



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión
Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Molienda de minerales de cobre para determinar el índice de
trabajo**

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

Autores

Jose Carlos Saavedra Veramendi

Mario Francisco Osorio Galarza

Asesor

M(o) Joaquín José Abarca Rodríguez



**JOAQUIN JOSÉ
ABARCA RODRIGUEZ
INGENIERO METALURGICO
Reg CIP Nº 106833**

Huacho - Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL

JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

INFORMACIÓN DE METADATOS

DATOS DEL AUTOR (ES):		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Jose Carlos Saavedra Veramendi	72553872	26 – 11 - 2025
Mario Francisco Osorio Galarza	73524482	26 – 11 - 2025
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Joaquín José Abarca Rodríguez	15740291	0000-0003-1004-3824
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CODIGO ORCID
Juan Manuel Ipanaque Roña	32952515	0000-0003-2695-9802
Elvira Teofila Castañeda Chirre	15744138	0000-0002-1953-8869
Helen Analí Zapata Del Solar	44067559	0000-0002-5347-6155

Osorio Galarza Mario Francisco- Exp.037147-2025 S...

MOLIENDA DE MINERALES DE COBRE PARA DETERMINAR EL INDICE DE TRABAJO

 Quick Submit

 Quick Submit

 Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::1:3258606517

Fecha de entrega

23 may 2025, 3:58 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

23 may 2025, 4:06 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

BORRADOR_DE_TESIS_SAAVEDRA_Y_OSORIO.docx

Tamaño de archivo

1.9 MB

64 Páginas

10.423 Palabras

54.525 Caracteres



Página 2 of 69 - Integrity Overview

Identificador de la entrega trn:oid::1:3258606517

19% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Small Matches (less than 10 words)

Top Sources

- 19%  Internet sources
- 2%  Publications
- 14%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Dedicatoria

Este proyecto de tesis se lo dedico principalmente a Dios, por darme la oportunidad de vivir y por haberme guiado por el camino correcto, por darme las fuerzas y la sabiduría para seguir adelante, para poder llegar a este punto de mi carrera.

A mis padres, pilares fundamentales en mi formación, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación, por enseñarme a ser una persona con valores y principios, siendo mi apoyo en todo momento, les dedico todo mi esfuerzo, en reconocimiento a todo el sacrificio puesto, para que yo pueda estudiar, se merecen esto y mucho más.

A mis queridos hermanos por estar siempre presentes y por ser mí apoyo incondicional. A todos ellos gracias por su apoyo y su confianza.

Agradecimiento

A Dios primeramente por concederme la vida y la salud, por darme el privilegio de estar con mis seres amados, y ayudarme durante el transcurso de mis estudios, porque sin el nada de esto hubiera sido posible.

A mis padres, quienes a lo largo de toda mi vida me han apoyado y motivado en mi formación académica, porque gracias a su apoyo incondicional en mis triunfos, en mis aciertos y en mis tropiezos, he llegado a realizar la más grande de mis metas, la cual constituye ser un profesional titulado, que es la herencia más valiosa que pudiera recibir y por lo cual viviré eternamente agradecido.

A mis hermanos, por ser mi compañía, mi apoyo y mi fuerza para seguir adelante, en especial a mi hermano, quien es mi mejor amigo y que siempre ha estado conmigo siempre que lo necesito.

Finalmente, pero no menos importante, a mi asesor, a quien le debo gran parte de mis conocimientos, gracias por prepararnos para un futuro competitivo no solo como los mejores profesionales sino también como mejores personas. A todos ustedes, ¡gracias!

Índice general

Dedicatoria.....	5
Agradecimiento.....	6
Índice general.....	7
Índice de figura.....	10
Índice de tabla.....	11
Anexo.....	12
Resumen.....	13
Abstract.....	14
Introducción.....	15
Capítulo I Planteamiento del Problema.....	17
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	17
1.2 Formulación del Problema.....	18
1.2.1 Problema General.....	18
1.2.2 Problemas Específicos.....	18
1.3 Objetivos de la Investigación.....	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.2 Objetivo Especifico.....	19
1.4 Justificación de la Investigación.....	19
1.5 Delimitación del Estudio.....	20
1.5.1. Delimitación territorial.....	20
1.5.2. Delimitación tiempo espacio.....	20
1.5.3. Delimitación de recursos.....	20

Capitulo II Marco Teórico	21
2.1. Antecedentes de la Investigación	21
2.1.1. Investigación Internacional.	21
2.1.2. Investigación Nacional.....	22
2.2. Bases Teóricas.....	24
2.1.1. Conminución.....	24
2.1.2. Postulados de conminución.....	24
2.1.3. Postulado de Bond.	24
2.1.4. Índice de trabajo de por el método Bond.....	25
2.1.5. Índice de trabajo de por el método Berry Bruce.	27
2.3. Definiciones conceptuales.....	29
2.4. Hipótesis de la Investigación.....	30
2.4.1. Hipótesis General.....	30
2.4.2. Hipótesis Específicos.....	30
2.5. Operacionalización de Variables e Indicadores.	31
Capitulo III Metodología	32
3.1. Diseño Metodológico.	32
3.2. Población y Muestra.....	33
3.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.	33
3.4. Técnicas para el Procesamiento de la Información.....	33
Capitulo IV Resultados	35
4.1. Análisis de resultados.....	35
4.1.1. Condiciones de trabajo.....	35

4.1.2.	Resultado de las pruebas de work index.....	36
4.1.3.	Procesamiento de los datos de las pruebas de work index.....	38
4.1.4.	Procesamiento de los resultados de las pruebas de work index.....	41
4.1.5.	Proyecciones del índice de trabajo.....	44
4.2.	Contrastación de hipótesis.....	47
2.5.1.	Contrastación de hipótesis general.....	47
2.5.2.	Contrastación de hipótesis específicos.....	48
Capítulo V	Discusión.....	50
5.1.	Discusión de resultados.....	50
Capítulo VI	Conclusiones y recomendaciones.....	51
6.1.	Conclusiones.....	51
6.2.	Recomendaciones.....	52
Capítulo VII	Referencias bibliográficas.....	53
7.1.	Referencias bibliográficas.....	53
ANEXOS	58

Índice de figura

Figura 1 Molino de estándar de bond 12"x12"	27
Figura 2: Control del análisis de mineral F(80) método Bond	38
Figura 3: Producto de la molienda método Bond P(80)	39
Figura 4: Producto de la molienda método Berry Bruce P(80)	40
Figura 5 Paramento de control de work index método Bond.	41
Figura 6 Paramento de control de liberación de en relación la revolución.....	42
Figura 7	43
Figura 8: Predicción del índice de trabajo por regresión en relación de P(80) por el método de Bond.....	44
Figura 9: Predicción de la liberación del mineral en relación P(80).....	45
Figura 10 Predicción del índice de trabajo por el método Berry Bruce en relación a P(80)	46

Índice de tabla

Tabla 1 Distribución de bolas para molino de Bond.....	25
Tabla 2 Operacionalización de las variables e indicadores	31
Tabla 3 Work index método Bond.....	36
Tabla 4 Índice de trabajo método de comparación	37
Tabla 7 Análisis de varianza del índice de trabajo método Bond.....	47
Tabla 8 Análisis de varianza método Berry Bruce	47
Tabla 9 Análisis de varianza para índice de trabajo por método de Bond.....	48
Tabla 10 Análisis de varianza de índice de trabajo método Berry y Brice.....	49

Anexo

Anexo 1 localización del CIyDTM.....	59
Anexo 2 Matriz de consistencia.....	60
Anexo 3 Instrumentos para la toma de datos	61
Anexo 4 análisis de malla alimentación.....	62
Anexo 5 Curva de distribución alimentación.....	62
Anexo 6 Análisis de malla de producto	63
Anexo 7 Curva de distribución de producto	63
Anexo 8 Índice de trabajo por el método de Berry Bruce	64
Anexo 9 Índice de trabajo método Bond	65

Resumen

Tiene por objetivo evaluar estudio de la molienda de minerales de cobre en molienda para determinar el índice de trabajo, mediante comparativo entre los métodos de Bond y Berry Bruce para la determinación del índice de trabajo en minerales de cobre evidencia diferencias significativas en la influencia de las variables operativas. Es una investigación experimental donde se sometieron a la molienda de minerales por el método de Bond, y los factores del tamaño de alimentación (F80), tamaño de producto (P80) y grado de liberación del mineral (g/rev), obteniendo como resultado el índice de trabajo de 16.049 kw-h/tc con un impacto significativo en los resultados, destacando el g/rev como la variable de peso mayor ($p < 0,001$). Por otro lado, en el método de Berry Bruce, el tamaño del producto (P80) obteniendo el índice de trabajo de 16.161 kw-h/tc con una variable significativa ($p < 0.001$), mostrando un enfoque más simplificado, pero igualmente efectivo para medir el índice de trabajo. Concluyendo que ambos métodos arrojan valores similares en promedio, con una ligera ventaja en consistencia y desviaciones estándar para Berry Bruce, lo que lo hace más viable en procesos donde se busca reducir la complejidad operativa. Sin embargo, el método de Bond proporciona una evaluación más detallada, adecuada para minerales con mayor dureza o variabilidad en las propiedades del mineral.

Palabra clave: Molienda, índice de trabajo, liberación de minerales, metodo Bond, método Berry Bruce.

Abstract

The objective of this study is to evaluate the grinding of copper ores in grinding to determine the work index, by comparing the Bond and Berry Bruce methods for the determination of the work index in copper ores, showing significant differences in the influence of the operating variables. It is an experimental investigation where minerals were subjected to grinding by the Bond method, and the factors of feed size (F80), product size (P80) and mineral liberation degree (g/rev), obtaining as a result the work index of 16.049 kw-h/tc with a significant impact in the results, highlighting the g/rev as the variable of greater weight ($p < 0.001$). On the other hand, in Berry Bruce's method, the product size (P80) obtaining the work index of 16.161 kw-h/tc with a significant variable ($p < 0.001$), showing a more simplified, but equally effective approach to measure the work index. Concluding that both methods yield similar values on average, with a slight advantage in consistency and standard deviations for Berry Bruce, making it more viable in processes where operational complexity is sought to be reduced. However, the Bond method provides a more detailed evaluation, suitable for ores with higher hardness or variability in ore properties.

Keyword: Grinding, work index, mineral liberation, Bond method, Berry Bruce method.

Introducción

La molienda de minerales de cobre es un proceso esencial en la industria minera, ya que no solo determina la eficiencia de la recuperación del metal, sino que también influye en el consumo energético y en la sostenibilidad del proceso. Este proceso implica la reducción del tamaño de las partículas del mineral para liberar las especies de valor, facilitando así su posterior separación mediante métodos como la flotación (Dávila y otros, 2022); (Reyes-Pérez y otros, 2022).

La caracterización mineralógica juega un papel crucial en este contexto, ya que la comprensión de la composición y estructura de los minerales puede optimizar los parámetros de molienda y mejorar la recuperación del cobre (Dávila y otros, 2022); (Kenji, 2023). El Índice de Trabajo (Wi), introducido por Bond, es un parámetro clave que requiere ser utilizado para una adecuada evaluar la resistencia de un mineral a la molienda. Este índice se determina a partir de ensayos de laboratorio y se expresa en kilovatios-hora por tonelada, lo que permite estimar el consumo energético necesario para reducir el tamaño del mineral a un nivel adecuado para la flotación (Palma y otros, 2020) (Palma et al., 2020). La importancia del Índice de Trabajo radica en su capacidad para predecir el rendimiento de los circuitos de molienda, lo que es esencial para el diseño y operación de plantas mineras eficientes (Palma y otros, 2020); (Osorio y otros, 2013). Además, la molienda de minerales de cobre no solo se limita a la reducción de tamaño, sino que también involucra reacciones químicas que pueden afectar la fisicoquímica de la pulpa de molienda. Por ejemplo, la interacción entre los minerales y los reactivos utilizados en la flotación puede ser influenciada por el tamaño de aquellas partículas adecuadas y una distribución de tamaños, lo que subraya la necesidad de un control riguroso durante la etapa de molienda (Reyes-Pérez y otros, 2022). La investigación sobre el comportamiento reológico de las pulpas también es

relevante, ya que afecta la eficiencia del transporte y la separación de partículas durante el procesamiento (Osorio y otros, 2015). La creciente complejidad de los minerales de cobre, junto con el agotamiento de las reservas de alta ley, ha llevado a la industria a buscar métodos más eficientes y sostenibles para la recuperación de este metal. Esto incluye la optimización de los procesos de molienda y la implementación de tecnologías innovadoras que minimicen el impacto ambiental (Kenji, 2023); (Huarachi-Olivera y otros, 2017). Por lo tanto, la investigación sobre la molienda de minerales de cobre y la determinación del Índice de Trabajo no solo es relevante desde el punto de vista técnico, sino que también tiene implicaciones significativas para la sostenibilidad y la eficiencia de la industria minera en su conjunto. En conclusión, la molienda de minerales de cobre y la determinación del Índice de Trabajo son áreas de investigación crítica que requieren un enfoque multidisciplinario. La caracterización mineralógica, el análisis de la eficiencia energética y la comprensión de las interacciones químicas son elementos esenciales que deben ser considerados para mejorar los procesos de extracción y recuperación de cobre. Este estudio no solo contribuirá al avance del conocimiento en el campo de la minería, sino que también proporcionará herramientas prácticas para la optimización de procesos en la industria.

