia la muestra con rayos x y registra una intensidad y una longitud de onda. En base a las calibraciones y al registro propio del equipo, identifica a qué elemento pertenece por la longitud de onda y la cantidad por la intensidad.

Si se considera la representatividad de las muestras que se utilizan para el análisis, debe tomarse en cuenta cada paso desde el flujo de proceso hasta el análisis por fluorescencia de rayos X. La radiación por fluorescencia de rayos X penetra la pulpa de muestra solamente a una distancia corta, típicamente menos de 1 mm. La muestra que se encuentra en la superficie misma de la ventana de analizador debe ser representativa de todo el flujo de proceso para que se logren mediciones de proceso en línea precisas.

De este modo el equipo, conectado en red, transmite los datos obtenidos de cada corriente.

Imagen 20: Courier 5SL

El equipo cuenta con un software muy potente que nos permite, entre otras muchas cosas, establecer calibraciones del equipo. El modo de operar sería pedirle al equipo que tomase distintas medidas de calibración a lo largo de varios días y modos de operación. Una vez recopilado una serie de datos suficientes (se recomienda en los manuales un mínimo de 20 medidas), se introducen manualmente el resultado analizado por laboratorio (nuestro patrón) en el equipo. Una vez hecho esto y realizada una criba de los datos que puedan ser erróneos, el software nos permite decidir si queremos que tenga en cuenta todos los posibles minerales o

sólo algunos de ellos. Esta característica es muy útil y más adelante veremos que es decisiva, ya que, si detectamos que la matriz del mineral es muy pobre en ciertos elementos interferentes, podemos eliminar su análisis y por ende, su canal, de modo que la radiación que le llegue al equipo proveniente de estas longitudes de onda, será tomada como radiación de fondo.

Una vez seleccionados los canales que queremos tener en cuenta, el equipo nos presenta la oportunidad de decidir si un elemento tiene un peso específico en el análisis, si queremos elevar al cuadrado su peso en la ecuación…opciones que sólo en base a la experiencia pueden configurarse y que no entran en el alcance de este proyecto.

Por último, seleccionadas todas las opciones, el equipo presenta una ecuación tal que:

$$-973{,}4 + 0{,}1065 * Fe - 0{,}0001813 * Cu * Cu + 0{,}9261 * Cu - 0{,}07179 * Sc \quad \text{(ec 1)}$$

En este ejemplo, tenemos un término independiente (-973,4), un factor que multiplica al hierro, otro al cobre y otro a la radiación de fondo y el cobre se ha configurado para que aparezca además al cuadrado.

El equipo sustituirá los valores de radiación tomados de cada elemento donde corresponde y reflejará el valor de la medida.

3.2 Control de calidad

Como se describe anteriormente, los parámetros que afectan a la lixiviación fundamentalmente, como son la ley de cobre y el ratio ferroso/férrico, deben estar sometidos a un control preciso.

Este control no sólo puede conseguirse con el analizador automático, puesto que un fallo de éste, una mala calibración…dejarían a la planta sin margen de error. Además, cabe la posibilidad de que pongamos en duda los datos reportados, por un atasco en la línea o cualquier otro motivo.

Es por ello que se necesita contrastar las medidas con un patrón, de tal modo que tengamos una referencia fidedigna de qué está entrando en el proceso de lixiviación, tanto por el analizador en línea como por un Laboratorio externo, que será nuestro patrón.

Este laboratorio externo, proceso una muestra representativa por turno (125 ml de muestra recogidos cada hora, durante 8 horas, 1 litro de muestra), de modo que reporta un dato por turno y se compara con los datos recogidos por el analizador a lo largo del turno (1 dato cada 15 minutos). La experiencia ha demostrado que el analizador automático es suficientemente fiable como para no precisar más que de una medida por turno por parte del laboratorio externo.

Una vez que tenemos esta comparativa entre "lo que mide el analizador" y "lo que analiza laboratorio" surge el objeto del presente proyecto:

¿Qué error es admisible?

Para ello, primero debemos comparar ambos métodos de medida. El analizador Courier realiza sus mediciones basándose en la dispersión de rayos x, mientras que Laboratorio lo hace por ICP con plasma acoplado.

ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente) es una técnica de análisis inorgánico que es capaz de determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la

tabla periódica en un rango dinámico lineal de 8 órdenes de magnitud (ng/l – mg/l). Consiste en un equipo dotado de un monocromador posterior a la muestra y una serie de detectores dedicados a cada elemento en diferentes posiciones del plano focal.

Su principal ventaja son sus bajos límites de detección para la mayoría de los elementos detectando unas pocas ppb – ppt, lo que la hace ideal para el análisis de elementos traza.

La muestra líquida es vaporizada e ionizada gracias a un plasma de Argón. Los iones una vez formados pasan al espectrómetro de masas donde son separados mediante un cuadropulo y dirigidos al detector.

Por ello, el ICP se considera un método de referencia frente a la dispersión de rayos x, puesto que su precisión es muy superior a la de éste.

Así pues, ahora debe establecerse qué error máximo debe permitirse en el análisis por parte del analizador Courier.

El error es inherente a la medida, es decir, los errores no pueden eliminarse. Cuando hablamos del error permitido, hablamos de la diferencia entre un valor que tomamos como referencia (el que reporta el laboratorio externo) y el valor que nos proporciona nuestro analizador. Evidentemente, la razón por la cual no se prescinde del analizador automático y se basan las operaciones en el laboratorio externo, es el ahorro de recursos, tanto económicos como de tiempo.

El error en un principio, puede establecerse en base a la experiencia en plantas piloto, en procesos homólogos o, en definitiva, en base a parámetros que se tienen previos a la operación. La particularidad que existe en este caso, es que el proceso es (relativamente) innovador. La lixiviación típicamente se realizaba “duchando” las pilas de mineral con ácido sulfúrico y recogiendo el lixiviado. En esta planta, se cuenta con 8 reactores de mezcla perfecta en serie. Esta particularidad es debido a la gran cantidad de cobre presente en el mineral, que necesita un tiempo de residencia mayor que el que típicamente en el riego de pilas se obtiene, maximizando el rendimiento de la operación y permitiendo la reintroducción del hierro en el proceso.

Así que en esta ocasión, el error se establece en base a recomendaciones del fabricante e instalador del analizador automático y la experiencia en plantas piloto, estableciéndose un ±5%. Esto quiere decir que si el error es de un -5%, nuestro analizador está reflejando valores un 5% más alto que el laboratorio y viceversa, puesto que la forma de calcularse sería:

$$\%error = \frac{Valor\ Laboratorio - Valor\ analizador}{Valor\ laboratorio} * 100 \quad \text{(ec. 2)}$$

Cuando tenemos errores inferiores a 0, tenemos errores por exceso y cuando son superiores a 0, errores por defecto. Si estamos por encima del -5% y por debajo del 5%, según este criterio, estamos en la corriente en situación de control, es decir, el analizador cumple el criterio de calidad que se impuso para operar.

4 Motivación del proyecto: Calibraciones de los sistemas de medida.

La operación en la planta con unos límites establecidos del ±5% para las corrientes medidas con el analizador en línea se descubre que es ineficaz al comenzar a operar la planta.

Dependiendo del parámetro que analicemos y de la corriente que se trate, este límite puede estar muy alejado de la realidad. Por ejemplo:

		Refino 2º						
FECHA	TURNO	Courier	LABORATORIO	Errores			Desviaciones	
		Cu	Cu	Err	Err Abs	media móvil 3 días	Desv COURIER	Desv lab
01/08/2014	01/08/2014 6:00	0,68	0,91	25,7%	25,7%	-33,4%	24,4%	70,6%
	01/08/2014 14:00	0,65	0,43	-50,9%	50,9%	-35,9%	25,1%	64,8%
	01/08/2014 22:00	0,87	0,87	0,8%	0,8%	-29,2%	31,8%	68,0%
02/08/2014	02/08/2014 6:00	0,96	0,99	3,4%	3,4%	-25,2%	35,8%	64,2%
	02/08/2014 14:00	0,41	0,24			-25,2%	33,9%	57,8%
	02/08/2014 22:00	0,36	0,14			-23,7%	35,7%	63,9%
03/08/2014	03/08/2014 6:00	0,56	0,67	15,5%	15,5%	-16,9%	34,9%	60,2%
	03/08/2014 14:00	0,96	0,72	-33,1%	33,1%	-16,3%	32,6%	52,8%
	03/08/2014 22:00	1,17	1,27	8,4%	8,4%	-4,3%	37,1%	53,3%
04/08/2014	04/08/2014 6:00	1,70				-9,3%	49,5%	57,9%
	04/08/2014 14:00	0,79	2,78	71,6%	71,6%	11,1%	47,9%	85,8%
	04/08/2014 22:00	0,56	0,47	-19,0%	19,0%	7,8%	51,3%	92,5%
05/08/2014	05/08/2014 6:00	0,78	0,76	-2,5%	2,5%	6,8%	52,2%	95,7%
	05/08/2014 14:00	0,57	0,25			6,8%	49,2%	95,3%
	05/08/2014 22:00	1,22	0,77	-59,3%	59,3%	-2,6%	41,5%	82,1%
06/08/2014	06/08/2014 6:00	0,88	0,69	-26,1%	26,1%	-8,6%	37,6%	81,6%
	06/08/2014 14:00	1,08	0,82	-32,1%	32,1%	-8,4%	37,3%	80,4%
	06/08/2014 22:00	0,95	0,73	-31,2%	31,2%	-14,1%	37,4%	85,7%

Tabla 2: Datos Cu Refino 2º

Esta tabla representa las concentraciones de cobre en la corriente de Refino secundario, recogidos durante los 6 primeros días de Agosto de 2014. Para compararlos se realiza una media de los valores que proporciona el analizador de la planta por cada turno y se enfrenta al reportado por laboratorio, según la fórmula antes mostrada.

