

**MODELAMIENTO DE UN PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DE EQUIPOS DE  
TRITURACIÓN A TRAVÉS DE SOFTWARE MATEMÁTICO**

**LUIS JOSÉ DELÚQUEZ BARÓN**

**JOSÉ FRANCISCO DÍAZ DELÚQUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA**

**BUCARAMANGA**

**2018**

**MODELAMIENTO DE UN PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DE EQUIPOS DE  
TRITURACIÓN A TRAVÉS DE SOFTWARE MATEMÁTICO**

**LUIS JOSÉ DELÚQUEZ BARÓN  
JOSÉ FRANCISCO DÍAZ DELÚQUEZ**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO  
METALÚRGICO**

**DIRECTOR  
PEDRO LUIS DELVASTO ANGARITA  
DOCTOR EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA  
BUCARAMANGA**

**2018**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo primeramente se lo dedicamos a Dios todo poderoso, que nos ilumino y nos brindó la sabiduría para realizar con éxito este trabajo.

Dedicado a nuestros padres Petrona Baron, Luis Deluquez, Dolila Deluquez, y Limbano Diaz, por ser parte fundamental en nuestra formación, por confiar en nosotros, por ser ese apoyo constante que nunca nos deja caer, por ser nuestros motores y por ser nuestro ejemplo a seguir.

A nuestros hermanos Juanfe, Eliseo, Sara y Luciano, que siempre han sido una inspiración y por estar siempre cuando los necesitamos.

A nuestros familiares por brindarnos su cariño, por sus consejos, y por contribuir de manera positiva en nuestra formación profesional y personal.

A nuestros amigos y compañeros, que hicieron de este camino una aventura inolvidable, sin ellos no hubiese sido lo mismo.

Luis José Deluquez Baron

Jose Francisco Díaz Deluquez

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestra alma mater la Universidad Industrial de Santander, a nuestra escuela de ingeniería metalúrgica y a su cuerpo docente que siempre estuvo presto a compartir su conocimiento en pro de nuestra formación profesional y humana.

A nuestro profesor Pedro Luis Delvasto por su entera disposición en colaborar y su profesionalismo como director en la realización del trabajo, poniendo en servicio todo su conocimiento y experiencia.

A los profesores Walter, Andrés, Sergio, Mauricio, Elcy, Sandra, y Ana Emilse, por todos sus consejos y conocimientos transmitidos a lo largo de la carrera.

A los técnicos del laboratorio Sergio, Domingo, Mario, Ambrosio, Javier y Oscar, por su ayuda y asesoría en cada disciplina de la carrera.

A nuestros compañeros y colegas, que a lo largo de la carrera se convirtieron en amigos, Pablo, Edgar, Checho, Armando, Kelly, y Madariaga.

A nuestros amigos Xavi, Osbert, Chiwi, Jose C, y Juanse por hacer de esta experiencia inolvidable.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	18
1. OBJETIVOS .....	20
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	21
2.1 MODELO DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA GATES-GAUDIN-SCHUHMANN.....	21
2.2 CALCULO DE LA POTENCIA DE LAS TRITURADORAS. ....	22
2.3 TRITURADORA DE MANDÍBULAS.....	23
2.3.1 Apertura de alimentación (AA). ....	23
2.3.2 Apertura de salida en posición abierta (APA) y apertura de salida en posición cerrada (APC).....	24
2.3.3 Largo de la cámara (L).....	24
2.4 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DE UNA TRITURADORA DE MANDIBULAS. ....	24
2.4.1 Tamiz. ....	25
2.4.2 Tamaño del producto.. ....	25
2.4.3 Eficiencia del tamiz( $\eta$ ).....	25
2.4.4 Porcentaje retenido acumulado. ....	25
2.4.5 Masa procesada horariamente de la operación para cada APC.....	26
2.4.6 Tamaño máximo de alimentación.. ....	26
2.4.7 Porcentaje de humedad. ....	26
2.4.8 Porcentaje de contenido de arcilla. ....	26
2.4.9 Alimentación horaria. ....	26
2.4.10 Tamaño característico de la alimentación.....	26
2.4.11 Densidad aparente.....	27

2.4.12 Índice de trabajo. ....	27
2.4.13 Capacidad de procesamiento horario de las trituradoras de mandíbulas de la base de datos. ....	27
3. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN .....	28
3.1 VISIÓN GENERAL.....	28
3.2 FASE DE RECOPIACIÓN, SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN ..	28
3.2.1 Recopilación de información. ....	29
3.2.2 Análisis de la información. ....	31
3.3 FASE DE DISEÑO DEL ALGORÍTMO DE OPERACIÓN .....	39
3.3.1 Interacción Usuario-Aplicación.....	40
3.3.2 Cálculo de procesamiento horario en cada apertura. ....	40
3.3.3 Verificación de requisitos de capacidad de las trituradoras disponibles. ....	41
3.3.4 Determinación de idoneidad de máquina trituradora. ....	42
3.3.5 Presentación del reporte de funcionamiento.....	43
3.4 FASE DE PROGRAMACIÓN DE LA APLICACIÓN .....	44
3.4.1 Interacción Usuario-Aplicación.....	44
3.4.2 Cálculo de procesamiento horario por apertura.....	45
3.4.3 Verificación de requisitos de capacidad de las trituradoras disponibles. ....	45
3.4.4 Determinación de idoneidad de máquina trituradora. ....	46
3.4.5 Presentación del reporte de funcionamiento.....	46
3.4.6 Manual de uso de la aplicación.....	46
3.5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE VARIABLES OPERATIVAS .....	46
3.5.1 Presentación de resultados.....	46
3.5.2 Interpretación de variables operativas. ....	48
4. MÉTODO DE EVALUACIÓN DE IDONEIDAD .....	50
4.1 CRITERIO DEL AUMENTO MÁXIMO DE LA ALIMENTACIÓN HORARIA. ....	50
4.2 CRITERIO DEL CONSUMO ENÉRGICO DEL EQUIPO.....	51

4.3 ÍNDICE DE IDONEIDAD.....	53
4.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....	53
5. CONCLUSIONES .....	54
6. RECOMENDACIONES.....	55
BIBIOGRAFÍA.....	56

## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Funciones del % de material pasante acumulado para piedras blandas, donde $x$ toma valores de la $apc$ en [plg]. a 1. ejemplo de un diagrama gates-gaudin-schumann. ....	31
Tabla 2. Funciones del % de material pasante para piedras semi-duras, donde $x$ toma valores de la $apc$ en [plg]. ....	32
Tabla 3. Funciones del % de material pasante para piedras duras, donde $x$ toma valores de la $apc$ en [plg]. ....	33
Tabla 4. Funciones de los límites de capacidad de procesamiento horario de las trituradoras de mandíbula disponibles ( $f_{li}$ : límite inferior, $f_{ls}$ : límite superior) en [ $m^3/h$ ], donde $x$ toma valores de la $apc$ en [plg]. ....	34
Tabla 5. Función del factor de índice de trabajo ( $fi$ ), donde $x$ toma valores del índice de trabajo en [kwh/ton].....	36
Tabla 6. Funciones del factor de tamaño de alimentación, donde $x$ toma valores del % de alimentación $< 1/2$ $apa$ .....	37
Tabla 7 (a). Funciones del factor humedad, para materiales con contenido de arcilla menor a 5%, donde $x$ toma valores de la $apc$ en [plg]. ....	38
Tabla 7 (b). Funciones del factor humedad, para materiales con contenido de arcilla mayor a 5%, donde $x$ toma valores de la $apc$ en [plg]. ....	38
Tabla 8. Condiciones de proceso de los ejemplos simulados.....	47
Tabla 9 Resultados de la versión microsoft excel y matlab. ....	47