Capítulo I

Planteamiento del Problema

1.1 Descripción de la realidad problemática.

En el chancado y molienda de los minerales se usan equipos de reducción como las chancadoras y los molinos esto a su vez consumen energía para realizar el proceso de reducción de los minerales, el consumo de energía específico está relacionado al índice de trabajo del mineral, por lo que es necesario saber el índice de trabajo de cada mineral en cada circuito de las operaciones por ello es necesario calcular el índice de trabajo de cada mineral y en cada circuito y equipos utilizados.

En uno de los estudios sobre la molienda Jankovic, Valery, & Davis (2004) en su estudio sobre “Optimización de molienda de cemento” el consumo de energía eléctrica es aproximadamente de 110 Kwh/t que representa el 40% de energía que se consume en la molienda, se puede aumentar con un circuito de cerrado entre 10% a 20% con una reducción en chancado con una trituradora barmac.

Del mismo modo Aydoğan, Ergün, & Benzer (2006) en el trabajo sobre “Aplicaciones de rodillos de molienda de alta presión (HPGR) en la industria del cemento”, la reducción de energía específica se logra empleando un molino de rodillo de alta presión HPGR, cuando la reducción de $(F(80)/P(80)) = 308.2$ a 4.4 con ello el consumo de energía específico se reduce de 8.04 Kwh/t a 4.05 Kwh/t.

En relación a los trabajos realizados a nivel regional por Marín, Martínez, Macías, Serrano, & Gómez (2020) en su trabajo sobre “Investigación experimental en el consumo de energía específica y reducción de tamaño en la molienda de bolas usando diferentes tipos de levantador” en la molienda sin uso de levantamiento la liberación de los minerales en su mayoría lo realiza por

abrasión mientras que con levantadores con ángulo de 22.5° con altura de 12mm tiene mayor eficiencia las bolas temiendo un consumo de bolas del orden de 9.69kwh/ton con un 32% de finos, teniendo un efecto significativo en la molienda.

A nivel nacional uno de los estudios realizados por Armas & Poma (2013) respecto a la “Evaluación del consumo de energía eléctrica en la operación de conminución de la planta concentradora de huari - UNCP” para una optimización del proceso es necesario realizar una evaluación de los efectos de los parámetros de conminución como la granulometría y el consumo de energía, que el consumo de energía es significativo en la molienda y en el costo operacional.

El trabajo el estudio de molienda de minerales en molino estándar de bond para determinar el índice trabajo del mineral se desarrollará al nivel experimental en el laboratorio de preparación de minerales y geometalurgia del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Materiales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.

Cada mineral tiene una dureza particular de acuerdo su composición y su morfología por ello es necesario realizar un estudio para calcular el índice de trabajo del mineral a nivel laboratorio para predeterminar el consumo especio del mineral.

1.2 Formulación del Problema.

1.2.1 Problema General.

¿Como el estudio de molienda de minerales de cobre en molino influye en la determinación del índice de trabajo?

1.2.2 Problemas Específicos.

¿Cómo la molienda de minerales de cobre en molino por el método de Bond influye en el índice de trabajo?

¿Cómo la molienda de minerales de cobre molino por el método de comparación de Berry & Bruce influye en el índice de trabajo?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el estudio de la molienda de minerales de cobre en molino para determinar el índice de trabajo del mineral.

1.3.2 Objetivo Especifico

Evaluar la molienda de minerales de cobre en molino por el método de Bond para hallar el índice de trabajo.

Evaluar la molienda de minerales de cobre en molino por el método de comparación de Berry & Bruce para hallar el índice de trabajo.

1.4 Justificación de la Investigación

El trabajo realizado sobre “Molienda de minerales de cobre para determinar el índice de trabajo”, tiene importancia ya que el consumo de energía en el chancado y molienda es necesario conocer para poder buscar alternativas que permita minimizar el consumo de energía ya que el 45% del consumo de energía en una planta concentradora se consume en la molienda la reducción en este proceso minimiza el gasto de operación.

Obteniendo un índice de trabajo optimo se minimiza la perdida de energía y por ende se reduce el gasto de energía y se contribuye al medio ambiente en el consumo de energía.

La realización de la investigación me permitirá obtener el título profesional y a la universidad cumplir con uno de los estándares o misiones en formar profesionales con enfoque de investigación y la publicación de las investigaciones que realiza sus egresados.

1.5 Delimitación del Estudio.

1.5.1. Delimitación territorial.

El espacio geográfico para la investigación sobre “estudio de molienda de minerales en molino estándar de bond para la determinación del índice de trabajo del mineral” se encuentra en:

Departamento	: Lima
Provincia	: Huaura
Distrito	: Huacho
Lugar	: Ciudad universitaria, facultad de ingeniería química y metalúrgica pabellón 10B.
Coordinates	: Latitud: 11° 7'33.86"S, Longitud: 77°36'33.12"O Fuente: Google earth pro.
Altitude	: 30 msnm, Fuente: Google earth pro.

1.5.2. Delimitación tiempo espacio.

Es estudio sobre “Molienda de minerales de cobre para determinar el índice de trabajo” se realizará en el laboratorio de preparación de minerales y geometalurgia del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Materiales de la Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica. Durante el periodo de del 2022 entre mayo agosto.

1.5.3. Delimitación de recursos.

Para realizar a cabalidad el trabajo sobre “Molienda de minerales de cobre para determinar el índice de trabajo” se tiene ciertas restricciones tiempo que solo funciona el laboratorio de 8 am a 4 pm de lunes a viernes.

Capítulo II

Marco Teórico

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Investigación Internacional.

García y otros (2021) es su trabajo sobre “Estudio de variabilidad del índice de trabajo de enlace y el índice de molienda en varios minerales metálicos críticos”, publicado en la revista Metals es una investigación experimental. Se realizó pruebas de molienda estándar para minerales críticos para mineral grueso en molino de barras y molienda fina en molino de bolas. Llegando a la conclusión de que el índice de trabajo no tiene correlación con el tamaño de molienda, mientras que el índice de molienda(gpr) con el tamaño de molienda muestra una correlación óptima.

Vedat (2022) es su trabajo sobre “Un nuevo modelo entre la molturabilidad de Bond y Hardgrove basado en el llenado volumétrico de polvo mediante el uso de calizas” publicado en la revista Elsevier es una investigación experimental. Para el trabajo se emplearon 6 muestras de piedra caliza las cuales se evaluarán por el método de triturabilidad de molienda de Hardgrove(HGI) los cuales se estudiaron el volumen de llenado de polvo HGI y Gbg(índice de trabajo de bond). El resultado del llenado de polvo en la molienda de molino de vertical se encontró una relación entre los índices de trabajo de bond (Gbg) y triturabilidad de molienda Hardgrove(HGI). Concluyendo que el modelo tiene una alta validez de acuerdo al coeficiente de regresión ($R^2= 0.971$).

Para Osorio (2011) en su trabajo de investigación sobre “Determinación del índice de bond a la trituración del mineral saprolítico del proyecto de Ferroníquel Yamanigüey SA” presentado al Instituto Superior Minero Metalúrgico Cuba. El propósito es determinar el índice de trabajo de bond para ello se usó una trituradora de mandíbula y para la preparación de muestra el método de

anillo, cono y el rifle. Obteniendo como resultado las pruebas el índice de trabajo para la trituradora como máximo de 3.72 Kwh/h, promedio de 2.94 KWh/t y mínimo de 2.25 Kwh/t en promedio. Concluyendo que se tiene una significancia en la trituración de 2.94 Kwh/t de índice de trabajo para una capacidad de 0.256 t/h.

Lamarú (2012) en su trabajo sobre “Determinación del índice de Bond de las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur en la Empresa Ernesto Che Guevara” publicado por el Instituto Superior minero Metalúrgico de Moa Cuba es un trabajo experimental. Se realiza el trabajo de investigación a nivel piloto, para ello se obtiene la muestra de la faja transportado. El resultado obtenido de índice de trabajo de bond es de 4 Kwh/t para mineral natural, mientras que de 18.1 Kwh/t para mineral serpentinitico y de 2.5 Kwh/t de mineral limonítico. Concluyendo que el consumo específico de energía es de 3.4 a 24.4 Kwh/t con un promedio de 5.4 Kwh/t para el mineral que se está procesando.

2.1.2. Investigación Nacional.

Rojas (2018) en su trabajo sobre “Evaluación de índice de trabajo, (work index); en un yacimiento tipo pórfido de cobre y su implicancia geometalúrgica” Publicado por la Pontificia Universidad Católica del Perú, es un trabajo experimental. Concluyo que en el índice de trabajo no influencia en la mineralogía.

Chillce & Rodríguez (2019) en su trabajo sobre “Estudio de los parámetros operativos de moliendabilidad de un mineral polimetálico (Pb, Ag y Zn) de la zona de Huancachi – Lima” presentado a la Universidad Nacional del Centro del Perú. El trabajo consiste en una evaluación de moliendabilidad operacional para ello se realizó un muestreo y análisis de malla para su evaluación. Resultado obtenido para un molino de 6´x6´ se tiene un consumo de energía de 3.5 Kwh/t con ello se obtiene 56% pasante a la malla 200, mientras que para un molino de 7´x7´ con

una carga de bola de 15.35 toneladas corta para una potencia de 200Hp con un flujo de 27.08 t/h se obtuvo un consumo específico de energía de 359 Kw.h/t con un índice de trabajo de 11.66 Kwh/t. Concluyendo que tiene diferencia significativa en el proceso de liberación ya que el valor de t student es de -2.824.

Cori & Castro (2014) en su investigación sobre “Control de parámetros extractivos para la optimización en la recuperación de minerales auríferos gruesos y argénticos de la empresa minera ECOVITACA LTDA” presentado a la Universidad Nacional de San Agustín. Es una investigación experimental. Una de las pruebas realizadas respecto al índice de trabajo lo realiza por el método de Bond. Obteniendo los resultados de P (80) de 100 μ , F(80) 1417 μ , Gpb 1.929 g/rev., abertura de la malla 150 μ (100m), índice de trabajo 11.17 Kwh/h. Concluyendo que el mineral tiene una alta dureza.

Cristobal & Huatuco (2014) “Determinación del work index según la teoría de E. Bond mediante pruebas de moliendabilidad sulfuros para el control de la etapa de molienda a nivel de laboratorio en la Facultad de Ingeniería Química U.N.C.P”, presentado a la Universidad Nacional del Centro del Perú. En el proceso experimental se realizaron la moliendabilidad y el chancado mediante una chancado de quijada de 2”x4” y un molido de 12”x12”. El resultado obtenido en el chancado es de 5.604Kwh/t, mientras que en la molienda de 8.9295 Kwh/t y el 76.26% pasante a la malla 100 permite una mayor recuperación de la calcopirita (Cu). Llegando a una conclusión de que en la molienda tiene un mayor consumo de energía que en el chancado.

2.2. Bases Teóricas.

2.1.1. Conminución.

Es la reducción de las rocas desde un tamaño grande a fragmentos pequeños mediante el uso de chancadoras o molinos, En el proceso se transfiere energía cinética y mecánica de una máquina a las rocas con la que se produce el fraccionamiento interno por la fricción y calor que origina la ruptura (Quiroz, 1986).

La conminución es la reducción de los minerales al ser expuesto a una fuerza por abrasión, impacto, fricción donde se genera la acción de fragmentación o reducción de las partículas gruesas a fina.

2.1.2. Postulados de conminución.

Entre las teorías empíricas establecidos en la conminución de los minerales se tiene el postulado de Rittinger 1867, postulado de Kick 1885, postulado de Bond 1950, ecuación diferencial de la conminución Walker 1937 y el postulado de Charles 1956 (Quiroz, 1986).

2.1.3. Postulado de Bond.

Basado en los postulados de Rittinger, Kick y los trabajos realizados a nivel industrial en 1956 desde el punto de vista empírico y las pruebas de laboratorio llega a relacionar el consumo de energía para una reducción de mineral de un tamaño de alimentación y un tamaño obtenido en el producto establece que el nivel de energía requerida de los productos es igual a la energía de alimentación más la energía entrante en la conminución, teniendo en consideración un producto pasante a un tamaño de $100 \mu\text{m}$ y conociendo el índice de trabajo de un mineral el consumo de energía establece está relacionado a $W = Wi \left(\frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}} \right)$ donde W es el consumo de energía

establecido y W_i índice de trabajo tiene las unidades en Kwh/t mientras que la F80 es el 80% pasante en la alimentación y P80 es el 80% pasante en el producto (Quiroz, 1986).

2.1.4. Índice de trabajo de por el método Bond.

