

METODOLOGIA DE INGENIERIA PARA ABORDAR PROYECTOS HIDROMETALURGICOS DE PLANTAS PEQUEÑAS

ABSTRACT

En este documento se analizan los métodos y tecnologías que permiten la creación de Plantas LX-SX-EW de baja capacidad de producción, económicamente viables, como también los escenarios que las hacen factibles o riesgosas.

Considerando que en estos proyectos de ingeniería de baja inversión los costos llegan a tener un muy alto impacto, se propone una metodología para ejecutarlas de una manera rápida, eficiente y económica y también se señalan las herramientas metodológicas que permiten llevarlas a cabo.

Se presentan diversos conceptos de re-ubicación de plantas pequeñas, en múltiples tecnologías de lixiviación de mineral, configuraciones de plantas y equipos optimizados usados en ellas para reducir costos de inversión y operacionales de un modo seguro y mejorando la calidad de los productos.

INTRODUCCION

En la localidad de Domeyko (III Tercera Región de Chile) en 1998 se construyó la primera etapa de la Planta Dos Amigos de la Empresa CEMIN con una capacidad de 5.000 toneladas anuales de cátodos de cobre a partir de minerales sulfurados de 1,44% de ley total y basada en un yacimiento con el orden de sólo 4,5 millones de toneladas cubicadas. Un año después la planta duplicó su capacidad a 10.000 toneladas anuales, completando una inversión del orden de 18 M-US\$ en el proyecto (la mayor parte en la planta), para operar actualmente a un costo total del orden de 36 a 40 centavos US\$/lb, operando con una configuración SX “serie-paralelo” y procesando una ley que ya ha descendido al orden de 1,1 %.

En el verano del 2000 se construyó la primera etapa de una planta SX – EW en la Planta Osvaldo Martínez de ENAMI ubicada en el Salado (III Región) con capacidad de sólo 57 toneladas mensuales de cátodos con una inversión del orden de 1,0 M-US\$ y que estimativamente opera a costos en el rango de 25 - 35 centavos US\$/lb. Estas etapas de SX-EW pertenecen a la Planta Osvaldo Martínez para reemplazar su producción de precipitados de cobre y diseñada para ampliarse hasta una capacidad final de 200 toneladas mensuales. Actualmente está implementándose con una inversión adicional en el orden de 0,8 M-US\$, mientras su capacidad de diseño final se ha estudiado ampliar a 400 toneladas de cátodos mensuales.

Ambas plantas, construidas con tecnología y participación de TERRAL constituyen ejemplos de aplicación de tecnologías SX–EW a baja escala para explotar pequeñas minas con rentabilidades atractivas para sus dueños. Ello motivó a TERRAL a desarrollar estudios sobre este tema para identificar sus características y proceder a la explotación comercial de este probable nicho de mercado, dado que mientras las corporaciones mineras buscan y encuentran yacimientos masivos de -al menos- varias decenas de millones de toneladas cubicadas. La existencia de múltiples minas de menor tamaño para las cuales estos desarrollos serían aplicables. A TERRAL le interesa participar como implementador tecnológico y operador.

1. CARACTERÍSTICAS DE UN NEGOCIO MINERO DE PLANTAS PEQUEÑAS

La minería, como cualquier sector de negocios, pretende generar valor económico agregado a los recursos empleados por sus dueños accionistas, mediante una gestión eficiente que además facilite una situación financiera tranquila, para favorecer un clima interno “pro-activo” y aprovechar las oportunidades que se detecten durante su actividad productiva.

Un negocio, centrado en una planta pequeña, presenta particulares diferencias respecto a las características de un negocio minero tradicional; algunas de ellas son:

- No existe un recurso mineral descubierto de gran envergadura, capaz de sustentar sobre bases confiables, una larga vida operacional. Por el contrario, es la oportunidad de un buen negocio el que motiva la búsqueda y el aseguramiento de reservas de mineral.
- La Planta debe ser altamente eficiente y requiere que sus inversiones puedan amortizarse en plazos cortos, generalmente relacionados con el potencial más favorable y mejor estimado de recursos minerales del proyecto.
- La alta eficiencia requerida exige al ingeniero diseñar un “proyecto a medida”, que no arriesgue la necesidad de ser eficiente.
- Los gestores de este nivel pocas veces cuentan con el respaldo técnico propio de las organizaciones mayores, lo que constituye un desafío. Por lo tanto, es aconsejable complementar al equipo gestor de la iniciativa con competencias que van en un sentido inverso al conocido como “economía de escala”.
- La agilidad de operar con plantas pequeñas y la flexibilidad de ajustar su demanda a la disponibilidad de minerales (tonelajes, calidades, etc.) puede ser bien utilizada mediante planes de negocios modulares, ajustados a particularidades coyunturales que son dinámicas o cambiantes.

Dentro del contexto descrito, el rol del ingeniero que debe diseñar “el proyecto a medida” y queda entonces enfocado a trabajar con los siguientes objetivos:

- Eficiencia en el uso del Capital, con mínima inversión por unidad de producto.
- Eficiencia operacional, para lograr un producto de alta apreciación en el mercado y al más bajo costo.
- Eficiencia en el control de todos los riesgos, incluidos los laborales y ambientales y evitando la generación de pasivos ambientales a largo plazo.