Como podemos observar, fijándonos en las 2 primeras columnas, los datos de laboratorio y del analizador Courier no difieren en exceso (en la mayoría de los casos), pero sin embargo, sobrepasan el ±5% en casi todos los turnos.

Esto se debe a que la concentración de cobre es muy baja y cualquier ligera variación hace que se sobrepase dicho límite. Así que queda demostrado que esta corriente necesita otro tipo de límite.

Hay otros casos en los que la corriente es mucho más estable, como en el caso de los electrolitos, que además son una corriente crítica, puesto que es el último paso antes de su electro-obtención. En este caso el control debe ser más férreo que el 5% usado.

Esto nos lleva a pensar que el criterio utilizado no es el adecuado para el control de las corrientes.

4.1 Calibraciones del sistema de medida

El error reflejado por el equipo nos indica qué grado de aceptación están teniendo las medidas que éste realiza del proceso. Para un correcto control del proceso necesitamos que nuestro analizador sea FIABLE, es decir, que sus medidas sean muy similares a las que reporta laboratorio. No tienen por qué ser iguales de precisas, puesto que el método es distinto, no puede pretenderse que den el mismo resultado uno que otro, pero deben presentar un error pequeño entre ambas, de forma que el analizador sea una herramienta útil en el seguimiento del proceso.

El analizador puede sufrir en su funcionamiento diversas vicisitudes. Durante el tiempo de toma de datos para este proyecto así ocurrió. Son analizadores expuestos a atascos, ensuciamiento, desajuste de componentes mecánicos, inclemencias meteorológicas…pero durante su normal funcionamiento, debe acercarse lo más posible a su patrón de referencia, el laboratorio.

La problemática de que ocurra un mal funcionamiento por cuestiones físicas o mecánicas, se reducen con los sistemas de mantenimiento programado y mantenimiento preventivo además de la experiencia de los operadores, así que el estudio se centrará en la consecución de la fiabilidad del equipo.

Los equipos electrónicos son susceptibles de presentar a medio plazo las derivas antes explicadas por el mero hecho de estar midiendo de forma continuada durante un periodo de tiempo largo (meses, años…). Las derivas que suelen presentar son: la deriva de 0 y la deriva de spam. La medida de 0 se da cuando la recta se desplaza de su valor inicial.

La deriva de spam presenta una variación en el rango de salida (de los valores) manteniendo constante el 0.

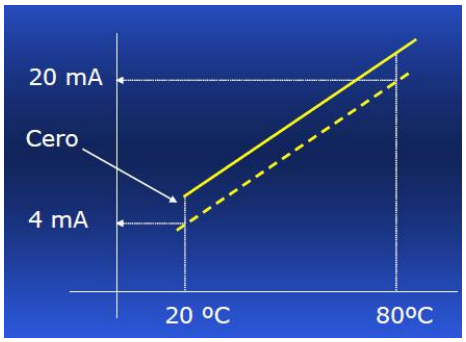


Imagen 21: deriva de 0

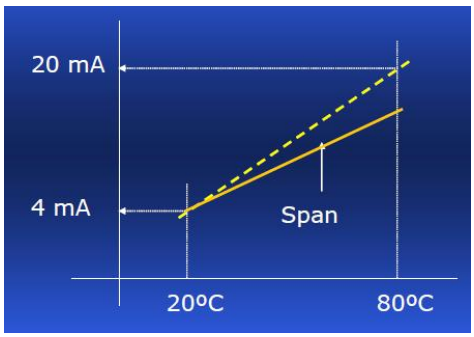


Imagen 22: deriva de Spam

Para corregir esta fuente de errores y por imposición por parte de los responsables de operación de la planta, contamos con 2 herramientas: La calibración y la introducción de factor.

Debido a que los procesos de medición del equipo no son lineales, puede aparecer un fenómeno denominado histéresis. La histéresis no es más que la tendencia del material a conservar un estado anterior, es decir, al irradiarlo con rayos x, puede que no vuelva exactamente a su estado energético inicial, provocando un error en la medida.

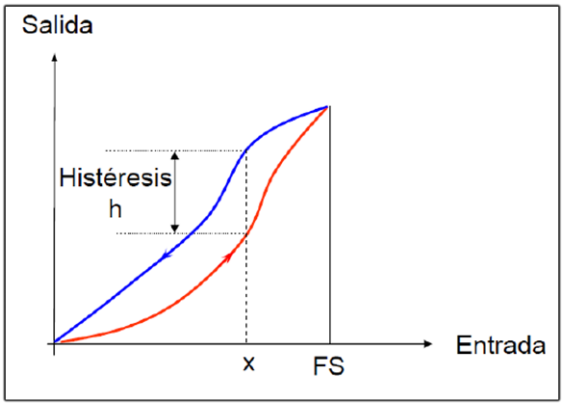


Imagen 23: Variación por histéresis

- FACTORIZACIÓN
  Cuando el equipo presenta un error inadmisible pero mantenido en el tiempo es cuando tiene sentido la introducción de un factor. En la dispersión de rayos x hay muchos elementos interferentes, esto hace que cuando se introduce mineral de una parte de la explotación minera cuya matriz cuenta con elementos interferentes (por ejemplo el Calcio), el equipo puede presentar en algunas corrientes un error constante en el tiempo. En este caso, se puede prescindir de la calibración. El software del analizador puede manipularse, de modo que el resultado que reporte puede multiplicarse por un factor. De este modo, si nuestro error varía repentinamente y en los análisis de laboratorio comprobamos que el mineral presenta una composición rica en elementos interferentes, podremos introducir un factor que ajuste nuestro analizador. Esto es válido si se prevé que el mineral interferente no va a ser permanente, es decir, la factorización no es una solución a largo plazo.
  Este es el proceso que se sigue cuando el equipo presenta una deriva de 0.

- CALIBRACIÓN
  Si una corriente deja de estar en control y no se tiene constancia de fallos mecánicos, atascos o cambios en el mineral, probablemente necesite calibrarse, puesto que estará motivada por una deriva de spam o la aparición de histéresis.
  En el apartado explicativo del analizador Courier, se trataba de cómo el equipo nos reflejaba una ecuación de calibración y existían múltiples opciones de configuración. Para corroborar que una ecuación de calibración era la adecuada, se procedía realizando una serie de ensayos y basándonos en la experiencia adquirida en otras ocasiones. El procedimiento era realizar una comparativa con varios modelos de calibración y con el valor que aportaba el laboratorio de referencia, de modo que se escogía el modelo que mejores resultados aportaba.

	INTENSIDADES			Antigua				MODELO I (25/03/2015)				
Date time	Cu	Fe	Sc	%Cu	Lab - Cou	%Error Cal act.		%Cu	Lab - Cou	%Error Model 1		LAB
25/02/201 22:45	2667	84,25	2475	30,46	7,14	19,0%	19,0%	38,23	-0,63	-1,7%	1,7%	37,60
27/02/201 16:46	2665	91,72	2460	30,00	10,70	26,3%	26,3%	40,19	0,51	1,3%	1,3%	40,70
01/03/201 1:52	2667	89,73	2462	30,13	9,07	23,1%	23,1%	39,75	-0,55	-1,4%	1,4%	39,20
01/03/201 7:20	2701	88,68	2454	30,72	10,28	25,1%	25,1%	38,61	2,39	5,8%	5,8%	41,00

Tabla 3: Datos de calibración de Electrolito Pobre

En la tabla 2 podemos ver la comparativa del modelo antiguo de calibración con el modelo I, como puede verse, el error del modelo I es menor que el que presenta el modelo Antiguo, debido a la distinta configuración de las opciones de calibración. Una vez obtenido un número representativo de puntos, se toma la decisión de realizar nuevos modelos o bien configurar el equipo para usar uno de los modelos nuevos.

Una vez resuelta la forma de calibrar, la problemática se presenta en saber **cuándo** hay que calibrar el equipo. El sistema que se venía usando era el de calibrar el equipo (para una corriente en concreto, cada corriente tiene su calibración independiente) cuando el error se mantenía en el tiempo superando el ±5% antes mencionado. Dado que en muchas corrientes este intervalo ni si quiera era el correcto, las calibraciones eran defectuosas y habitualmente no eran la solución al problema.

Por ello, se buscaba un procedimiento que optimizara el proceder a la hora del mantenimiento del equipo en este sentido y a su vez, sirviese de herramienta para la evaluación del estado actual de la corriente

Diagrama de flujo de las actuaciones a seguir.

5 Ámbito y alcance del proyecto

El estudio realizado está orientado a desarrollar un procedimiento operativo de control de los analizadores en línea Courier (5SL y 5HX) de modo que se establezcan las herramientas y procedimientos necesarios para tal fin.

