

Parker K.W. 1951. A method for measuring trend and range condition on National Forest Ranges. USDA. Forest Service.

PNUMA (Programa de las naciones unidas para el desarrollo). 2010. Manejo integrado de agua y áreas costeras (en línea). Consultado 5 ene. 2015. Disponible en

[www.pnuma.org/aguamiac/pdf](http://www.pnuma.org/aguamiac/pdf).

Price, W.A., 2009. Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. MEND Program. CANMET Mining and Mineral Sciences Laboratories. British Columbia, Canada. 579 pp.

Sobek, A.A., W.A. Schuller, J.R. Freeman and R.M. Smith, 1978. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils. Report EPA-600/2-78-054, US National Technical Information Report PB-280.

The Nature Conservancy 2005. Planificación para la conservación de áreas. Desarrollo de estrategias, ejecución de acciones y medidas de

éxitos en cualquier escala. Descripción de las mejores prácticas.

Usher B.H., Cruywagen L.M., De Necker E., Hodgson F.D. 2003. Acid-Base Accounting, Techniques and Evaluation (ABATE). South African Water Research Commission. Report Number 1055/2/03.

Valladares, F., Balaguer, L., Mola, I., Escudero, A., y Alfaya, V., eds. 2011. Restauración ecológica de áreas afectadas por infraestructuras de transporte. Bases científicas para soluciones técnicas. Fundación Biodiversidad, Madrid, España. ©Fundación Biodiversidad.

Walder, I., Twardowska, I., Wahlstrom and Tommi Kaartinen, T. (2010). European Waste Characterisation Standards Acid/neutral Rock Drainage Prevention. Preliminar Europea (Pren15875) test BAB.

Artículo recibido en: 28.03.2021

Artículo aceptado: 23.04.2021

**Revista de Medio Ambiente Minero y Minería 6 (1): 27 – 33, Junio 2021. ISSN 2519-5352**

## **UNA APROXIMACIÓN TERMODINAMICA PARA LA COMPRESION DE LA ECONOMIA CIRCULAR APLICADA AL ÁMBITO MINERO - METALÚRGICO**

M. Ing. José Miguel Huerta<sup>1</sup>  
PhD. Romina Cayumil Montecino<sup>1</sup>  
Dr. Ing. Mario Sánchez Medina <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Andrés Bello, Chile. Carrera de Ingeniería Civil en Metalurgia  
e.mail: jose.huerta@unab.cl

### **Resumen**

La Economía Circular es un concepto económico vinculado al desarrollo sustentable y a la economía verde, pero que la profundiza mucho más. Apunta no sólo a reducir el impacto ambiental de las industrias y la disminución de la cantidad de desechos generados, sino que a producir bienes y servicios mediante el manejo sostenible de materiales y fuentes de energía. Consideramos que este enfoque que está basado en la observación del comportamiento de los mercados y que puede ser enriquecido con aspectos teóricos provenientes de la Termodinámica. Para ello, proponemos la inclusión de algunos conceptos como la Energía Libre de Gibbs y la irreversibilidad de los procesos, creemos que agregar ideas permite enfatizar el profundo vínculo que es posible establecer entre la Economía Circular y la Termodinámica. El objetivo del trabajo es investigar el modo en que las definiciones Termodinámicas permiten ampliar la mirada sobre los flujos relacionados con la Economía Circular. Se exponen casos del ámbito minero metalúrgico que son brevemente comentados con esta nueva aproximación. Se concluye presentando los conceptos de la Termodinámica como una ampliación de los aspectos teóricos del enfoque Económico Circular.

**Palabras Clave:** Economía Circular, Termodinámica, Procesos Minero-Metalúrgicos

## **A THERMODYNAMIC APPROACH TO UNDERSTAND THE CIRCULAR ECONOMY APPLIED TO THE MINING - METALLURGICAL FIELD**

### **Abstract**

The Circular Economy is an economic concept linked to sustainable development and the green economy, but it goes much deeper into it. It aims not only to reduce the environmental impact of industries and reduce the amount of waste generated, but also to produce goods and services through the sustainable management of

materials and energy sources. We consider that this approach is based on the observation of the behavior of the markets and that it can be enriched with theoretical aspects from Thermodynamics. To do this, we propose the inclusion of some concepts such as Gibbs Free Energy and the irreversibility of the processes. We believe that adding ideas allows to emphasize the deep link that can be established between the Circular Economy and Thermodynamics. The objective of the work is to investigate the way in which Thermodynamic definitions allow broadening the view on the flows related to the Circular Economy. Cases of the metallurgical and mining fields are presented and are briefly commented with this new approach. It concludes by presenting the concepts of Thermodynamics as an extension of the theoretical aspects of the Circular Economic approach.