Las causas que afectan la rentabilidad (y por ende la ganancia) son los factores de riesgo, capaces de alterar las cifras planeadas y desviarlas desde sus valores objetivos planeados a otros más

desfavorables. En una explotación minero-metalúrgica estos factores de riesgo son conocidos y son tanto externos como internos, de los que sólo algunos son controlables por los gestores.

Lo anterior conduce a que en este ámbito de pequeños proyectos lo más recomendable es cuidar los costos proyectados, particularmente a través de las recuperaciones metalúrgicas y consumos, cuyo grado de seguridad dependerá del diseño del negocio y de su administración y de la calidad de la información minera, metalúrgica y de la calidad de su análisis previo.

Favorablemente, dado que una planta pequeña está configurada a partir de equipos e instalaciones cuyo tamaño los define como esencialmente reubicables, la vida útil de la planta hasta cierto punto se independiza del tamaño de la mina. Así, la geología sólo debe validar un mínimo de cubicación probada que ya justifique iniciar el proyecto pequeño, más que descubrir los recursos finales. La capacidad final de la planta también puede llevarse a cabo después de algunas expansiones de la planta para procesar la mayor cantidad de mineral descubierto.

2. EL ROL DE LA INGENIERIA EN PROYECTOS DE PLANTAS PEQUEÑAS

En el contexto de esta escala de proyectos el papel de la ingeniería se ve imperceptible, pero muy seriamente, comprometido. En relación a los aspectos, que son de atención por parte del gestor o dueño de la iniciativa de negocios, comentaremos los siguientes tópicos:

2.1 LA RESPONSABILIDAD Y EL PAPEL DEL INGENIERO

- En lugar de los alcances acostumbrados del ingeniero, hay un retorno de sus prioridades a la lógica. Para el propietario, debe ser prioritario establecer las estructuras de negocios como referencia fundamental para establecer el marco técnico. Sin embargo, el propietario también necesita antecedentes que proporciona la ingeniería para establecer el marco de negocios.
- En consecuencia, y dada la implementación de una empresa del tamaño interesada en plantas pequeñas, es esperable que el inversionista solicite otros servicios para asegurar su negocio y lo probable es que ellos se orientarán a demandar consejos al ingeniero respecto del armado conceptual del “negocio – proyecto”.
- La solicitud de lo anterior moverá peligrosamente al ingeniero fuera de su terreno, ya que lo lleva a presentar al cliente su recomendación del enfoque de negocio y de los objetivos y metas precisos, que según su opinión, el propietario debería asumir.
- Las empresas de ingeniería difícilmente tienen experiencia, o desean involucrarse en ellos. Sus habilidades objetivamente son más aparentes que reales en ese campo.

- Usualmente los ingenieros entenderán que deben proceder inicialmente a realizar la etapa de ingeniería conceptual pero, incluso para seguir este enfoque el ingeniero está habituado a que las alternativas a analizar en la etapa conceptual (“trade off”) le son presentadas por sus clientes. Posteriormente, pueden aplicar sus metodologías a la sola selección y respaldo de su recomendación, con aportes que más bien se orientan a los temas técnicos que a los enfoques del negocio.
- En pocas palabras, lo que en realidad interesaría -o convendría- al empresario es que su ingeniero le ayude a formular su negocio, con lo que justamente pone al ingeniero en el rol previo de proponer cómo abordarlo, de definir sus objetivos y enfoques de materialización y también de definir las alternativas viables en cuyo análisis conviene concentrarse.
- Razones simplemente éticas y prácticas cambian bruscamente el método del ingeniero desde la usual forma de trabajar “para el cliente” y según los enfoques de éste, a otra posición diferente en la que necesita trabajar simultáneamente “con y para el cliente”, incluso para ayudarlo a definir las tareas de ingeniería que luego le serán encomendadas para que las realice con sus metodologías estándar.
- Una dramática demostración de esta realidad, respecto del impacto de un enfoque “sólo de ingeniería” en lugar de un enfoque “de negocios” a un proyecto, radica en la simple observación de los usuales aumentos del presupuesto calculado a través de las sucesivas etapas conceptual, básica y de detalles de la ingeniería de un proyecto, sin mencionar la comparación de las inversiones y de los costos proyectados con el resultado operacional real.

2.2 LOS ALCANCES Y EL PRECIO DE LOS SERVICIOS

- Los documentos de respaldo para fundamentar una propuesta de inversión dependen del criterio que aplique el inversionista. Por ejemplo, son distintos los requisitos de presentación que aplicará un banco de los requisitos que usará un inversionista privado particular, dependiendo de la confianza que otorga al ingeniero o basado en los requerimientos de sus fuentes de financiamiento alternativo, o por su propia visión de las oportunidades coyunturales del mercado.
- Las tareas relativas a la conceptualización del marco del negocio son variables y difíciles de presupuestar; representan una consultoría de alto valor y de gran responsabilidad y riesgo, principalmente en el contexto del otorgamiento de garantías al inversionista. Pero este mayor valor de esas tareas difícilmente le será reconocido y pagado al ingeniero.
- Las instalaciones incluidas en un proyecto pequeño son básicamente las mismas que en un proyecto grande; con ello, el trabajo de ingeniería en realidad sólo cambia en el tamaño de los diseños, pero no en la cantidad ni en el tipo de los diseños. De esta forma, el tiempo empleado para efectuarlos sólo presenta ahorros marginales por la menor cantidad de tiempo requerido para la confección de esta menor necesidad de documentos.

