

**“ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGIA ELÉCTRICA EN LA ETAPA DE
CONMINUCIÓN DE UN ENTABLE MINERO AURIFERO”**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO COMO TECNÓLOGO
ELECTRICISTA**

Programa:

Tecnología eléctrica

JUAN DAVID HENAO VARGAS

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO – IUPB
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2014**

DEDICATORIA

A mis padres y hermano por su incondicional apoyo en todos los proyectos de mi vida.

A todas las personas que pertenecen al maravilloso mundo de la investigación para que se siga innovando y mejorando cada día todos los campos que hacen de nuestro mundo un lugar más agradable.

AGRADECIMIENTOS

Totalmente agradecido con el grupo de investigación GIIAM, el semillero SIA, y con la dirección operativa de investigación de la Institución Universitaria Pascual Bravo

Agradecimientos especiales a Carlos Mario Serna, Jim Giraldo Builes, Juan David Ospina y William Álzate Segura que estuvieron apoyándome incondicionalmente en todo el proceso.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| LISTA DE FIGURAS | 5 |
| LISTA DE TABLAS | 6 |
| INTRODUCCIÓN | 8 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 9 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 10 |
| 3. OBJETIVOS | 11 |
| 3.1 Objetivo General:..... | 11 |
| 3.2 Objetivos específicos..... | 11 |
| 4. REFERENTES TEÓRICOS..... | 12 |
| 4.1 Marco institucional, regulatorio y mercado de la energía eléctrica | 12 |
| 4.2 Consumidores..... | 13 |
| 4.3 Sistema inductivo..... | 13 |
| 4.4 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ORO..... | 14 |
| 4.4.1 Procesamiento..... | 14 |
| 4.4.2 Trituración..... | 14 |
| 4.4.3 Proceso de molienda | 15 |
| 4.4.4 Clasificación..... | 16 |
| 4.4.4.1 Clasificación por concentración gravimétrica..... | 17 |
| 4.4.5 Amalgamación y refinación para recuperación del oro | 17 |
| 4.5 La minería en Colombia..... | 18 |
| 5. METODOLOGÍA..... | 20 |
| 6. ANÁLISIS Y RESULTADOS..... | 21 |
| 6.1 Etapa de trituración y molienda | 21 |
| 7. CONCLUSIONES..... | 37 |
| 8. RECOMENDACIONES | 38 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 39 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| fig. 1 Ilustración del marco institucional eléctrico colombiano..... | 12 |
| fig. 2 Trituradora de quiјadas..... | 15 |
| fig. 3 Molino de bolas..... | 16 |
| fig. 4 Bolas de acero del molino..... | 16 |
| fig. 5 Proceso de amalgamación para la recuperación de oro A) Formación de amalgama B) Aspecto final de amalgama C) Refinación de la amalgama D) aspecto final del oro | 18 |
| fig. 6 Tabla para la selección del índice de trabajo..... | 22 |
| fig. 7 Relación de tamaño y energía en la etapa de trituración..... | 24 |
| fig. 8 Clasificación de la molienda | 25 |
| fig. 9 Clasificación de la molienda 2 | 25 |
| fig. 10 Relación de tamaño y energía etapa de molienda | 26 |
| fig. 11 Relación de tamaño y energía en las etapas de trituración y molienda | 28 |
| fig. 12 Consumo Kwh/dia según la cantidad de material procesado | 33 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Tabla 1 Tamaños en la trituración | 21 |
| Tabla 2 Cálculo de energía por el método de bond para la etapa de trituración | 24 |
| Tabla 3 Calculo de energía por el método del índice de bond para la etapa de molienda | 26 |
| Tabla 4 Calculo de energía por el método del índice bond para las etapas de trituración y molienda | 27 |
| Tabla 5 Equipos eléctricos utilizados en los entables mineros..... | 28 |
| Tabla 6 Entables, cantidad de equipos, material procesado y el tenor | 29 |
| Tabla 7 Costo y consumo de energía eléctrica de los entables | 30-31 |
| Tabla 8 Cantidad de material procesado y consumo de energía eléctrica al día | 32 |
| Tabla 9 Costo total del consumo de energía eléctrica | 33 |
| Tabla 10 Costo de recuperación de oro | 34 |
| Tabla 11 Costo de energía eléctrica y recuperación de oro mensual | 35 |

INTRODUCCIÓN

El proceso para reducir el tamaño de las rocas para la obtención de minerales en la minería no es algo sencillo debido a que contiene subprocesos en los cuales hay una alta demanda de energía eléctrica.

El proceso de reducción de tamaño llamado conminución incorpora las etapas de trituración, molienda y separación de minerales.

“Debido a que el principal gasto energético en la minería es poder disminuir el tamaño (conminución) del material extraído” (Coello-Velazquez and Tijinov 2001); Por medio de este trabajo se pretende dar una aproximación del consumo eléctrico y su costo durante la etapa de la conminución, utilizando entables mineros auríferos ubicados en el distrito minero de Segovia, describiendo los procesos por operación unitaria en la etapa de la conminución y por medio de una matriz que permitirá dar un análisis energético para cada uno de los procesos y el costo de la energía eléctrica con respecto a la recuperación y el precio del oro.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Antioquia ha sido por tradición una zona de actividad minera y sus recursos constituyen una riqueza natural de gran importancia, pues se presentan condiciones geológicas propicias para la exploración y explotación de diversos minerales (Posada and Sepúlveda 2013). Para la extracción de oro es necesario mover mucha maquinaria; entre ellas están los motores utilizados para la reducción de tamaño o conminución. Esta etapa es considerada como la etapa en la que se consume más energía eléctrica; del 100% de la energía utilizada para la extracción de oro en una mina el 60% es consumido en la etapa de la conminución y el 40% restante es utilizado en el concentrado, el refinado, y otros oficios eléctricos.

En Antioquia no se ha encontrado un estudio que permita observar qué costo y qué cantidad de energía eléctrica se utiliza en la etapa de conminución. Mediante esta investigación se pretende dar un estimado del costo y la cantidad aproximada de la energía eléctrica utilizada para la extracción de oro en la etapa de la conminución.

2. JUSTIFICACIÓN

El consumo de energía eléctrica para el procesamiento de la extracción de oro, no ha sido actualmente material de estudio en el departamento de Antioquia, ya que su enfoque va orientado a un control ambiental, debido a la cantidad de elementos contaminantes utilizados como el cianuro y mercurio, además del impacto minero que afecta factores bióticos y abióticos.

La importancia de realizar este proyecto va orientado a relacionar la energía eléctrica con el sector minero, para obtener un valor aproximado del consumo y costo de la energía eléctrica en la etapa de la de la conminución ya que en esta fase es donde el mayor gasto energético se produce, siendo este un estudio base para proyectos futuros encaminado al uso eficiente de esta.

Para la pequeña minería antioqueña es importante obtener un valor aproximado del consumo energético ya que este es uno de los pilares fundamentales y una de las variables con mayor costo, este proyecto también se realiza con la intención de aportar un dato de apoyo que permita visualizar económicamente el gasto eléctrico en los entables mineros.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General:

Estimar el consumo energético promedio en la etapa de conminución de minerales refractarios a partir de un análisis técnico-energético en entables mineros del nordeste Antioqueño.