Como se describe en el capítulo anterior, el objetivo es desarrollar unas herramientas que permitan determinar el estado de una corriente en cuanto a su control (el control del error) que aumenten la fiabilidad de las mediciones, y por consiguiente del equipo, de modo que se establezca un criterio de actuación único y adecuado.

Para realizar este estudio y desarrollar las herramientas, se propone el uso de una **estadística de control** que sirva de indicador del estado de las corrientes.

En otros procesos industriales, este ámbito está muy desarrollado. La principal diferencia en este caso, es la variabilidad del proceso que se maneja, puesto que el proceso está optimizado para que el mineral inicie el proceso de lixiviación con una granulometría de unos 140µm y una ley de cobre en torno al 5%. Sin embargo, la ley de cobre puede alcanzar en un mismo día valores del 6,5% y del 3,5%. Esto hace que el uso de la experiencia de otros procesos sea difícil o imposible a la hora de realizar la implantación. Por ejemplo, en la bibliografía a menudo se hace referencia a procesos en los que se quiere obtener una determinada calidad fija o un tamaño concreto del producto (una fábrica de tornillos por ejemplo), por ello, las variaciones que existen en esos procesos son ínfimas y se ajustan muy bien a una distribución de Gauss. En nuestro caso, aunque habitualmente la distribución será Gaussiana, un dato de una ley muy baja o muy alta sostenido genera muchas dificultades en el control del analizador.

Por ello, la opción que se propone es la adaptación de la estadística de control que se utilizan en estos procesos y que son de demostrada eficacia, al proceso existente en Cobre las Cruces, utilizando la estadística de control establecida hasta el momento, implementando en ella las herramientas necesarias.

5.1 Punto de partida: Estadística de control

Para el control y seguimiento de las corrientes de la planta, se utilizaban una serie de tablas de datos y gráficos de Excel (ver Anexo I) tal que:

		PLS 1º						
FECHA	TURNO	Courier	LABORATORIO	Errores			Desviaciones	
		Cu	Cu	Err	Err Abs	media móvil 3 días	Desv COURIER	Desv lab
01/07/2014	01/07/2014 6:00	45,73	45,19	-1,2%	1,2%	-1,2%		
	01/07/2014 14:00	44,98	44,63	-0,8%	0,8%	-1,0%	1,2%	0,9%
	01/07/2014 22:00	45,40				-1,0%	0,8%	0,9%
02/07/2014	02/07/2014 6:00	44,65	44,97	0,7%	0,7%	-0,4%	1,0%	0,6%
	02/07/2014 14:00	44,13	45,41	2,8%	2,8%	0,4%	1,4%	0,7%
	02/07/2014 22:00	44,18				0,4%	1,4%	0,7%
03/07/2014	03/07/2014 6:00	43,32	40,95	-5,8%	5,8%	-0,8%	1,9%	4,2%
	03/07/2014 14:00	41,50	41,98	1,1%	1,1%	-0,5%	3,0%	4,3%
	03/07/2014 22:00	39,06				-0,4%	4,9%	4,3%
04/07/2014	04/07/2014 6:00	37,97	39,55	4,0%	4,0%	0,6%	6,3%	5,7%
	04/07/2014 14:00	39,01	39,79	1,9%	1,9%	0,8%	6,7%	6,0%
	04/07/2014 22:00	41,02				0,8%	6,1%	6,0%

Tabla 4: Seguimiento de composites Cu de la corriente de PLS 1º

Como se puede ver en la tabla 3, para esta corriente diariamente se obtenían 2 comparaciones con laboratorio (turno de mañana y turno de tarde), un error por cada turno, una media del error acumulado durante 6 comparaciones (es decir, 3 días) y del mismo periodo, la desviación que presenta el analizador y el laboratorio.

Estableciendo los límites de ±5%, se graficaban los errores de cada comparación, obteniendo una gráfica de seguimiento, representando el mes anterior y el mes actual, como puede verse en el siguiente gráfico:

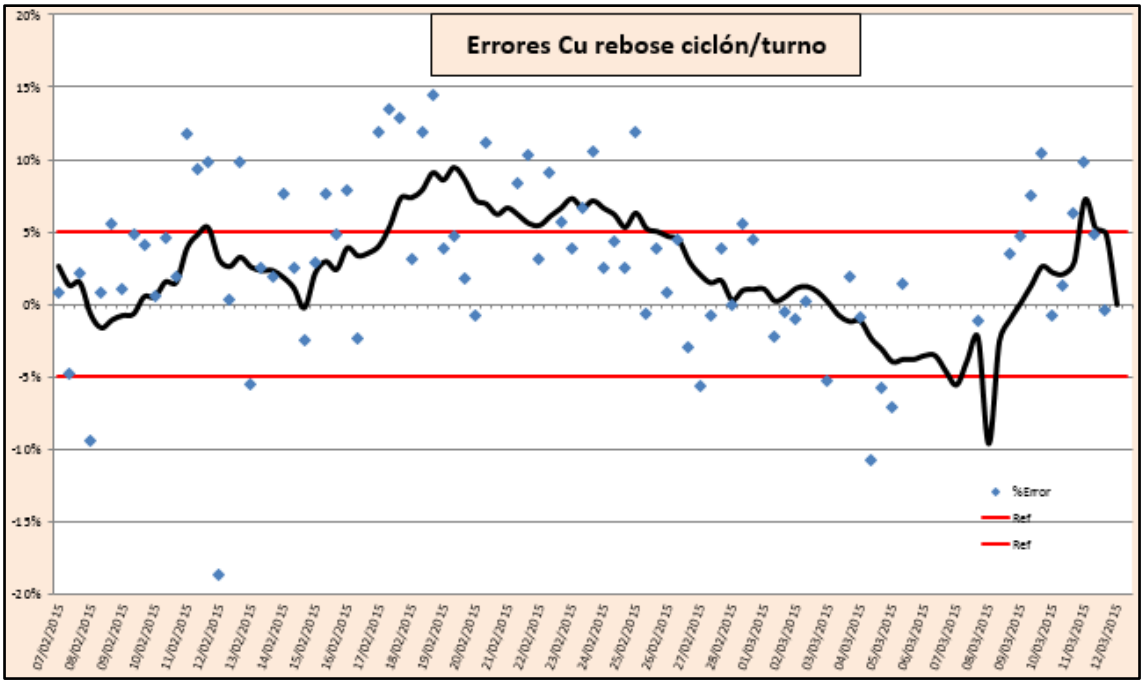


Gráfico 1: Errores de Cu en Rebose de Ciclón

Con este gráfico, se podía comprobar el comportamiento de los errores (calculados siempre con la ecuación 2) y si la línea de representación de los errores de 3 días (negra) quedaba fuera de los límites establecidos antes mencionados, se consideraba que la corriente estaba fuera de control y, o bien se factorizaba, o bien se calibraba.

Esta estadística de control era el procedimiento habitual previo a este proyecto y se realizaba para las corrientes más importantes, como son: PLS 1º y secundario, Refino 1º y 2º, electrolito pobre, electrolito rico, rebose de ciclón y residuo (mineral tras lixiviación y filtrado).

Todas las corrientes presentaban el mismo margen de error, ±5% y todas estaban controladas teniendo en cuenta el mes anterior y el mes concurrente, lo que hace que no todas tengan el mismo número de parámetros graficados, puesto que como puede verse en la tabla 3, las corrientes líquidas (pls, refino y electrolitos) sólo se comparan durante dos de los tres turnos diarios.

Este sistema de control era ineficaz por las siguientes cuestiones:

- LÍMITES RÍGIDOS: En un proceso de una variabilidad intrínseca, los límites referidos a errores diarios deben estar “vivos”, es decir, deben reflejar que efectivamente, el proceso está cambiando, la matriz del mineral no es la misma…de modo que utilizar un 5% fijo hace que detectemos puntos fuera de control que son reales y correctos.

- PARÁMETRO DE CONTROL: El parámetro para controlar el proceso no debe ser un parámetro fuertemente sujeto a desviaciones, como lo es el error. El error, como ya se vio, es fruto de un único reporte por parte de laboratorio. Esto hace que, pese a que se realiza una criba de resultados, se sufra gran riesgo de utilizar datos erróneos y por tanto errores no reales.

- PROCEDIMIENTO ERRÓNEO: Con la representación del gráfico 1 se induce a error, puesto que ¿cuándo hemos de calibrar y cuándo aplicamos un factor?, si como se dijo anteriormente, el 5% no es un límite real para algunas corrientes ¿cómo discernimos entre proceso normal y proceso fuera de control?

Por todo ello, acudiendo a la bibliografía específica, se propone el uso de las llamadas **cartas de control**, adaptadas al proceso en cuestión.

6 HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA

Para el desarrollo del estudio, el material de referencia más utilizado fue el manual "Control estadístico de calidad y Seis Sigma" del autor Humberto Gutiérrez Pulido.

En este libro se sientan las bases de la estadística de control, aunque aplicados a procesos con una variación mínima, comparado con el proceso de producción existente en Cobre Las Cruces. A través de este manual, surge la idea de realizar una estadística de control basada en el concepto Seis Sigma.

El concepto de calidad *Seis Sigma (6*σ) se fundamenta en que, en un proceso productivo, la media del proceso, su centralización, para que se considere la corriente dentro de control, ésta centralización debe estar situada entre los límites de control, calculados como la media del proceso ± 3 veces la desviación estándar del proceso (σ).