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ejemplo de un diagrama gates-gaudin-schumann.....	21
Figura 2. Esquema de una trituradora de mandíbulas. ....	23
Figura 3. Circuito típico de trituración. ....	25
Figura 4. Diagrama de flujo general para el desarrollo de la aplicación.....	29
Figura 5. Representación gráfica de la regresión polinomial de grado 3 para los porcentajes de material pasante con tamaño de 0.5 [plg], en función de la apc para materiales blandos.....	33
Figura 6. Representación gráfica de la regresión polinomial de grado 2 para los limites de las capacidades de procesamiento horario correspondientes a la trituradora cec, ms-3248, en función de la apc.a de figuras .....	35
Figura 7. Representación gráfica de la regresión polinomial de grado 2 para el factor del índice de trabajo en función del índice de trabajo.....	36
Figura 8. Representación gráfica de la regresión polinomial de grado 2 para el factor del tamaño de alimentación correspondiente al 30% de relación entre el tamaño máximo del material y la aa, en función del porcentaje de alimentación menor a la mitad del tamaño de la apa.....	37
Figura 9. Representación gráfica de la regresión polinomial para el factor de humedad correspondiente al 10% de humedad con menos del 5% de contenido de arcilla, en función de la apc. ....	38
Figura 10. Diagrama de flujo general del algoritmo de operación de la aplicación. ....	39
Figura 11. Ejemplo de interacción entre objetos de interfaz (visual basic for applications®). ....	40
Figura 12. Diagrama de flujo del procedimiento “CÁLCULO DE PROCESAMIENTO HORARIO EN CADA APERTURA.” SIENDO APC EL VALOR DE LA APERTURA DE SALIDA EN POSICIÓN CERRADA EN [PLG]. ....	41
Figura 13. Diagrama de flujo del procedimiento “VERIFICACIÓN DE REQUISITOS DE CAPACIDAD DE LAS TRITURADORAS DISPONIBLES.” SIENDO APC EL VALOR DE LA APERTURA DE SALIDA EN POSICIÓN CERRADA EN [PLG]. ...	42
Figura 14. Diagrama de flujo del procedimiento “DETERMINACIÓN DE IDONEIDAD DE MÁQUINA TRITURADORA.” SIENDO APC EL VALOR DE LA APERTURA DE SALIDA EN POSICIÓN CERRADA EN [PLG]. ....	43

Figura 15. Formulario principal de la aplicación en matlab® (a) y vba ® (b).....	45
Figura 16 (a) Interfaz de resultado del ejemplo 2 para la versión microsoft excel®. .....	48
Figura 16 (b) Interfaz de resultado del ejemplo 2 para la versión matlab®.....	48
Figura 17. Gráfica de la ecuación del criterio del aumento máximo de la alimentación horaria.....	51
Figura 18. Ejemplo de la relación entre la potencia de trituración y la APC. ....	52

## **LISTA DE ANEXOS**

Los anexos están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS

ANEXO A. LISTA DE PROVEEDORES CONSULTADOS.

ANEXO B. TABLAS DE GRANULOMETRIA DE LAS TRITURADORAS.

ANEXO C. TABLAS DE CAPACIDAD DE LAS TRITURADORAS UTILIZADAS.

ANEXO D. TABLAS DE FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCTIVIDAD DE LAS TRITURADORAS UTILIZADAS.

ANEXO E. OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE DATOS.

ANEXO F. CALCULO TIPO PARA REALIZAR UNA REGRESION POLINOMIAL.

ANEXO G. INSTRUCCIONES PARA INTERACCIÓN USUARIO-APLICACIÓN EN MICROSOFT EXCEL.

ANEXO H. CODIFICACIÓN DE LOS EVENTOS PRINCIPALES PARA LA INTERACCIÓN USUARIO-APLICACIÓN (AGREGAR CONDICIONES), EN MICROSOFT EXCEL®.

ANEXO I. CODIFICACIÓN DE LOS EVENTOS PRINCIPALES PARA LA INTERACCIÓN USUARIO-APLICACIÓN (SELECCIÓN DE TRITURADORA), EN MICROSOFT EXCEL®.

ANEXO J. INSTRUCCIONES PARA INTERACCIÓN USUARIO-APLICACIÓN EN MATLAB.

ANEXO K. CODIFICACIÓN DE INTERACCIÓN USUARIO-APLICACIÓN (AGREGAR PARAMETROS Y SELECCIÓN DE TRITURADORA), EN MATLAB®.

ANEXO L. CODIFICACIÓN DE LOS EVENTOS PRINCIPALES PARA EL CÁLCULO DEL PROCESAMIENTO HORARIO POR APERTURA, EN VBA®.

ANEXO M. CODIFICACIÓN DE LOS EVENTOS PRINCIPALES PARA EL CÁLCULO DEL PROCESAMIENTO HORARIO POR APERTURA, EN MATLAB®.

ANEXO N. CODIFICACIÓN DE LOS EVENTOS PRINCIPALES PARA LA VERIFICACIÓN DE REQUISITOS DE CAPACIDAD DE LAS TRITURADORAS DISPONIBLES, EN VBA®.

ANEXO O. CODIFICACIÓN DE LOS EVENTOS PRINCIPALES PARA LA VERIFICACIÓN DE REQUISITOS DE CAPACIDAD DE LAS TRITURADORAS DISPONIBLES, EN MATLAB®.

ANEXO P. CODIFICACIÓN DE LOS EVENTOS PRINCIPALES PARA LA DETERMINACIÓN DE IDONEIDAD DE MAQUINA TRITURADORA, EN VBA®.

ANEXO Q. CODIFICACIÓN DE LOS EVENTOS PRINCIPALES PARA LA DETERMINACIÓN DE IDONEIDAD DE MAQUINA TRITURADORA, EN MATLAB®.

ANEXO R. CODIFICACIÓN DE LOS EVENTOS PRINCIPALES PARA LA PRESENTACIÓN DEL REPORTE DE FUNCIONAMIENTO, EN VBA®..

ANEXO S. CODIFICACIÓN DE LOS EVENTOS PRINCIPALES PARA LA PRESENTACIÓN DEL REPORTE DE FUNCIONAMIENTO, EN MATLAB®.

ANEXO T. MANUAL DE USO DE LA APLICACIÓN “SELECCIONADOR DE TRITURADORA.

## RESUMEN

**TITULO:** MODELAMIENTO DE UN PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DE EQUIPOS DE TRITURACIÓN A TRAVÉS DE SOFTWARE MATEMÁTICO\*

**AUTORES:** Luis José Delúquez Barón, José Francisco Díaz Delúquez \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Simulador, proceso de conminución, trituración primaria, Visual Basic para Aplicaciones ® (VBA), Microsoft Excel ®, Matlab ®.