En el proceso de cálculo de índice de trabajo a nivel laboratorio por el método de bond consiste en las siguientes pasas:

- a) Determinación del Work index: Es un método estándar que consiste realizar una molienda en circuito discontinuo en molino de laboratorio y un tamiz para realizar la clasificación, los molinos pueden ser molino de barras y bolas.
- b) Work index en molino de bolas: El proceso consiste en un molino estándar de laboratorio de 12"x12" a una velocidad de operación de 70 rpm, con un peso de bolas de 20.125 kg con la siguiente distribución (Quiroz, 1986):

Tabla 1

Distribución de bolas para molino de Bond

Tamaño pulgas	% Peso	Numero de bolas
1.45	43.70	43
1.17	35.80	67
1.00	3.30	10
0.75	10.00	71
0.61	7.20	94

El mineral para la prueba debe de ser 100% pasante a la malla 6 o 10 lo cual debe ser calculado el F80 el mineral tamizado se debe sacar 700 cm³, luego carga al molino y dejar moler durante 100 vueltas o revoluciones luego tamizar, el peso del mineral que pasa a la malla se debe carga para el nuevo ciclo y el mineral molido durante las 100 vueltas, se debe dividir entre 100

para calcular gramos molinos por vueltas en función a ello el mineral cargado menos el porcentaje de fino existe entre los gramos de mineral liberado por revolución será la nueva revolución. Este proceso se debe mantener el peso de la carga inicial y la carga circulante se mantenga en 250%, se termina cuando las tres últimas pruebas el peso del mineral por vuelta sea constante con ello las carga que ingresa y la carga que sale sea igual es decir la carga circulante sea constante al 250% en eso caso termina la prueba y se realiza el análisis de malla del producto para hallar el P80 y se emplea la fórmula para calcular el work index del mineral (Quiroz, 1986):

$$Wi = \frac{44.50}{P^{0.23} G_B^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}} \right)}$$

Donde:

P → Es la abertura de la malla utilizado para clasificación del ciclo malla(147μ).

G_B → Es el gramo molido por revolución en los 3 últimos ciclo expresado g/rev., conocido como moliendabilidad.

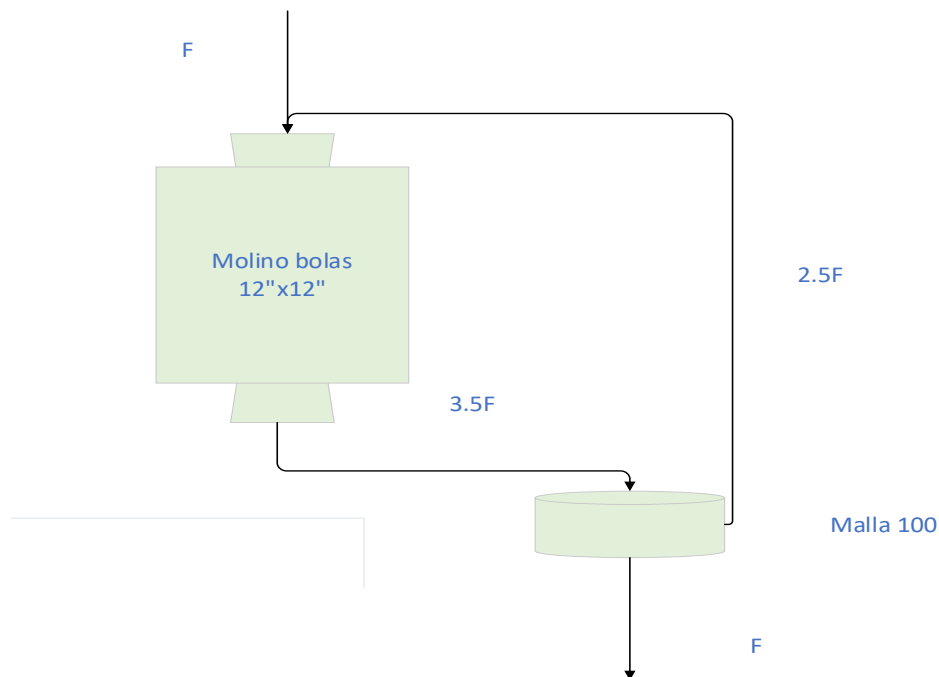
F80 → Es el 80 porcentaje pasante a una determinada malla en la alimentación antes de la prueba pasante 100% a la malla 10.

P80 → Es el 80 porcentaje pasante a una determinada malla en el producto.

El circuito de molienda en la prueba para determinar el índice de trabajo por el método de Bond consta en un circuito cíclico de molienda a nivel laboratorio como se ver en la figura:

Figura 1

Molino de estándar de bond 12"x12"



2.1.5. Índice de trabajo de por el método Berry Bruce.

El método de Berry Bruce consiste en realizar pruebas de molienda a mineral pasante 100% a malla 10 en un medio húmedo en un molino estándar de 12" de diámetros con una carga de 2000 gramos de mineral. Consiste en realizar una prueba de un mineral conocido el índice de trabajo conocido y otro mineral desconocido que se llevara a cabo la molienda en un tiempo determinado igual para la muestra conocida y la muestra desconocida se debe tener en cuenta la velocidad operacional, carga de bola, tiempo, etc., debe de tener las mismas condiciones. La alimentación y producto se debe realizar un análisis de malla para calcular el 80% pasante en que malla se encuentra en la alimentación y el 80% pasante en que malla se encuentra el producto (Selpulvera & Gutierrez, 1986).

$$W_{ir} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80r}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80r}}} \right) = W_{it} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80t}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80t}}} \right)$$

Donde:

Wir= índice de trabajo muestra de referencia conocida (kw.h/tc).

Wit= índice de trabajo de muestra desconocida test (kw.h/tc)

P80r= 80 porciento pasante en el producto en la muestra de referencia (μ).

F80r= 80 porciento pasante en la alimentación en la muestra de referencia (μ).

P80t= 80 porciento pasante en el producto en la muestra desconocida test (μ).

F80t= 80 porciento pasante en la alimentación en la muestra desconocida test (μ).

2.3. Definiciones conceptuales.

- a) **Molienda:** Es la reducción de los minerales por impacto, abrasión en un seco o húmedo donde el molino gira a una velocidad de operación para aprovechar la energía potencial.
- b) **Índice de trabajo:** Es la energía potencial requerida para liberar o moler desde un tamaño infinito a un tamaño 100 micras pasante el 80% expresado en kw.h/tc.
- c) **Carga moledora:** Es la masa de las bolas, barras o guájaras que se encargan de la fragmentación del mineral que está representado del 62% del 45% del volumen del molino con una distribución adecuada para una liberación óptima.
- d) **Malla:** Es una zaranda con aberturas que se encarga de clasificar el mineral en dos productos los que son rechazados y los que pasan.
- e) **Molino:** Es un cilindro de hierro de forma cilíndrico que sirve para moler el mineral con una velocidad de operación.
- f) **Carga circulante:** Es el mineral que retorna de la clasificación al molino para su liberación es un circuito cerrado lo que recircula en el proceso desde el clasificador al molino.
- g) **Mineral:** Es un material constituido de minerales oxidados, sulfuros, etc. Que se encuentra en la corteza terrestre conformado por metales, oxígeno, azufre, etc.
- h) **Velocidad de operación:** Es la velocidad que gira el molino en una fracción de la velocidad crítica entre 0.75 a 0.8.
- i) **Método:** Es la forma sistemática de organizar algo mediante una estructura con la finalidad de alcanzar los objetivos trazados.
- j) **Ciclo:** Es un periodo secuencia repetitivo de tiempo donde ocurre un conjunto de acontecimiento o suceso, fenómenos, etapas una vez finalizado vuelve a repetirse desde el inicio hasta el fin.

- k) **Malla:** Es un tejido entrecruzado hecho con delgados alambres que se tiene una abertura cuadrilátero o rómbico que sirve para clasificar por tamaño de granos
- l) **Prueba:** Es una secuencia de actividades que se realizan con la finalidad de probar la efectividad, eficiencia, resultados que uno desea saber. Se realizan a escala de laboratorio con pequeñas muestras.

2.4. Hipótesis de la Investigación.

2.4.1. Hipótesis General.

Con el estudio de molienda de minerales de cobre en molino influye significativa en la determinación del índice de trabajo.

2.4.2. Hipótesis Específicos.

Con una molienda de minerales en molino por el método de Bond permitirá determinar la influye significativa en el índice de trabajo.

Con una molienda de minerales en molino por el método de comparación de Berry & Bruce permitirá determinar la influye significativa del índice de trabajo.

2.5. Operacionalización de Variables e Indicadores.

Molienda de minerales de cobre para determinar el índice de trabajo.

Tabla 2

Operacionalización de las variables e indicadores

Variable	Concepto	Dimensiones	Indicador
Independiente			
Molienda de minerales	Molienda de minerales en un molino estándar de bond con una carga circulante de 250% y molienda en un tiempo estándar el mineral desconocido y frente al cuarzo	- Método de bond - Comparación de Berry & Bruce	- g/rev. - P80 - F80
Dependiente			
Índice de trabajo	Es la conminución o fragmentación de las partículas de un mineral en un determinado tiempo de los granos finos en una malla estándar expresados gramos por la revolución del molino.	- Word índice	- Kw-h/tc
Intervinientes			
Componentes integrantes en el proceso	Son las variables que intervienen en el proceso, pero no se tiene en cuenta en el estudio.	- Tiempo - Densidad de pulpa - Carga de bolas - Velocidad de operación.	- Minuto - g/cm ³ - % - rpm

Capítulo III

Metodología

3.1. Diseño Metodológico.

3.1.1. Tipo de Investigación.

La investigación es aplicada ya que se emplean los métodos y procedimientos de una investigación básica para solucionar un problema específico para ser aplicado a nivel operacional (Carrasco, 2010).

3.1.2. Nivel de Investigación.

Respecto el nivel de investigación se encuentra en una investigación explicativo con ello se pretende explicar que mediante los métodos empleados se pueden determinar el consumo de energía en un tiempo por unidad de masa que es un variable importante en el proceso de liberación de los minerales ya que en esta etapa existe un mayor consumo de energía respecto los otros puntos (Carrasco, 2010).

3.1.3. Diseño de la Investigación.

El trabajo a realizar tiene un diseño experimental ya que se realizarán pruebas de laboratorio con la finalidad de obtener el consumo de energía en un tiempo por unidad de masa con fines prácticos (Hernandez y otros, 2014).

3.1.4. Enfoque de la Investigación.

Es una investigación cuantitativa ya que tiene por finalidad calcular el consumo de energía en un tiempo por unidad de masa para ello si tiene que realizar pruebas experimentales de acuerdo el método estándar propuesto de los autores (Palella & Martins, 2012).

3.2. Población y Muestra.

3.2.1. Población de la Investigación.

La población a tener en consideración es un mineral proporcionado de una empresa que se pretender realizar los estudios para ello se nos proporcionaran 200 kilogramos de mineral.

3.2.2. Muestra de la Investigación.

Para determinar la muestra se realizarán una reducción por la chancado y su clasificación por la malla 10, el mineral obtenido menor a la malla 10 se realizará un muestreo por el método incremento obteniendo una muestra para las pruebas de 10 kilogramos con ello se realizan las pruebas experimentales para calcular el índice de trabajo del mineral.

3.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.

3.3.1. Técnicas a emplear.

En el estudio de acuerdo a su naturaleza se emplearán la técnica de observación, ya que se realizarán un trabajo experimental con la finalidad de determinar el índice de trabajo del mineral para ello se obtendrá la información mediante la observación (Palella & Martins, 2012).

3.3.2. Descripción de los Instrumentos

Los instrumentos a emplear en la recolección de la información se emplearán la ficha de cotejo ya que la información a obtener se necesita registrar en tablas donde se encuentren la información de ingreso y salida (Silvestre & Huamán, 2019).

3.4. Técnicas para el Procesamiento de la Información.

En el presente estudio se emplearán la estadística paramétrica con la finalidad de probar las hipótesis planteadas, para ello se emplearán el Excel, minitab, jamovi con ellos se realizarán promedio, cálculos, gráficos, tabla y el análisis de varianza. Por otra parte, para realizar el

procesamiento de la información se realiza el Word y para la distribución y publicación el pdf (Silvestre & Huamán, 2019).

Capítulo IV

Resultados

4.1. Análisis de resultados

4.1.1. Condiciones de trabajo.

Para realizar la parte experimental por el método Bond se prepara mineral pasante a la malla 10, aproximadamente de 700 cm^3 , con una densidad de mineral 2.93 g/cm^3 que se aproxima 2.05 kg para cada prueba, realizando 28 pruebas que es aproximadamente 57.428 kg de mineral para la prueba en sí, lo que se realizaron en un molino de $8'' \times 8''$ con una carga moledora de 10.97 kg , lo que se realiza una prueba de molienda cíclico de 100 vueltas, luego se descarga y se clasifica empleando la malla 65, el mineral mayor a ello se regresa al molino y el pasante a la malla que es el producto, para reponer el peso se agrega mineral fresco y se agrega al molino, luego se realiza otra vez una molienda en 100 vueltas, este proceso se realiza hasta que la carga circulante sea igual 2.5 es decir hasta la estandarización de la alimentación y descarga sea similares.

En las pruebas de Berry Bruce se realizaron por el método de comparación para ello se tiene un mineral conocido de óxido de silicio con un Work index de 13.57 kw-h/tc , con una carga de mineral de 1 kg por prueba para las 11 pruebas realizados se emplearon aproximadamente 11 kilos de mineral.