De esta forma, nuestro proceso se graficaría, obteniendo así un seguimiento de la corriente y una información real del estado de la corriente en base a unos parámetros estadísticos reales del proceso. Existirían dos límites:

- Un Límite Superior tal que: $\mu + 3 * \sigma \ (ec. 3)$
- Un Límite inferior: : $\mu - 3 * \sigma \ (ec. 4)$

La elección de 6σ viene dada por la calidad que deseamos en nuestro proceso. Aplicando este concepto tendremos 3,4 defectos por cada millón de eventos, es decir, una eficacia del 99,99966%.

A priori, con estos elementos graficados tendríamos un primer esbozo de una **carta de control** para atributos, siendo el atributo nuestro parámetro estadístico, el error.

El objetivo básico de una carta de control es observar y analizar el comportamiento de un proceso a través del tiempo. Así, es posible distinguir entre variaciones por causas comunes y especiales (atribuibles), lo que ayudará a caracterizar el funcionamiento del proceso y decidir las mejores acciones de control y de mejora. Cuando se habla de analizar el proceso nos referimos principalmente a las variables de salida (características de calidad), pero las cartas de control también pueden aplicarse para analizar la variabilidad de variables de entrada o de control del proceso mismo.

Existen diversos tipos de carta de control, en una primera instancia se pensó en utilizar la carta de control de atributos (denominada X-R). Ideales para procesos industriales considerados de tipo "masivo", en el sentido de que producen muchos artículos, partes o componentes durante un lapso de tiempo pequeño. Por ejemplo: líneas de ensamble, máquinas empacadoras, procesos de llenado, etc.

Algunos de estos procesos realizan miles de operaciones por día, mientras que otros efectúan varias decenas o centenas. En ambos casos se está ante un proceso masivo. Si, además, las variables de salida de interés son de tipo continuo, entonces estamos ante el campo ideal de aplicación de este tipo de cartas de control.

La realidad es que nuestro proceso productivo produce centenas de cátodos de cobre al día, pero no entra dentro del ámbito de las cartas de control de atributos (X-R), puesto que están pensadas para procesos discontinuos o semi-continuos.

Por ello, se elige como herramienta para la estadística de control la carta de control de individuales

La carta de individuales es un diagrama para variables de tipo continuo, pero en lugar de aplicarse a procesos semimasivos o masivos como es el caso de la carta X-R, se emplea en procesos lentos, en los cuales para obtener una medición o una muestra de la producción se requieren periodos relativamente largos.

Ejemplos de este tipo de procesos son:

- Procesos químicos que trabajan por lotes
- Industria de bebidas alcohólicas, en las que deben pasar desde una hasta más de 100 horas para obtener resultados de los procesos de fermentación y destilación.
- Procesos en los que las mediciones cercanas sólo difieren por el error de medición. Por ejemplo, temperaturas en procesos, humedad relativa en el medio ambiente, etcétera.

Esta carta concuerda mucho más con las características de nuestra instalación por lo que la mejor alternativa es usar una carta de individuales, donde cada medición particular de la variable que se quiere analizar se registra en una carta.

Para determinar los límites de control se procede igual que en los casos anteriores, mediante la estimación de la media y la desviación estándar del estadístico que se grafica en la carta, que en este caso es directamente la medición individual de la variable X. Por ello, los límites se obtienen con la expresión $\mu \pm 3 * \sigma$, donde μ y σ son la media y la desviación estándar del proceso, respectivamente. Es decir, los límites de control, es este caso, coinciden por definición con los límites reales.

La utilización del error como parámetro estadístico, como se venía usando en por procedimiento fue una idea rápidamente desechada. En este concepto es donde difieren los procesos productivos industriales más comunes y el de Cobre Las Cruces. Si se considera que cada medida es un evento singular, la variabilidad intrínseca del proceso productivo llevará consigo una desviación estándar del proceso tal, que al calcular los límites obtendríamos unos parámetros totalmente inaceptables.

Podemos ver un ejemplo del uso del error como parámetro estadístico:

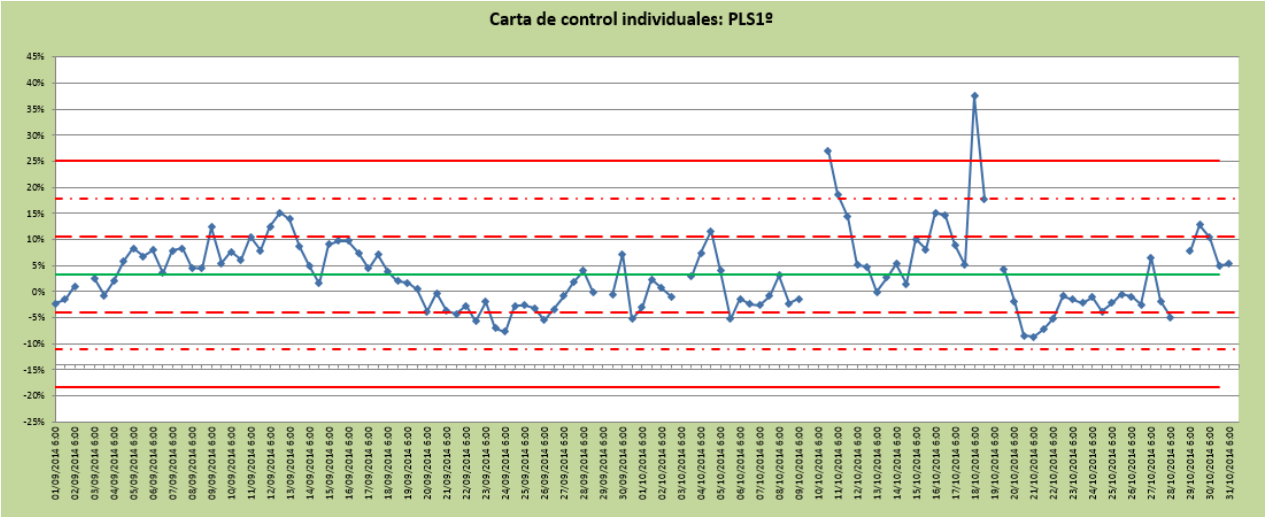
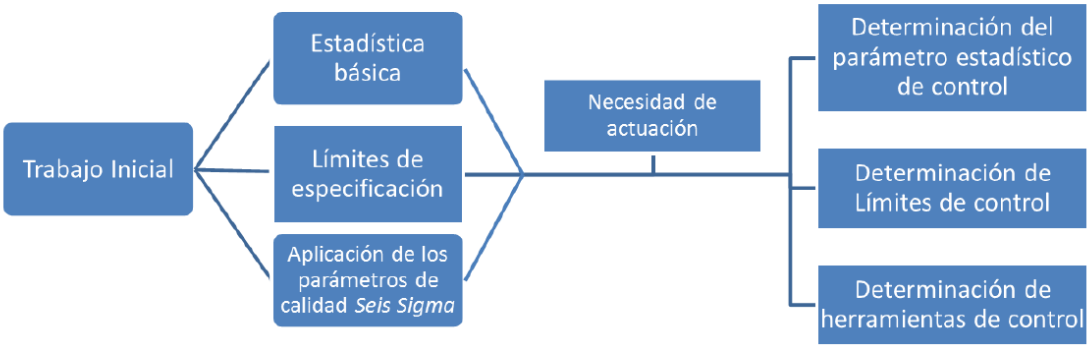


Imagen 22: Carta de control inicial de PLS 1º

En el gráfico de la carta de control pueden verse graficado como una línea continua azul el error de cada turno durante el periodo graficado y los límites de control superior (LCS) e inferior (LCI) como líneas rojas continuas.

El LCS tiene un valor de 25% y el LCI, de -18,35%, es decir, según esta herramienta, sería admisible que los errores por turno fueran entre estas dos magnitudes. Esto demuestra que, pese a estar bien calculados los límites, la herramienta no es útil, puesto que un 25% de error supone que la cuarta parte de la concentración de la corriente está en entre dicho.



Como puede verse la línea de trabajo a seguir es clara y se desarrolla a continuación:

6.1 Definición de la primera optimización de las cartas de control. Metodología a seguir

Debido a los factores antes mencionados, se realizan una serie de ensayos para determinar qué parámetro estadístico es el más adecuado, según el siguiente procedimiento:

1) Tras diversas reuniones con los responsables del departamento de procesos y de producción, se establece un objetivo de productividad del analizador en cuestión. Esto establece la cantidad de horas que el analizador debe estar en buen funcionamiento en cuanto a la realización de mediciones fidedignas se refiere, de manera que concuerde con los objetivos de producción de la planta.

2) Se realiza un archivo histórico de todas las mediciones llevadas a cabo a lo largo del equipo durante el año 2014 en las corrientes que van a controlarse, para los parámetros de cobre y de hierro, con el fin de analizar en qué periodos de tiempo se consiguió el ítem de productividad marcado en el punto 1) y las causas de la consecución del mismo.

3) Utilizando el archivo anterior, en los meses donde se consigue el número de horas dentro de control más aceptable en cada corriente, se estudian los parámetros estadísticos más frecuentes: el error puntual (el de cada turno), tanto absoluto, como con su signo, el error acumulado de 3 días y la desviación del analizador y del laboratorio y se llega a la conclusión de que cuando el error promediado de 3 días se mantiene más estable, en todos los casos el equipo cumplía los objetivos marcados.