### DESCRIPCIÓN:

En el presente proyecto se diseñó y desarrolló un simulador prototipo que modela un procedimiento de selección de equipos de trituración primaria, tal simulador se desarrolló como una aplicación programada mediante los softwares Microsoft Excel ® y Matlab ®, los cuales cuentan con su propio lenguaje de programación.

Para el cumplimiento los objetivos planteados, se consultaron estudios y teorías actuales que rigen los procesos de conminución de materiales, los cuales se configuraron como la base argumental de la selección, además, se obtuvo información detallada del funcionamiento de un grupo representativo de máquinas trituradoras utilizadas comercialmente para trituración primaria, de ésta forma se completaron los requisitos necesarios para el desarrollo del simulador. Posteriormente, la información se trató a través de métodos matemáticos con el fin de optimizar su manejo y se diseñó un algoritmo de operación, el cual es representado a través de diagramas de flujo. Luego, se implementó en cada software el algoritmo diseñado traduciéndolo a su lenguaje.

Una vez terminada la fase de codificación del algoritmo, se presentan los resultados obtenidos con ambas aplicaciones, los cuales son un conjunto de procesos de conminución simulados, que luego son analizados con un enfoque teórico con el fin de verificar su coherencia y confiabilidad; finalmente, a partir de este análisis, se identificaron los aspectos que le permiten a este trabajo cumplir con los objetivos planteados. Adicionalmente se presentan una serie de recomendaciones que sirven de ayuda para la optimización del simulador en cuestiones de diseño, cobertura y aplicabilidad.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Director: Dr.. Pedro Luis Delvasto Angarita.

## ABSTRACT

**TITLE:** MODELING SELECTION PROCEDURE OF CRUSHING EQUIPMENT THROUGH MATHEMATICAL SOFTWARE\*

**AUTHORS:** Luis José Deluquez Barón, José Francisco Díaz Delúquez \*\*

**KEYWORDS:** Simulator, conminution procedure, primary crushing, Visual Basic for Applications ® (VBA), Microsoft Excel ®, Matlab ®.

### DESCRIPTION:

In the present project, a prototype simulator was designed and developed to model a selection process for primary crushing equipment. This simulator was developed as an application programmed using the Microsoft Excel ® and Matlab ® softwares, which have their own coding language.

For the fulfillment of the proposed objectives, current studies and theories that govern the processes of comminution of materials were consulted, which were configured as the argumental basis of the selection, in addition, detailed information about the operation of a representative group of crushing machines used commercially for primary crushing was obtained, Subsequently, the information was treated through mathematical methods in order to optimize its management and an operation algorithm was designed, which is represented through flow diagrams. Then, the designed algorithm was translated into each software language and implemented in it.

Once the coding phase of the algorithm is finished, the results obtained with both applications are presented, which are a set of simulated comminution processes, which are then analyzed with a theoretical approach in order to verify their coherence and reliability; finally, from this analysis, the aspects that allow this work to meet the objectives set were identified. Additionally, a series of recommendations that help to optimize the simulator in design, coverage and applicability issues are presented.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering. Director: Dr. Pedro Luis Delvasto Angarita

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de reducción de tamaño de minerales poseen una considerable relevancia en la metalurgia extractiva y en los procesos subsiguientes, pues son el punto de partida para la síntesis de minerales. La cual generalmente requiere de transformaciones físicas del producto que se obtiene directamente del yacimiento<sup>1</sup>.

El proceso de trituración se configura como uno de los principales procesos de reducción de tamaño debido a que ha sido utilizado ampliamente utilizado por la industria para la reducción de tamaño de grandes terrones de roca a pequeños fragmentos de 1/4 pulgada a 3/8 pulgada de tamaño. Tal proceso se subdivide en diferentes etapas que tienen como principales diferencias: la escala de reducción de tamaño que maneja cada una, el tipo de maquinaria utilizada y la forma en la cual se aplica la fuerza; en tales subdivisiones se pueden encontrar: la trituración primaria, secundaria y en algunos casos terciaria. Dentro del proceso de trituración primaria se utilizan ampliamente los equipos trituradores de mandíbulas; los cuales poseen propiedades físicas que les permiten romper grandes peñascos, de hasta 60 pulgadas de diámetro, utilizando eficientemente la energía que consumen.<sup>2</sup>

Debido a que las condiciones de trabajo y los niveles de producción son variables de un proyecto a otro, la industria trituradora actual ofrece un extenso catálogo de equipos para trituración primaria, lo cual constituye un gran reto en relación al diseño del proceso de conminución y a su vez a la selección del equipo idóneo. Sumado a esto, los estudios y reportes presentados por los fabricantes de estos equipos son limitados a ciertas condiciones de operación, por lo tanto, para garantizar una selección correcta, requieren de un análisis más complejo donde se tengan en cuenta factores que puedan afectar el funcionamiento de cada uno de los equipos.

---

<sup>1</sup> PRYOR, E. J. Mineral Processing, third edition. London: Springer Netherlands, 1965. p.14. ISBN: 978-94-010-2943-8.

<sup>2</sup> CURRIE, John M. Unit operations in mineral processing. Burnaby: British Columbia Institute of Technology. p. 4 - 2, 4 - 3 ISBN: 0-918062-13-6.

En ese orden de ideas, surge la necesidad de diseñar un método para agilizar este procedimiento y disminuir errores de cálculo, producto de la gran cantidad de operaciones e información que se debe analizar. En este proyecto se propone utilizar dos softwares matemáticos (Matlab ® y Microsoft Excel ®) para automatizar el procedimiento de selección a través de programación, en otras palabras, crear un simulador que sea capaz de seleccionar equipos que cumplan con los requisitos para realizar un proceso de trituración primaria bajo ciertas condiciones definidas por un usuario y al mismo tiempo definir la idoneidad del uso de los equipos según un criterio que tenga en cuenta las necesidades del usuario y consideraciones energéticas basadas en la ley de Bond<sup>3</sup>.

Al cumplir el objetivo principal, se espera que el simulador sirva como apoyo a los proyectos para incorporar las tecnologías de información al área de metalurgia extractiva de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad industrial de Santander.

---

<sup>3</sup> Ibid., p \*\*.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Instrumentalizar un procedimiento de selección de equipos de trituración de minerales a través de Matlab ® y Microsoft Excel ®

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

**1.2.1** Elaborar una base de datos con las características de operación de diferentes equipos de trituración disponibles comercialmente, tales como, distribución granulométrica del producto, tablas de capacidad y dimensiones de las máquinas.

**1.2.2** Desarrollar un simulador, empleando Matlab ® y Microsoft Excel ®, para establecer la relación existente entre la base de datos matemáticos y los parámetros involucrados en el proceso de la selección del equipo de trituración, teniendo en cuenta las propiedades del mineral (índice de trabajo, humedad, entre otros.).