4.1.2. Resultado de las pruebas de work index.

Tabla 3

Work index método Bond

Código de Muestra	Alimento F80 (μm)	Producto P80 (μm)	Abertura Malla de corte 65m (μm)	GBP (g/rev)	Wi (Kw-h/tc)
1	2507	158	212	1.41	16.45
2	2507	157	212	1.52	15.36
3	2632	160	212	1.41	16.43
4	2593	154	212	1.32	16.94
5	2338	157	212	1.4	16.71
6	2639	156	212	1.25	17.82
7	2644	156	212	1.54	14.99
8	2665	157	212	1.49	15.51
9	2644	160	212	1.45	16.09
10	2630	153	212	1.33	16.77
11	2799	154	212	1.35	16.49
12	2590	159	212	1.57	15.03
13	2729	155	212	1.49	15.29
14	2627	161	212	1.49	15.76
15	2627	158	212	1.59	14.8
16	2846	158	212	1.51	15.19
17	2769	157	212	1.34	16.76
18	2806	161	212	1.67	14.21
19	2665	158	212	1.39	16.47
20	2847	157	212	1.23	17.9
21	2557	162	212	1.54	15.46
22	2872	158	212	1.28	17.43
23	2677	157	212	1.36	16.72
24	2654	160	212	1.52	15.48
25	2621	160	212	1.51	15.52
26	2679	157	212	1.33	16.99
27	2820	158	212	1.46	15.65
28	2747	155	212	1.51	15.14

En índice de trabajo por el método de Bond en la tabla 2 para las 28 corridas se tiene una alimentación de F(80) μm de 2669 μm , P(80) 158 μm , una malla de clasificación 65 con abertura de 212 μm con una liberación de 1.44 g/rev y un índice de trabajo promedio de 16.05 Kw-h/tc.

Tabla 4
Índice de trabajo método de comparación

N°	work index muestra	F(80)	P(80)	Work index muestra	F(80)	P(80)
	patrón Kw-h/tc	SiO ₂	SiO ₂	Problema Kw-h/tc	problema	problema
1	13.57	1216.76	170.98	16.43	1187.56	215.26
2	13.57	1216.76	170.98	16.38	1187.56	214.52
3	13.57	1216.76	170.98	16.53	1187.56	216.73
4	13.57	1216.76	170.98	15.81	1187.56	205.87
5	13.57	1216.76	170.98	15.87	1187.56	206.73
6	13.57	1216.76	170.98	15.91	1187.56	207.37
7	13.57	1216.76	170.98	16.43	1187.56	215.33
8	13.57	1216.76	170.98	15.73	1187.56	204.68
9	13.57	1216.76	170.98	15.62	1187.56	202.86
10	13.57	1216.76	170.98	16.50	1187.56	216.42
11	13.57	1216.76	170.98	16.12	1187.56	210.58

En la tabla 3 resumen de las 11 pruebas realizadas de work index de minerales de cobre por el método de comparación de Barry Bruce, con un promedio de índice de trabajo para la muestra problema de mineral de cobre de 16.12 Kw-h/tc con un P(80) de 210.54 μm .

4.1.3. Procesamiento de los datos de las pruebas de work index.

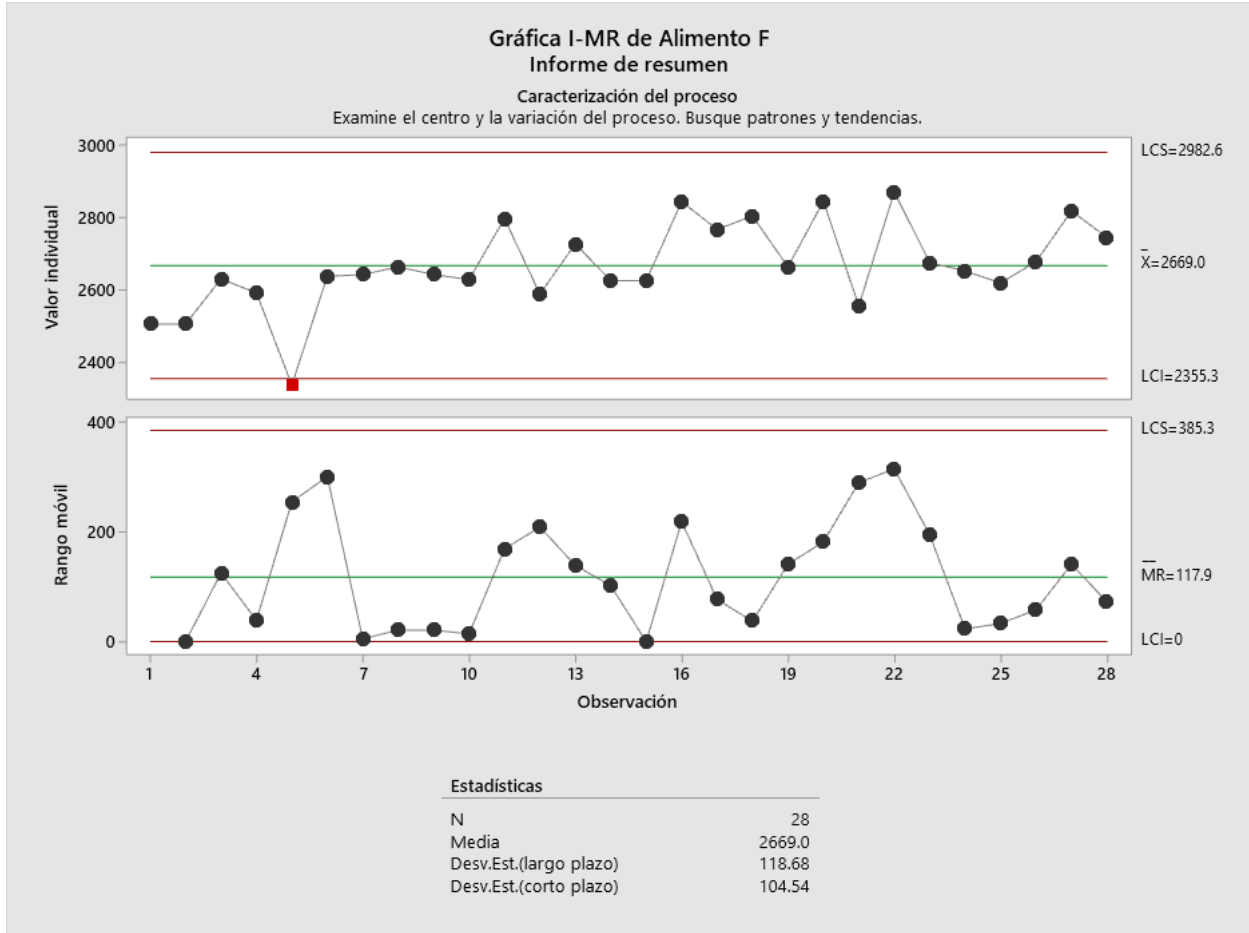


Figura 2: Control del análisis de mineral F(80) método Bond

En el control de la alimentación del 80 por ciento en la figura 3, se tiene un promedio de 2669 μm con un límite superior e inferior entre 2355.3 μm y 2982.6 μm , el 3.57% de los datos se encuentran fuera de los límites, mientras que el rango móvil el se tiene un promedio de 117.9 y inferior y superior entre 0 a 385.3, para los 28 datos con una desviación de estándar a largo plazo de 118.68 y corto plazo de 104.54.

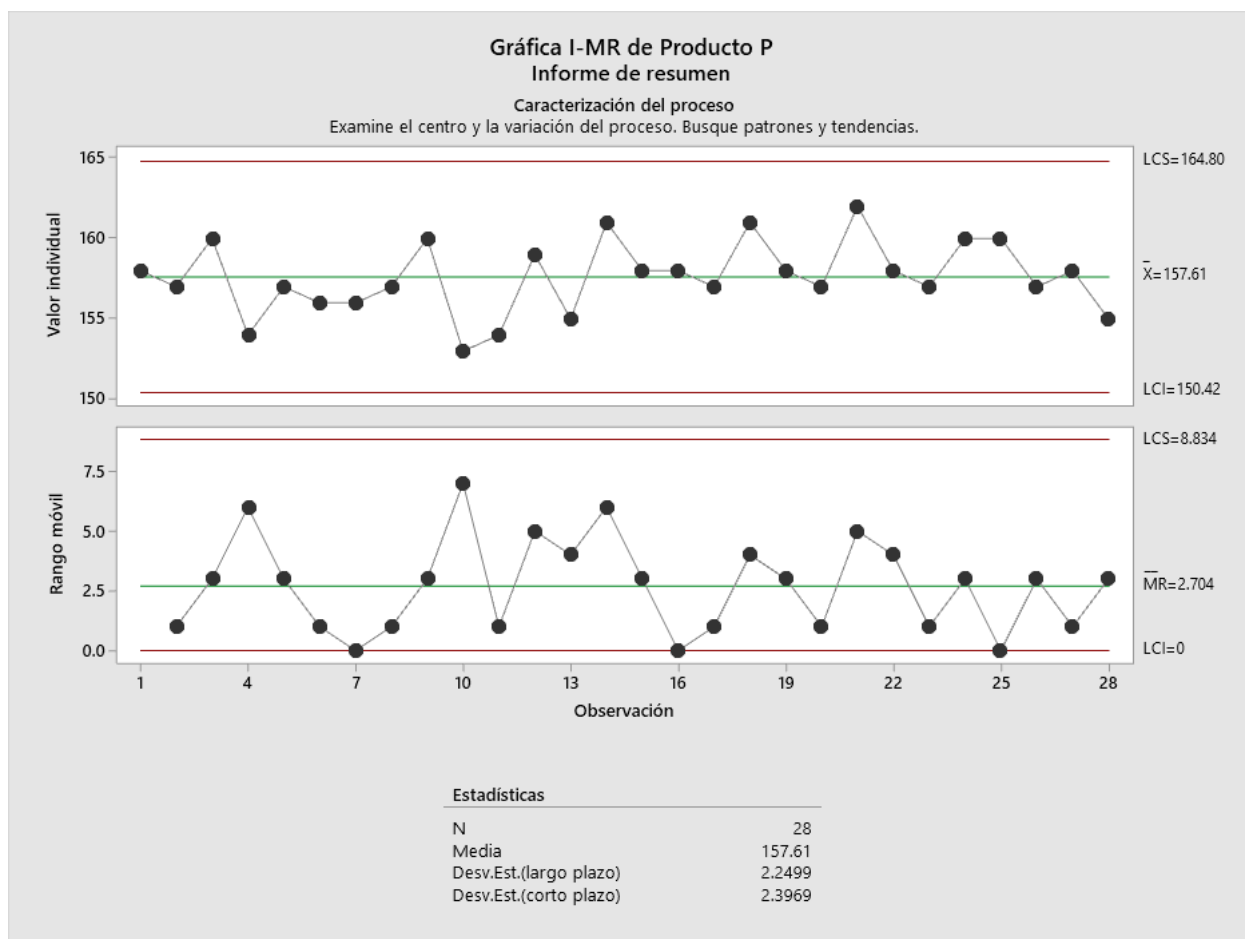


Figura 3: Producto de la molienda método Bond P(80)

El producto de la molienda referente al 80 por ciento para cada prueba se describe en la figura 4 en donde se describe que el promedio se encuentra $157.61\mu\text{m}$, con un límite entre $150.42\mu\text{m}$ a $164.80\mu\text{m}$, mientras que el rango móvil tiene un promedio de 2.704 con un rango de 0 a 8.834 para los 28 datos con desviación estándar a largo plazo de 2.2499 y a corto plaza 2.3969 .

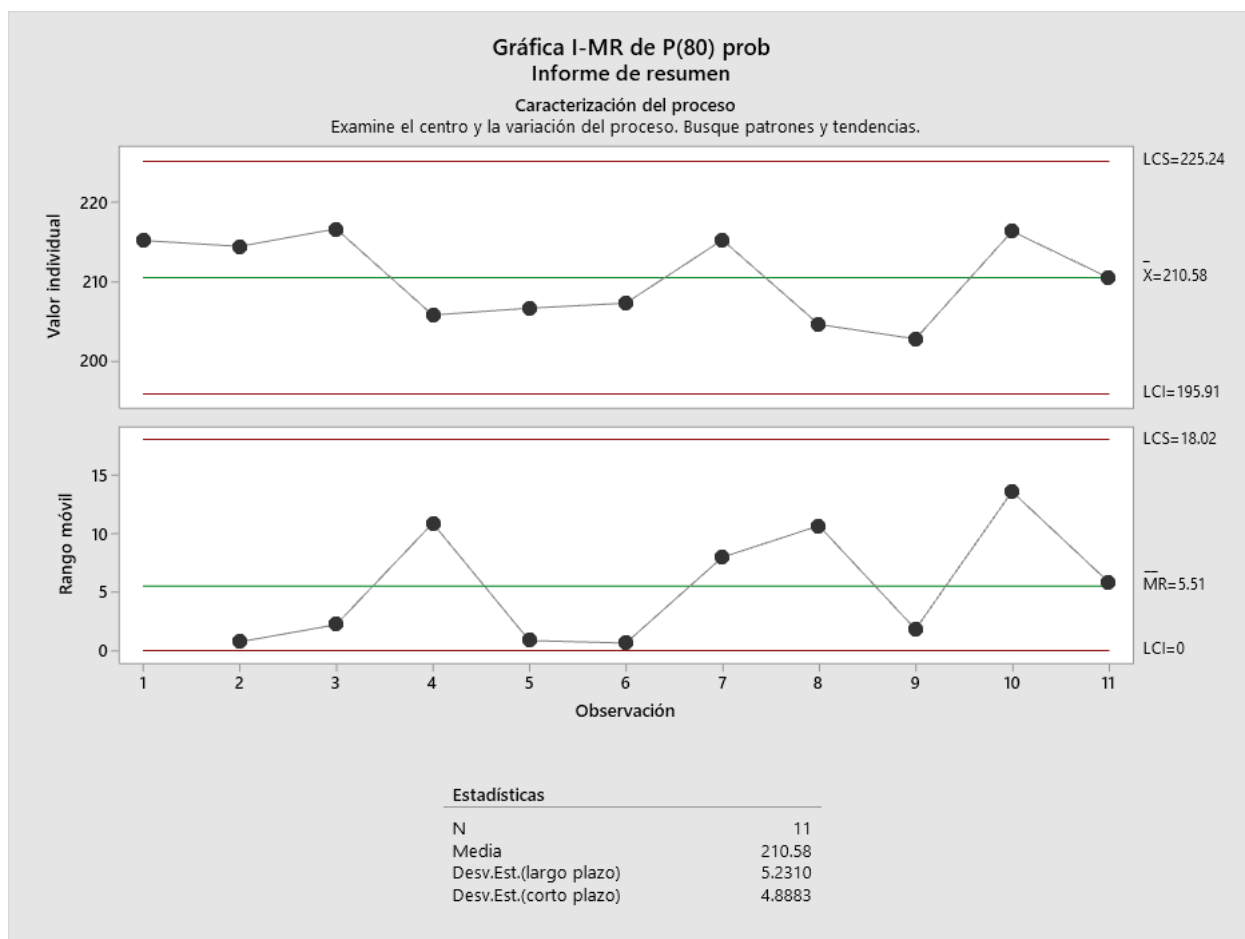


Figura 4: Producto de la molienda método Berry Bruce P(80)