4) Una vez que se define el parámetro a utilizar, se procede al cálculo de los límites de control y se analizan los resultados obtenidos.

6.2 Análisis de herramientas y resultados. Primeras conclusiones.

Tras el estudio realizado según la metodología expuesta anteriormente, se lograba unificar el criterio a la hora de decidir cuándo las corrientes estaban o no en control, basándonos en dos pilares fundamentales: la experiencia obtenida, puesto que usábamos el archivo histórico para identificar los pasos a seguir, y por otro lado, estadísticamente era mucho más fiable el uso de una media móvil, es decir, que se ajusta a la variación en el proceso.

La media móvil a 3 días se utiliza por criterio personal, es decir, no está basada en un estudio previo, si no en la experiencia de los supervisores de procesos, ya que por el tiempo de residencia del cobre en el proceso y la amortiguación de los posibles cambios que ocurren en el proceso, parece que 3 días de margen es el óptimo en este aspecto.

Por otro lado, puede que frente a un fallo en el proceso, la carta de control tarde demasiado tiempo en reflejarlo, es decir, puede que pasen varias horas sin que la media de los 3 días supere los límites de control, y por tanto, nos alerte. Por ello, en el seguimiento de las corrientes, el error puntual sigue teniendo un papel importante. Además, esto puede subsanarse con un

estudio de la pendiente de la representación gráfica de la media móvil, de modo que una pendiente agudizada indica una variación en el proceso muy grande y nos pondría sobre aviso.

Un aspecto que no queda solucionado con esta primera solución son los límites de control.

Para los límites de control se propone el método que la bibliografía aporta y que antes se vio que la fiabilidad que ofrecía era muy alta. Sin embargo, estos límites están "vivos", es decir, varían con cada nuevo dato, reflejando la propia naturaleza variable del proceso de producción. Este aspecto es contradictorio, puesto que es cierto que el proceso cambia, pero en un periodo de tiempo suficientemente largo sin cambios significativos en la producción de cobre (en principio, hasta 2019 el proceso de producción no variará) el proceso es estable. Esto hace que por parte de los managers de procesos, se prefieran límites fijos, como el ±5% inicial que había instaurado previamente, de modo que, aunque sean conscientes de que el proceso es susceptible de presentar determinados puntos fuera de control, a la larga, el proceso se estabilizará en torno a unos valores aceptables y dentro de especificaciones.

6.3 Obtención de las cartas de control finales. Metodología aplicada.

Para la determinación de unos parámetros fijos que, cumpliendo con la calidad *Seis Sigma*, fuesen desde el punto de vista del control de procesos aceptables se realizó un nuevo test:

1) Decisión por parte de los responsables de producción y procesos del porcentaje de aceptación de las medidas del equipo, es decir, como mínimo, en un periodo de tiempo suficiente, qué porcentaje de datos debe estar dentro de especificaciones para considerar que el equipo es fiable. Para tal efecto, se establece que al menos el 75% de los datos que el analizador reporte deben estar dentro de control.

2) Tras la decisión, teniendo en cuenta el número de mediciones que se realizan diariamente en cada corriente, se establece que 100 días es un periodo adecuado para el control de las corrientes. Estimando que hay corrientes que presentan comparaciones con laboratorio en los 3 turnos y otras en 2 de los 3 turnos, se estima que, al menos habrá más de 50 datos en todas las corrientes, puesto que hay que tener en cuenta paradas de planta, fallos en los reportes de datos, puestas en fuera de servicio por mantenimiento…

3) Con el apoyo del archivo histórico creado con anterioridad, se buscan todos los periodos de 100 días seguidos para cada corriente que cumplan el requisito de tener una aceptación de datos del 75% o superior, creando una nueva base de datos de fiabilidad de los analizadores.

4) Una vez que conocemos los periodos que cumplen con todos los requisitos, se calculan los límites de control (LCS y LCI) con los datos seleccionados de cada una de las corrientes, de modo que, para cada corriente, se calcula la desviación estándar de cada periodo seleccionado, la media del periodo de la media móvil y se establece una media

y una desviación estándar para cada corriente que permiten calcular uno límites superior e inferior únicos para cada corriente y fijos.

De este modo, ahora los límites no variarán en función de cada medida y nuestro objetivo será mantener al equipo dentro de los nuevos límites fijas calculados, porque se demuestra que si el equipo funciona en esa zona, su fiabilidad es aceptable.

Las cartas de control pueden ofrecer mucha información complementaria, de modo que no sólo las usemos para saber si una corriente está o no en control.

En la siguiente página se adjunta una carta de control de individuales de la corriente Rebose de ciclón, sobre la que se detallará la información que presenta esta herramienta.

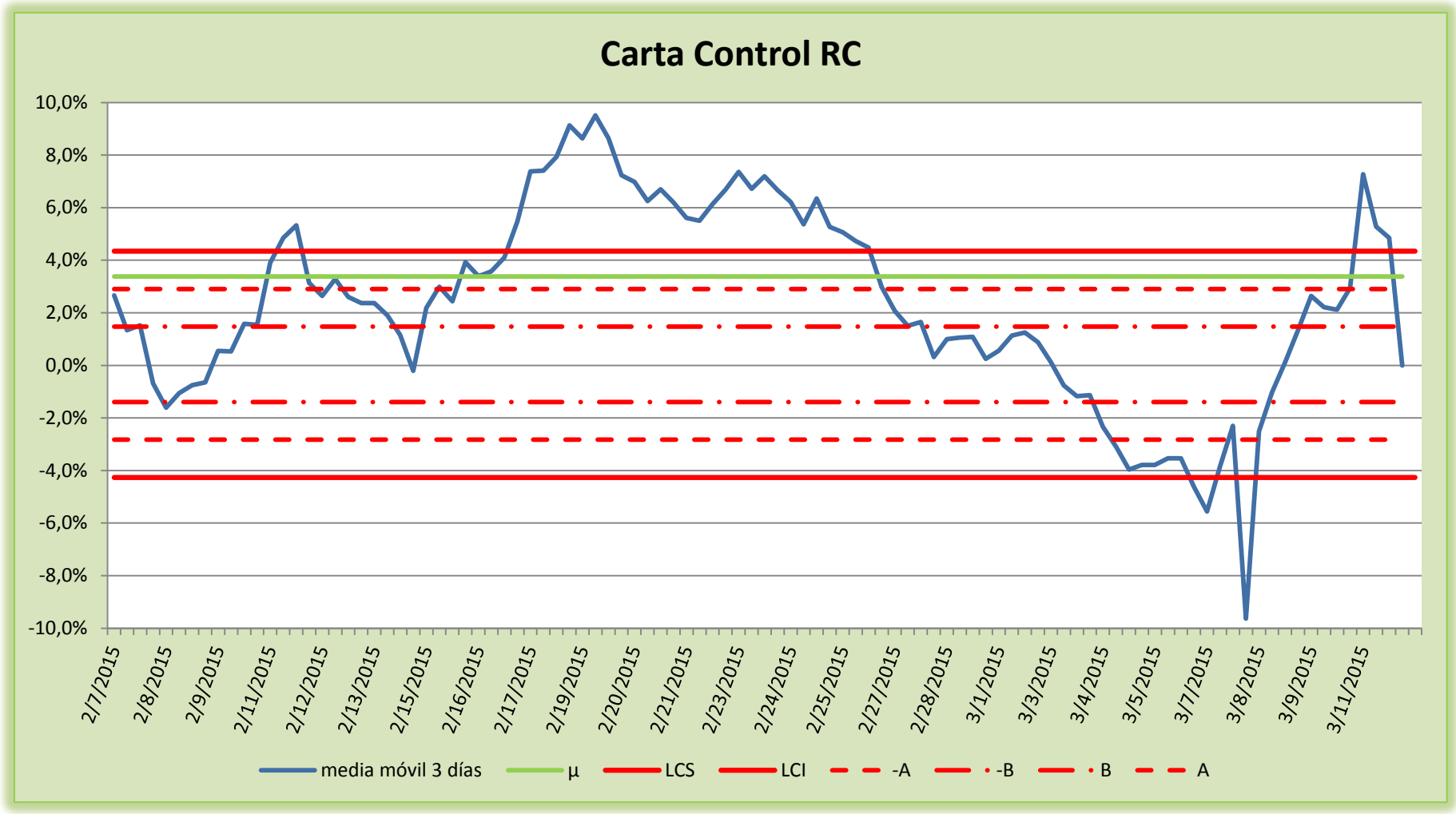


Imagen 23: Carta de control de Rebose de ciclón

Como se puede apreciar, la media móvil es el estadístico representado por la línea azul y varía a lo largo del periodo representado. Los límites de control son líneas rojas continuas situadas a 4,34% para el LCS y a -4,26% para el LCI.

Además, podemos ver que la carta de control está zonificada, es decir, está dividida en zonas equidistantes entre los dos límites de control, estando de abajo a arriba la zona –A, -B, B, A y la zona central (C). Con esta zonificación conseguimos una herramienta "predictiva".

Cuando los puntos de la media móvil están fuera de los límites, es evidente que hay que actuar sobre el equipo, pero en este momento, los resultados ya no tienen validez, puesto que el error indica que la corriente presenta demasiado error.

Con la zonificación, se crea una matriz de puntos, que el propio Microsoft Excel recorre, de modo que al introducir nuevos datos hace siempre un recuento de dichos puntos.