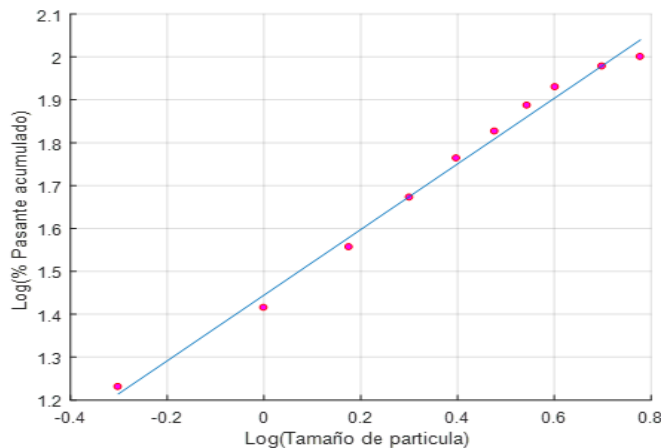
**1.2.3** Diseñar una interfaz gráfica con la opción de digitar los parámetros que regulen el proceso de reducción de tamaño, con el fin de obtener el equipo de trituración óptimo por medio del simulador.

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1 MODELO DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA GATES-GAUDIN-SCHUHMANN.

La función Gates-Gaudin-Schuhmann es la distribución más usada en América para representar distribuciones de tamaño obtenidas por tamizado. En algunos casos la distribución granulométrica aparece sesgada y se puede obtener una representación lineal de la misma trazando el logaritmo del % pasante acumulado versus el logaritmo del tamaño de partícula.<sup>4</sup> Esta representación lineal es conocida como diagrama de Gates-Gaudin-Schuhmann, ejemplificado en la Figura 1.

Figura 1. Ejemplo de un diagrama Gates-Gaudin-Schumann.



El beneficio de realizar un análisis granulométrico con un diagrama Gates-Gaudin-Schumann es que con un número limitado de tamices se puede calcular el tamaño de las partículas que se encuentran entre otros dos tamaños de tamices y obtener la distribución completa de tamaños de las partículas que existen en una muestra.<sup>5</sup>

<sup>4</sup> ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, Beatriz. Análisis de la influencia de la distribución de tamaños de partícula en la determinación de consumos energéticos en molienda mediante el método de bond. Oviedo: Universidad de Oviedo. Dpto. de explotación y prospección de minas, 2005, p. 34

<sup>5</sup> Ibid., p. 34

La ecuación de la distribución de Gates-Gaudin-Schuhmann viene dada por:

$$y = 100 * \left(\frac{x}{k}\right)^m \quad (1)$$

Donde:

y es el % pasante acumulado para un tamaño x, x es el tamaño de apertura de malla, k es el módulo de tamaño, y m es el módulo de distribución.

Tomando logaritmos en ambos lados de la ecuación (1) se obtiene:

$$\text{Log}y = \text{Log}100 + m\text{Log}x - m\text{Log}k$$

$$\text{Log}y = m\text{Log}x + \text{cte}(2)$$

La ecuación (2) representa la ecuación que se grafica en el diagrama Gates-Gaudin-Schuhmann donde se obtiene una línea recta en la que su pendiente está representada por "m", la variable dependiente está representada por "Logy", la variable independiente está representada por "Logx", y la ordenada al origen está representada por "cte".

## **2.2 CALCULO DE LA POTENCIA DE LAS TRITURADORAS.**

Para un proceso de reducción de tamaño se necesita un aporte energético para vencer la resistencia interna del material. La energía necesaria para generar una fractura en el sólido depende del tipo de material. La ecuación de la ley de Bond modela la potencia de las trituradoras.<sup>6</sup> Esta ley establece que existe una relación lineal entre la energía necesaria para llevar a cabo la pulverización y la raíz cuadrada del tamaño de partícula.<sup>7</sup>

La ecuación práctica de la ley de bond viene dada por la ecuación (3):

---

<sup>6</sup>BUSH, P.D.; GAULT, G.A.; LESS, M.J.; MORRISON, R.D.; RAO, T.C.; STANLEY, G.G.; WALTER, G.W.; WHITEN, W. J. y WIEGEL, R.L. Mineral crushing and grinding circuits. New York: Julius Kruttschnitt Mineral Research Center, 1977. p.15.

<sup>7</sup>Ibid., p.16

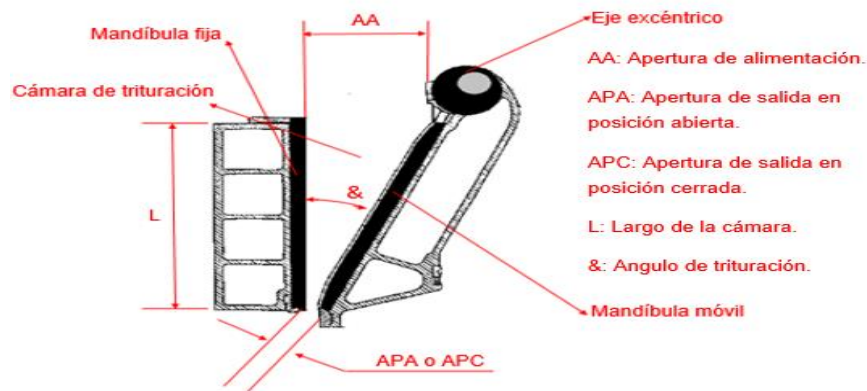
$$\frac{P}{T} = Kb * Wi * \left( \frac{1}{\sqrt[2]{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt[2]{F_{80}}} \right) \quad (3)$$

Donde P es la potencia de trituración en [kW], T es la tasa de alimentación en [ton/h],  $F_{80}$  es el tamaño por donde pasa el 80% de las partículas alimentadas en [ $\mu\text{m}$ ],  $P_{80}$  es el tamaño por donde pasa el 80% de producto en [ $\mu\text{m}$ ], y Wi es el índice de trabajo [kWh/ton].

### 2.3 TRITURADORA DE MANDÍBULAS.

En una planta de trituración, este equipo es el que reduce de tamaño el material. El proceso consiste en quebrar el material por la acción de una fuerza de compresión o impacto, aplicada a través del movimiento periódico de aproximación y alejamiento de una Mandíbula móvil y una Mandíbula fija.<sup>8</sup> En el Figura 2 se ilustra el esquema de una trituradora de mandíbulas con sus principales características.

Figura 2. Esquema de una trituradora de mandíbulas.



Fuente: SOLANILLA B. Jorge H. Gerencia de equipos para obras civiles y minería. Bogotá: BRANDAR EDITORES. Bogotá, 2003. P.60. ISBN: 958-9247-21-0.