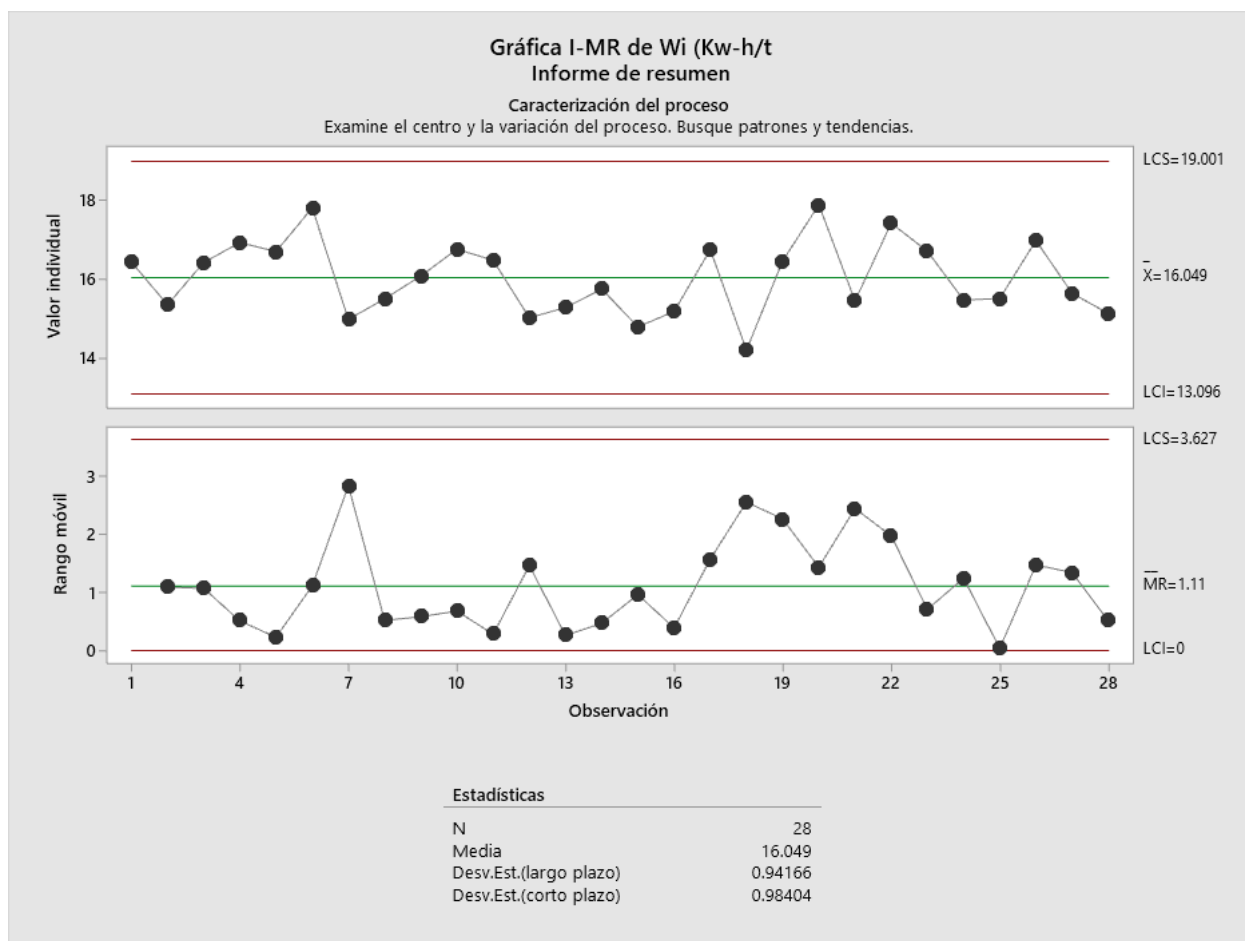
El 80 por ciento de las partículas en la molienda del mineral para el método de Berry Bruce, el valor de control individual tiene un promedio de 210.58 μm con límite superior y inferior entre 195.91 μm y 225.25 μm , mientras que los valores del rango móvil se encuentran en promedio de 5.51 y sus límites entre 0 a 18.02 para los 11 pruebas realizados, con una desviación estándar a largo plazo de 5.231 y a corto plazo de 4.8883. Los datos se encuentran dentro del parámetro del control predicho.

4.1.4. Procesamiento de los resultados de las pruebas de work index.

En las figuras 2 se realizan un control de las 28 pruebas, de índice de trabajo por el medo de bond y la liberación de mineral por gramo por revolución en la figura 3.

Figura 5

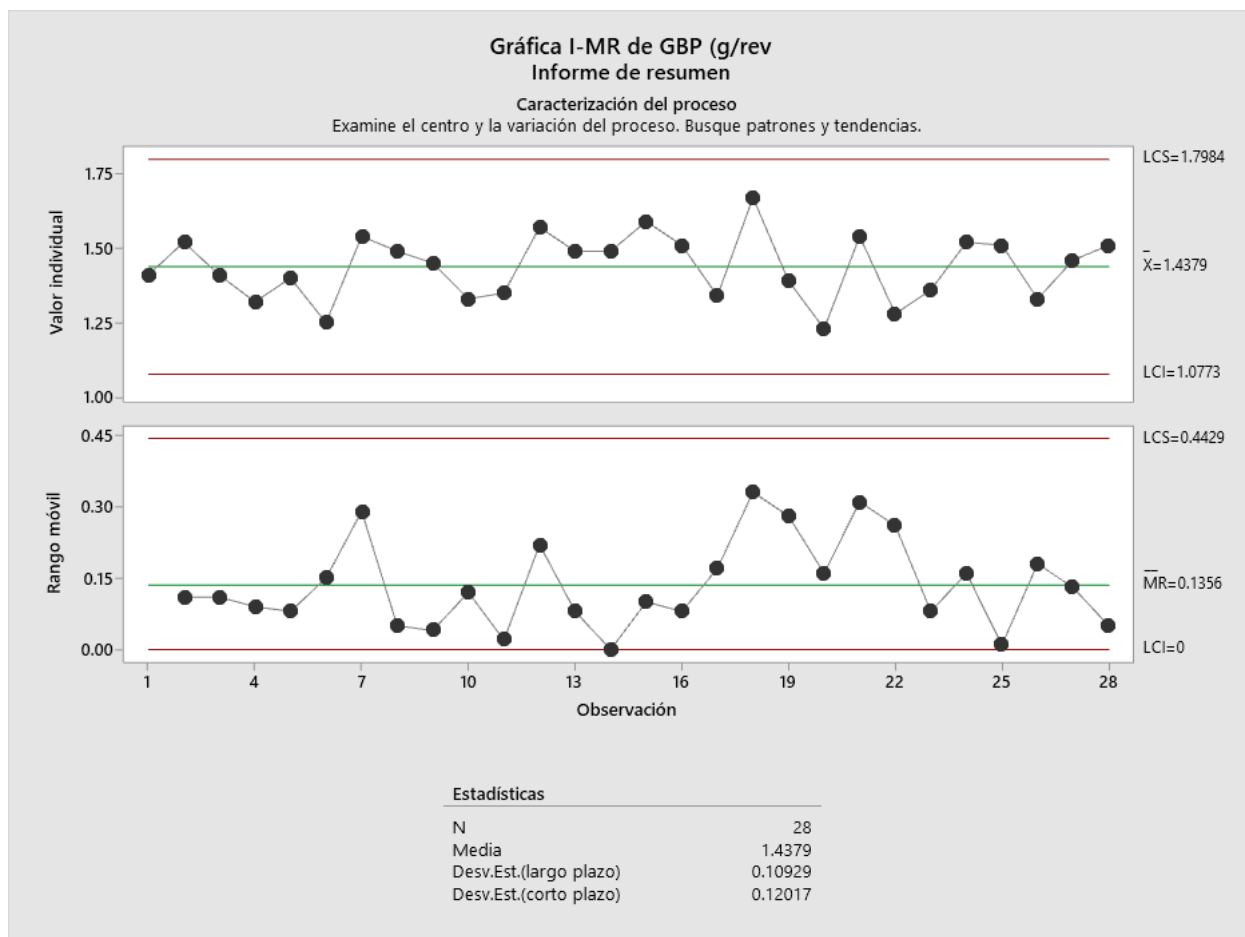
Paramento de control de work index método Bond.



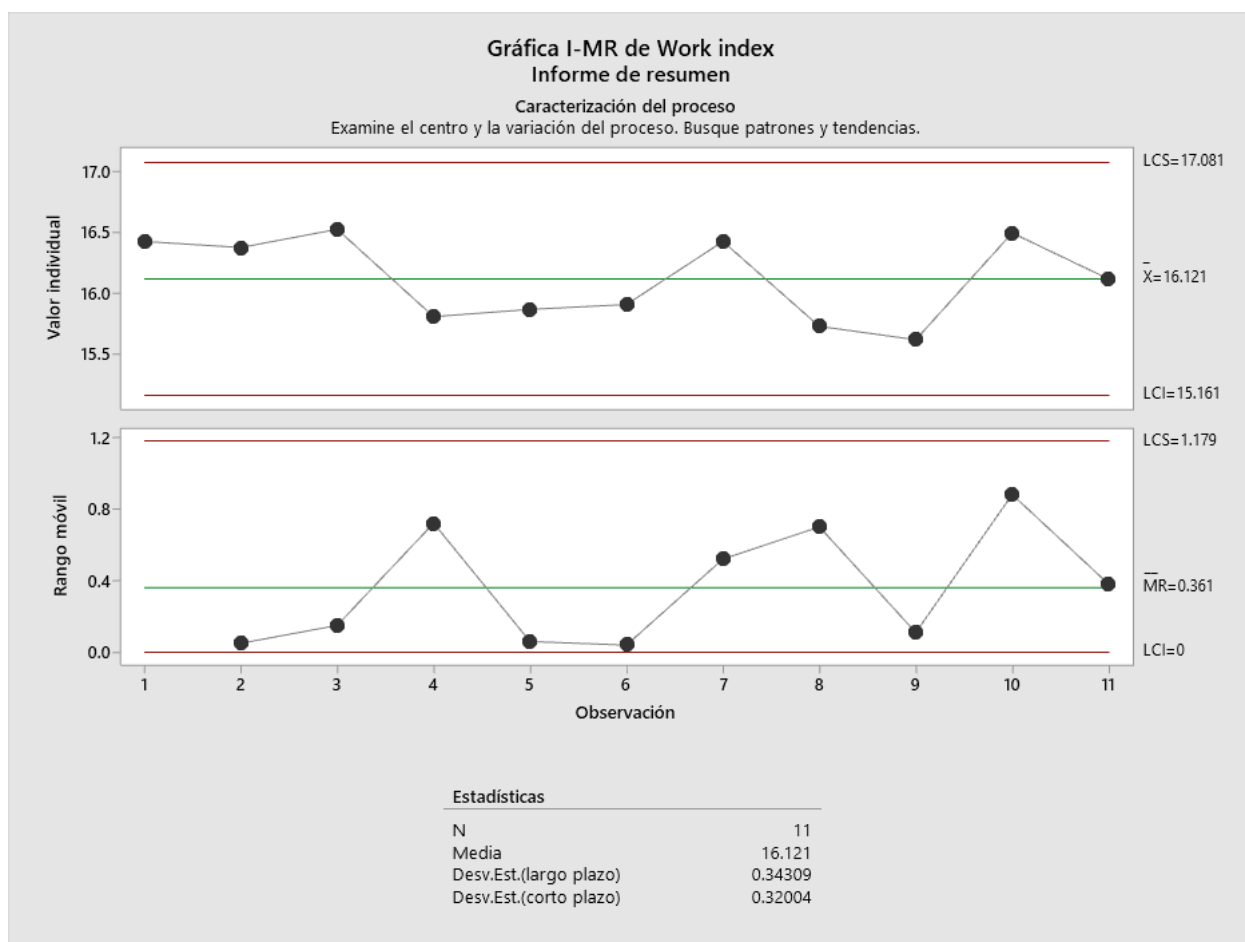
El índice de trabajo de minerales de cobre en la figura 2 los valores individuales tienen un límite superior de 10.01 Kw-h/tc, e límite inferior de 13.096 Kw-h/tc, con un promedio de 16.049 Kw-h/tc; con un rango móvil promedio de 1.11 y rango superior de 3.627, para 28 corridas con una desviación estándar a largo plazo de 0.94166 y a corto plazo de 0.98404. indica que todos los datos se encuentran dentro de parámetro de control. Es un mineral duro por su paramento al encontrarse entre 13.16 – 16.46 Kw-h/tc.