Puesto que queremos un 75% mínimo de fiabilidad, si la gráfica ofrece más de un 25% de puntos fuera de los límites de control, habría que actuar sobre el equipo. Pero si un alto porcentaje de los puntos se halla, por ejemplo, en la zona –A, esto invita a pensar que puede haberse producido una deriva de cero.

Así pues, junto con la gráfica, se presenta una tabla tal que:

Zonificación		Nº Datos	% Datos
-A	-2,83%	10	10,00%
-B	-1,39%	4	4,04%
C	0,04%	26	26,53%
B	1,47%	17	17,53%
A	2,91%	43	44,79%

Tabla 5: Matriz de gráfica de control

Esta tabla refleja que en este periodo existen demasiados puntos fuera de los límites de calibración y por tanto se recomienda actuar sobre el equipo.

La predicción viene dada por esta propia tabla. Si durante un periodo vemos un aumento progresivo en una de las zonas, por la experiencia en dicha corriente podemos prever una posible calibración e ir recogiendo los datos de calibración necesarios, de tal modo que carguemos en el equipos una nueva ecuación de calibración si esperar a que supere el 25% de datos fuera de control, aumentando así el número de horas "fiables" del equipo.

Como resumen y ayuda en la toma de decisiones, se crea un cuadro que refleja el estado de la corriente:

	Estado
Centralización	Revisar
	ok
Zonificación	Mala Calibración
Acciones	Sin factor
	Pendiente alta
Resumen	Cambiar calibración

Tabla 6: Actuación sobre el equipo

- CENTRALIZACIÓN: Indica el estado de la media de los últimos 9 Datos, de manera que muestra un mensaje de REVISAR CORRIENTE si la media excede de (± 3% de error) y un mensaje de DESCENTRADO si el error del proceso en estos días es superior al ± 5%. La media aparece representada en la carta de control mediante una línea recta verde.
- ZONIFICACIÓN: Como hemos visto antes, atendiendo a la cantidad de puntos que se encuentran a lo largo de los 100 datos en determinadas zonas de la carta de control, se establece cuando la calibración es o no válida. Si un 25% de los datos al menos se encuentran en las zonas A, las más críticas, la calibración será rechazada. Si el 75% de los datos se encuentran comprendidos entre la zona central y la B, entonces la calibración será aceptada. Si el número de puntos en la zona B es más de un 25% entonces la calibración necesita un factor. Muestra el mensaje de "Mala calibración" o de "calibración ok"
- ACCIONES: Realiza una verificación de cuándo se necesita factorización y calcula dicho factor. También se presta atención a la pendiente de los últimos datos, lo que nos da información acerca del tiempo que se posee como margen de actuación. Para el cálculo del factor, se realiza con al siguiente ecuación:

$$\left(1 - \frac{Valor\ Courier}{Valor\ Laboratorio}\right) * 100\ (ec. 3)$$

De modo que:

1. Si el factor es negativo, indica en qué porcentaje debe reducirse la concentración, multiplicando la ecuación de calibración por un factor menor que 1.

2. Si el factor es positivo, indica en qué porcentaje debe aumentarse la concentración, multiplicando la ecuación por un factor mayor que 1.

En el caso de la pendiente, se examina la pendiente de la recta que forma la representación de la media móvil. Si la pendiente es mayor de un 1,5%, quiere decir que el error puntual está creciendo rápidamente. Esto nos ayuda a predecir lo que pasará con la media móvil y el margen de tiempo que tenemos para actuar sobre el equipo, puesto que según el valor de la pendiente, podremos calcular cómo de rápido puede exceder los límites de control.

- RESUMEN: Muestra la acción correctora más inmediata, puesto que pueden darse varios indicadores a la vez, indica la prioridad a seguir a la hora de actuar sobre el equipo.

6.4 Metodología a seguir para el correcto control de la calidad.

Una vez presentada las principales herramientas de control de las corrientes, se crea un procedimiento de trabajo diario para dar seguimiento al estado de las corrientes controladas por dicho sistema.

En todo caso suponemos que el mantenimiento, incluido el mantenimiento preventivo, es llevado a cabo y que el equipo mecánicamente se encuentra en un estado óptimo.

La herramienta creada se denomina seguimiento de composites Cu o seguimiento de composites Fe, funcionan de igual forma y se presenta la de cobre en los anexos adjuntos al presente proyecto. Para el procedimiento, se explicará la referente al cobre.

La metodología a seguir es la siguiente:

1. Partiendo de los reportes enviados por el analizador automático Courier y del reporte actualizado de laboratorio, en la hoja de cálculo “seguimiento de composites Cu” y en la pestaña llamada “COBRE” deben introducirse los datos provenientes de las dos fuentes citadas anteriormente, la media de los datos de cada turno del Courier y el valor de cada turno de laboratorio.

2. Realizado esta para cada corriente, nos dirigimos a la pestaña “seguimiento de corrientes líquidas” donde encontramos los 100 últimos datos de estas corrientes y 2 botones, asociados a 2 macros. Debemos usar primero el botón “Periodo”, en el que podemos seleccionar una fecha cualquiera, dentro del histórico de datos que creamos, con objeto de poder ver cualquier periodo de funcionamiento de la planta. Una vez seleccionado el periodo que queremos visualizar, pulsamos el siguiente botón “Actualizar 100 datos”, de modo que se actualizan las pestañas de seguimiento de corrientes líquidas y sólidas.

3. A continuación, se presenta una pestaña para cada corriente, por lo que, para acceder al estado de la corriente, debemos entrar en la pestaña de la corriente concreta y comprobar el estado y las recomendaciones que se presentan.

No sólo encontramos la información de las cartas de control. En esta hoja de cálculo para el seguimiento podemos ver el rango de concentraciones que tiene la calibración que estamos usando para esa corriente, un gráfico de la desviación que ofrecen las medidas tanto de

laboratorio como del propio analizador y la representación del error puntual frente al periodo de tiempo.

Actualmente, con el seguimiento estadístico que se realiza sobre las corrientes, se ha llegado a un nivel de compromiso más que aceptable. Siempre que se sigan las recomendaciones de la carta de control y la experiencia en el control del proceso que se ha obtenido durante los años de funcionamiento de la planta, el quipo anualmente puede funcionar por encima del 80% de horas dentro de los límites de control, cuando anteriormente lo hacía por debajo del 65% de horas.

De hecho, en determinadas ocasiones, la fiabilidad del equipo es tal, que cuando aparece un error puntual muy alto (por encima del 10%) en algunas corrientes, puede ponerse en duda el valor de laboratorio, realizando en este caso un segundo análisis, lo que habla por sí solo del nivel de compromiso alcanzado por el equipo.

7 HERRAMIENTAS AUXILIARES

Para tener un preciso conocimiento del funcionamiento del proceso en todos sus aspectos y para ayudarnos a comprender fenómenos que pueden darse a lo largo del seguimiento de las corrientes, existen una serie de herramientas en las que apoyarnos, de una forma auxiliar, para sacar conclusiones más precisas.

Algunas de estas herramientas eran parte del control estadístico inicial de la planta y otras han sido creadas a lo largo de la elaboración del presente estudio. Inicialmente se contaba con las herramientas de "Seguimiento de la Matriz del rebose de ciclón" y "Seguimiento de Ácido". Durante el estudio estadístico realizado se crearon 2 herramientas más "Gráficas EWMA" y "Índices de capacidad".

7.1 Matriz de rebose de ciclón

Esta herramienta es una hoja de cálculo donde en cada turno se rellena con las proporciones (%en peso) de los elementos más influyentes en el análisis por difracción de rayos x, lo que afecta al Courier. Estos elementos son: Cobre, hierro, calcio, azufre, manganeso, sílice, cinc, arsénico, y plomo, siendo los cinco primeros los elementos mayoritarios, puesto que constituyen de media un 85% del total del mineral.

Si presenciamos un aumento notable de alguno de los elementos, esto podría influir en un aumento de los errores por parte del analizador. Fundamentalmente, el calcio es de los más influyentes, aunque un aumento de los minoritarios, históricamente también suele afectar.

El mineral se acopia en pilas, que alimentan al proceso. Las pilas suelen estar homogeneizadas y presentar una composición parecida. Lo que ocurre es que al ir agotando el yacimiento, las composiciones varían. De ahí reside la importancia de esta herramienta. Antes de comenzar la alimentación con una pila nueva, suele muestrearse unos 7 o 10 días antes de su uso, con objeto de preparar el proceso si necesita unas condiciones especiales (algo más de ácido, temperatura…). Desde el punto de vista de la estadística de control, puede afectarnos como se expone anteriormente, de cara a la aparición de elementos interferentes.

7.2 Seguimiento de ácido

De la misma forma que se controla la concentración de hierro y cobre en las corrientes líquidas, también se hace de la concentración de ácido. Un exceso de ácido puede indicar una lixiviación más baja de lo esperado y viceversa, aunque este parámetro suele ser secundario, puesto que el proceso de lixiviación puede controlarse de forma más eficiente con el seguimiento de composites de cobre y hierro.