3.2 Objetivos específicos:

- Describir el proceso de beneficio del oro en un entable minero aurífero, teniendo en cuenta las características de operación, capacidad y eficiencia.
- Calcular el costo de procesamiento de material por operación unitaria en el entable minero.
- Construir una matriz de costos que permita definir el valor real del oro recuperado después del proceso de beneficio

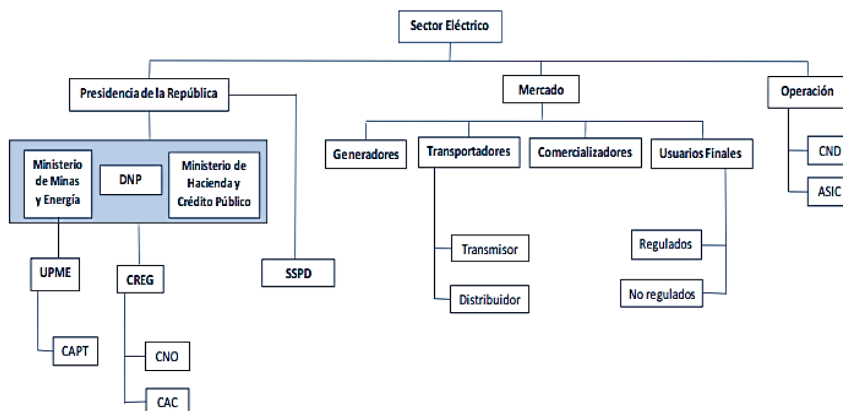
4. REFERENTES TEÓRICOS

4.1 Marco institucional, regulatorio y mercado de la energía eléctrica.

Desde el punto de vista institucional, en el sector eléctrico colombiano participan tres tipos de instituciones. La primera encargada de la política, planeación sectorial, vigilancia, control y regulación del mercado, que está en cabeza del Ejecutivo. La segunda comprende el mercado en sí mismo, con diferentes agentes especialmente por el lado de la provisión del servicio. El tercer tipo son los encargados de la operación del cuarto sector. En este apartado describimos el primer y tercer tipo, en tanto que en el siguiente presentamos los agentes del mercado.

La regulación del mercado de energía eléctrica está a cargo de la CREG. Su objetivo es buscar que los servicios de gas natural, gas licuado de petróleo y energía eléctrica se presten de manera competitiva, es decir, que se logre la mayor cobertura al menor costo posible con una remuneración adecuada para los agentes que intervienen en el mercado. Esta Comisión está conformada por cinco miembros expertos nombrados por la Presidencia de la República, por el Ministerio de Hacienda de Crédito Público (MHCP), por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y por el Ministerio de Minas y Energía (MME). La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) del MME, por su parte, es la encargada de la planeación y desarrollo sostenible y es asesorada en materia de transmisión por el Comité Asesor Planeamiento de Transmisión (CAPT). La vigilancia, control y protección de los derechos de los usuarios y la libre competencia, está a cargo de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD). En la fig. 1 podemos observar cómo está compuesto el marco institucional eléctrico colombiano (Lozano and Rincón 2012).

fig. 1 Ilustración del marco institucional eléctrico colombiano



Fuente: (Lozano and Rincón 2012).

4.2 Consumidores

Los usuarios finales o consumidores se dividen en dos tipos, de acuerdo al nivel de consumo:

Regulados: son los usuarios cuyas compras de energía están sujetas a las tarifas reguladas por la CREG. En el año 2009, su consumo representó el 62,5% de la demanda real de energía del sistema, que ascendió a 54679 GW por hora.

No regulados: son los usuarios cuya demanda promedio mensual de potencia durante seis meses es mayor a 0,1 MW, o en energía de 55 MWh-mes, en promedio durante los últimos 6 meses (Resolución CREG 131 de 1998). Según esta Resolución los “usuarios con consumo pico alto pueden ser Usuarios No Regulados al superar el límite de la potencia, o también si poseen un consumo constante de energía aunque su demanda de potencia no sea tan elevada”. El consumo de estos usuarios representó el 28,6% de la demanda real de energía del sistema en el año de 2009 (Cavieles Rojas, Acosta Aguazaco, and Estupiñán Pérez 2011).

4.3 Sistema inductivo.

En la minería se utilizan equipos eléctricos muy inductivos los cuales pueden ser perjudiciales para la red eléctrica, debido a que estos equipos afectan en el factor de potencia provocando armónicos en el sistema eléctrico, el funcionamiento de estos equipos es constante durante varias horas de trabajo lo cual hace que estos tipos de usuarios se conviertan en un mercado no regulado, si no se realiza una corrección de la calidad de la energía esto puede ser perjudicial tanto para la red eléctrica como para la economía del usuario.

El análisis del factor de potencia de un sistema eléctrico industrial está relacionado con la eficiencia del mismo. Normalmente el interés se fija en el análisis del factor de potencia global porque genera sobrecostos en la facturación de energía. Según la Resolución CREG 082 de 2002, en caso de que la energía reactiva consumida por un usuario sea mayor al cincuenta por ciento (50%) de la energía activa (kWh) que le es entregada en cada periodo horario, el exceso sobre este límite en cada periodo se considerará como energía activa para efectos de liquidar mensualmente el cargo por uso del respectivo sistema.

Lo anterior quiere decir que cuando se mantiene un factor de potencia igual a 0,9 por unidad de tipo inductivo, el consumo de energía reactiva es equivalente al 50% de la energía activa, y se empezaría a penalizar el consumo adicional de reactivos en el momento en que el factor de potencia alcance valores inferiores a 0,9 inductivo. Por lo tanto, se recomienda mantener el factor de potencia de la instalación por encima de 0,9 por unidad de tipo inductivo y así evitar sobrecostos en la facturación. De otro lado, una excesiva compensación reactiva por medio de capacitores también generará susceptibilidad del sistema a los armónicos y a los

transitorios. El análisis del factor de potencia global permite llegar a observaciones de este tipo (Cavieles Rojas, Acosta Aguazaco, and Estupiñán Pérez 2011).

4.4 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ORO

4.4.1 Procesamiento

En la universidad politécnica de Catalunya (UPC) ubicada en el Perú, el investigador Anticoi Sudzuki, Hernán, define el concepto de procesamiento como “todas las actividades mineras con el objetivo de conseguir el material de valor comercial a partir de una materia prima mineral. En este caso, el oro representa el material de valor económico, y para conseguirlo deben seguir una serie de acciones, comenzando por la extracción desde las labores, luego pasar por una etapa de disminución del tamaño de las partículas, clasificación y procesos en general” (Anticoi Sudzuki and others 2011).