Figura 6

Paramento de control de liberación de en relación la revolución.



En la figura 3 la liberación de mineral tiene un promedio de 1.379 g/rev, límite superior de 1.7984 g/rev, y un límite inferior de 1.0773 g/rev., con un rango móvil en promedio de 0.4429 límite superior para los 28 resultados con una desviación estándar a largo plazo 0.10929 y corto plazo de 0.12017 en virtud a los dos graficas todos los datos se encuentran dentro de los parámetros de control.

Figura 7*Control de Índice de trabajo de método Berry Bruce*

Para las 11 pruebas realizados en la figura 4 el índice de trabajo por el método de Berry Bruce, se tiene un parámetro de control superior de 17.081 Kw-h/tc, control inferior de 15.161 Kw-h/tc, con un promedio de 16.121 Kw-h/tc para los valores individuales, mientras que para el rango móvil se tiene un límite superior de 1.179 y un promedio de 0.361. Para ello se tiene una desviación estándar a largo plazo de 0.34309 y a corto plazo de 0.32004 encontrándose los 11 datos dentro de los parámetros de control. El mineral de cobre tratado es duro por encontrarse entre 13.16 – 16.46 Kw-h/tc.

4.1.5. Proyecciones del índice de trabajo

Predicciones de índice de trabajo en relación del 80 por ciento de partícula del producto de la molienda

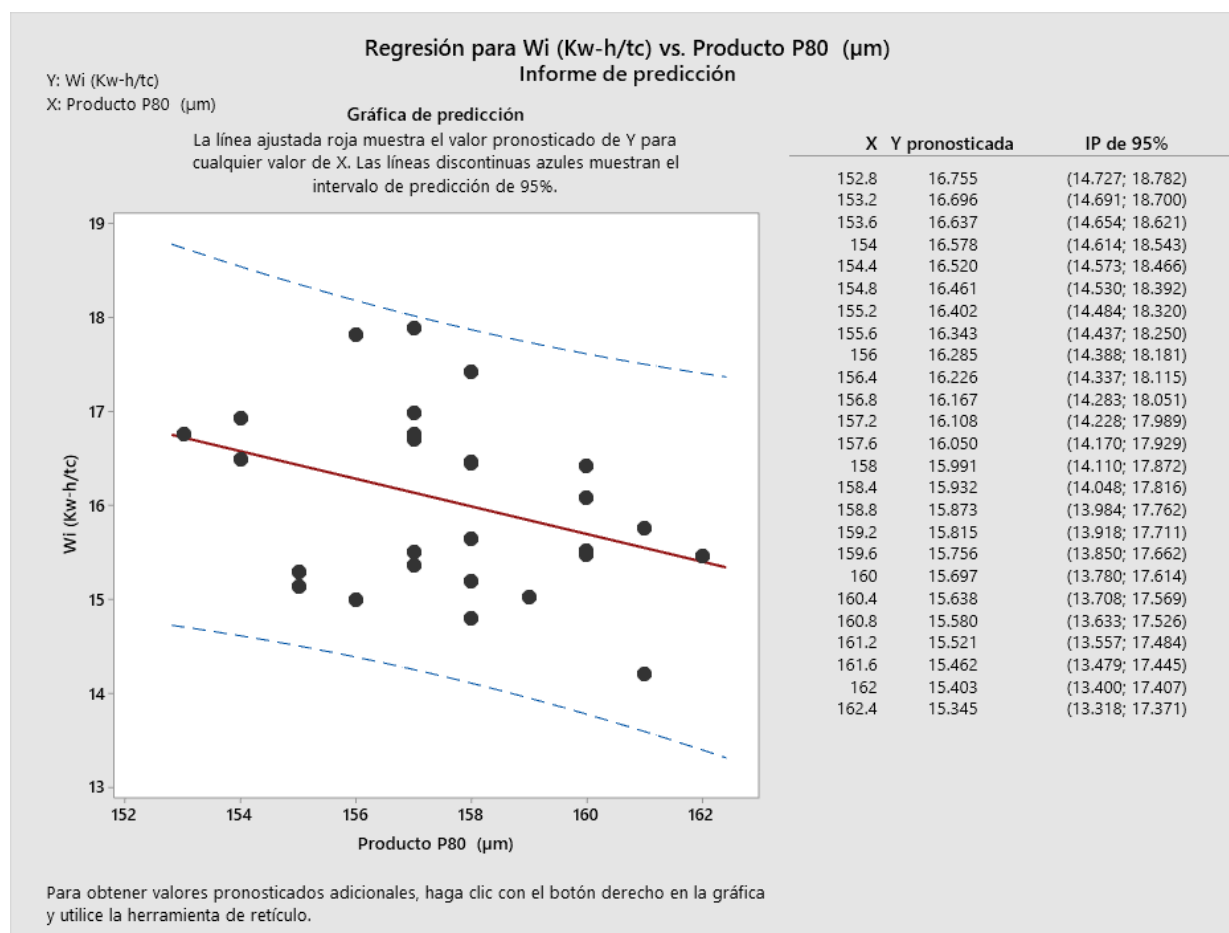


Figura 8: Predicción del índice de trabajo por regresión en relación de P(80) por el método de Bond.

El índice de trabajo por el método de Bond para las 28 pruebas en relación a la liberación del mineral en la figura 8, tiene una predicción que una mayor liberación el índice de trabajo tiene una reducción en comparación cuando la liberación es más gruesa. Encontrándose en una variación inferior 13.218 kw-h/tc a 14.727 kw_h/tc y el superior 17.371 kw_h/tc a 18.783 kw-h/tc con un promedio que varía entre 15.345 kw-h/tc a 16.755 kw-h/tc.

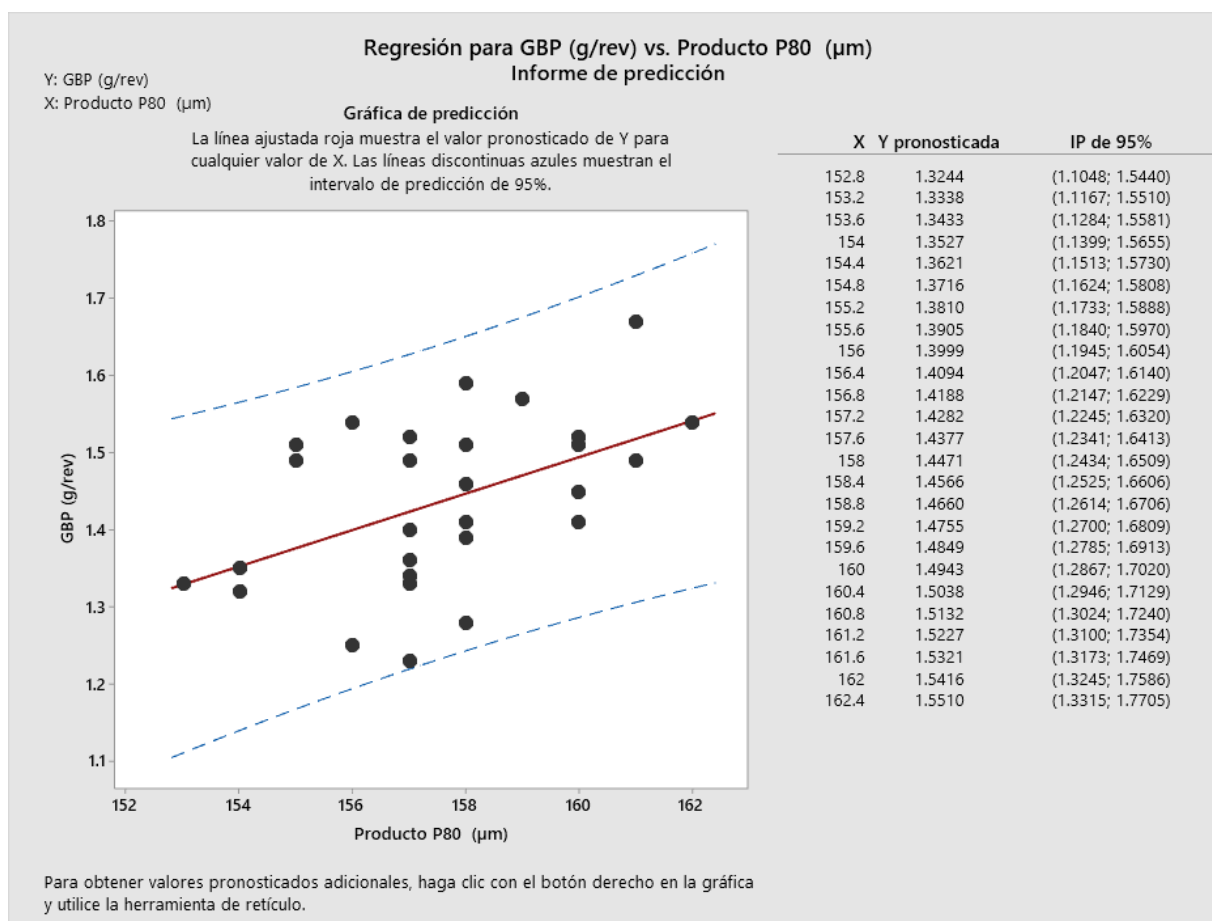


Figura 9: Predicción de la liberación del mineral en relación P(80)

La proyección por regresión, la liberación del mineral en relación a la revolución del molino en la figura 9 para una confiabilidad del 95% tiende a incrementarse a medida que el tamaño del mineral obtenido sea más grande, la relación gramo por revolución tiene un incremento, una liberación promedio de 1.5510 g/rev a 1.3244 g/rev frente al mineral obtenido de la molienda el P(80) entre 152.8 μm a 162.4 μm . El rango de la liberación se centra en el límite inferior entre 1.1045 g/rev a 1.3315 g/rev y el límite superior entre 1.544 g/rev a 1.7705 g/rev.

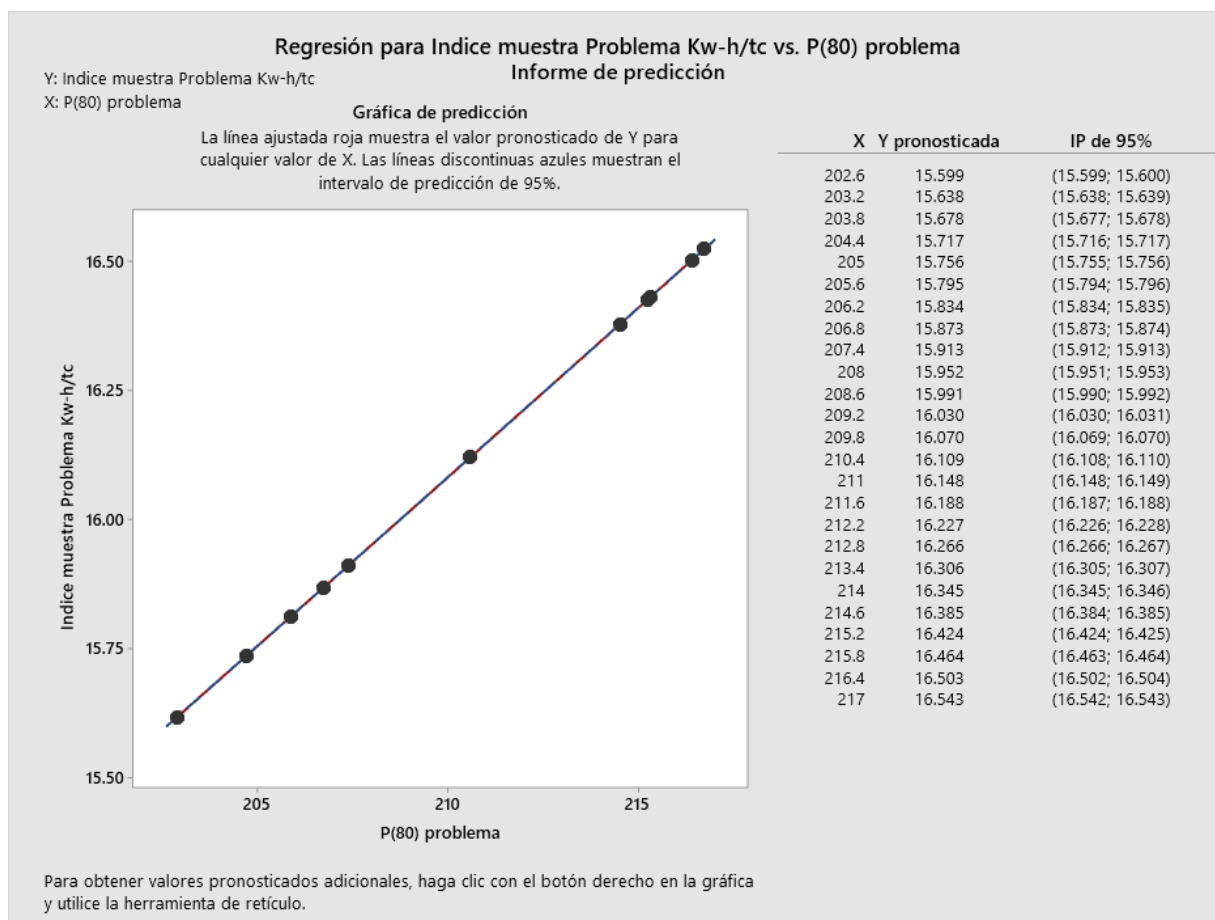


Figura 10 Predicción del índice de trabajo por el método Berry Bruce en relación a P(80)

La predicción por regresión lineal del índice de trabajo en la figura 10, se incrementa en relación al tamaño de mineral obtenido en la molienda en relación del P(80) que se encuentra entre 202.6 um a 217 um con una predicción del índice de trabajo entre 15.599kw-h/tc a16.543 kw-h/tc , para confiabilidad del 95% un índice de trabajo límite inferior que se encuentra entre 15.599 a 16.542 kw_h/tc y superior entre 15.600 kw-h/tc a 15.543 kw-h/tc.