7.3 Gráficas EWMA

Son gráficos de ponderación de medias móviles en el tiempo. Cuando queremos realizar el seguimiento de un periodo, por experiencia y en base a cómo se realizan las comparativas en las corrientes con el laboratorio de referencia, se han escogido los 100 últimos turnos para tal propósito. Pero puede que durante los 100 días, el proceso haya sufrido variaciones, la pila de alimentación no sea la misma…

Por ello puede pensarse que los resultados más recientes son más representativos del estado actual de la corriente, por lo que una solución es ponderar estos resultados en el tiempo, es decir, en las decisiones sobre el estado de la corriente, deben tener mayor peso los valores más recientes.

Para solventar este inconveniente de, se propone implementar este tipo de gráficas de control, donde los límites, en su cálculo dependen de un parámetro de ponderación, λ. Este parámetro puede estar comprendido entre 0,01 y 1, de manera que mientras más próximo nos encontremos de 0,01, menos importancia tendrían los datos antiguos y viceversa, siendo λ=1 los límites de control presentados en las cartas individuales sin ponderar. Se recomienda valores tal que 0,2> λ > 0,5. Este procedimiento será de especial utilidad en el muestreo de nuevas pilas o alimentaciones al proceso, de modo que podamos anticipar si la calibración vigente puede resultar aceptable o debemos modificarla. También aportará información sobre la centralización o no del proceso, todo ello en base a la referencia tomada.

Así pues, con un muestreo de una nueva pila que vaya a alimentar al proceso, podemos hacer una estimación de los límites que presentará para cada corriente y compararlos con los establecidos en la carta de control. Gracias a esto, podemos saber si a lo largo del uso de la nueva pila, necesitaremos una nueva calibración en función de la existencia de gran diferencia o no con los límites de control que tenemos fijados.

La forma de calcular estos límites es la siguiente:

$$LCS = \bar{\bar{X}} + 3\sigma * \sqrt{(\frac{\lambda}{n(2-\lambda)})(1-1(1-\lambda)^{2t}} \quad \text{(ec.4)}$$

$$LCI = \bar{\bar{X}} - 3\sigma * \sqrt{(\frac{\lambda}{n(2-\lambda)})(1-1(1-\lambda)^{2t}} \quad \text{(ec.5)}$$

Donde “t” son los subgrupos de muestreo, en nuestro caso 3, por estar divididos en 3 turnos y “n” es el número de datos que recopilemos, que variarán en función del muestreo de cada pila, aunque típicamente suelen ser 8.

8 RESULTADOS DEL MÉTODO

Concluido el estudio de la estadística de control para la mejora y optimización de los analizadores tipo Courier existentes en la planta, se obtiene una herramienta para la estimación y predicción de los errores derivados de la comparativa entre este analizador y su patrón, el laboratorio externo.

La estadística de control que pasamos a tener se divide fundamentalmente en tres partes:

- HISTÓRICO DE DATOS: Se crea un seguimiento que contempla los registros de mediciones de cobre y hierro desde que el proceso se controla mediante el análisis estadístico básico (Julio 2014). Este registro se actualiza turno a turno, de modo que permite crear una base de datos en Excel. Será esta la matriz de datos que utilizarán las gráficas y cartas para la representación de datos.

- GRÁFICAS DE SEGUIMIENTO: tal y cómo se tenía con anterioridad a este proyecto, existen varias gráficas de seguimiento que permiten extraer datos relevantes del proceso, tales como si seguimos dentro del rango de concentraciones con las que hemos calibrado, la dispersión de las muestras, lo que no da una orientación sobre cuán fiable es el error puntual de los turnos o gráficas para ver representar el error puntual con los antiguos niveles de confianza del 5%.

- CARTAS DE CONTROL: En las corrientes especificadas en el alcance, se incluye además las cartas de control resultantes del presente estudio.

8.1 Implantación en el sistema de calidad de la empresa

Una vez desarrolladas las herramientas estadísticas, se dispone la implementación con la premisa de que sea accesible a los técnicos que trabajan con el equipo y de una forma sencilla, que permita operar dichas herramientas sin la necesidad de tener amplios conocimientos sobre estadística u ofimática, facilitando así que cualquier persona de la organización pueda comprobar el estado de las corrientes sin apenas explicación previa.

Para ello, se parte de la base que ya se tenía de la estadística de control inicial, de modo que conserve la interfaz.

Inicialmente, los archivos que se tenían eran a dos meses vista, es decir, los datos de las mediciones de cobre y hierro del mes anterior y el mes actual, y sobre estos datos, los gráficos de seguimientos iniciales.

				PLS 1º						
		FECHA	TURNO	Courier	LABORATORIO	Errores			Desviaciones	
				Cu	Cu	Err	Err Abs	media móvil 3 días	Desv COURIER	Desv lab
653	646		01/02/2015 6:00	42,03	38,49	-9,2%	9,2%	-12,4%	6,0%	4,9%
654	647	01/02/2015	01/02/2015 14:00	41,33	36,87	-12,1%	12,1%	-12,3%	5,6%	4,4%
655	648		01/02/2015 22:00	41,14				-15,0%	4,9%	4,4%
656	649		02/02/2015 6:00	40,78	36,22	-12,6%	12,6%	-12,7%	2,3%	4,5%
657	650	02/02/2015	02/02/2015 14:00	38,61	35,45	-8,9%	8,9%	-12,0%	3,7%	3,2%
658	651		02/02/2015 22:00	39,41				-11,8%	4,1%	3,2%
659	652		03/02/2015 6:00	39,81	36,45	-9,2%	9,2%	-10,4%	3,8%	2,8%
660	653	03/02/2015	03/02/2015 14:00	41,23	37,63	-9,6%	9,6%	-10,3%	3,3%	2,9%
661	654		03/02/2015 22:00	40,40				-10,5%	2,7%	2,9%
662	655		04/02/2015 6:00	41,03	38,88	-5,5%	5,5%	-9,2%	2,3%	3,3%
663	656	04/02/2015	04/02/2015 14:00	42,15	38,71	-8,9%	8,9%	-9,1%	2,7%	3,8%
664	657		04/02/2015 22:00	41,31				-8,4%	2,7%	3,8%
665	658		05/02/2015 6:00	41,58	38,75	-7,3%	7,3%	-8,1%	2,8%	3,8%
666	659	05/02/2015	05/02/2015 14:00	41,64				-8,1%	2,2%	2,7%
667	660		05/02/2015 22:00	41,97				-7,8%	1,8%	2,7%
668	661		06/02/2015 6:00	41,67	34,49	-20,8%	20,8%	-10,6%	1,3%	4,9%
669	662	06/02/2015	06/02/2015 14:00	41,00	39,80	-3,0%	3,0%	-9,1%	1,3%	5,5%
670	663		06/02/2015 22:00	40,44				-10,0%	1,3%	5,5%

Imagen 24: Nuevo histórico de datos

Ahora, conservando el formato, se adjunta todo el histórico desde Julio de 2014 incorporando un filtro en las hojas de cálculo como se ve en la imagen, lo que permite desplazarse por el archivo de forma ágil, con ayuda de Microsoft Excel, se programaron ,en una pestaña distinta, dos macros de modo que pueda elegirse el periodo que quiera comprobar el usuario y otra para actualizar todas las gráficas existentes, de modo que cualquiera puede comprobar la estabilidad de las mediciones desde Julio de 2014 hasta la actualidad, lo que permite realizar comparativas entre periodos de una forma mucho más rápida y apoyándonos en las cartas de control.

Esta versatilidad es fundamental en un buen análisis estadístico, ya que a menudo contamos con un tiempo limitado y esto nos facilita el trabajo a la hora de sacar conclusiones.

Cabe recordar que, como se indicó en capítulos anteriores, todos los estudios estadísticos están referenciados a 100 datos, por ello cada periodo de tiempo ofrece un análisis estadístico independiente en los archivos creados.

Otra de las implementaciones más útiles es la de la tabla de estado:

Valor medio Lab	5,23	
Valor medio Courier	5,06	
Límite especificación	±5%	
Nº de datos	87	
Nº de datos lím. Especif.	51	
Porc.entaje lím especif	58,6%	
Nº de datos >5%	27	31,0%
Nº de datos <-5%	9	10,3%
%Error medio	2,9%	
%Error medio abs	5,6%	
Media móvil 3 días	0,0%	

Tabla 7: Tabla de estado

Esta tabla muestra un resumen de los parámetros más importantes en el seguimiento de la corriente, referido siempre a los 100 datos seleccionados. Ofrece el valor medio de los 100 datos

del Courier y del laboratorio de referencia (Lab en la tabla), el número de datos totales, puesto que a pesar de estar referido a 100 datos, puede que por problemas técnicos, de mantenimiento…no se cuente con tal número de mediciones, por lo que se realiza un conteo.

La siguiente información nos muestra cuántos de estos datos están dentro del límite de control "antiguo", es decir, basado en el ±5%. Esto es de utilidad, puesto que permite comprarlo con los datos de las cartas de control y hacer un seguimiento de la fiabilidad de cada método.

Por último aparecen los porcentajes de los errores medios diarios y a tres días, que son los parámetros influyentes en la carta de control.

Con esta pequeña tabla puede sacarse de un vistazo toda la información necesaria en materia de estadística para crearnos una ligera idea del comportamiento de la corriente y poder contrastarlo con la información de la carta de control. Siempre ha de tenerse un método que contrate un análisis estadístico de este tipo, ya que la toma de decisiones debe realizarse a criterio personal del ingeniero encargado del equipo, por ello, a pesar de que la carta de control aconseje una serie de acciones, siempre la experiencia del técnico con los datos resumidos de esta tabla será la que dicte la acción a realizar.