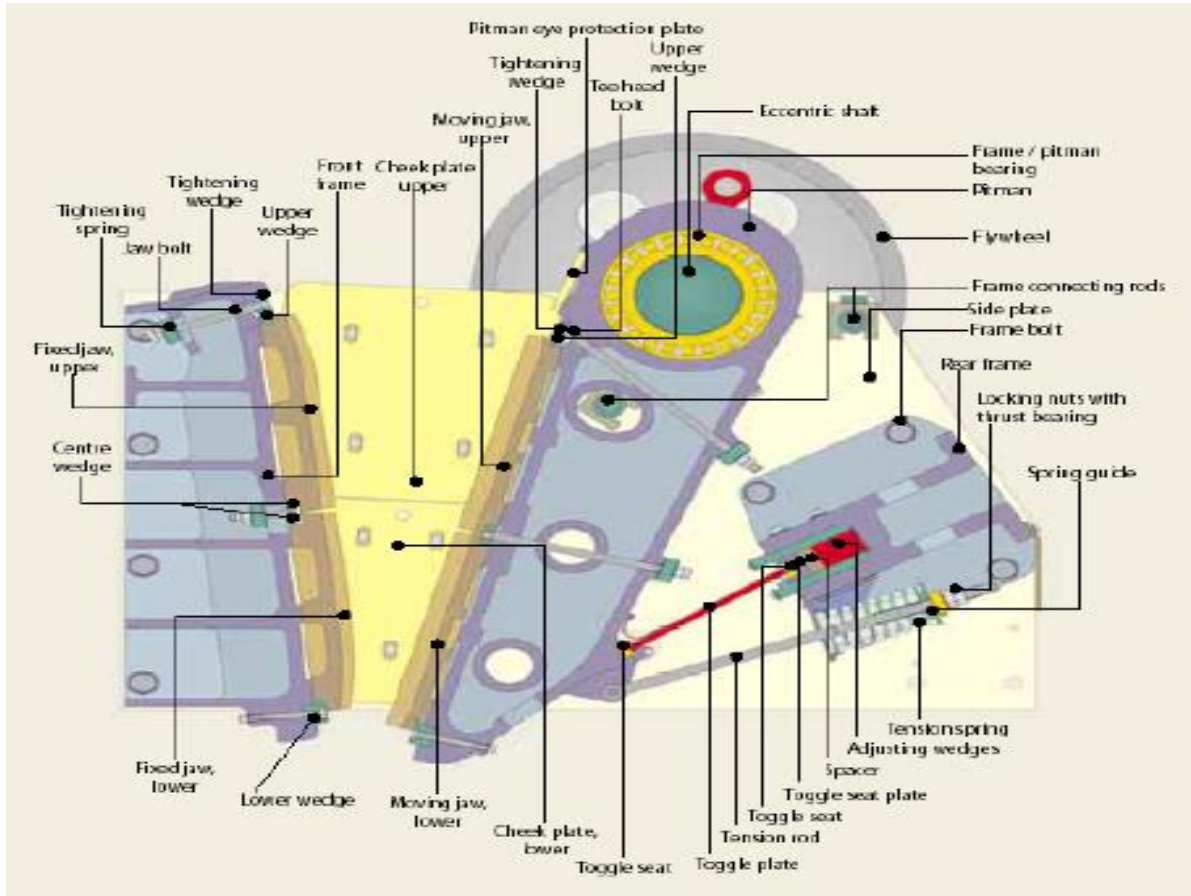
El procesamiento del mineral depende de los materiales y sus propiedades físicas, dureza y composición. El objetivo es conseguir una granulometría lo suficientemente pequeña como para lograr liberar los granos de oro, para así conseguir la amalgama de oro con mercurio.

4.4.2 Trituración

Se define la trituración de minerales como la operación mecánica destinada a disminuir el tamaño de partículas, con el fin de liberar la mena de los materiales con poco valor económico. Los materiales tratados se encuentran en forma de vetas mineralizadas, los cuales se instalan en fallas, depositándose así los diferentes elementos, que al cristalizarse, o en diferentes secuencias paragenéticas, forman minerales tan diversos como son el cuarzo, minerales sulfurados y alteraciones de estos.

“En minería, el principal gasto energético es producido al intentar disminuir el tamaño de partícula de asociaciones minerales” (Coello-Velazquez and Tijinov 2001). Por eso utilizan dos medios para conseguir la trituración. Uno de ellos es del tipo automatizado, por medio de unas trituradoras ya sean de quijadas como se puede apreciar en la fig. 2 Y en otros casos una trituradora de martillos, en algunos casos utiliza un molino de bolas de acero, la utilización de estos equipos produce un gasto energético; el otro medio de trituración es el manual, en el cual aprovechan el roce y la diferencia de dureza de distintos materiales, sin gastos de energía, pero sí de mano de obra para llevar a cabo la trituración.

fig. 2 Trituradora de quijadas



Fuente: (Donovan 2003).

4.4.3 Proceso de molienda

“Al hablar de molienda se tiene forzosamente que hablar de la reducción de tamaño del material, para lo cual existen dos teorías, la de espacio (volumen) y la de superficie” (Durán and Pulido 2007).

En la sección de molienda se produce la reducción dimensional del mineral mediante los molinos de bolas el cual se puede apreciar en la fig. 3, de modo que el 80% al 85% del mineral procesado deben quedar con una granulometría menor de 74 micras, a fin de facilitar en los procesos posteriores a la extracción. Se encontró esta investigación la cual tuvo el objetivo de determinar las causas que inciden en las variaciones del consumo específico de energía en el proceso de molienda de la laterita, con la finalidad de elaborar un modelo para predecir el comportamiento de este indicador energético y formular las recomendaciones

pertinentes con el objetivo de lograr un uso más racional de la electricidad y la consecuente reducción de los costos de producción (Laborde-Brown 2004).

fig. 3 Molino de bolas



Fuente: (Anticoi Sudzuki and others 2011).

fig. 4 Bolas de acero del molino



Fuente: (Anticoi Sudzuki and others 2011)

4.4.4 Clasificación

Clasificar mineral implica la separación de mineral grueso por un número de tecnologías diseñada para rechazar partículas de tamaños gruesos antes de la elaboración. La tecnología más antigua es la clasificación manual. La separación dispone de un número de ventajas, una de ellas es la eliminación de los costos de

la molienda de material sin valor. La Capacidad del circuito de mineral también aumenta a medida que se rechaza material de tamaño grueso.

Arvidson revisa la tecnología de mineral de clasificación más utilizado, clasificación fotométrica. Esta tecnología separa las partículas gruesas basadas en diferentes propiedades ópticas. Muchos números de diferentes propiedades han sido empleados por cuenta propia para la clasificación de minerales, incluyendo el magnético y clasificación radiométrica (Adams 2005).

En la investigación con el título “Propuesta del plan de manejo minero ambiental para la explotación y aprovechamiento del recurso pétreo en la Isla San Cristóbal-Galápagos” definen la separación de minerales como: “la separación de los componentes de una mezcla de partículas en dos o más fracciones de acuerdo a su tamaño, siendo cada grupo obtenido más uniforme que la mezcla original”.

Existe una etapa en la cual el mineral es tamizado, que consiste en poner el material en mallas que retienen las partículas más grandes, en esta etapa la forma y el tamaño de las partículas influyen. “La Clasificación es una operación primordial cuando el producto tiene especificaciones estrictas de tamaño” (Pazmiño and Darío 2008).

4.4.4.1 Clasificación por concentración gravimétrica

Los métodos de concentración gravimétrica se agrupan en tres categorías (Valdivieso et al.)

1) separación por medio pesado, en la cual las partículas se introducen en un fluido de densidad intermedia, de tal manera que partículas de bajo peso específico flotan y las de alto peso específico se hunden.

2) separación por corrientes verticales, en la que se aprovechan las diferencias en velocidades de sedimentación, como en el caso de los Jigs.

3) separación en corrientes superficiales, como en el caso de las mesas concentradoras y los espirales.

4.4.5 Amalgamación y refinación para recuperación del oro

La amalgamación consiste en agregar mercurio al material explotado o procesado, cuando este entra en contacto con el oro libre lo atrapa, formando la amalgama como se puede apreciar en la fig. 5 (A) (aleación oro – mercurio) de color blanco brillante y viscosa.

La amalgamación puede llevarse en flujo abierto en la trituración, la molienda y la concentración en canaletas y planchas amalgamadoras, o en circuito cerrado en el lavado del material procesado y concentrados, en barriles o tambores amalgamadores; esta combinación de procesos es de cuidado y puede ser sumamente perjudicial para el medio ambiente por producir elevadas cantidades de harina de mercurio que permanecen en las colas.