4.2. Contrastación de hipótesis.

2.5.1. Contrastación de hipótesis general.

Ha: El estudio de las condiciones de los métodos de Bond y Berry Bruce en la molienda de minerales de cobre influye significativa en la determinación del índice de trabajo.

Ho: El estudio de las condiciones de los métodos de Bond y Berry Bruce en la molienda de minerales de cobre **no** influye significativa en la determinación del índice de trabajo.

Tabla 5

Análisis de varianza del índice de trabajo método Bond

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Alimento F80 (μm)	0.249	1	0.24881	46.4	<.001
Producto P80 (μm)	0.485	1	0.48468	90.4	<.001
GBP (g/rev)	20.863	1	20.86327	3891.1	<.001
Residuos	0.129	24	0.00536		

En la tabla 5, para el método de Bond la alimentación, producto y la liberación por revoluciones influyen en el work index ya que los valores p calculado son menor a 0.001 menor al 0.05 para una confiabilidad del 95% estadísticamente. La liberación en gramo por revolución tiene mayor influencia, seguida del producto P (80) y alimentación F (80).

Tabla 6

Análisis de varianza método Berry Bruce

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
P (80) problema	1.18	1	1.18	94990	<.001
Residuos	1.12e-4	9	1.24e-5		

El método Berry Bruce en la tabla 6 el producto de la molienda influye en el índice de trabajo de mineral de cobre, ya que el valor de p calculada es inferior a 0.001 para una confiabilidad del 95% estadísticamente.

2.5.2. Contratación de hipótesis específicos.

Ha: Con una molienda de minerales por el método de Bond permitirá determinar la influye significativa en el índice de trabajo.

Ho: Con una molienda de minerales por el método de Bond no permitirá determinar la influye significativa en el índice de trabajo.

Tabla 7
Análisis de varianza para índice de trabajo por método de Bond

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
Producto P80 (μm)	0.498	1	0.4982	33.0	<.001
GBP (g/rev)	20.615	1	20.6153	1365.3	<.001
Residuos	0.377	25	0.0151		

El índice de trabajo en referencia a la tabla 8 el work index tiene una influencia significativo por la liberación gramo liberado por revolución y el P(80) ya que p hallado es de menor a 0.001 en comparación a 0.05 para una confiabilidad del 95% estadísticamente para minerales de cobre. Para 28 corridas realizadas experimentalmente.

Ha: Con una molienda de minerales por el método de comparación de Berry & Bruce permitirá determinar la influye significativa del índice de trabajo.

Ho: Con una molienda de minerales por el método de comparación de Berry & Bruce no permitirá determinar la influye significativa del índice de trabajo.

Tabla 8

Análisis de varianza de índice de trabajo método Berry y Brice

	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p
P(80) problema	1.18	1	1.18	94990	<.001
Residuos	1.12e-4	9	1.24e-5		

En relación a la tabla 9 en índice de trabajo por el método de Berry bruce tiene influencia significativa la liberación del mineral ya que para el P(80) el p calculado es menor 0.001 en relación a lo establecido de 0.05 para una confiabilidad del 95% estadísticamente. Para 11 corridas realizadas experimentalmente.

Capítulo V

Discusión

5.1. Discusión de resultados

En el índice de trabajo para minerales de cobre por el método de Bond para las 28 pruebas se obtuvo en promedio de 16.049 kw-h/tc con una desviación estándar de largo y corto plazo de 0.94166 y 0.98404, siendo un mineral duro, una liberación de 1.379 g/rev., mientras que por el método de Berry Bruce se obtuvo 16.161 kw-h/tc con una desviación estándar a largo y corto plazo de 0.34309 y 0.32004. En el índice de trabajo por el método de Bond el tamaño de alimentación F(80), producto P(80) y grado de liberación de mineral g/rev tiene influencia, y en el índice de trabajo por el método Berry Bruce el producto de tamaño de P(80) influye en el índice de trabajo.

Por otra parte, que la relación entre el índice de trabajo, el tamaño de molienda y las propiedades mineralógicas es compleja y depende de su enfoque metodológico como del tipo de mineral, García et al. (2021) establece un marco útil para evaluar el índice de molienda (gpr) su parámetro como alternativo, por otra parte, es necesario realizar estudios comparativos con metodologías estandarizadas que permitan evaluar la aplicabilidad de diferentes índices en condiciones operativas similares. Además, la exploración de nuevos modelos, como la propuesta por Vedat (2022), podría aportar mayor predictibilidad y eficiencia en los procesos.

Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos del estudio realizados experimentalmente se tiene las siguientes conclusiones:

La determinación del índice de trabajo en minerales de cobre mediante los métodos de Bond y Berry Bruce evidencia una influencia significativa de las variables operativas como el tamaño de alimentación (F80), producto (P80) y el grado de liberación (g/rev). Ambos métodos presentan resultados consistentes en términos de eficiencia energética, con un índice de trabajo promedio similar (16.049 kw-h/tc para Bond y 16.161 kw-h/tc para Berry Bruce), demostrando su aplicabilidad en la caracterización de minerales duros.

El análisis de varianza del método de Bond demuestra que la liberación en gramos por revolución (g/rev) es el factor con mayor influencia en el índice de trabajo ($p < 0.001$), seguido por el tamaño de producto (P80) y la alimentación. (F80). Este resultado valida el uso del método de Bond como una herramienta eficaz para evaluar la molienda de minerales de cobre que predetermina calcular el índice de dureza, en base a la información proporcionando consistentes de las 28 pruebas reales.

El método de Berry Bruce, a través de su énfasis en el tamaño de producto (P80), ofrece una aproximación simplificada y eficiente para la determinación del índice de trabajo en minerales de cobre. Con un coeficiente de significancia estadística de $p < 0.001$ y desviaciones estándar más bajas en comparación con el método de Bond, este método se presenta como una alternativa confiable en procesos de molienda con menos variables críticas.

6.2. Recomendaciones

Las recomendaciones que se podría detallan en base a los resultados son:

Implementar un análisis previo de las características del mineral, como dureza y composición, para seleccionar el método más adecuado entre Bond y Berry Bruce. Este enfoque personalizado permitirá optimizar el uso de recursos energéticos y mejorar la precisión en la determinación del índice de trabajo, lo cual impactará positivamente en la planificación operativa y la eficiencia de los procesos.

Desarrollar protocolos estandarizados que integran ambos métodos en estudios comparativos bajo las mismas condiciones operativas. Esto facilitará la validación cruzada de resultados y la generación de datos más robustos, permitiendo a las empresas mineras mejorar la predictibilidad de los costos energéticos y la calidad del producto.

Incorporar y probar modelos alternativos como el propuesto por Vedat (2022) en investigaciones futuras para evaluar su aplicabilidad en minerales metálicos y no metálicos. Estos modelos podrían ofrecer mayor precisión y eficiencia al reducir las variables críticas y adaptarse a nuevas tecnologías de molienda, promoviendo la sostenibilidad.

Capítulo VII

Referencias bibliográficas

7.1. Referencias bibliográficas

Armas, H., & Poma, J. (2013). Evaluación del consumo de energía eléctrica en la operación de conminución de la planta concentradora de huari - UNCP. *Ingeniero metalurgista y de materiales*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.

<http://hdl.handle.net/20.500.12894/577>

Aydoğan, N., Ergün, L., & Benzer, H. (2006). Aplicaciones de rodillos de molienda de alta presión (HPGR) en la industria del cemento. *Ingeniería de minerales*, 130-139.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.08.011>

Carrasco, S. (2010). *Metodología de la investigación científica*. Lima: Editorial San Marcos.

Castro, A. (1998). Recuperación de metales preciosos, oro y plata, de los relaves de flotación por el método de segregación. *Ingeniero Químico*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/7858>

Chillce, L., & Rodriguez, L. (2019). Estudio de los parámetros operativos de moliendabilidad de un mineral polimetálico (Pb, Ag y Zn) de la zona de Huancachi – Lima. *Ingeniero metalurgista y de materiales*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> Repositorio Institucional - UNCP

Cori, C., & Castro, D. (2014). Control de parámetros extractivos, para la optimización en la recuperación de minerales auríferos gruesos y argénticos de la empresa minera ECOVITACA LTDA. *Ingeniero Químico*. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa. chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/3909/IQcachcv049.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Cristobal, W., & Huatuco, J. (2014). Determinación del work index según la teoría de E. Bond mediante pruebas de moliendabilidad sulfuros para el control de la etapa de molienda a nivel de laboratorio en la Facultad de Ingeniería Química U.N.C.P. *Ingeniero Químico*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3701/Cristobal%20Lara-Huatuco%20Cuestas.pdf?sequence=1
- Dávila, G., Gómez, M., & Delgado, E. (2022). Análisis de la caracterización mineralógica de los pórfidos de cobre como soporte a los procesos de flotación. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 25(50), 433-444. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24259>
- García, G., Oliva, J., Guasch, E., Anticoi, H., Coello, A., & Menéndez, J. (2021). Variability Study of Bond Work Index and Grindability Index on Various Critical Metal Ores. *MDPI metals*, 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/met11060970>
- Hernandez, R., Fernandez, C., & Batista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. CD Mexico: MGrow Hill Educacion.
- Huarachi-Olivera, R., Dueñas-Gonza, Á., Yapo, U., Almanza, M., Manuel, D., Lazarte-Rivera, A., & Esparza, M. (2017). Biolixiviación de mineral cuarzo por acidithiobacillus ferrooxidans en reactor de columna por gravedad. *Revista de Metalurgia*, 53(2), 096. <https://doi.org/https://doi.org/10.3989/revmetalm.096>
- Jankovic, A., Valery, W., & Davis, E. (2004). Optimización de molienda de cemento. *Ingeniería de minerales*, 1075-1081. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.031>

- Kenji, E. (2023). Análisis petromineográfico en minerales de óxidos de cobre para una eficiencia en la hidrometalurgia. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9427-9438. https://doi.org/https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5148
- Lamaru, A. (2012). Determinación del índice de Bond de las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur en la Empresa Ernesto Che Guevara. *Ingeniero Metalúrgico*. Instituto Superior Minero Metalurgico de la Mao, Mao. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1912/Alisa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Marín, G., Martínez, J., Macías, G., Serrano, E., & Gómez, D. (2020). Investigación experimental en el consumo de energía específica y reducción de tamaño en la molienda de bolas usando diferentes tipos de levantador. *Ingeniería investigación y tecnología*, 1-8. <https://doi.org/https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.020>
- Morales, E. (2016). Extracción de plata y oro del relave sulfurado de la Minera Santa Fe por lixiviación con adición de peróxido de hidrógeno y acetato de plomo. *Ingeniero Metalúrgico*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/5518/Morales_le.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Osorio, A., Marín, J., & Restrepo, G. (2013). Diseño y evaluación energética de dos circuitos de molienda y clasificación para un clinker de cemento a escala piloto. *Información Tecnológica*, 24(2), 99-108. <https://doi.org/https://doi.org/10.4067/s0718-07642013000200011>

- Osorio, A., Marín, J., & Restrepo, G. (2015). Comportamiento reológico de pulpas de cuarzo a diferentes concentraciones del sólido. *Información Tecnológica*, 21(1), 135-142.
<https://doi.org/https://doi.org/10.4067/s0718-07642015000100015>
- Osorio, Y. (2011). Determinación del índice de bond a la trituración del mineral saprolítico del proyecto de Ferroníquel Yamanigüey SA. *Ingeniero Metalurgico*. Ministerio de educación, Moa. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1859/Gueje.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Palella, S., & Martins, F. (2012). *Metodología de la investigación cuantitativa*. Caracas: FIDUPEL.
- Palma, H. J., Legrá, A. L., & Coello-Velázquez, A. L. (2020). Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el proceso de molienda de los minerales lateríticos. *Sinergia Académica*, 3(2), 22-31. <https://doi.org/https://doi.org/10.51736/sa.v3>
- Quiroz, I. (1986). *Operaciones unitarias en procesamiento de minerales*. Curso.
- Reyes-Pérez, M., Escobar, R., Juárez, J., Palacios, E., Labra, M., Domínguez, I., & Ruiz, A. (2022). Caracterización de la pulpa de molienda de mineral de arsenopirita. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 5(5), 129-134.
<https://doi.org/https://doi.org/10.29057/aactm.v5i5.9122>
- Rojas, J. (2018). Evaluación de índice de trabajo, (work index); en un yacimiento tipo pórfido de cobre y su implicancia geometalúrgica. *Ingeniero Geologo*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstr

eam/handle/20.500.12404/13068/ROJAS_JORGE_TRABAJO_YACIMIENTO_COBRE
_GEOMETALURGICA.pdf?sequence=1

Selpulvera, J., & Gutierrez, L. (1986). *Dimensionamiento y optimización de plantas*

concentradora mediante tecnicas de modelación matematica. Santiago: CIMM.