- Por lo anterior, la mayoría de los elementos del precio de los servicios de ingeniería se mantienen y sólo disminuyen los costos de los alcances eventuales, relativos a servicios de asistencia a la construcción, montaje y puesta en marcha, que debieran ser de menor duración.
- De esta forma, el servicio de ingeniería resulta caro para el cliente, o por el contrario, el precio que el cliente puede pagar es poco atractivo para el ingeniero.
- El tema del precio de los servicios puede resolverse mediante una disminución de los alcances, o por una ingeniería propia al interior de la empresa u otra modalidad, pero se debe cuidar que esos enfoques conduzcan a una ingeniería menos detallada, lo que afectaría la calidad del proyecto y aumentaría el riesgo del negocio, que es justamente lo que siempre se debe procurar reducir.

2.3 LOS REQUISITOS DEL INGENIERO PARA PROVEER LO NECESARIO

- Los requisitos del ingeniero estarán entonces relacionados con su capacidad para proveer una solución tecnológica que satisfaga al objetivo del negocio para el cliente, negocio que además debe interpretar cabalmente al cliente o que honestamente convenza al cliente que lo que se le propone es lo que le conviene.
- No obstante, independientemente de la opinión del ingeniero, el cliente también presentará sus propios objetivos, condiciones y restricciones para el proyecto, ello resulta en una tarea en la que los enfoques suelen ser difíciles de conciliar.
- Lo ideal es que mediante interacciones conjuntas y con roles cambiantes en el desarrollo del trabajo y con el ingeniero a veces aconsejando con fuerza ideas propias, otras veces sólo elaborando ideas del cliente, finalmente se acuerde por consenso y sobre bases muy objetivas,
- Así, el proyecto es elaborado para que resulte exitoso y se controlen los riesgos económicos del inversionista tanto como los riesgos de prestigio del ingeniero y también, indirectamente, se eliminen los riesgos de destruir el concepto de las plantas pequeñas o el interés de los empresarios por este nicho de mercado.
- La experiencia indica que todas las fallas, que se hacen evidentes en la fase de operación de un proyecto y afectan sus aspectos económicos ocurren por detalles mal resueltos antes porque no se los enfocó adecuadamente, o por aplicación de enfoques sobre “lo técnico” y no sobre “el negocio”. Independientemente de las causas reales últimas de las fallas, siempre se espera que fuese la ingeniería la que los visualizara y resolviera en alguna de las etapas anteriores de desarrollo del proyecto, por lo que –con o sin razón- la ingeniería es considerada de todas formas “culpable”.
- Dado que en las plantas pequeñas, más que en los proyectos grandes, el ingeniero es considerado responsable de evitar los riesgos, el ejercicio de un simple análisis estadístico

de las fallas ya ocurridas en proyectos revisados durante su vida operacional, marca los requisitos que debiera tener el ingeniero para evitarlas oportunamente en la fase de desarrollo del proyecto:

- **Enfoque del negocio:** Fallas por objetivos mal planteados en las etapas conceptuales, muy usualmente causadas por “sesgos” o decisiones arbitrarias cuando los participantes hacen lo que “querían” (o lo que “sabían” hacer) en lugar de hacer lo que “debía hacerse”.
 - **Enfoques técnicos del proyecto:** Fallas por formas de “sesgo” en las decisiones de este nivel y que normalmente afectan la configuración del proyecto, su procesos, su implementación o sus equipos e instalaciones.
 - **Definición de las holguras del proyecto:** Errores al asumir posibles cambios de condiciones y contingencias de todo tipo, errores al dotar las instalaciones iniciales con pocos grados de flexibilidad para resolverlas, o para implementar soluciones más adelante y con mínimas interferencias con las instalaciones iniciales.
 - **Desglose de las ideas anteriores:** Con errores al nivel de detalles en las decisiones respecto de varias áreas de la planta proyectada y muy particularmente en el área de lixiviación, desde la cual se trasladan efectos a la operación de las áreas de SX y EW, dada la interrelación de la cadena del proceso global.
- En consecuencia, los ingenieros necesitan estar preparados con conocimiento especializado para aportar en suplencia del propietario, o en su suplemento, en los temas de gestión y de la metalurgia tales como:
- Conocimiento del negocio, para abordar el proyecto obteniendo la rentabilidad máxima con el mínimo de riesgos.
 - Conocimiento de la metalurgia, para evaluar las mejores soluciones para el proyecto.
 - Conocimiento de las configuraciones de plantas, sea para extraer el máximo de provecho a las implementadas, o para prever sus problemas y dotarlas con adecuados grados de flexibilidad para resolverlos.
 - Conocimiento de ingeniería, lo cual es el conocimiento básico del ingeniero para enfrentar las etapas, una vez que éstas han sido decididas.
 - Conocimiento y experiencia en los temas de tecnologías, para especificar o diseñar los más adecuados equipos e instalaciones de planta y sus materiales de construcción, según los marcos del proyecto.
 - Experiencia en operación, tanto para prever el buen comportamiento práctico de sus diseños durante la operación como para abordar la programación de los sistemas de instrumentación y control; también para abordar las tareas de confección de manuales,

de entrenamiento del personal, la puesta en marcha de las instalaciones y eventuales asistencias a la operación, aunque ellas sean para corregir bajo términos de garantía las disconformidades que el proyecto presente.