**Keywords.** Circular Economy, Thermodynamics, Mining and Metallurgical Processes

### **Introducción.-**

La Economía Circular es una plataforma de conceptos que aumentan su relevancia en la realidad actual y para la conducción de nuestro futuro desarrollo como sociedad (1). Considera protocolos de comportamiento, institucional e individual, que dicen relación con los aspectos económicos, sociales y ambientales. Estos aspectos son los parámetros medibles más importantes que configuran la estabilidad de los seres humanos, considerando un sistema de equilibrio con la naturaleza. Esto afecta, evidentemente, a los reinos animal, vegetal y mineral, pero ahora no en una visión aislada por sectores, como lo fue antaño, sino en un contexto global e integral donde el planeta tierra es el gran sistema que los contiene.

La Economía Circular, como muchos otros modelos surgidos durante épocas de crisis, intenta corregir un comportamiento, que a la luz de los acontecimientos actuales, que no tenía consideraciones con el sistema planetario completo. Estas consideraciones las podemos rescatar hoy de una población más informada, con elementos más sofisticados de comunicación y donde los límites planetarios son condiciones de borde mejor conocidas y que permiten replantear nuestro comportamiento al interior de la sociedad en la cual nosotros, los seres humanos, tenemos la responsabilidad de su construcción.

La termodinámica, estudiada largamente en la educación media y en la educación superior particularmente para quienes hemos derivado en profesiones de carácter científica y/o tecnológica, es un modelo que ha perdurado

en el tiempo y su aplicabilidad ha sido extendida incluso a las ciencias sociales, en la interpretación de procesos de carácter sociológico (2). El carácter científico de la termodinámica no sólo es avalado por los antecedentes de quienes la fundaron, cuyo prestigio ha perdurado en el tiempo (3), sino que también por el carácter experimental de los parámetros que la conforman, como lo hemos podido constatar quienes trabajamos corrientemente en esta área del conocimiento (4). En efecto, cuando analizamos la estabilidad de los sistemas o la evolución de los procesos, quienes pensamos “desde” la termodinámica visualizamos inmediatamente conceptos como la Energía Interna, la Entalpía, la Entropía, la Energía Libre u otros parámetros, variables o funciones, que pueden ser medidos experimentalmente ya sea directa o indirectamente (4,5). Hemos aprendido de la insuficiencia de la Primera Ley para describir un fenómeno y que la Segunda Ley es el complemento necesario para entender porque los procesos podrían o no ocurrir. También podemos apreciar que la belleza de estas leyes se vieron coronadas por la aparición de la llamada “ley cero”, que fija una escala de temperaturas absoluta o escala Kelvin, no dependiente de características físicas del sistema, como lo son las escalas Celsius o Fahrenheit (4,5). Hoy el uso de los parámetros termodinámicos es parte importante de las “ciencias de la ingeniería” e imprescindible para quienes nos dedicamos a la extracción y uso de los metales por su aplicación práctica en áreas como la Hidrometalurgia, Pirometalurgia, Electrometalurgia y Ciencias de los Materiales (6,7,8).

El desafío de entender la Economía Circular usando conceptos de la termodinámica no es menor, pero como motivación inicial, digamos que la introducción del parámetro Energía Libre nos muestra que los cuerpos puros no existen en la naturaleza ya que la presencia de otros elementos, aun en proporciones de partes por millón, contribuye a estabilizar el sistema global haciendo disminuir la Energía Libre de la mezcla, como se muestra esquemáticamente en la Figura No.1 adjunta.