**2.3.1 Apertura de alimentación (AA).** Es la distancia máxima entre dos mandíbulas, se mide en la parte superior de la cámara de trituración. Los fabricantes denominan a la trituradora por las dimensiones de la boca de alimentación, que

<sup>8</sup> SOLANILLA B, Jorge H. Gerencia de equipos para obras civiles y minería. 1 ed. Bogotá, 2003. p.59.

puede ser en pulgadas o en milímetros, por ejemplo, una trituradora de 24 x 36 significa que su boca tiene de ancho 24" y de largo 36". Estos datos sirven para escoger la trituradora por la capacidad de recibir material.<sup>9</sup>

**2.3.2 Apertura de salida en posición abierta (APA) y apertura de salida en posición cerrada (APC).** Toda trituradora de mandíbulas tiene un mecanismo para graduar la apertura de salida del material, esta apertura puede tener dos medidas: posición abierta o cerrada, dependiendo de la posición en que se encuentra el eje excéntrico que está ubicado en la parte superior, y que genera un movimiento de vaivén en la mandíbula móvil para efectuar el rompimiento o trituración del material.<sup>10</sup>

**2.3.3 Largo de la cámara (L).** Entre más larga sea la longitud, más eficiente puede ser la producción de la trituradora, porque se tiene una mayor cámara de trituración. Si no se alimenta adecuadamente, la operación resulta más costosa porque no se aprovecha la longitud total de la mandíbula, se presenta mayor desgaste en su parte inferior y hay desperdicio de energía.<sup>11</sup>

## **2.4 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DE UNA TRITURADORA DE MANDIBULAS.**

De manera general, un circuito típico de trituración es como el que se muestra en la Figura 3, la selección de la trituradora se fundamenta primeramente en resolver el balance de masa del circuito típico encontrando el valor de S, y comparándolo con la capacidad de procesamiento horario de las trituradoras. El balance de masa del circuito viene dado por la ecuación (4).

$$S = \frac{T}{1 - \frac{R/100}{\eta}} \quad (4)$$

---

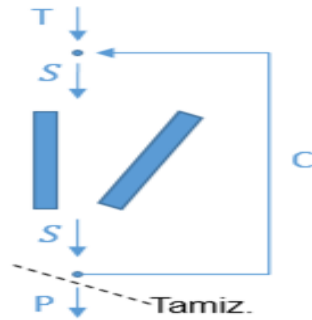
<sup>9</sup> Ibid., p.60.

<sup>10</sup> Ibid., p.61.

<sup>11</sup> CURRIE. Op. Cit, p. 4-15

Donde T es la alimentación horaria, S es la masa procesada horariamente, C es la recirculación horaria, P es la producción horaria,  $\eta$  es la eficiencia del tamiz y R es el % retenido acumulado.

Figura 3. Circuito típico de trituración.



**2.4.1 Tamiz.** Es un instrumento que se coloca en la salida de la trituradora y se emplea para separar dos sólidos formados por partículas de tamaños diferentes, el tamiz se compone de una red de poros con un tamaño característico.

**2.4.2 Tamaño del producto.** Es el tamaño de los poros del tamiz, y también es la mayor dimensión que se encuentra en la producción horaria. El tamaño del producto se utiliza para calcular el porcentaje retenido acumulado de cada APC.

**2.4.3 Eficiencia del tamiz( $\eta$ ).** Indica la cantidad de material que está pasando en relación a la cantidad de material que debería pasar por el tamiz.<sup>12</sup>

**2.4.4 Porcentaje retenido acumulado.** Es el porcentaje de masa que no pasa a través del tamiz, depende de la distribución granulométrica del producto que surge de cada APC que se utiliza. Para determinar el porcentaje retenido acumulado, primero se calcula el porcentaje pasante acumulado usando la ecuación Gates-Gaudin-Schuhmann como se muestra en la ecuación (5), posteriormente se calcula el porcentaje retenido acumulado como se expresa en la ecuación (6).

$$AP = \left( \frac{TP^m}{X_{100}^m} \right) * 100(5)$$

<sup>12</sup> CURRIE. Op. Cit, p. 4-15

$$R = 100 - AP(6)$$

Donde TP es el tamaño del producto,  $X_{100}$  es el tamaño por donde pasa el 100% de la masa de la producción del mineral, AP es el porcentaje pasante acumulado, R es el porcentaje retenido acumulado, y m es la pendiente para la ecuación de la distribución Gates Gaudin- Schuhmann en la APC.

**2.4.5 Masa procesada horariamente de la operación para cada APC.** La cantidad de masa procesada horariamente de la operación en una APC determinada, en principio depende del porcentaje retenido acumulado, de la eficiencia del tamiz, y de la alimentación horaria.<sup>13</sup> Este parámetro permite realizar la comparación con la capacidad de procesamiento horario de cada trituradora de la base de datos. La ecuación (4) se utiliza para calcular su valor.

**2.4.6 Tamaño máximo de alimentación.** Es la mayor dimensión que existe en la alimentación horaria de la trituradora de mandíbulas. Este parámetro es esencial para determinar las dimensiones de la boca de la trituradora del proceso y el factor del tamaño de alimentación.

**2.4.7 Porcentaje de humedad.** Indica el porcentaje de agua impregnada en el mineral. Este parámetro se utiliza para calcular el factor de humedad.

**2.4.8 Porcentaje de contenido de arcilla.** Indica el porcentaje de arcilla contenida en el mineral. Este parámetro se utiliza para calcular el factor de humedad.

**2.4.9 Alimentación horaria.** Es la cantidad de mineral que se ingresa en la trituradora en una hora. Este parámetro es utilizado para calcular la capacidad de procesamiento horario de las APC de la base de datos.

**2.4.10 Tamaño característico de la alimentación.** Es la dimensión por donde pasa cierto porcentaje de la alimentación. Este parámetro es necesario para calcular la potencia de trituración y el factor del tamaño de alimentación.

---

<sup>13</sup> Ibid., p.4-16.

**2.4.11 Densidad aparente.** Es la relación entre el volumen y el peso seco, incluyendo huecos y poros que contenga. Este parámetro se utiliza para calcular la potencia de trituración y para cambiar de unidades la alimentación horaria cuando se trabaje en [ton/h].

**2.4.12 Índice de trabajo.** Es una medida de la energía necesaria para quebrantar el mineral y reducir su tamaño. Con este parámetro se selecciona la tabla de las distribuciones granulométricas adecuada para el proceso y el factor del índice de trabajo.<sup>14</sup>

**2.4.13 Capacidad de procesamiento horario de las trituradoras de mandíbulas de la base de datos.** Debido a que las tablas de capacidad de procesamiento horario de los fabricantes se dan bajo ciertas condiciones ideales de producción y generalmente se basan solo en un tipo de mineral.<sup>15</sup> Se puede calcular la capacidad de procesamiento horario de las trituradoras con la ecuación (7).

$$Q = Q_t * F_i * F_t * F_h \quad (7)$$

Donde  $Q_t$  es la capacidad de procesamiento horario de las tablas que proporciona el fabricante de la trituradora en sus catálogos,  $F_i$  es el factor del índice de trabajo,  $F_t$  es el factor del tamaño de alimentación y  $F_h$  es el factor de humedad.

---

<sup>14</sup> Ibid., p.3-7, p. 3-8.