- Disposición a asumir responsabilidad sobre materias relacionadas con el riesgo económico.
- La conclusión indica que los ingenieros deben estar preparados para:
 - hacer más cosas que en sus alcances habituales, principalmente para colaborar en establecer el marco del negocio.
 - estar mejor preparados y con buena experiencia incluso en otros ámbitos de sus conocimientos habituales,
 - garantizar su trabajo y
 - optimizar el costo de sus servicios.

Todo lo cual suena a un completo contrasentido, ya que en definitiva ello implica que en este tipo de proyectos, el ingeniero debiera cobrar más barato aunque necesita tener un conocimiento adicional de otras áreas y por hacer más aportes y de mayor impacto al negocio.

3. PROPOSICIÓN DE METODOLOGÍA DE INGENIERÍA EN PROYECTOS DE PLANTAS PEQUEÑAS

TERRAL ha encontrado la forma para resolver el contrasentido, el que es consecuente con su condición de pequeña empresa de ingeniería, especializada en procesos y enfocada sólo a proyectos hidrometalúrgicos. Adicionalmente, sus empresas relacionadas Novatec S.A. (laboratorio de pruebas metalúrgicas y de desarrollo de procesos) y Forza S.A. (taller de fabricación de equipos de procesos) han cumplido roles en proyectos anteriores. También mencionamos a otras empresas externas especializadas en las otras disciplinas de la ingeniería, con las que ya ha participado en varios proyectos de este tipo.

El riesgo propio asociado al otorgamiento de garantías duras queda minimizado por el conocimiento y la experiencia acumulada. Además y desde un punto de vista ético, en TERRAL ello es considerado como una condición natural que se debe asumir en todos los negocios.

Lo que queda por resolver es establecer una metodología y los instrumentos para ejecutarla tomando en cuenta los nuevos requerimientos de los clientes para sus proyectos de plantas

pequeñas, permitiendo ejecutarlos con calidad y seguridad a costos tolerables para los eventuales clientes.

3.1 INSTRUMENTOS DE LA METODOLOGIA DE INGENIERIA PARA PROYECTOS DE PLANTAS PEQUEÑAS

La solución elegida por TERRAL pasa por envasar conocimiento en programas de computación y bases de datos estructuradas para aplicar la misma metodología estandarizada para lograr diseños que son únicos para cada proyecto. Ellos cuentan con los siguientes módulos y presentan las siguientes características:

MÓDULO DE CONFIGURACIÓN Y BALANCE DE MASAS:

- Los cálculos del balance de masas se efectúan según la configuración y las reacciones independientes de cada una de las etapas de lixiviación, SX y EW del proceso completo.
- Mediante iteraciones parciales es posible intercambiar las condiciones y los parámetros como datos de entrada, para adaptar las entradas a los cálculos, ya que no siempre los grados de libertad y las restricciones del problema son los mismos.
- De esta forma sólo dos modelos generales analizan las diversas opciones de configuración de plantas y de procesos, que difieren en el tipo de solución que se recircula en lixiviación (ILS o PLS) para ajustar las concentraciones objetivo del PLS.
- Mediante iteraciones globales es posible ajustar los balances conjuntos de las secciones LX-SX-EW de la planta completa, en cada uno de los varios escenarios que se estudien para compararlos.
- Los modelos se pueden correr en paralelo para comparar diversas opciones de configuración de planta y de ajustes de proceso para elegir la más conveniente.
- Sus resultados son enviados posteriormente a todos los módulos por medio de enlaces de datos.

MÓDULO DE CONFIGURACIÓN DE PILAS DE LIXIVIACIÓN:

- Destinado a dimensionar las pilas, sus sistema de riego y de drenaje en forma conciliada con la opción conceptual de modulación establecida en el módulo de configuración y balance.
- Sus datos de entrada provienen por enlaces desde el módulo de balances de masa y permiten seleccionar los aspersores y/o goteros y las tuberías y presiones de trabajo que satisfacen las condiciones establecidas en ese módulo.

MÓDULO DE PRE-DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS E INSTALACIONES:

- Módulo de cálculos por áreas de la planta de las cantidades y de las dimensiones distintivas

de los equipos e instalaciones. Típicamente los cálculos de las áreas de planta dados están basadas desde el módulo de balance de masas y desde las áreas anteriores, más otros ingresados donde corresponda.