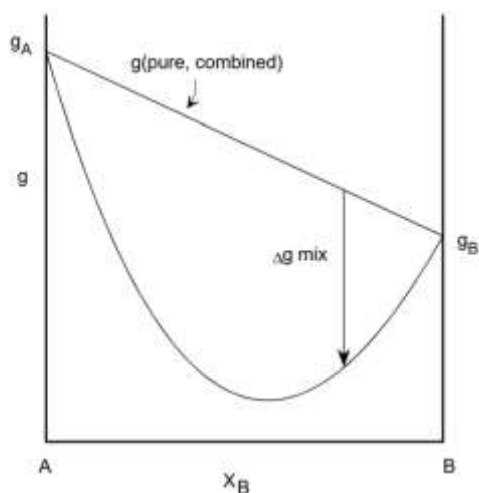


Fig 1.- Energía Libre vs fracción molar para un sistema binario A-B (16)

Esta situación corrobora la idea que obtener un cuerpo puro no es un proceso “natural” y debe considerar la inversión de grandes cantidades de energía, a diferencia de los procesos naturales que ocurren espontáneamente muchas veces liberando grandes cantidades de energía. La obtención de un metal a partir de sus minerales es un típico proceso “no natural”, no ocurre espontáneamente, como lo constatamos diariamente al observar las operaciones de nuestra industria extractiva. Los procesos piro, hidro y/o electrometalúrgicos, si bien concluyen en materiales de alta pureza, el metal final siempre contendrá las impurezas que le confieren la estabilidad termodinámica requerida. La inestabilidad del metal “puro” así obtenido, queda explícito cuando, abandonado a la atmósfera circundante,

comienza nuevamente a captar impurezas del entorno para estabilizarse y volver al estado mineral. Proceso que es equivalente al observado a lo largo de edades geológicas.

El segundo punto a considerar es que la termodinámica predice que no es posible producir un cambio en un sistema o parte de un sistema, sin producir una alteración en otra parte del universo o en el medio circundante. Esto lo vemos claramente en la producción de cobre, donde, a cambio de producir un metal relativamente puro, debemos generar pasivos mineros y/o metalúrgicos de dimensiones colosales, como se muestra en la Tabla 1 adjunta (9).

Tabla 1.- Pasivos mineros y metalúrgicos generados durante la producción de 1 ton de cobre blíster.

Residuos Solidos	Generación (ton/ton Cu)
SO <sub>2</sub> en gases de Fundición	< 1
Escorias de Fundición	2 - 5
Colas de Flotación	60 - 100
Ripios de Lixiviación	100 - 200
Estéril de Mina	300 - 400

Hoy en día, en alguna medida nos hacemos cargo de estos efectos “no deseados”, tratando de recuperar y valorizar estos mal llamados “desechos”, y es así como los gases de fundición, por razones ambientales, han ido convirtiendo el contenido de SO<sub>2</sub> en ácido sulfúrico (10), recuperando cobre y otros materiales desde las escorias (11), y, en estos últimos años, incentivando el tratamiento y uso ulterior de colas de flotación y ripios de lixiviación (12).

Finalmente, la Fundación Ellen Mc Arthur (13,14,15), entre otras instituciones hoy dedicadas a instalar el concepto de la Economía Circular, han considerado de sumo interés establecer las bases científicas de esta proposición, toda vez que hoy vivimos en un planeta claramente finito y con limitaciones de borde bien conocidos, donde se hace necesario establecer protocolos de trabajo rigurosos y desbloquear de alguna manera el concepto tradicional de crecimiento económico del desarrollo de nuestra sociedad.

### Antecedentes.-

La termodinámica, en sus principios, describe los procesos mediante el uso de variables y funciones de estado, para anticipar si un cambio puede o no ocurrir. Es largo de explicar en una presentación de este tipo, pero debemos decir que el modelo termodinámico tiene una base experimental, ya que los parámetros y funciones utilizadas son medibles y se encuentran tabuladas y descritas en todos los textos de físico química (4,5). Para los metalurgistas, la función que mejor describe este cambio es la llamada Energía Libre de Gibbs  $G$ , que a su vez es función de la Entalpía  $H$ , la Entropía  $S$  y la Temperatura absoluta o temperatura Kelvin  $T$ , tal como se describen sus variaciones en la ecuación siguiente

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1)$$

Los procesos o los cambios ocurren porque un potencial (variable intensiva) obliga un desplazamiento de una variable o función extensiva a la búsqueda del equilibrio, y en esa búsqueda del equilibrio la función energía libre de Gibbs decrecerá hasta llegar a su valor mínimo. Es ésta en esencia la aplicación del modelo termodinámico a los procesos de extracción de metales. Así, el potencial químico por ejemplo, obligará al desplazamiento de la materia desde las más altas a las más bajas concentraciones. El potencial térmico, la temperatura, obligará el desplazamiento de calor desde las más altas a las más bajas temperaturas. El aumento del potencial mecánico, la presión, obligará a la

expansión del sistema como una forma de absorber este crecimiento.