<sup>15</sup> SOLANILLA. Op. Cit, p. 244

### 3. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

#### 3.1 VISIÓN GENERAL

Para el diseño y construcción del simulador se tuvo en cuenta todos los aspectos formales de desarrollo de una herramienta informática, para lo cual se consultaron investigaciones acerca de los enfoques de desarrollo de software mejor calificados en la actualidad, de tal investigación se concluyó que un marco de trabajo\* con metodología en cascada (lineal) ofrece las mayores ventajas para el desarrollo del presente proyecto teniendo en cuenta entre otros aspectos que: “1. *Esta metodología es ideal para el apoyo de equipos de trabajo con poca experiencia en el desarrollo de software; 2. La secuencia ordenada de los pasos de desarrollo y los controles estrictos para la adaptación de la documentación y diseño ayudan a garantizar la calidad, confiabilidad y mantenimiento del software desarrollado; 3. El progreso del desarrollo del sistema es mensurable; 4. Conserva recursos.*”<sup>17</sup>

Por lo tanto, se diseñó el siguiente flujograma que describe las fases principales del desarrollo del proyecto (Figura 4):

#### 3.2 FASE DE RECOPIACIÓN, SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

En esta fase se tuvo como objetivo principal la recolección de datos operativos de las diferentes líneas y referencias comerciales de trituradoras de mandíbula para posteriormente realizar la selección de un grupo de máquinas trituradoras que represente la oferta general de los fabricantes<sup>18</sup>. Los enlaces de las páginas web de fabricantes se muestran en el Anexo A

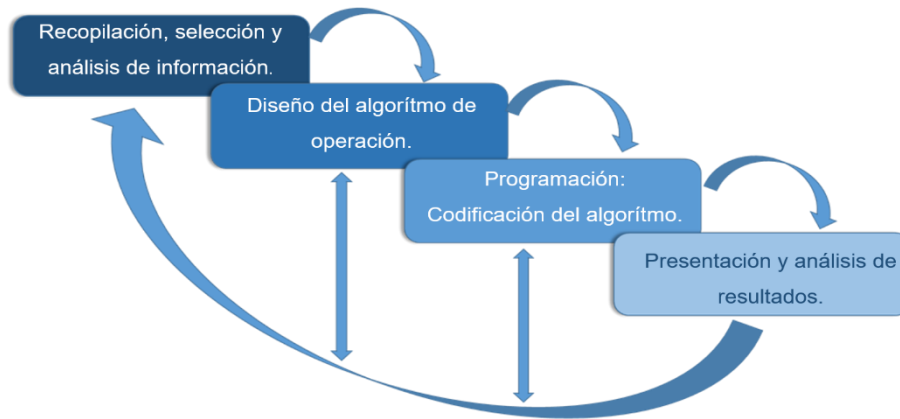
Una vez es seleccionada la información de los fabricantes es necesario realizar su análisis por medio de métodos matemáticos para optimizar su manejo.

<sup>17</sup> CENTERS FOR MEDICARE AND MEDICAIDS SERVICES. Selecting a development approach. [En línea] Baltimore, 2005. (Recuperado en 9 Julio 2018) Disponible en: <https://www.cms.gov/Research-Statistics-Data-and-Systems/CMS-Information-Technology/XLC/Downloads/SelectingDevelopmentApproach.pdf>

\*Marco de trabajo o FrameWork en inglés, es un término en el ámbito de la programación para referirse a el esquema de desarrollo de un programa o aplicación.

<sup>18</sup> SOLANILLA. Op Cit., p. 225-259.

Figura 4. Diagrama de flujo general para el desarrollo de la aplicación.



Estando seleccionada la información de los fabricantes, es necesario realizar su análisis por medio de métodos matemáticos para optimizar su manejo.

**3.2.1 Recopilación de información.** La información indispensable para construir la base de datos del simulador son los datos operativos de las máquinas trituradoras, es decir; los valores de la Apertura de salida en Posición Cerrada (APC), el rango de capacidad de procesamiento horario asociado a cada APC, las tablas de distribución granulométrica resultante (la cual depende exclusivamente de la APC y del Índice de Trabajo (IT) del material a triturar) y los factores de operación de las máquinas trituradoras.

**3.2.1.1 Tablas de distribución granulométrica.** Debido a que las tablas de distribución granulométrica son realizadas de forma experimental y la gran mayoría de fabricantes las realizan siguiendo las mismas normas y estándares de calidad se concluye que, es posible realizar los cálculos de distribución granulométrica con base en el estudio de un proveedor y tener resultados con certidumbre aceptable para cualquier máquina trituradora de mandíbula.

El Anexo B muestra las tablas de distribución granulométrica escogidas para el desarrollo del simulador. Anexo B.1: Distribución granulométrica para materiales blandos  $IT = 8$  [Kw·h/ ton] a  $12$  [Kw·h/ ton]; Anexo B.2: Distribución granulométrica para materiales Semi-duros  $IT = 12$  [Kw·h/ ton] a  $18$  [Kw·h/ ton]; Anexo B.3: Distribución granulométrica para materiales duros  $IT = 18$  [Kw·h/ ton] a  $22$  [Kw·h/ ton].

**3.2.1.2 Trituradoras de mandíbula.** Fueron escogidas 17 máquinas trituradoras entre varios catálogos de las marcas fabricantes: Telsmith, Cedarapids, Parker, Nordberg, CEC Construction Equipment Co., TEREX, entre otros.

El Anexo C muestra una tabla las máquinas trituradoras escogidas, referenciadas según las dimensiones de su apertura de entrada [en pulgadas], con sus respectivas APC y rangos de procesamiento horario de cada una.

**3.2.1.3 Factores de operación.** Los factores de operación son calculados experimentalmente por algunos fabricantes, sin embargo, al igual que las tablas de distribución granulométrica, pueden ser aplicados en la mayoría de los casos por el estrecho margen de discrepancia entre cada estudio, la información de las tablas se presenta en el Anexo D.

El Anexo D.1 Muestra los valores del Factor índice de trabajo ( $F_i$ ) para cada valor de ( $IT$ ), el Anexo D.2 muestra los valores de Factor tamaño de alimentación ( $F_t$ ) el cual depende de una relación de tamaño de alimentación y los valores de Apertura de salida en Posición Abierta (APA) y de la APC, el Anexo D.3 muestra los valores de Factor Humedad ( $F_h$ ) el cual depende de la APC, el porcentaje de contenido de humedad y el porcentaje de contenido de arcilla en el mineral.

**3.2.1.4 Obtención experimental de datos.** Con el fin de simular la obtención experimental de los parámetros de operación de una máquina trituradora y aumentar la cobertura del catálogo de selección, se desarrolló un procedimiento experimental que consta de un análisis granulométrico a las APC en 1cm, 2cm y

3cm, de la trituradora Retsch, BB200, que se encuentra en el laboratorio de beneficio de minerales de la Universidad Industrial de Santander. Además de éste análisis, para incluir la trituradora Retsch, BB200 en las opciones de selección de la aplicación, se realizó el estudio de la capacidad de procesamiento horaria para cada una de las APC mencionadas. Este paso es importante cuando surge la necesidad de obtener datos más precisos sobre los parámetros de operación de las trituradoras bajo condiciones específicas o cuando éstos no se conocen. El procedimiento experimental y los resultados se presentan en el Anexo E.

**3.2.2 Análisis de la información.** Con el fin de desarrollar una base de datos completa se hace necesario realizar una regresión polinomial para los datos presentados en el Anexo B, Anexo C y Anexo D. Dicha regresión tiene como objetivo aproximar una función polinomial para un grupo de datos. El grado de la función polinomial dependerá del comportamiento de los datos, en el Anexo F se muestra un cálculo tipo de la regresión polinomial realizada para obtener éstas funciones.