- En configuraciones alternativas de planta, causadas por diversas razones asociadas a disponibilidad de fondos de inversión, tamaño de la mina o de la explotación o a la configuración del negocio, opcionalmente se integran algunas otras áreas.
- En todas las áreas se calculan o definen sus aspectos generales (p. ej.: movimientos de tierra, iluminación e instrumentación), consumos de energía y elementos de seguridad.
- Se consideran simultáneamente instalaciones alternativas para elegir la más conveniente.
- Pueden efectuarse en paralelo los cálculos de la implementación de las diversas opciones de negocio que se estudien en el módulo de balances de masa, conciliando diversos aspectos; por ejemplo, las implementaciones de las etapas de expansión con equipos similares cuya cantidad se incrementa en las etapas.

MÓDULO DE CÁLCULO DE INVERSIONES:

- Módulo de cálculos de las inversiones en instalaciones separadas de las mismas áreas de la planta definidas en el “módulo de pre-dimensionamiento”; ingreso de datos son enlazados a partir desde esos cálculos y de información desde bancos de datos o de cotizaciones específicas, según su grado de importancia y según la etapa de avance de la ingeniería.
- El grado de detalle del desglose de las partidas se mejora en el avance de la ingeniería. Ocasionalmente parte con algunos simples índices -en las etapas de estudios de alternativas- que luego se detallan al afianzarse las opciones elegidas.
- Análogamente, las cotizaciones -con diversos grados de formalidad y de precisión- sustituyen la información de precios desde bancos de datos al afianzarse las opciones elegidas.

MÓDULO DE CÁLCULO DE COSTOS:

- Módulo para los cálculos de los costos de operación y de administración de las opciones en estudio; los datos son enlazados a partir del valor de los consumos ya calculados en el módulo de balance de masas y de los precios de esos insumos.
- El módulo considera los costos de consumos de energía (provenientes del cálculos en el “módulo de pre-dimensionamiento”) además de índices de costos de mantenimiento provenientes del módulo de cálculo de las inversiones (inicialmente, luego se reemplazan por cálculos más precisos) y
- Decisiones respecto de contratos de servicios externos (por ejemplo de servicios, ventas, administrativos) y la dotación y costos del personal contratado.

MÓDULO DE CÁLCULO DE INDICADORES ECONÓMICOS:

- Módulo para los cálculos de los indicadores resultantes de las varias alternativas, para establecer su ranking comparativo; los datos son enlazados a partir de los costos y módulos de cálculos de inversiones.

MÓDULO DE DISEÑO DE DETALLES DE EQUIPOS:

- Módulo para los cálculos de detalle de los equipos.

3.2 LA METODOLOGIA DE INGENIERIA PROPIAMENTE TAL

DURANTE LA ETAPA DE ARMADO DEL NEGOCIO:

- En esta etapa se efectúa el primer ejercicio de cálculos del proyecto con los antecedentes que se dispongan, respecto de la producción deseada, o de la tasa estimada de tratamiento de mineral y los de la información metalúrgica o de cualquier otro aspecto limitante o condicionante del proyecto, haciendo la inmediata transposición entre variables independientes y dependientes según corresponda.
- Es conveniente modelar de inmediato y en paralelo las diversas alternativas de configuración, de capacidad o de otro tipo que se desee comparar, principalmente en lo relativo a balances de masas y a la implementación de las instalaciones.
- Lo importante de la solución del módulo de balance de masas (en las alternativas que se estudian), es que para construirlo y resolverlo en realidad se adoptan la mayoría de las decisiones sobre la configuración del proyecto. De esta manera, el producto de los cálculos del balance en realidad es la configuración del proyecto más que el balance de masas, el que es un muy importante sub-producto.
- Se recomienda adoptar el criterio que la atención de los temas de prevención de riesgos y medio ambientales sea considerada como una “función de cargo” de los ingenieros analistas más que bajo la atención de otros responsables, para que ellos incorporen los conceptos aplicables desde el inicio, incluso hasta para dejar previsto la estrategia del “plan de cierre” de las faenas.
- El traspaso de información mediante enlaces entre módulos mantiene la información permanentemente coordinada y reduce las revisiones producto de cambios sólo a las decisiones relativas a datos discrecionales que se incorporan, lo que economiza tiempos y costos del trabajo.
- Los objetivos de este primer ejercicio de cálculos de los módulos son mostrar los factores debido al alto costo de inversión o al aprovechamiento de servicios y a mostrar una supervisión de las implementaciones preliminares del proyecto como un todo.
- Los comentarios, observaciones y correcciones del equipo de trabajo a este primer ejercicio

de cálculos de los módulos del programa, permiten iniciar de inmediato nuevos y sucesivos ejercicios de cálculos, en los que:

- i. Se explican los avances de los diversos temas del proyecto y en todos sus aspectos al propietario y se incorporan sus indicaciones, restricciones, percepciones de factores de riesgo y se ensayan sus respectivas soluciones.
 - ii. Se atienden los factores de evaluación para priorizar las alternativas analizadas e iniciar el descarte de las que no correspondan para centrar los análisis posteriores sólo en los mejores prospectos.
- Este ciclo de revisiones y correcciones de los modelos se repite hasta consolidar la concepción del proyecto optimizado, que es consecuencia de:
 - i. La experiencia de los actores –del ingeniero y del propietario- para detectar los factores de riesgo y del dominio del conocimiento –imaginación incluida- para resolverlos del modo más conveniente por medio de las modelaciones.
 - ii. Los ejercicios de modelación y la seguridad de los datos usados, para elegir la “mejor alternativa” en base a los factores objetivos de ponderación que se hayan establecido para el proyecto.