El modelo termodinámico de estados de equilibrio, si bien es una aproximación, no se aleja demasiado de la realidad, particularmente en los procesos a altas temperaturas en que la cinética es muy rápida. De ahí que los llamados Diagramas Ellingham (5), que son representaciones de la ecuación de Energía Libre antes citada, sean muy utilizados por los metalurgistas para entender la estabilidad y evolución de los sistemas metálicos.

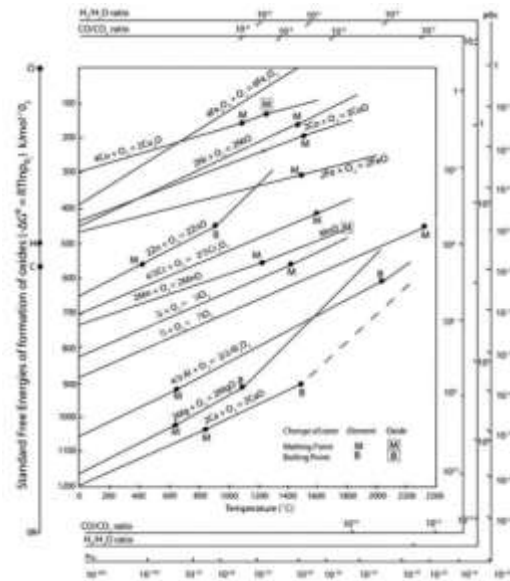


Figura 2: Diagrama de Ellingham de óxidos (17)

La simplificación de un sistema polimetálico a dos componentes, como se muestra en la Figura 1, permite explicar por qué los cuerpos metálicos puros son inestables y basta una muy baja concentración de un componente, a nivel de impureza, para darle estabilidad al sistema. Vemos entonces que la existencia de “metales puros” es una utopía, y la búsqueda tecnológica por conseguirlo involucra cantidades enormes de energía. Dicho de otra manera, los metales llamados puros que utilizamos a diario, se encuentran en un estado termodinámicamente inestable y tendrán siempre a recuperar su estado

mineral. Sin embargo, hemos descubierto que mientras más puros son los metales, mayor es la utilidad que prestan sobre todo en las aplicaciones más sofisticadas, por lo que debemos hacer el esfuerzo de conseguirlo. Este es, quizá, la primera reflexión desde la termodinámica que nos permite anticipar la aparición de la economía circular: el respeto por la ocurrencia natural de los fenómenos y que tiene una fundamentación científica que no debemos menospreciar. Ello debiera hacernos pensar profundamente sobre la idea de restituir las condiciones iniciales del medio ambiente, para no correr el inevitable riesgo de producir efectos negativos permanentes en las zonas aledañas a los lugares donde ocurren los cambios, este análisis de impacto en el entorno indica una primera y muy poderosa relación entre la Economía Circular y la Termodinámica. .

La ecuación básica para la Energía libre de Gibbs antes señalada en (1), que representa la conjunción de la primera y la segunda ley de la termodinámica, indica además que un proceso es espontáneo (tiene todas las posibilidades de ocurrir) si ocurre con cesión de calor al medio ambiente (proceso exotérmico, decrecimiento de la entalpía) y con aumento del desorden (proceso con crecimiento de la entropía, aumento del desorden). Ambos parámetros, Entalpía y Entropía, hacen su aporte para que el cambio ocurra en forma espontánea e irreversiblemente, por lo tanto existe una degradación de la Energía. Esto representa la pérdida irreversible de las condiciones iniciales y evidencia que la única forma de restituir las en parte es recurriendo a los principios de la Economía Circular.