Silvestre, I., & Huamán, C. (2019). *Pasos para elaborar la investigación y la redacción de la*

tesis universitaria. Lima: San Marcos.

Vedat, D. (2022). A new model between the Bond and Hardgrove grindability based on

volumetric powder filling by using limestones. *Elsevier*, 1-9.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107444>

ANEXOS

Anexo 1 localización del CIyDTM



Anexo 2 Matriz de consistencia.

	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Indicador	Metodología
Generales	¿Como el estudio de molienda de minerales de cobre en molino influye en la determinación del índice de trabajo?	Evaluar la molienda de minerales de cobre en molino para determinar el índice de trabajo del mineral.	Con el estudio de molienda de minerales de cobre en molino influye significativa en la determinación del índice de trabajo.	<u>Independiente</u> • Molienda de molienda	g/rev. P80 F80	<u>Tipo de investigación:</u> aplicada
				<u>Dependiente.</u> • Índice de trabajo	Kw-h/tc	<u>Nivel de Investigación:</u> explicativo
Específico	¿Cómo la molienda de minerales de cobre en molino por el método de bond influye en el índice de trabajo?	Evaluar la molienda de minerales de cobre en molino por el método de bond para hallar el índice de trabajo.	Con una molienda de minerales en molino por el método de Bond permitirá determinar la influye significativa en el índice de trabajo.	<u>Independiente</u> - Método de bond	g/rev. P80 F80	<u>Diseño de Investigación:</u> experimental
				<u>Dependiente.</u> - Word index	Kw-h/tc	<u>Enfoque de Investigación:</u> cuantitativa
				<u>Independiente</u> - Método Berry & Bruce	P80 F80	<u>Población</u> <u>Muestra:</u> 200 kg - 10 kg (-10m)
				<u>Dependiente.</u> - Word index	Kw-h/tc	<u>Técnica</u> <u>Recolección</u> <u>Datos:</u> observación
	-	-	-	<u>Independiente</u> -		<u>Técnica</u> <u>Procesamiento</u> <u>Información:</u> Estadístico paramétrica
				<u>Dependiente.</u> -		

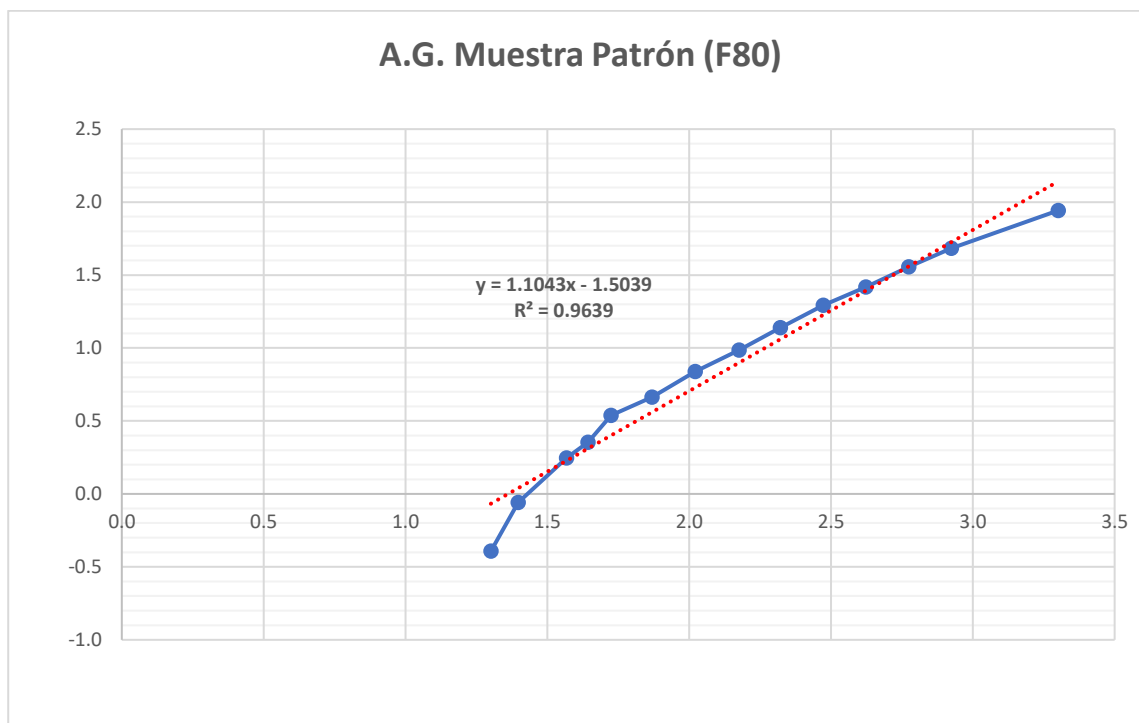
Anexo 3 Instrumentos para la toma de datos

	Malla	Alimento	Producto	80 % Pass	
Tyler	Abertura (μ)	% Ac. (-)	% Ac. (-)	F80	P80
6	3350				
8	2360				
10	1700				
14	1180				
20	850				
28	600				
35	425				
48	300				
65	212				
100	150				
150	106				
200	75				
270	53				
325	44				
400	38				

Anexo 4 análisis de malla alimentación

Malla	Abertura (mm)	Peso (gr)	f(x) %	Retenido G(x)	Pasante F(x)	Log (x)	Log F(x)
10	2000	124.20	12.42	12.42	87.58	3.301	1.942
20	841	394.34	39.43	51.85	48.15	2.925	1.683
30	595	121.73	12.17	64.03	35.97	2.775	1.556
40	420	97.52	9.75	73.78	26.22	2.623	1.419
50	297	66.37	6.64	80.42	19.58	2.473	1.292
70	210	57.88	5.79	86.20	13.80	2.322	1.140
100	150	40.97	4.10	90.30	9.70	2.176	0.987
150	105	28.02	2.80	93.10	6.90	2.021	0.839
200	74	22.99	2.30	95.40	4.60	1.869	0.662
270	53	11.41	1.14	96.54	3.46	1.724	0.539
325	44	11.94	1.19	97.74	2.26	1.643	0.354
400	37	4.94	0.49	98.23	1.77	1.568	0.247
500	25	8.96	0.90	99.13	0.87	1.398	-0.060
635	20	4.67	0.47	99.60	0.40	1.301	-0.393
-635		4.05	0.40	100.00	0.00		
		1000.00	100.00				

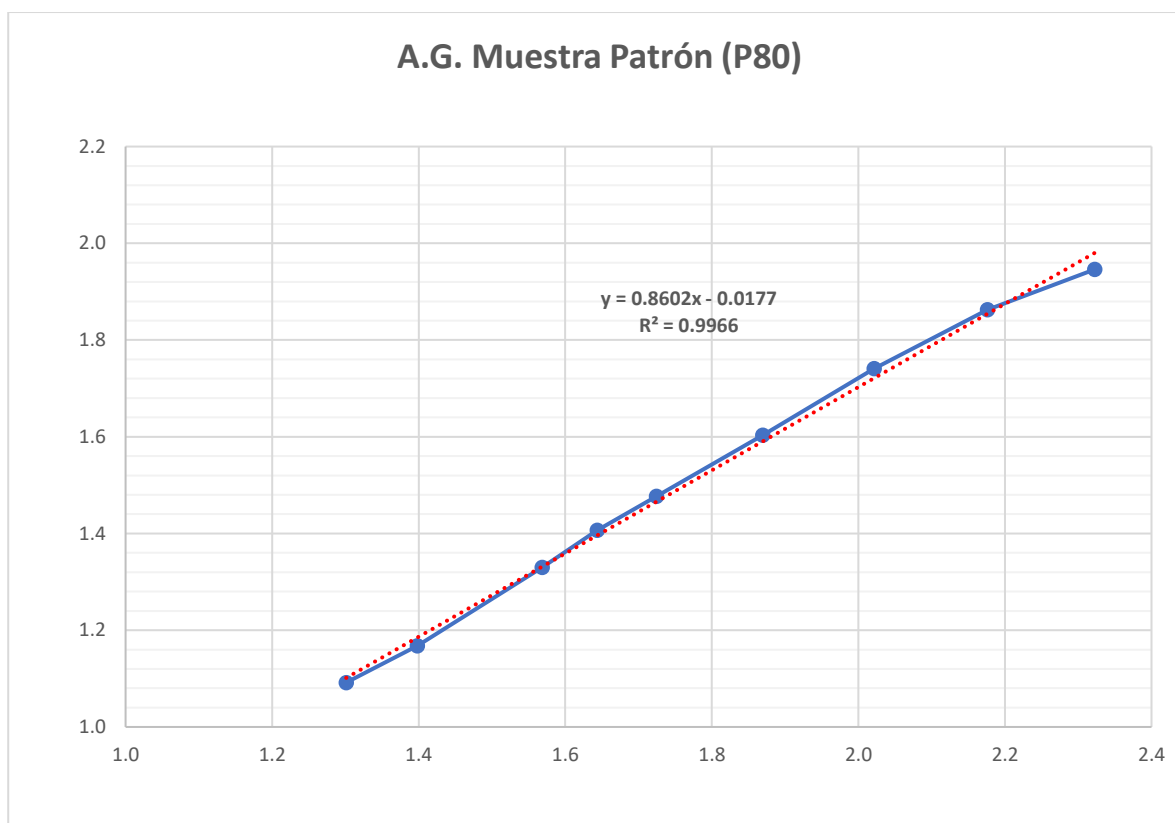
Anexo 5 Curva de distribución alimentación



Anexo 6 Análisis de malla de producto

Malla	Abertura (mm)	Peso (gr)	f(x) %	Retenido G(x)	Pasante F(x)	Log (x)	Log F(x)
10	2000						
20	841						
30	595						
40	420						
50	297						
70	210	117.30	11.73	11.73	88.27	2.322	1.946
100	150	154.51	15.45	27.18	72.82	2.176	1.862
150	105	177.80	17.78	44.96	55.04	2.021	1.741
200	74	149.51	14.95	59.91	40.09	1.869	1.603
270	53	101.39	10.14	70.05	29.95	1.724	1.476
325	44	44.62	4.46	74.51	25.49	1.643	1.406
400	37	41.03	4.10	78.62	21.38	1.568	1.330
500	25	66.69	6.67	85.29	14.71	1.398	1.168
635	20	23.61	2.36	87.65	12.35	1.301	1.092
-635		123.53	12.35	100.00	0.00		
		1000.00	100.00				

Anexo 7 Curva de distribución de producto



CICLO	#	ALIMENTACIÓN		PRODUCTO		NETO	gr/rev.
	REV.	TOTAL	+65	-65	+ 65	-65	
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
PROMEDIO DE LOS ÚLTIMOS DOS CICLOS							

Anexo 8 Índice de trabajo por el método de Berry Bruce

N°	Índice muestra patrón Kw-h/tc	F(80) SiO ₂	P(80) SiO ₂	Índice muestra Problema Kw-h/tc	F(80) problema	P(80) problema
1	13.57	1216.76	170.98	16.428	1187.56	215.26
2	13.57	1216.76	170.98	16.379	1187.56	214.52
3	13.57	1216.76	170.98	16.525	1187.56	216.73
4	13.57	1216.76	170.98	15.812	1187.56	205.87
5	13.57	1216.76	170.98	15.868	1187.56	206.73
6	13.57	1216.76	170.98	15.910	1187.56	207.37
7	13.57	1216.76	170.98	16.433	1187.56	215.33
8	13.57	1216.76	170.98	15.735	1187.56	204.68
9	13.57	1216.76	170.98	15.617	1187.56	202.86
10	13.57	1216.76	170.98	16.505	1187.56	216.42
11	13.57	1216.76	170.98	16.121	1187.56	210.58

Anexo 9 Índice de trabajo método Bond

N°	Alimento F80 (µm)	Producto P80 (µm)	Malla de corte 65m (µm)	GBP (g/rev)	Wi (Kw-h/tc)
1	2507	158	212	1.41	16.45
2	2507	157	212	1.52	15.36
3	2632	160	212	1.41	16.43
4	2593	154	212	1.32	16.94
5	2338	157	212	1.4	16.71
6	2639	156	212	1.25	17.82
7	2644	156	212	1.54	14.99
8	2665	157	212	1.49	15.51
9	2644	160	212	1.45	16.09
10	2630	153	212	1.33	16.77
11	2799	154	212	1.35	16.49
12	2590	159	212	1.57	15.03
13	2729	155	212	1.49	15.29
14	2627	161	212	1.49	15.76
15	2627	158	212	1.59	14.8
16	2846	158	212	1.51	15.19
17	2769	157	212	1.34	16.76
18	2806	161	212	1.67	14.21
19	2665	158	212	1.39	16.47
20	2847	157	212	1.23	17.9
21	2557	162	212	1.54	15.46
22	2872	158	212	1.28	17.43
23	2677	157	212	1.36	16.72
24	2654	160	212	1.52	15.48
25	2621	160	212	1.51	15.52
26	2679	157	212	1.33	16.99
27	2820	158	212	1.46	15.65
28	2747	155	212	1.51	15.14