La validez de esta crucial secuencia de análisis de configuración del negocio depende de la calidad del instrumento –programa de computación- y de la capacidad de sus usuarios para operarlo con buena velocidad para optimizar los tiempos y costos de la ejecución de los trabajos de ingeniería.

Durante su desarrollo se habrá transformado a la ingeniería en un factor del armado del negocio, pero –gracias al instrumento usado- el proyecto quedará virtualmente concluido en su conceptualización y se habrán controlado los factores de riesgo previsible y se habrán establecidos los grados de flexibilidad para atender imprevistos.

Bajo los conceptos tradicionales de la ingeniería, parecerá haberse efectuado simultáneamente una “ingeniería conceptual” muy avanzada en los temas técnicos -prácticamente a un nivel de ingeniería intermedio entre las usuales etapas de ingenierías Básica y de Detalle.

DURANTE LA ETAPA DE DISEÑOS:

- En esta etapa perfectamente pueden usarse las metodologías tradicionales para la formulación de los documentos oficiales tradicionales de ingeniería: planos especificaciones, informes y otros.
- Vale la pena revisar la real necesidad de cada uno de los documentos a emitir, dado que muchos corresponden a formas de comunicación con el constructor, que pueden ser reemplazados por las instrucciones directas en una adecuada participación del ingeniero en las etapas de adquisiciones, construcción y montaje.
- Otros varios documentos vale la pena encomendarlos a fabricantes o proveedores, dado

que usualmente ellos tiene mejores conocimientos y experiencia que el ingeniero en sus temas específicos. Con ello el ingeniero puede concentrarse en vigilar la buena coordinación de los frentes de trabajo y en conciliar sus resultados.

4. LAS TECNOLOGÍAS CLAVES

En los puntos anteriores de este documento se ha insistido en los aspectos económicos de un proyecto de plantas pequeñas y se ha presentado una metodología de ingeniería que resuelve el marco de las moderadas tarifas viables en este contexto. Sin embargo, con ello no se resuelven por completo todos los aspectos económicos relativos a las inversiones en implementación ni tampoco los de los costos de operación, cuya concepción en niveles bajos y óptimos es también requisito del proyecto y una responsabilidad del ingeniero. Ello implica un llamado a las capacidades del ingeniero para proponer diseños que resuelvan ambos aspectos.

Las inversiones totales en una planta hidrometalúrgica pequeña para la recuperación de cobre puede situarse en el orden de 2000 a 2500 US\$/tonelada anual de cobre producido, principalmente según la concepción constructiva de las instalaciones. Estudios y estadística muestran que se reparten en los rangos que se indican:

4.1 CHANCADO, AGLOMERACION Y LIXIVIACION

La Inversión en esta etapa es de 12 a 18 % del total de la inversión. Lo que implica un orden promedio de 340 US\$/ton anual de cobre recuperado, con un rango entre 240 a 450 US\$/ton anual, según ley, granulometría adoptada, recuperación y consumo de ácido.

4.2 PLANTA SX

La Inversión en esta etapa es de 30 a 38 % del total de la inversión. Orden promedio de 790 US\$/ton anual de cobre recuperado, con rango entre 600 a 950 US\$/ton anual de cobre recuperado, según concentración soluciones y reactivo en la fase de orgánico.

4.3 PLANTA EW

La Inversión en esta etapa es de 50 a 55 % del total de la inversión. Orden promedio de 1040 US\$/ton anual de cobre recuperado, con rango entre 1000 a 1380 US\$/ton anual de cobre recuperado, según la densidad de corriente adoptada en la nave y consecuente implementación.

Al respecto de las cifras señaladas y de los criterios propuestos, nos permitimos proponer las habilidades deseables del ingeniero en las diversas áreas de la planta proyectada:

4.4 CHANCADO, CURADO-AGLOMERACION Y LIXIVIACION

EN TEMAS DE LA METALURGIA:

- Debe ser capaz de evaluar que las concepciones aplicadas en la obtención de la data previa hayan sido las correctas, ya que un error en esa etapa –normalmente desarrollada por el inversionista- tiene la más alta incidencia económica y puede representar por si solo la diferencia entre el éxito y el fracaso del proyecto.
- Debe ser capaz de diseñar una lixiviación optimizada, en los términos siguientes:
 - i. El proceso debe maximizar la recuperación metalúrgica y minimizar consumos de ácido, de agua y de energía, destruyendo “interferentes”, acidulando adecuadamente las partículas con un curado inteligente sin adiciones innecesarias de ácido y cuidando la forma de aplicación del riego.
 - ii. La solución rica generada debe lograr consistentemente las concentraciones de cobre (en valores altos), ácido e impurezas (en valores bajos), que le impondría la planta SX para mantenerse en su eficiencia máxima, conciliando la “razón de lixiviación” y la “razón de concentración” mediante recirculaciones adecuadas.
 - iii. Mediante el diseño de ingeniería de riego y de las recolecciones de soluciones debe generar una solución rica limpia, sin sólidos suspendidos, coloides, fierro, cloruros, manganeso y sulfatos totales, para minimizar borras y contaminación del electrolito que causen descartes y consumos de agua tratada, de aditivos y de energía en calentamiento.
 - iv. Debe anular los efectos de eventuales “interferentes” del mineral, y destruirlos o saturarlos con iones sin valor, durante el curado y el período inicial del riego.
 - v. Debe evitar la formación de capas freáticas e inundaciones localizadas, capaz de producir canalizaciones y deslizamientos o hasta derrumbes del apilamiento.
 - vi. Idealmente el apilamiento debe permitir administrar el tratamiento conjunto de minerales de diversa mineralogía, incluidas las especies de óxidos, de sulfuros, de mixtos y de otras refractarias.
 - vii. Mediante el control de la adición de ácido y un adecuado esquema de períodos de riego y de reposo debe permitir administrar el comportamiento del fierro para mantener en solución el necesario para las bacterias (en lixiviación de sulfuros), la cantidad y proporción “férico-ferroso” para las interacciones que regeneran ácido, o que crean condiciones oxidantes o que co-precipitan impurezas,
 - viii. Mediante el control de la adición de ácido y un adecuado esquema de riegos y de reposos debe evitar la formación de precipitados férricos coloidales que afecten la permeabilidad del lecho y de las partículas y que fomenten la canalización de las

soluciones; Alternativamente, cuando los precipitados inevitablemente se formen, debe permitir la remoción del agua de esos coloides,

EN TEMAS DE DISEÑO

- Debe formular una adecuada estrategia de crecimiento de capacidad para considerarla desde el principio en forma armónica con la capacidad de la etapa inicial. Por ejemplo: mediante una adecuada modulación de pilas útil en todas las etapas, o mediante la instalación inmediata de los requerimientos, tales como tuberías o pozos, de las etapas siguientes que más bien representan una inversión moderada.
- Debe atender el manejo de materiales –principalmente de carga de pilas y de eventual descarga de ripios- de modo de minimizar su costo pero asegurando al mismo tiempo la performance metalúrgica.
- Debe prepararse para no desperdiciar recursos minerales y hasta considerará el tratamiento de leyes marginales en condición ROM.
- Debe ser capaz de configurar los apilamientos con suficientes grados de flexibilidad para atender situaciones fuera de las normalmente esperables, tales como: ajustes de tamaño de mineral, dosis de curado y tipos de soluciones a esta etapa, tasas de riego, recolección y destino de las soluciones y otros aspectos.
- Los diseños deben considerar aspectos relativos al impacto ambiental, emisiones de polvo y vapor, filtración de combustibles, pérdidas de ácido, pérdidas de agua, pérdidas de calor, contaminación de soluciones, etc.; los pozos deben controlar la clarificación de soluciones, las bombas y sistema de control deben medir y ajustar con precisión los caudales.
- Debe dejar conceptualizado “el plan de abandono”, de modo de evitar o minimizar sus costos de inertización de residuos o de aseguramiento del saneamiento medioambiental utilizadas en terreno.

4.2 PLANTA SX

EN TEMAS DE LA METALURGIA

- Debe formular una adecuada estrategia de crecimiento de capacidad para considerarla desde el principio en forma armónica con la capacidad de la etapa inicial. Por ejemplo: mediante una adecuada estrategia de instalación de etapas de mezclado-decantación (hasta considerando etapas de extracción en paralelo más adelante), o de cambio de caudales de solución, reactivo y orgánico y de concentraciones de reactivo en orgánico y de cobre en electrolito rico, circulante y descargado.
- Debe configurar las instalaciones con una buena capacidad de adaptación para atender situaciones fuera de las normales, por ejemplo: frente a variaciones de concentración de

cobre o de caudal de la solución rica, incremento de impurezas de todo tipo y otros factores.

- Debe prepararse para controlar los factores incidentes en la metalurgia, tales como: continuidades de fases, eficiencias de mezclado, arrastres de orgánico (por pérdidas y contaminación del electrolito) y de acuoso (por contaminación de electrolito), recirculaciones de fases y otros aspectos.
- Debe incluir medios para mantener limpio al inventario de orgánico de la planta; deseablemente procurará prevenir las borras más bien que sólo incluir medios para tratarlas una vez formadas.
- Debe crear sistema de instrumentación y control eficaces, que atiendan los requerimientos del control de las operaciones bajo los conceptos metalúrgicos que se usarán, evitando introducir el “ruido” causado por información poco relevante o innecesaria.