El metal precioso se recupera en la fundición y refinación, mediante el calentamiento de la amalgama, “quema de la amalgama” como se muestra en la fig. 5 (C), se hace en un recipiente por lo general al aire libre, este es el proceso preferido por los mineros, plantas o entables del oro informales y algunas compras de oro, produciendo emisiones atmosféricas de vapor de mercurio con afectación en la salud del personal que realiza esta labor y de la comunidad que se encuentra cerca (MERCURIO) luego de este proceso se puede obtener el oro en su aspecto final como se muestra en la fig. 5 (D).

fig. 5 Proceso de amalgamación para la recuperación de oro A) Formación de amalgama B) Aspecto final de amalgama C) Refinación de la amalgama D) aspecto final del oro



Fuente (Anticoi Sudzuki and others 2011).

4.5 La minería en Colombia

La competitividad internacional de la minería de un país depende de varios factores, algunos de los cuales están asociados con las políticas públicas mientras otros escapan a su control. Si bien el potencial geológico-minero constituye el elemento esencial para atraer la atención de los empresarios, la rentabilidad esperada de una inversión depende además de factores como seguridad, potencial geológico-minero, la infraestructura, el entorno tributario, las condiciones legales y su estabilidad.

La revisión de un estudio adelantado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) y la firma Econometría, así como del Informe Nacional de Competitividad 2007 permite establecer cómo se encuentra Colombia en algunos de esos frentes. Colombia ocupa un lugar intermedio entre los principales países

mineros de la región en cuanto a su potencial geológico-minero, por debajo de Chile, Perú, Brasil y México, y superando a Argentina, Bolivia y Ecuador. En cuestiones de infraestructura Colombia se encuentra una vez más en una posición intermedia, por debajo de Brasil, México, Argentina y Chile, y superando a Ecuador, Bolivia y Perú. Es necesario señalar que los indicadores evaluados en cuanto a infraestructura vial (kilómetros de vías por unidad de área) son insuficientes para dar una idea clara de la situación en el caso de Colombia.

Si bien los indicadores de Colombia en el área de energía no son malos, el país tiene los precios de electricidad para la industria más altos de Suramérica. El diferencial de costo que presenta Colombia frente a los demás países es tan grande que en el margen se convierte en un factor disuasivo para la inversión en el sector. Por ello es urgente tomar las medidas necesarias para avanzar de manera decidida en la reducción de los precios de la energía para el sector industrial, para mejorar la posición competitiva de Colombia en la región (Cárdenas and Reina 2008).

La producción de oro en Colombia ha presentado un comportamiento muy inestable durante las últimas tres décadas. En el caso particular de este mineral, el comportamiento puede no estar relacionado directamente con los niveles de producción, sino con las cifras reportadas, debido a la alta ilegalidad presente en la explotación de este mineral en el país. En 2010, la Defensoría del Pueblo reportó que el 28% de las unidades de explotación minera de hecho (sin título) se dedican a la explotación de oro. Además, según el Censo Minero Departamental 2010-2011, de las 4133 Unidades de Producción Minera de oro censadas, el 86,7% no contaban con título minero (Ortiz 2013).

5. METODOLOGÍA

El presente trabajo se realizara mediante una revisión bibliográfica que permita el entendimiento de las etapas implicadas en el beneficio del oro; se hará una comparación con los procesos mineros utilizados en el distrito minero de Segovia, Antioquia; La información requerida para este estudio, será concedida por el Centro Provincial Minero de Antioquia, y permitirá realizar el análisis de los entables mineros para obtener así los costos energéticos.

Para obtener la información acerca de los procesos para la recuperación de oro en el distrito minero de Segovia se realizara una encuesta de manera personal con un funcionario del centro provincial minero enfocada a la parte de la conminución debido a que es la parte que se desea analizar en este proyecto describiendo las características de cada uno de los equipos utilizados y su tiempo de funcionamiento.

Esto mismo se realizará con cada uno de los entables a estudiar obteniendo información acerca de que tipos de procesos utilizan para la extracción de oro, que cantidad de material promedio procesan en un día, en un mes y que cantidad de oro recuperan.

Se realizará una matriz que permita insertar toda la información recopilada por medio de las encuestas y así obtener un resultado aproximado acerca del costo energético para la producción de oro y así analizar cada una de las etapas de la conminución respecto a su consumo eléctrico.

6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1 Etapa de trituración y molienda

En la conminución, la trituración es la primera etapa por la que pasa el material, en ella se busca romper el material grueso y convertirlo en un tamaño más pequeño. Para poder realizar esta operación se necesita de equipos adecuados los cuales normalmente están conectados a una fuente de energía eléctrica y por tanto consumen potencia.

La trituración se puede dividir en tres etapas que van desde la trituración primaria hasta la trituración terciaria y en cada una de ellas el material cada vez está siendo reducido a un tamaño inferior al inicial. En la Tabla 1 se muestran los tamaños del material que se pueden ingresar y los tamaños finales obtenidos en la etapa de trituración.

Tabla 1 Tamaños en la trituración

| ETAPA DE TRITURACIÓN | RANGO DE TAMAÑO DE LA ALIMENTACIÓN | RANGO DE TAMAÑO DEL PRODUCTO |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------|
| PRIMARIA | > 1524 mm (60") | 152 – 305 mm (6 – 12") |
| SECUNDARIA | 152 – 457 mm (6 – 18") | 37 – 127 mm (1 ¼ - 5") |
| TERCIARIA | 19 – 152 mm (3/4 – 6") | 5 – 25 mm (3/16 – 1") |

Fuente: (Maiolino and Navas 2011).

Para hallar la cantidad de energía necesaria en la reducción del tamaño se pueden utilizar varias teorías expuestas por King y Rittenger (1867); la más utilizada es la teoría de bond (Coello-Velazquez and Tijinov 2001), la cual se escoge para compararla con el método que se va emplear en la investigación. La energía de bond propone que se puede llevar una reducción de tamaño obteniendo que el 80% de las partículas tenga una granulometría estimada, como se expresa en la Ecuación 1.

Ecuación 1 Ecuación para hallar el índice de bond

$$W = K\left(\frac{1}{\sqrt{D_1}} - \frac{1}{\sqrt{D_0}}\right)$$

Fuente: (Coello-Velazquez and Tijinov 2001).

Donde:

W = energía

D₀ = diámetro inicial

D₁ = diámetro final

K = 10W_i

W_i = índice de trabajo (work index) que depende del material

El índice de trabajo de algunos materiales está dado por la siguiente tabla fig. 6

fig. 6 Tabla para la selección del índice de trabajo

| Material | W _i kWhr/t |
|----------------|--------------------------|
| All materials | 15.19 |
| Barite | 6.86 |
| Basalt | 22.45 |
| Cement Clinker | 14.84 |
| Clay | 7.81 |
| Coal | 12.51 |
| Copper Ore | 14.44 |
| Dolomite | 12.44 |
| Emery | 64.00 |
| Feldspar | 12.84 |
| Galena | 10.68 |
| Glass | 3.39 |
| Gold Ore | 16.31 |
| Granite | 15.83 |
| Iron Ore | 16.98 |
| Lead Ore | 12.54 |
| Limestone | 12.77 |
| Mica | 148.00 |
| Oil Shale | 19.91 |
| Phosphate Rock | 11.14 |
| Quartz | 14.05 |
| Taconite | 16.36 |

Fuente: (Anticoi Sudzuki and others 2011).