**3.2.2.1 Regresión polinomial de la distribución granulométrica, para los tipos de material disponible.** En la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3, están expresadas las funciones polinómicas correspondientes a la tabla de distribución granulométrica de las piedras blandas, las piedras semiduras y las piedras duras respectivamente, mostradas en el Anexo B. Cada función de las tablas mencionadas corresponde a un tamaño de partícula, la variable dependiente representa el % de material pasante y la variable independiente representa la APC. En la Figura 5 se muestra un ejemplo grafico de esta regresión polinomial.

Tabla 1. Funciones del % de material pasante acumulado para piedras blandas, donde X toma valores de la APC en [Plg].

Tamaño del material [Plg]	Función del % de material pasante, para piedras blandas Wi 8-12 [kWh/ton]	R <sup>2</sup>
0.5	$f(X) = -0.0382X^3 + 1.0019X^2 - 9.0270X + 39.8235$	0.9920
1	$f(X) = -0.0899X^3 + 2.3810X^2 - 21.0986X + 79.0392$	0.9890
1.5	$f(X) = -0.1233X^3 + 3.3440X^2 - 30.5149X + 113.9216$	0.9922

Tabla 1. (Continuación)

Tamaño del material [Plg]	Función del % de material pasante, para piedras blandas Wi 8-12 [kWh/ton]	R <sup>2</sup>
2	$f(X) = -0.1452X^3 + 4.0089X^2 - 37.5518X + 143.5882$	0.9958
2.5	$f(X) = -0.1166X^3 + 3.4289X^2 - 35.1457X + 152.0000$	0.9992
3	$f(X) = -0.0741X^3 + 2.4651X^2 - 29.2654X + 150.2941$	0.9986
3.5	$f(X) = -0.0661X^3 + 2.3235X^2 - 29.2631X + 160.6453$	0.9993
4	$f(X) = -0.0313X^3 + 1.4553X^2 - 23.0823X + 154.5839$	0.9991
5	$f(X) = 0.0615X^3 - 0.9582X^2 - 4.0125X + 120.3614$	0.9967
6	$f(X) = 0.0439X^3 - 0.6924X^2 - 4.6736X + 127.2206$	0.9984
7	$f(X) = 0.1180X^3 - 2.7893X^2 + 14.3763X + 80.3129$	0.9988
8	$f(X) = 0.1465X^3 - 3.6424X^2 + 23.0784X + 57.5040$	0.9973
9	$f(X) = 0.0399X^3 - 1.1832X^2 + 5.7676X + 99.2453$	0.9990
10	$f(X) = -0.0535X^3 + 1.3558X^2 - 16.3535X + 166.3881$	1
12	$f(X) = 0.2083X^3 - 5.6250X^2 + 45.4167X - 10.0000$	1

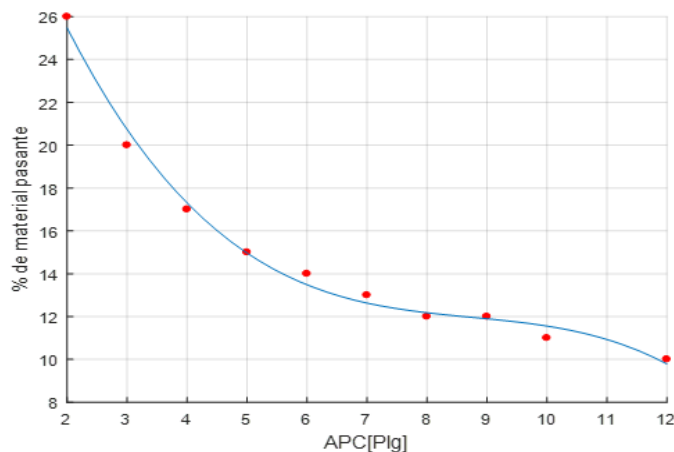
Tabla 2. Funciones del % de material pasante para piedras semi-duras, donde X toma valores de la APC en [Plg].

Tamaño del material [Plg]	Función del % de material pasante, para piedras semi-duras Wi 12-16 [kWh/ton]	R <sup>2</sup>
0.5	$f(X) = -0.0400X^3 + 1.0301X^2 - 8.8893X + 33.3137$	0.9887
1	$f(X) = -0.0833X^3 + 2.2060X^2 - 19.4729X + 68.5490$	0.9888
1.5	$f(X) = -0.1162X^3 + 3.1589X^2 - 28.7334X + 102.0784$	0.9916
2	$f(X) = -0.1412X^3 + 3.8537X^2 - 35.6671X + 130.3333$	0.9949
2.5	$f(X) = -0.1478X^3 + 4.1363X^2 - 39.6899X + 152.3725$	0.9970
3	$f(X) = -0.1003X^3 + 3.0845X^2 - 33.4424X + 150.0980$	0.9994
3.5	$f(X) = -0.0570X^3 + 2.1281X^2 - 27.8598X + 149.6078$	0.9956
4	$f(X) = -0.1001X^3 + 3.1374X^2 - 35.6628X + 174.7935$	0.9989
5	$f(X) = -0.0173X^3 + 1.0228X^2 - 19.5605X + 149.6404$	0.9957
6	$f(X) = 0.0767X^3 - 1.3685X^2 - 0.8070X + 113.9987$	0.9942
7	$f(X) = 0.1150X^3 - 2.3929X^2 + 7.7263X + 100.5940$	0.9950
8	$f(X) = 0.1657X^3 - 3.9036X^2 + 22.1069X + 64.6827$	0.9971
9	$f(X) = 0.1327X^3 - 3.4188X^2 + 21.7334X + 60.2219$	0.9991
10	$f(X) = 0.1341X^3 - 3.7505X^2 + 27.7572X + 39.2257$	0.9974
12	$f(X) = -0.3145X^3 + 8.2022X^2 - 73.3486X + 317.4933$	0.9986

Tabla 3. Funciones del % de material pasante para piedras duras, donde X toma valores de la APC en [Plg].

Tamaño de material [Plg]	Función del % de material pasante, para piedras duras Wi 16-22 [kWh/ton]	R <sup>2</sup>
0.5	$f(X) = -0.0262X^3 + 0.6952X^2 - 6.3285X + 22.8039$	0.9828
1	$f(X) = -0.0495X^3 + 1.3688X^2 - 12.8880X + 47.8039$	0.9896
1.5	$f(X) = -0.0905X^3 + 2.5242X^2 - 23.6288X + 83.7843$	0.9859
2	$f(X) = -0.1323X^3 + 3.6131X^2 - 33.2268X + 115.0980$	0.9852
2.5	$f(X) = -0.2011X^3 + 5.3625X^2 - 47.5892X + 156.0980$	0.9876
3	$f(X) = -0.1738X^3 + 4.8592X^2 - 46.0704X + 165.5882$	0.9969
3.5	$f(X) = -0.1410X^3 + 4.1786X^2 - 42.8121X + 170.5490$	0.9984
4	$f(X) = -0.1927X^3 + 5.5370X^2 - 54.8597X + 210.5323$	0.9974
5	$f(X) = -0.0435X^3 + 2.0256X^2 - 30.6577X + 174.7664$	0.9898
6	$f(X) = 0.0764X^3 - 1.0329X^2 - 7.1071X + 131.0650$	0.9897
7	$f(X) = 0.0875X^3 - 1.3888X^2 - 4.3441X + 135.5890$	0.9944
8	$f(X) = 0.1442X^3 - 3.0182X^2 + 9.9993X + 105.8997$	0.9915
9	$f(X) = 0.2454X^3 - 6.0730X^2 + 39.4846X + 23.8628$	0.9980
10	$f(X) = 0.3225X^3 - 8.4565X^2 + 63.1651X - 44.3851$	0.9929
12	$f(X) = 0.2060X^3 - 6.5431X^2 + 61.0555X - 81.3652$	0.9997

Figura 5. Representación gráfica de la regresión polinomial de grado 3 para los porcentajes de material pasante con tamaño de 0.5 [Plg], en función de la APC para materiales blandos.