#### **Discusión.-**

La llamada Economía Lineal, asociada a la revolución industrial en el mundo, puso toda su atención en la generación masiva de un producto final de uso social, en una época que correspondía suplir fuertemente la necesidad de nuevos bienes en la sociedad. Existía la percepción que el medio ambiente era capaz de absorber todos los cambios generados como si fuera un sumidero infinito y la lógica

industrial obliga a poner atención sólo en el producto final sin considerar los efectos ambientales. Hoy, producto del incremento en la cantidad y calidad de las comunicaciones, tenemos mucho más claras nuestras limitaciones respecto a los límites y restricciones del mundo en que vivimos. De esta manera la Economía Circular, como alternativa al desarrollo de lo que fue la revolución industrial y la hoy llamada Economía Lineal, tuvo una gestación natural y evidente.

Los principios de la Termodinámica y las previsiones respecto a la ocurrencia o no de los fenómenos, así como los efectos colaterales de estos cambios, son antecedentes de valor científico que permiten predecir cuáles serán los efectos de un manejo irresponsable de nuestro vínculo con la naturaleza, particularmente con los minerales y metales que queremos utilizar.

La Termodinámica predice la imposibilidad de gestar un cambio en un sistema sin provocar un cambio en alguna otra parte del universo. Aún más, la termodinámica nos habla de la degradación de la energía y del crecimiento de entropía cuando los procesos son espontáneos y por ende irreversibles. Traducidos en lenguaje metalúrgico, la obtención de un metal puro, desde una naturaleza cuyo equilibrio se basa esencialmente en los cuerpos mezclados, considera la presencia de otros componentes, que hoy llamamos despectivamente impurezas, pero que en realidad suman estabilidad al sistema. Este principio es también válido, como ya lo hemos comentado, para un posible análisis sociológico respecto de la pureza o impureza de agrupaciones y comunidades humanas.

Como conocedores de estas bases científicas debemos tener, alguna concepción de cómo corregir y anticiparse a los cambios no deseados que pueden venir. Es lo mínimo que podemos hacer como personas formadas en estos principios. La Economía Circular viene a ayudarnos a corregir esta situación sin otro protocolo que imitar a la naturaleza, en una

suerte de biomimesis, para seguir viviendo en un mundo en que podemos aprovechar los recursos que nos ofrece si somos capaces de devolver lo que la naturaleza espera de nosotros.

### **Bienvenida Economía Circular.**

La Economía Lineal es aquel modelo de fabricación y consumo surgido durante la Revolución Industrial. Consiste en etapas secuenciales que forman una línea de vida de un producto. Una línea típica es “Take-make-use-discard” Es decir los recursos que el Planeta pone a disposición son tomados, con ellos fabricamos objetos que son usados y luego desechados. El modelo de Economía Circular, cierra el ciclo, permitiendo que todos los insumos y desechos consumidos en el modelo Lineal vuelvan a integrarse a otros procesos. Algunos ejemplos de procesos asociados a la Economía Circular que modifican el modelo lineal se muestran a continuación:

Comenzamos mencionando (a) el proyecto de la central hidroeléctrica de pequeña escala asociada al canal de Relaves, esta iniciativa se encuentra en la División El Teniente de Codelco. Esta iniciativa es el primer proyecto de generación eléctrica a partir de relaves en el mundo. El proyecto busca aprovechar la energía mecánica del relave en la primera cascada, ubicada en plena Cordillera de Los Andes y que tiene un desnivel de 120 metros. De acuerdo a la declaración oficial de la División: “La generación de energía a partir de relaves se inserta en la política de eficiencia energética y energías renovables no convencionales de la empresa, que busca aprovechar los recursos disponibles”(18). Este proyecto usa la energía contenida en un flujo másico para convertirla en energía eléctrica mediante un dispositivo ya conocido: un generador hidráulico. Este caso muestra como los flujos asociados a masas pueden entregar energía de muy alta calidad a los procesos productivos, también muestra que las empresas buscan constantemente maximizar el uso de los recursos disponibles, por lo que se considera que la Economía

Circular es un enfoque ya incorporado a la gestión.

Otros ejemplos son el de (b) la mina brasilera Morro Agudo, de propiedad de Nexa Resources. Es una faena que tiene un procesamiento adicional de sus flujos de salida, denominado como “residuo cero”. A sus desechos les dan un tratamiento para extraer zinc, que luego es usado en el control de la acidez del suelo que afecta al sector agrícola cercano a la faena, comercializado bajo el nombre de Zincal 200.

(c) El segundo caso similar es el de la asociación formada por Rio Tinto, Geocycle Canada y la empresa de materiales de construcción Lafarge Canada. Las tres trabajan en reutilizar los desechos del proceso de fundición de aluminio y producir cemento. A través de esta iniciativa de economía circular, el trío reducirá la necesidad de extraer otras materias primas y crear valor a partir de estos residuos.