En el punto 6.3 puede verse la carta de control de individuales que se implementa en las corrientes.

En el caso de las herramientas auxiliares, el archivo de matriz de rebose de ciclón y el de seguimiento de ácido no se incluyen puesto que fueron desarrolladas en colaboración con el departamento de control de procesos y se desea preservar su confidencialidad por parte de la empresa.

Para las gráficas EWMA, de media ponderada, requieren de conocimientos estadísticos muy avanzados en materia de analizadores y el manejo del software MINITAB17, por lo que la herramienta creada no se introduce en el sistema de calidad de la empresa, sino que se le transfiere al técnico encargado del equipo Courier.

9 CONCLUSIONES

Una vez finalizado tanto el estudio estadístico como la posterior implementación, comienza el uso de esta técnica para mantener en control los analizadores en línea de la planta, concretamente de la zona de hidrometalurgia.

Para que los analizadores cumplan los criterios de la calidad Seis Sigma, se han seguido los siguientes pasos:

- Estudio de la estadística de control.
- Obtención del estadístico de control adecuado.
- Establecimiento de límites fijos en función de los datos históricos de estabilidad del proceso.
- Adaptación de las cartas de control.
- Creación de las herramientas estadísticas.
- Implementación en el sistema de calidad

La posibilidad de tener los analizadores en calidad Seis Sigma desde el punto de vista de la operativa es un gran avance. Hasta ahora no existía un método anticipativo que nos permitiese analizar en tiempo real una posible desviación del equipo, debido a que las comparativas que se realizaban eran con el laboratorio de referencia. De media, este laboratorio suele reportar datos con 4 turnos de retraso, es decir, si en el turno de mañana de un Martes el equipo ofrece una medida puntual inaceptable, no lo sabríamos hasta el Miércoles en el turno de tarde. Este sistema nos hacía que paliáramos desviaciones del equipo una vez que el fallo se había producido.

Además, la sistemática para paliar dicho error no estaba definida, con lo que se factorizaba, calibraba o no se actuaba en función de la pericia y la experiencia de los técnicos responsables.

Fundamentalmente, mantener los analizadores en calidad Seis Sigma tras la adaptación conseguida en este proyecto dota de FIABILIDAD a las mediciones que el equipo realiza. Ahora, el laboratorio externo confirma los datos estadísticos extraídos de las cartas de control, lo que supone un avance en la calidad de los analizadores. La sistemática de actuaciones que también conlleva esta implantación dota de independencia al sistema, por lo que, independientemente de que el técnico responsable esté o no en la planta, se cuenta con un método de garantías que permite el total control de la calidad.

Los aspectos más relevantes que se extraen, no sólo del estudio estadístico, sino de su puesta en marcha son los siguientes:

1) INFLUENCIA EN LA PRODUCCIÓN: Existen sobretodo dos aspectos que, tras la implementación de la calidad Seis Sigma, permiten que la producción de cobre se vea mejorada. En primer lugar, al contar ahora con un sistema que permite identificar y alertarnos sobre los errores con fiabilidad, no esperamos a que el error se produzca, nos anticipamos, de este modo minimizamos los periodos en los que no operamos eficientemente, lo que redunda sobre todo en un aumento del rendimiento de la recuperación de cobre. Del mismo modo actúa el segundo factor; al establecer una sistemática de actuación, cada vez que se opere sobre el equipo se hará de modo más eficiente, permitiendo que las horas de funcionamiento del equipo de modo correcto aumenten.

2) OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS: Los recursos se utilizan más y mejor. La versatilidad de las herramientas creadas, así como la propia naturaleza de las cartas de control, permiten una rápida y efectiva toma de decisiones. De este modo optimizamos dos recursos importantes, el tiempo y el analizador. El analizador funciona más y mejor con una menor dedicación (tiempo) por parte de los técnicos encargados, puesto que tienen herramientas suficientes para seguir un protocolo de actuación correcto en menos tiempo. También cabe añadir que al actuar de una manera más acorde con las necesidades del equipo, se prevé que se reduzca el mantenimiento del equipo, lo cual redunda en una optimización de recursos (tiempo y dinero) por parte de la compañía.

3) HERRAMIENTA FIABLE: La calidad Seis Sigma, como se explica en el apartado correspondiente, permite una enorme fiabilidad. Este método ha sido adaptado para el proceso en el que nos encontramos inmersos y se estima que, al menos, el 75% de los datos estarán dentro de especificaciones. Además, por la naturaleza de las herramientas creadas, en función a la base de datos creada, permiten que la adaptación sea total y las actuaciones a realizar sean las más adecuadas para el proceso. Todo esto hace que el analizador sea un equipo fiable, así como las herramientas para la toma de decisiones.

4) HERRAMIENTA PREDICTIVA: Estamos ante un método que se basa en la estadística, pudiendo predecir (por ejemplo con las gráficas EWMA) el comportamiento de las corrientes cuando se cambia de pila de alimentación o simplemente tras un periodo de tiempo concreto. También puede predecirse con la carta de control, como se explica en el capítulo correspondiente, gracias a la pendiente y a la tendencia que expresa la carta de control. Así que la principal ventaja es el anticiparse a las posibles incidencias

Así pues, la inclusión de estas mejoras en cuanto al control de procesos aporta un **beneficio directo sobre la producción** y además supone un **ahorro** en **tiempo** y en recursos **económico**s en el día a día de la operación.

Por todo esto, se implementan las herramientas expuestas en este proyecto dentro del sistema de control y calidad en el conjunto minero Cobre las Cruces como primera versión, que se espera que evolucione con el uso y la recogida posterior de datos.

10 ASPECTOS DE MEJORA

En el momento de la finalización del presente proyecto, las herramientas creadas se introducen en el sistema de control de la planta, como se presenta en los anexos, intentando preservar el modelo y el estilo de las herramientas anteriores.

A pesar de conseguir el objetivo planteado y con motivo de la finalización de la beca concedida para ello, existen ciertas medidas que mejorarían de cara al futuro la herramienta principal, la carta de control, así como el flujo de información de la misma.

A continuación se exponen dos de las principales ideas que podrían ser viables:

- Actualización de límites de control: los límites de control, fueron objeto de estudio, decidiéndose tomar aquellos que representaban la estabilidad de la planta. Puesto que en la implementación se construyó un histórico donde, además de los datos utilizados para la construcción de estos límites, también se van introduciendo los nuevos datos adquiridos. Podía crearse un análisis de dichos datos, con el objetivo de controlar en cada momento, cuál es el periodo que representa mejor la estabilidad del proceso, con el objetivo de que si encontramos en las distintas corrientes periodos cuya estabilidad sea máxima, podríamos no sólo actualizar los límites de control, sino estudiar por qué se obtienen resultados más positivos, de manera que aumente la calidad y el conocimiento sobre el control del proceso. Esto es extrapolable al proceso inverso, estudiar periodos en los que el control no sea adecuado para comprobar en qué falla el modelo, todo con objetivo de ir actualizando y mejorando el trabajo inicial.

- Creación de una base de datos sobre actuaciones: Las distintas actuaciones que se realizan sobre el equipo actualmente quedan registradas en el software del propio equipo. Se propone la creación de una base de datos o un histórico de dichas actuaciones asociados al hecho que motiva la actuación concreta. De esta forma, puede obtenerse información a largo plazo de qué cambios en el proceso motivan un cambio de calibración o una factorización, lo que ayudaría a un diagnóstico de cuáles son los factores más influyentes para el control del equipo y nos permitiría centrar los esfuerzos y recursos en estos factores.

Existen otros caminos por explorar, como por ejemplo si realmente, puede compararse directamente el dato que laboratorio nos ofrece con la técnica de ICP contra el que ofrece el Courier, que analiza por rayos X, puesto que son métodos distintos con distintos márgenes de confianza y distintas precisiones. O si el protocolo de toma de muestras para el análisis del laboratorio está bien implantado/inculcado en los encargados de llevarlo a cabo.

Estas últimas vías de mejora necesitan más recursos para poder llevarse a cabo, con lo que los anteriormente desarrollados parecen más viables de poderse gestionar.

11 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

El proyecto, en su mayor parte, se adapta a las características exigidas para los procesos Seis Sigma, en este campo, el manual utilizado para realizar esta labor fue: *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma*, de los autores Humberto Gutiérrez Pulido y Román de la Vara Salazar, de la editorial McGraw Hill.

Para el estudio estadístico en Microsoft Excel no fue necesario más de los conocimientos adquiridos durante la carrera, tanto de programación para la implantación como para el uso de las herramientas del programa. En el caso del programa Minitab17 se utilizó el manual de introducción al programa, que puede consultarse on-line en la dirección: http://www.minitab.com/uploadedFiles/Documents/getting-started/Minitab17_GettingStarted-es-es.pdf

Para la búsqueda de contenido en cuanto al sector minero, la información fue obtenida de la Junta de Andalucía, en concreto, en un informe de la consejería de Medio Ambiente, que puede consultarse en la siguiente dirección: http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Estado_Y_Calidad_De_Los_Recursos_Naturales/Suelo/documentos/evolucion_mineria.pdf , además de diversas búsquedas en el portal Wikipedia, https://es.wikipedia.org/

Por último, para el entendimiento del proceso y el conocimiento del mismo, se utilizaron los manuales de operación y diseño de la planta