Obteniendo estos datos se procede hallar el cálculo mediante la Ecuación 1 utilizando la información expuesta en fig. 6 teniendo en cuenta que los valores a insertar en la ecuación tienen que estar en micrómetros (μm).

Se escogen los tamaños equivalentes al 80%, del material de entrada y del material de salida.

$D_0 = 1524 \text{ mm}$ equivalentes a 60 pulgadas y equivalentes a $1'524.000\mu\text{m}$

$D_1 = 152 \text{ mm}$ equivalente aproximadamente 6 pulgadas y equivalentes a $152.000\mu\text{m}$

Estos datos se tomaron arbitrariamente teniendo en cuenta que estos son los rangos de los tamaños promedios en la trituración primaria según la fig. 6.

Luego de seleccionar los tamaños se procede a seleccionar el índice de trabajo (W_i) expuesto en la fig. 7.

$W_i = 16.31 \text{ kwh/t}$ correspondientes al material de oro (gold ore).

Ya Obtenidos los datos se realiza la operación la cual arrojó el siguiente resultado.

$$W = 10 \times \left(\frac{16.31 \text{ kh}}{t} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{152000\mu\text{m}}} - \frac{1}{\sqrt{1524000\mu\text{m}}} \right)$$

$$W = 0.286 \text{ kwh/t}$$

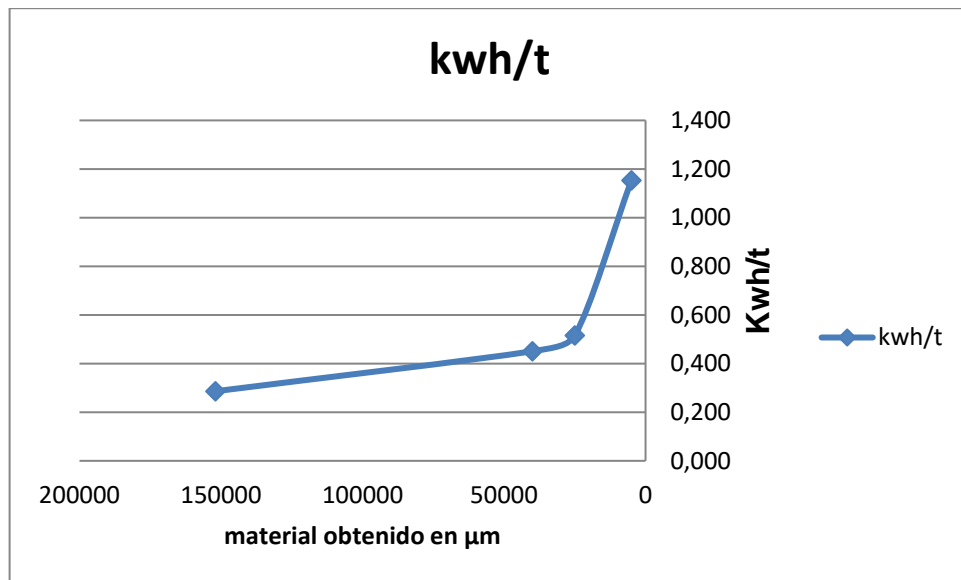
Se realiza una matriz que permita ver como es la interacción de la reducción de tamaño con respecto al consumo de energía y se obtuvieron los siguientes datos expresados en la Tabla 2.

Tabla 2 Cálculo de energía por el método de bond para la etapa de trituración

| Wi (workindex) | tamaño de entrada en μm (D0) | tamaño de salida en μm (D1) | KWh/t |
|----------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|-------|
| 163,1 | 1524000 | 152000 | 0,286 |
| 163,1 | 200000 | 40000 | 0,451 |
| 163,1 | 100000 | 25000 | 0,516 |
| 163,1 | 20000 | 5000 | 1,153 |

Fuente: (Henao Juan D.).

fig. 7 Relación de tamaño y energía en la etapa de trituración



Fuente: (Henao Juan D.).

Como se puede observar en la fig. 7 vemos que a medida que se necesite un tamaño de partícula más fino se va a necesitar más cantidad de energía.

En la trituración se necesita dejar el material en un tamaño adecuado para la etapa de molienda y como se puede observar el consumo aun no es muy significativo. La reducción total del material a tamaños mucho más finos lo realiza la molienda, debido a que en la trituración no se es posible alcanzar estos tamaños y debido a esto es que la molienda se consume mucha más energía porque además de que tiene que fragmentar el material a tamaños mucho más pequeños se necesita de mucho más tiempo para alcanzar esta reducción y por lo tanto esto significa una alza en el consumo de energía.

En la molienda podemos encontrar granulometrías de varios tipos, según Hukki se encuentran productos de salida en la molienda con tamaños de 1mm y 100µm(Granda and Alava 1999), como se puede observar en la fig. 8 los tamaños de minerales expuestos por Hukki en la molienda de minerales.

Fig. 8 Clasificación de la molienda

CLASIFICACION DE LA MOLIENDA.

| PROCESO | TAMAÑO DE SALIDA |
|--------------------|-----------------------|
| Molienda gruesa | $\leq 1 \text{ mm}$ |
| Molienda fina | 100µm |
| Molienda untrafina | $\leq 100 \text{ µm}$ |

Fuente: (Granda and Alava 1999).

A veces se utilizan otras denominaciones en la molienda como se puede observar en la fig. 9.

Fig. 9 Clasificación de la molienda 2

CLASIFICACION DE LA MOLIENDA.

| PROCESO | TAMAÑO DE SALIDA |
|-----------------|------------------|
| Molienda gruesa | 1 - 2 m m |
| Molienda media | 0.2 - 0.5 mm |
| Molienda fina | 0.05 - 0.1 mm |

Fuente: (Granda and Alava 1999).

Como ya se había dicho se necesita de mucho más tiempo y consumo energético para poder reducir de tamaño el mineral y obtener un diámetro mucho más fino.

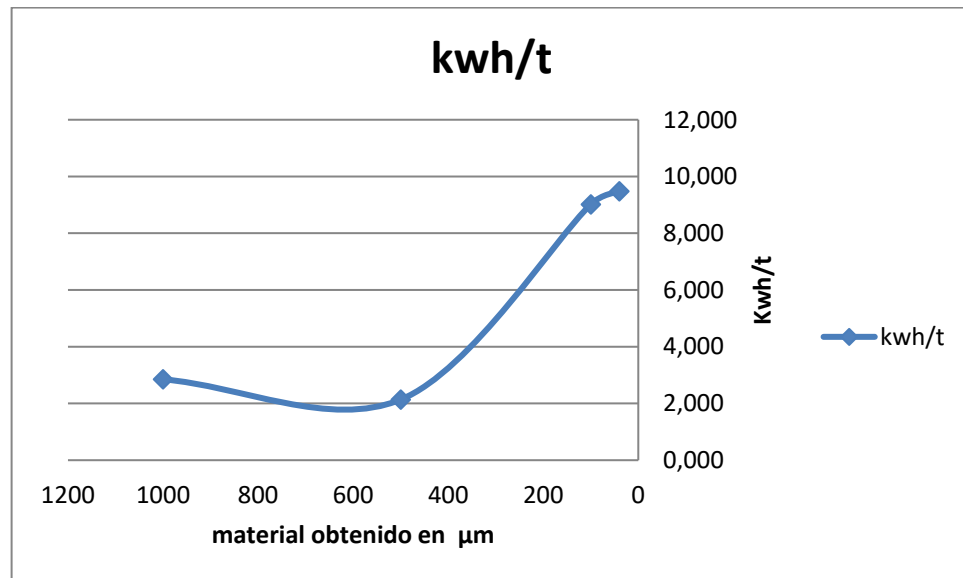
En la Tabla 3 se simularon cálculos menores a 5mm de diámetro correspondientes al diámetro de salida del mineral en la trituración expuesto en la Tabla 1.