(d) Otro ejemplo interesante ha sido el uso de las escorias (el subproducto de un proceso metalúrgico que involucre fundiciones) producidas por la Fundición de Ilo de Southern Copper en los años 90. La minera estableció un acuerdo con la Municipalidad Provincial de Ilo para usar estas escorias y generar una mezcla de concreto que permitió la construcción de cientos de veredas que hoy caracterizan a la ciudad portuaria y capital del departamento de Moquegua. Estos casos muestran que los flujos de salida de un sistema pueden ser la entrada de otro y que todo proceso tiene impacto en su entorno, dependiendo de la manera en que se modulen los flujos de salida, el impacto puede o no ser beneficioso para la Economía total. (19)

(e) En la Faena minera Los Bronces de Anglo American, se puso en marcha el piloto de la primera planta fotovoltaica construida sobre un depósito de relaves a nivel mundial. La iniciativa consiste en paneles fotovoltaicos, ubicados en una isla flotante, con capacidad de generar en conjunto 86 kWh. Junto con ello, este proyecto permitirá reducir las

emisiones de CO<sub>2</sub> en 58 toneladas al año, generar energía eléctrica renovable de 150.000 kWh/año y reducir en un 80% la evaporación del agua sobre el área que cubre. Este ejemplo nos muestra que una vez iniciado el ciclo, se alimenta a sí mismo. La generación de electricidad limpia en espacios no usados, reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> y como beneficio secundario que puede ser obvio al enunciar, pero que es relevante: disminuye la evaporación de agua al evitar que la luz solar incida en ella. (20)

Estos ejemplos tienen en común el uso de flujos de materiales y energías previamente no incluidos en el proceso. Una mirada atenta a estos flujos revela que la termodinámica anticipa la posibilidad de que estos flujos existan, fluyan en un determinado sentido y puede calcularlos. El análisis usando herramientas termodinámicas de los procesos y sus flujos enriquece y aporta valiosos datos. Adicionalmente este análisis puede encontrar posibilidades de aprovechamiento de flujos previamente no considerados. Estos análisis termodinámicos tienen que ver con las probabilidades de que un flujo tenga lugar, dado por el cambio de entropía, con la energía asociada a un flujo particular dada por la energía total del flujo y por la energía disponible para realizar un trabajo dado indicada por la entalpía. Este análisis permite cuantificar y modelar con bases muy sólidas los flujos en la plataforma de la economía circular

Es necesario pensar que estos flujos no son un análisis de laboratorio, ni puramente teórico, hay factores económicos involucrados, esto lleva a considerar que existen tantas oportunidades de negocio como flujos materiales y de energía. Al pensar las operaciones minero-metalúrgicas desde la plataforma de la economía circular se considera el impacto en las economías, el medio ambiente, las empresas y los ciudadanos. Estos beneficios potenciales se unen para ofrecer una visión prometedora para una regeneración y restauración en el futuro.

## Conclusiones.

Podemos decir que la Economía del futuro será circular o no será. Las posibilidades de mantener el modelo de Economía lineal en el futuro son nulas dado el agotamiento de los recursos, el crecimiento de la población y disminución de la disponibilidad de superficie agrícola per cápita. De manera muy conservadora se plantea que los ahorros en materiales y energía dados por la economía circular permitirían intentar alcanzar un desarrollo sustentable, intento fuera del alcance del modelo lineal.

La termodinámica es una herramienta que tiene el potencial de aplicarse a todos los sistemas, pero encaja particularmente bien en el modelo de economía circular, dado que este modelo considera todos los flujos y no solo los del producto. Esta situación favorece un análisis basado en flujos y sistemas y no sólo enfocarse en costos y beneficios para el productor.