EN TEMAS DE DISEÑO:

- Debe diseñar equipos reubicables y que concilien adecuadamente calidad y precio en el cumplimiento de sus respectivas funciones.
- Especialmente debe asegurar una elevada “disponibilidad de planta”, tanto mediante el compromiso “calidad-precio” de los equipos, como mediante una configuración flexible que permita “by pasear” equipos que deban detenerse, para continuar con la operación.
- Debe optimizarse los equipos mezcladores-decantadores en términos de las eficiencias de mezclado de las etapas, consumos de potencia y capacidad de cumplir con los objetivos metalúrgicos con la menor inversión y al menor costo operacional.
- El estanque de orgánico debe decantar el máximo de los arrastres de acuoso para separarlos y aliviar o eliminar la necesidad de una etapa SX de lavado de orgánico o, al menos, para disminuir su consumo de agua tratada.
- La etapa de lavado de orgánico debe minimizar sus propios arrastres de acuoso en orgánico y su consumo de agua tratada y debe estar preparada para combatir en esta etapa la ocasional formación desmedida de borras.
- Debe proveerse técnicas y medios para minimizar las pérdidas de orgánico por arrastres (principalmente en refinación), pero en cantidad conciliada con el grado de degradación o de “envenenamiento” del reactivo.
- Debe proveerse medios para remover al máximo los arrastres de orgánico en electrolito rico.

4.3 PLANTA EW

EN TEMAS DE LA METALURGIA:

- Debe diseñar su estrategia propendiendo a asegurar la calidad de los cátodos, ya que ganancias o castigos en el precio o pérdidas de clientes por disconformidades representarían un fuerte golpe a las expectativas de éxito económico del proyecto.
- Debe propender al uso de altas densidades de corriente, pero que aún aseguren consistentemente la calidad de cátodos, ya que ello tiene una gran influencia en las inversiones de implementación de esta área del proyecto.
- Debe evaluar el tamaño de las celdas para minimizar la demanda de corriente continua, dado que ella incide fuertemente en el precio de los rectificadores.
- Debe atender la calidad y pureza de los electrolitos rico, circulante y descargado, pero también debe procurar minimizar descartes de electrolito por la pérdida de reactivos costosos, agua y energía y por los efectos de la recirculación del ácido contenido.
- Debe cuidar los potenciales rédox del electrolito descargado para evitar degradación del reactivo en las etapas de re-extracción en la planta SX.
- Debe prevenir condiciones que propendan a la corrosión de electrodos.

EN TEMAS DE DISEÑO

- Debe formular una adecuada estrategia de crecimiento de capacidad para conciliar las etapas de expansión desde el principio en forma armónica con la capacidad de la etapa inicial, por ejemplo definiendo la tensión del sistema rectificador en función de la capacidad final y la de sus “taps” en función de sus etapas, definiendo una estrategia inicial con cátodos iniciales a baja densidad de corriente (y menos rectificadores) para luego reemplazarlos por cátodos permanentes y aumentar la densidad para aumentar la capacidad de producción.
- Debe evaluar una estrategia basada en varios rectificadores de bajo amperaje (y precio), controlados por un dispositivo centralizado de sincronización; ello permite usar más baratos rectificadores enfriados por aire y aumenta la cantidad de pulsos, lo que su vez minimiza el costo de la supresión de frecuencia armónicas.
- Debe resolver adecuadamente los temas de ventilación de la nave EW. por razones de seguridad laboral y medioambientales,

5. CONCLUSIONES

- a) Es posible que exista un mercado potencial de plantas hidrometalúrgicas pequeñas que pueda desarrollarse a partir de minas de moderada cubicación de reservas.
- b) Probablemente es recomendable efectuar un estudio de mercado para cuantificarlo.
- c) Previsiblemente, este nuevo mercado de plantas pequeñas presentará nuevos desafíos a la ingeniería, ya que se le demandará apoyo en la formulación del negocio, conceptos de configuración de proceso y de planta y de diseños de implementación más avanzados, precios razonables y garantías efectivas por su trabajo.
- d) El mayor alcance requerirá mayor conocimiento y experiencia a los ingenieros para minimizar sus propios factores de riesgo.
- e) Las exigencias son posibles de asumir si se cuenta con una metodología e instrumentos de cálculos y diseños ágiles y eficientes que permitan realizarlas, en manos de una estructura organizativa muy coordinada.
- f) Una alternativa viable a lo propuesto consistiría en estandarizar tamaños óptimos de plantas SX (con equipos diseñados en base a caudales estandarizados) y de plantas EW (en base a rectificadores y celdas estandarizados), que se diseñarían una sola vez para amortizarlos en varios proyectos cuyas características se adaptarían a esos estándares.
- g) Sin embargo, las diferencias mineralógicas, de comportamiento y de todo tipo entre los diversos minerales, impiden una estandarización de los diseños del área de lixiviación y, como máximo, sólo se pueden estandarizar las configuraciones de esta área.
- h) Muy probablemente, las plantas de esta categoría de proyectos deberán diseñarse de forma que sean reubicables sucesivamente entre varias minas, con mínimas pérdidas y deterioro de sus implementos.
- i) La concepción de plantas mencionadas en el punto anterior, también permitiría venderlas eventualmente, a su valor económico residual.
- j) Probablemente varios de los enfoques, metodologías e instrumentos aplicables a este nivel de tamaño de plantas también resultan aplicables en proyectos de plantas de gran capacidad de producción.