Tabla 3 Calculo de energía por el método del índice de bond para la etapa de molienda

| wi (workindex) | tamaño de entrada en μm (D0) | tamaño obtenido en μm (D1) | kwh/t |
|----------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|-------|
| 163,1 | 5000 | 1000 | 2,851 |
| 163,1 | 1000 | 500 | 2,136 |
| 163,1 | 500 | 100 | 9,016 |
| 163,1 | 100 | 40 | 9,478 |

Fuente: (Hena Juan D.).

fig. 10 Relación de tamaño y energía etapa de molienda



Fuente: (Hena Juan D.).

Vemos que en la fig. 10 se obtiene una grafica con las mismas características que en la fig. 7 correspondiente a la trituración pero los consumos energéticos no son el mismo se observa que en la Tabla 2 el consumo energético aumenta significativamente.

Se está tomando en cuenta que se está llevando un proceso de reducción muy meticuloso pasando por varias etapas de reducción fragmentando el material hasta dimensiones muy pequeñas o muy finas pero en un entable minero real

estos valores solo representarían para ellos costos muy elevados en la factura del consumo de energía eléctrica. En la Tabla 3 se muestra el cálculo aproximado del consumo de energía eléctrica por tonelada corta de material tomando nada más dos etapas de reducción la trituración primaria y la molienda, teniendo en cuenta que en muchos entables solo utilizan una trituración primaria en la cual dejan el material en una granulometría apta para la etapa de molienda y al salir de la etapa de molienda se obtiene una granulometría aun más pequeña para los procesos consecuentes.

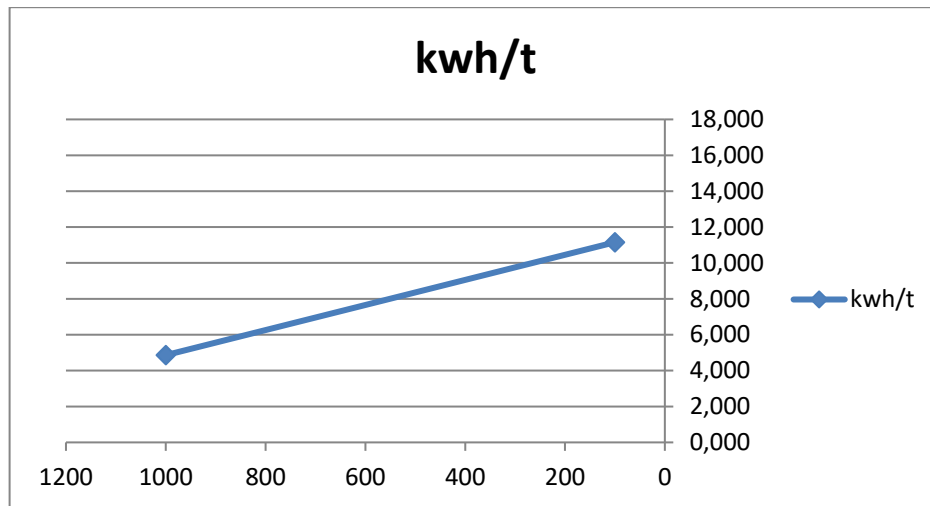
Tabla 4 calculo de energía por el método del índice bond para las etapas de trituración y molienda

| Etapa | Tamaño de entrada en μm (D0) | Tamaño obtenido en μm (D1) | kwh/t |
|-------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|--------|
| Trituración | 305000 | 1000 | 4,862 |
| Molienda | 1000 | 100 | 11,152 |
| total | | | 16,015 |

Fuente: (Hena Juan D.).

Vemos que en la fig. 11 cuando el material es cada vez disminuido de tamaño el consumo de energía eléctrica va aumentando, en la etapa de trituración el consumo energético en la reducción de tamaño no es tan significativo en comparación con la molienda que para este caso representa aproximadamente el 70% del consumo total en estas dos etapas de trituración y molienda.

Fig. 11 Relación de tamaño y energía en las etapas de trituración y molienda



Fuente: (Hena Juan D.).

En el análisis de los entables mineros del municipio de Segovia que se presenta continuación se nombran como “entable 1”, “entable 2” etc.

Por medio de los datos de placa de los equipos se podrá dar una aproximación al consumo y costo de la energía eléctrica según su tiempo de trabajo, se está teniendo en cuenta que se lleva a cabo un proceso altamente eficiente donde los equipos están funcionando a plena carga lo que quiere decir que el consumo por kwh equivale al dato obtenido en la placa multiplicado por las horas de trabajo.

Los equipos eléctricos encontrados en los entables mineros de Segovia pertenecientes a la etapa de conminución se muestran en la Tabla 1 con sus respectivas potencias.

Tabla 5 Equipos eléctricos utilizados en los entables mineros

| Equipos | Potencia |
|--------------------------|----------|
| TRITURADORA DE MARTILLOS | 11 Hp |
| TRITURADORA DE QUIJADAS | 12 Hp |
| BOMBAS | 4 HP |
| PULVERIZADOR DE LODO | 0,5 HP |
| MOTOR PARA LOS COCOS | 5 HP |
| SOLDADOR | 5,4 Kw |
| TANQUE AGITADOR | 7 HP |

Fuente: (Hena Juan D.).

Las horas de trabajo de estos equipos depende mucho de la cantidad de material que procese el entable, un caso especial son las trituradoras de quijadas y la de martillos que según las especificaciones pueden procesar 2 toneladas en una hora. En la Tabla 6 se muestran los entables, la cantidad de material que procesan en un día, la cantidad de equipos por entable y el tenor promedio.

El consumo de energía eléctrica puede variar según las horas de trabajo de cada uno de los equipos, la etapa de molienda en los entables se realiza en los cocos amalgamadores suplantando los molinos de bolas.

Tabla 6 Entables, cantidad de equipos, material procesado y el tenor

| ENTABLE | EQUIPO | CANTIDAD DE EQUIPO | MATERIAL PROCESADO AL DIA kg/día | TENOR gr/ton |
|-----------|------------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------|
| ENTABLE 1 | TRITURADORA QUIJADAS | 1 | 1344 | 3 |
| | BOMBAS | 2 | | |
| | PULVERIZADOR DE LODO | 1 | | |
| | COCOS(2 MOTORES CON 10 COCOS C/U) | 2 | | |
| | SOLDADOR | 1 | | |
| ENTABLE 2 | TRITURADORA QUIJADAS | 2 | 3087 | 3,5 |
| | TANQUE AGITADOR | 2 | | |
| | COCOS(4 MOTORES CON 12 COCOS C/U) | 4 | | |
| | BOMBAS | 7 | | |
| | SOLDADOR | 1 | | |
| ENTABLE 3 | TRITURADORA DE MARTILLOS | 1 | 4032 | 2,5 |
| | BOMBAS | 4 | | |
| | PULVERIZADOR DE LODO | 1 | | |
| | SOLDADOR | 1 | | |
| | COCOS (4 MOTORES CON 16 COCOS C/U) | 4 | | |
| ENTABLE 4 | TRITURADORA DE QUIJADAS | 1 | 3780 | 2,3 |
| | TRITURADORA DE MARTILLOS | 1 | | |
| | COCOS (4 MOTORES CON 16 COCOS C/U) | 4 | | |
| | TANQUE AGITADOR | 2 | | |
| | BOMBAS | 2 | | |
| | SOLDADOR | 1 | | |

Fuente: (centro provincial minero)

En la etapa de molienda como ya se había dicho anteriormente, es la etapa donde el consumo de energía eléctrica se concentra debido a que se requiere de mucho más tiempo para realizar la reducción de tamaño del mineral lo que significa un aumento en el consumo y un costo más elevado, en la Tabla 7 se puede apreciar las horas de trabajo de cada uno de los equipos, su consumo de energía eléctrica al día y su costo aproximado por día y por mes teniendo en cuenta que el costo del Kwh se considero a 300\$ pesos.