Creemos firmemente que un enfoque termodinámico de la economía circular puede descubrir oportunidades y aportar valor al paso de un modelo lineal a uno circular. Las herramientas de la termodinámica son extremadamente valiosas y no pueden ser pasadas por alto al momento de evaluar los sistemas económicos del futuro

## Bibliografía.-

- (1) L'économie circulaire, un nouveau modèle de développement. (2020, 11 juin). ESCadrille Toulouse Junior Conseil. <https://www.escadrille.org/fr/blog/economie-circulaire-nouveau-modele-developpement>
- (2) Stefan Pohl-Valero, Termodinámica, pensamiento social y biopolítica en la España de la Restauración, *universitas humanística* no.69 enero-junio de 2010 pp: 35-60 bogotá - colombia issn 0120-4807, <http://www.scielo.org.co/pdf/unih/n69/n69a03.pdf>
- (3) Saslow, W. M. (2020). A History of Thermodynamics: The Missing Manual. *Entropy*, 22(1), 77.

- (4) O. Kubaschewski & E. LL. Evans & C. B. Alcock, Metallurgical Thermochemistry, Fourth Edition, enero 1974
- (5) David Gaskell, David Laughlin, Introduction to the Thermodynamics of Materials, Sixth Edition, 2018, Taylor and Francis Group.
- (6) A.K. Biswas and W.G. Davenport, Extractive Metallurgy of copper, Third Edition, 1994, Pergamon.
- (7) T. Rosenqvist, Principles of Extractive Metallurgy, McGraw Hill, CRC Press, First Edition, Enero 1969.
- (8) W.F. Smith, Ciencia e Ingeniería de Materiales, Mac Graw-Hill, Tercera Edición, 1998.
- (9) M. Sanchez, CONCEPTOS DE ECONOMIA CIRCULAR APLICADA A LA PRODUCCION Y USO DE METALES. Curso Fac Ingeniería, Universidad Andres Bello, 2020 (Elaboración propia)
- (10) Sánchez, A. J. (2011). BLOG DEL SEMINARIO DE CIENCIAS. BLOG DEL SEMINARIO DE CIENCIAS. <http://quimicavirgendeatocha.blogspot.com/2011/10/la-industria-del-acido-sulfurico.html>
- (11) M. Sanchez, Use of copper slag for iron alloys fabrication. A circular economy approach for the Chilean metallurgical industry, The 11th Molten Slags, Fluxes and Salts [MOLTEN 2020] May 25-29, 2020, Seoul, Korea
- (12) Oscar López, Recuperación de valor de residuos mineros y de relaves, BioTech Environmental Technologies, [https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/oscar\\_lopez\\_-\\_bioteq.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/oscar_lopez_-_bioteq.pdf)
- (13) Ellen Mc Arthur Foundation, Towards the Circular Economy, Vol 1, 2013.
- (14) Ellen Mc Arthur Foundation, Towards the Circular Economy, Vol 2, 2013.
- (15) Ellen Mc Arthur Foundation, Towards the Circular Economy Vol 3, 2014.
- (16) MS15a, Gibbs Free Energy and Phase Diagrams. (n.d.).
- (17) Stratton, P. (2013). Ellingham diagrams—their use and misuse. International Heat Treatment and Surface Engineering, 7(2), 70-73.
- (18) <https://www.t13.cl/noticia/negocios/code-lco-licitara-primer-proyecto-de-minicentral-hidroelectrica-de-relaves-en-el-mundo>
- (19) <https://especial.elcomercio.pe/mineriasostenible/economia-circular-como-se-aplica-en-el-sector-minero/>
- (20) <https://energia.gob.cl/noticias/metropolitana-de-santiago/en-la-rm-se-dio-inicial-plan-piloto-de-la-1era-planta-fotovoltaica-construida-sobre-un-relave-minero-en-el-mundo>

*Revista de Medio Ambiente Minero y Minería 6 (1): 33 – 48, Junio 2021. ISSN 2519-5352*

## **APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE MONTECARLO A LA EVALUACIÓN PROBABILÍSTICA DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN ROCA**

Rubén Medinaceli Tórrez

Ingeniero Civil y de Minas – r.medinaceli.torrez@gmail.com – Universidad Técnica de Oruro

Rubén Medinaceli Ortiz

Ingeniero de Minas – rmedinaceliortiz@gmail.com – Universidad Técnica de Oruro

### **RESUMEN**

En el presente trabajo, se desarrolla una metodología probabilística, utilizando la simulación de Montecarlo, para evaluar de la estabilidad de un talud en roca en el que la modalidad previsible de fallamiento es la falla en cuña.

Se evalúa la estabilidad del talud seleccionado utilizando el diseño determinístico de taludes, se calcula el factor de seguridad de dicho talud.