Tabla 7 costo y consumo de energía eléctrica de los entables

| ENTABLE | EQUIPO | POTENCIA HP | POTENCIA A KW | HORAS DE TRABAJO | CONSUMO KW/H DIA | COSTO KW/H DIA | COSTO KW/H MES |
|-----------|-----------------------------------|-------------|---------------|------------------|------------------|----------------|----------------|
| ENTABLE 1 | TRITURADORA QUIJADAS | 12 | 8,952 | 1 | 8,952 | \$ 2.685,60 | \$ 80.568 |
| | BOMBAS | 4 | 2,984 | 1 | 5,968 | \$ 1.790,40 | \$ 53.712 |
| | PULVERIZADOR DE LODO | 0,5 | 0,373 | 1 | 0,373 | \$ 111,90 | \$ 3.357 |
| | COCOS(2 MOTORES CON 10 COCOS C/U) | 5 | 3,73 | 3 | 22,38 | \$ 6.714 | \$ 201.420 |
| | SOLDADOR | | 5,4 | 1 | 5,4 | \$ 1.620 | \$ 48.600 |
| ENTABLE 2 | TRITURADORA QUIJADAS | 12 | 8,952 | 4 | 71,616 | \$ 21.484,80 | \$ 644.544 |
| | TANQUE AGITADOR | 7 | 5,222 | 9 | 93,996 | \$ 28.198,80 | \$ 845.964 |
| | COCOS(4 MOTORES CON 12 COCOS C/U) | 5 | 3,73 | 8 | 119,36 | \$ 35.808 | \$ 1.074.240 |
| | BOMBAS | 4 | 2,984 | 2 | 41,776 | \$ 12.532,80 | \$ 375.984 |

| | | | | | | | |
|-----------|------------------------------------|-----|-------|---|--------|--------------|--------------|
| | SOLDADOR | | 5,4 | 1 | 5,4 | \$ 1.620,00 | \$ 48.600 |
| ENTABLE 3 | TRITURADORA DE MARTILLOS | 11 | 8,206 | 5 | 41,03 | \$ 12.309,00 | \$ 369.270 |
| | BOMBAS | 4 | 2,984 | 3 | 35,808 | \$ 10.742,40 | \$ 322.272 |
| | PULVERIZADOR DE LODO | 0,5 | 0,373 | 2 | 0,746 | \$ 223,80 | \$ 6.714 |
| | SOLDADOR | | 5,4 | 1 | 5,4 | \$ 1.620 | \$ 48.600 |
| | COCOS (4 MOTORES CON 16 COCOS C/U) | 5 | 3,73 | 8 | 119,36 | \$ 35.808 | \$ 1.074.240 |
| ENTABLE 4 | TRITURADORA DE QUIJADAS | 12 | 8,952 | 3 | 26,856 | \$ 8.056,80 | \$ 241.704 |
| | TRITURADORA DE MARTILLOS | 11 | 8,206 | 3 | 24,618 | \$ 7.385,40 | \$ 221.562 |
| | COCOS (4 MOTORES CON 16 COCOS C/U) | 5 | 3,73 | 8 | 119,36 | \$ 35.808 | \$ 1.074.240 |
| | TANQUE AGITADOR | 7 | 5,222 | 9 | 93,996 | \$ 28.198,80 | \$ 845.964 |
| | BOMBAS | 4 | 2,984 | 3 | 17,904 | \$ 5.371,20 | \$ 161.136 |
| | SOLDADOR | | 5,4 | 1 | 5,4 | \$ 1.620 | \$ 48.600 |

Fuente: (Hena Juan D.) y (Centro provincial minero).

Como se puede observar en la Tabla 7 el mayor consumo de energía eléctrica en los entables mineros está concentrado en la molienda realizada por los cocos amalgamadores.

De acuerdo a la cantidad de material que procese un entable minero depende también su consumo de energía eléctrica en la Tabla 8 podemos observar la cantidad de material y el consumo de energía eléctrica al día.

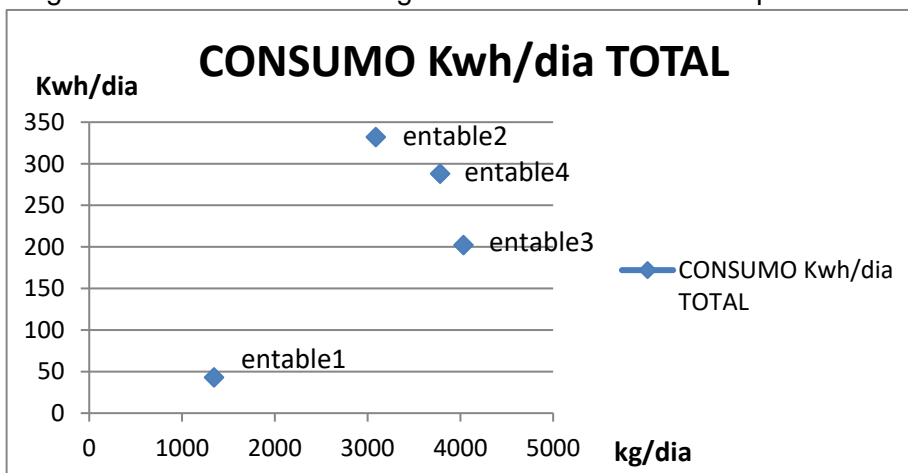
Tabla 8 Cantidad de material procesado y consumo de energía eléctrica al día

| ENTABLE | MATERIAL PROCESADO DIA kg/día | CONSUMO Kwh/día TOTAL |
|-----------|----------------------------------|--------------------------|
| ENTABLE 1 | 1344 | 43,073 |
| ENTABLE 2 | 3087 | 332,148 |
| ENTABLE 3 | 4032 | 202,344 |
| ENTABLE 4 | 3780 | 288,134 |



Fuente: (Henao Juan D.).

fig. 12 Consumo Kwh/dia según la cantidad de material procesado



Fuente: (Henao Juan D.).

En la fig. 12 vemos que el entable 2 es el que más consumo de energía eléctrica tiene pero a comparación de el entable 3 y el entable 4 procesa menos material pero es el que más equipos eléctricos posee y es por eso que el consumo se aumenta pero vemos que a partir de 3 toneladas de material procesado al día el consumo es elevado.

El consumo de energía eléctrica representa un valor económico y como se había dicho varía según la cantidad de material la cantidad de equipos que posea el entable y las horas de trabajo de cada uno de los equipos en la podemos ver el

costo aproximado de la energía eléctrica consumida al día de los entables analizados.

Tabla 9 costo total del consumo de energía eléctrica

| ENTABLE | MATERIAL PROCESADO DIA kg/día | CONSUMO Kwh/día TOTAL | COSTO TOTAL DE Kwh/día |
|-----------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| ENTABLE 1 | 1344 | 43,073 | \$ 12.921,90 |
| ENTABLE 2 | 3087 | 332,148 | \$ 99.644,40 |
| ENTABLE 3 | 4032 | 202,344 | \$ 60.703,20 |
| ENTABLE 4 | 3780 | 288,134 | \$ 86.440,20 |

| | | | |
|--|--|--|--|
| | | | |
|--|--|--|--|

Fuente: (Hena Juan D.).

El costo de la energía eléctrica en un entable minero aurífero es uno de los costos más significativos y según la recuperación de oro y el costo por el total de oro recuperado se puede ver si la minería aurífera si es un buen negocio, en la Tabla 10 podemos observar el costo del oro recuperado teniendo en cuenta que la recuperación es altamente eficiente según el tenor del entable.

Tabla 10 Costo de recuperación de oro

| ENTABLE | TENOR gr/Tn | COSTO DE RECUPERACION DE ORO |
|-----------|-------------|------------------------------|
| ENTABLE 1 | 3 | \$ 9.000.000 |
| ENTABLE 2 | 3,5 | \$ 31.500.000 |
| ENTABLE 3 | 2,5 | \$ 30.000.000 |

| | | |
|-----------|-----|---------------|
| ENTABLE 4 | 2,3 | \$ 20.700.000 |
|-----------|-----|---------------|

Estos datos se toman teniendo en cuenta que el valor por gramo de oro recuperado esta en promedio a \$100.000 pesos y que el valor que se tomo como periodo de tiempo analizado es de 30 días equivalentes en promedio a un mes.

En la Tabla 11 podemos ver el costo total de la energía eléctrica y el costo de la recuperación del oro.

Tabla 11 costo de energía eléctrica y recuperación de oro mensual

| ENTABLE | COSTO TOTAL kwh/mes | COSTO DE RECUPERACION DE ORO |
|-----------|------------------------|------------------------------------|
| ENTABLE 1 | \$ 387.657 | \$ 9.000.000 |
| ENTABLE 2 | \$ 2.989.332 | \$ 31.500.000 |
| ENTABLE 3 | \$ 1.821.096 | \$ 30.000.000 |

| | | |
|-----------|--------------|---------------|
| | | |
| ENTABLE 4 | \$ 2.593.206 | \$ 20.700.000 |

Fuente: (Hena Juan D.).

Vemos que el costo de la energía eléctrica mensual pagada por entable representa un porcentaje en promedio del 8% y el 10% de acuerdo al pago por recuperación de oro mensual.

7. CONCLUSIONES

En la etapa de la conminución que comprende las etapas de trituración y molienda es difícil no tener en cuenta el consumo de energía eléctrica y esta va a variar de acuerdo a la cantidad de material que procese un entable.

El consumo de energía eléctrica representa aproximadamente el 8% y el 10% del costo total de la recuperación de oro y suponiendo que el costo de los insumos adicionales para el proceso de recuperación represente el 17% y la nomina para el pago de los mineros asociados sea del 25% al dueño del entable le queda el 50% de las ganancias del oro recuperado.

La minería en la actualidad puede producir muchos daños ambientales que pueden perjudicar mucho el aspecto a sus alrededores y la comunidad cercana, pero sin ella muchos de los elementos tecnológicos que para nosotros son una comodidad o lujo como celulares, computadores, televisores no existirían si no fuera por la de la explotación minera.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda recolectar los datos reales de cada uno de los equipos eléctricos utilizados en la etapa de la conminución e implementarlos en los cálculos realizados para poder obtener un valor más preciso acerca del consumo de la energía eléctrica.

Se recomienda también recolectar información representativa de la granulometría del material que es procesado en estas minas, como también estadísticas del funcionamiento en horas de la maquinaria utilizada en el proceso de la conminución para que de esta forma los datos obtenidos sean estadísticamente significativos y se pueda llegar a conclusiones validas.

BIBLIOGRAFÍA

Adams, Mike D. 2005. *Advances in Gold Ore Processing*. Vol. 15. Elsevier.

Anticoi Sudzuki, Hernán, and others. 2011. "Procesamiento Sostenible Del Oro En San Cristóbal, Sur Del Perú". Universitat Polit{ç}cnica de Catalunya.

Cárdenas, Mauricio, and Mauricio Reina. 2008. *La Minería En Colombia: Impacto Socioeconómico Y Fiscal*. Fedesarrollo.

Cavieles Rojas, Nairo J, Juan H Acosta Aguazaco, and Elkin E Estupiñán Pérez. 2011. "Estudio de Calidad de La Energía Implementando Filtros Activos Para La Corrección de Armónicos." *INGE@UAN, Tendencias En La Ingeniería 2* (3).

- Coello-Velazquez, Alfredo L, and Oleg N Tijinov. 2001. "Molienda de Minerales Multicomponentes: Modelo Íntegro-Diferencial Para La Valoración de La Energía." *Minería & Geología* 18 (3-4): 5.
- Donovan, James G. 2003. "Fracture Toughness Based Models for the Prediction of Power Consumption, Product Size, and Capacity of Jaw Crushers". Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Durán, Hector M, and Jose L Pulido. 2007. "Análisis de La Molienda En El Proceso de Elaboración de Mezcal." *Información Tecnológica* 18 (1). SciELO Chile: 47–52.
- Granda, Wilmer Vasquez, and Hugo Eguez Alava. 1999. "Micronización De Caliza En Un Molino De Bolas."
- Laborde-Brown, Reynaldo. 2004. "Diagnóstico Energético En El Proceso de Molienda de La Laterita." *Minería & Geología* 20 (3-4): 107–13.
- Lozano, Ignacio, and Hernán Rincón. 2012. "Formación de Las Tarifas Eléctricas E Inflación En Colombia." *Banco de La República*.
- Maiolino, Ramsés J, and Héctor A Navas. 2011. "Reducción de Tamaño En Circuito Abierto de La Laterita Ferruginosa, Sector El Menito, Estado Zulia."
- MERCURIO, CIANURO Y OTRAS SUSTANCIAS. "EN LA MINERÍA DEL ORO EN COLOMBIA."
- Ortiz, Astrid Martínez. 2013. "Estudio Sobre Los Impactos Socio-Económicos Del Sector Minero En Colombia: Encadenamientos Sectoriales."
- Pazmiño, Quimbiulco, and Henry Darío. 2008. "Propuesta Del Plan de Manejo Minero Ambiental Para La Explotación Y Aprovechamiento Del Recurso Pétreo En La Isla San Cristóbal-Galápagos". SANGOLQUÍ/ESPE/2008.
- Posada, Viviana Villa, and Giovanni Franco Sepúlveda. 2013. "DE ANTIOQUIA MINING AND ECONOMIC DIAGNOSTIC OF ANTIOQUIA I", 125–34.
- Valdivieso, Alejandro López, Armando Ibarra Amaya, Sergio Oliva Rangel, and M C Juan Luis Reyes Bahena. "CONCENTRACION GRAVIMETRICA

CENTRIFUGA DE ORO Y PLATA. SU IMPLEMENTACION EN EL CIRCUITO DE MOLIENDA DE MINERA EL PILON.”