**3.2.2.2 Regresión polinomial de la capacidad de procesamiento horario de las trituradoras de mandíbula disponibles.** En la Tabla 4 están expresadas las

funciones polinómicas correspondientes a los límites de capacidad de procesamiento horario de las trituradoras de mandíbulas disponibles, mostradas en el Anexo C. Estas funciones tienen como variable dependiente la capacidad de procesamiento horario en  $[m^3/h]$  y como variable independiente la APC en [Plg]. En la Figura 6 se muestra un ejemplo gráfico de esta regresión polinomial.

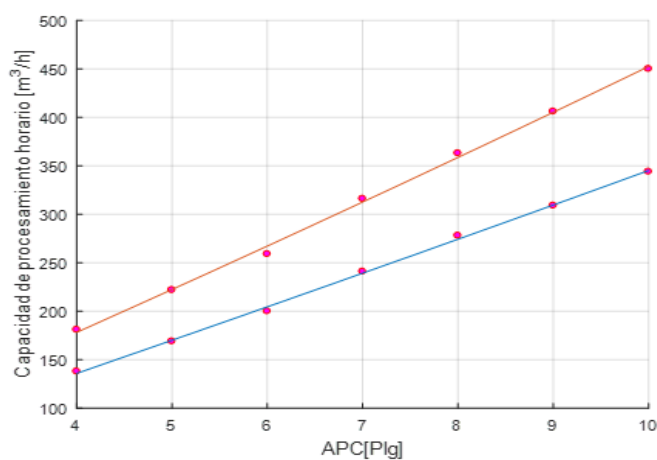
Tabla 4. Funciones de los límites de capacidad de procesamiento horario de las trituradoras de mandíbula disponibles (*fli*: Límite inferior, *fls*: Límite superior) en  $[m^3/h]$ , donde X toma valores de la APC en [Plg].

Trituradoras disponibles	Función de la capacidad de procesamiento horario ( $m^3/h$ )	$R^2$
Trituradora Nile, PE250x400	$fli(X) = 0.3073X^2 + 3.1874X + 1.1343$ $fls(X) = 0.5547X^2 + 4.4065X + 1.6180$	0.9851 0.9946
Trituradora Telsmith, 1021	$fli(X) = -0.5497X^2 + 7.1575X - 0.3638$ $fls(X) = 1.1684X^4 - 10.9816X^3 + 29.4958X^2 - 21.1676X + 9.5177$	0.9973 1
Trituradora Parker, 600x300	$fli(X) = -0.5714X^2 + 8.6857X + 4.0000$ $fls(X) = 2.8571X^2 + 0.9714X + 14.2000$	0.9989 0.9988
Trituradora Nile, PE250x750	$fli(X) = -0.0730X^2 + 7.9675X + 2.4556$ $fls(X) = 0.6249X^2 + 9.3220X + 5.7934$	0.9947 0.9995
Trituradora CEC, MB-1236	$fli(X) = -0.4987X^2 + 10.6825X + 3.4440$ $fls(X) = -2.5016X^2 + 24.5658X - 3.8983$	0.9989 0.9917
Trituradora Telsmith, 1524	$fli(X) = -0.2857X^2 + 8.9429X + 2.6000$ $fls(X) = 0.5714X^2 + 10.1143X + 5.4000$	0.9959 0.9997
Trituradora Telsmith, 2036	$fli(X) = 0.1905X^2 + 13.2218X + 1.2748$ $fls(X) = -0.0477X^2 + 24.6048X + 4.5384$	0.9991 0.9996
Trituradora Faco, 2432	$fli(X) = -0.7441X^2 + 17.0160X - 0.3465$ $fls(X) = -1.6908X^2 + 29.7068X - 23.3145$	0.9999 0.9989
Trituradora CEC, MS-2436	$fli(X) = 0.8571X^2 + 11.1143X + 1.3429$ $fls(X) = 1.2857X^2 + 7.7714X + 31.3143$	0.9898 0.9983
Trituradora Faco, 3240	$fli(X) = 2.2032X^2 - 2.2353X + 45.0471$ $fls(X) = 0.7584X^2 + 19.0396X + 3.6320$	0.9877 0.9904
Trituradora Terex, JW42	$fli(X) = 0.8897X^2 + 11.6503X + 37.6303$ $fls(X) = 4.3752X^2 - 15.9111X + 142.8571$	0.9990 0.9925
Trituradora Telsmith, 2540	$fli(X) = 0.0000X^2 + 12.0000X + 16.5000$ $fls(X) = 0.2500X^2 + 15.2500X + 18.2500$	0.9931 0.9992
Trituradora Faco, 2448	$fli(X) = -0.1071X^2 + 23.0929X + 23.0429$ $fls(X) = 0.1429X^2 + 31.0571X + 39.1143$	0.9963 0.9898
Trituradora Nile, PE800x1060	$fli(X) = 0.5714X^2 + 21.3429X + 31.4286$ $fls(X) = -2.2143X^2 + 66.6714X - 77.0857$	0.9930 0.9989

Tabla 4. (Continuación)

Trituradoras disponibles	Función de la capacidad de procesamiento horario ( $m^3/h$ )	$R^2$
Trituradora Nile, PE900x1200	$f_{li}(X) = -0.1429X^2 + 26.1429X + 22.8571$	0.9982
	$f_{ls}(X) = -0.0357X^2 + 37.3214X + 39.3571$	0.9962
Trituradora CEC, MS-3248	$f_{li}(X) = 0.1429X^2 + 32.8571X + 2.2857$	0.9987
	$f_{ls}(X) = 0.2976X^2 + 41.5119X + 7.5000$	0.9981
Trituradora Faco, 4852	$f_{li}(X) = -0.2321X^2 + 38.8821X + 16.2857$	0.9952
	$f_{ls}(X) = 2.2857X^2 + 16.4857X + 131.2857$	0.9994
Trituradora Retsch, BB200	$f_{li}(X) = 0.0268X^2 + 0.1297X + 0.2196$	1
	$f_{ls}(X) = 0.1141X^2 - 0.1067X + 0.4467$	1

Figura 6. Representación gráfica de la regresión polinomial de grado 2 para los límites de las capacidades de procesamiento horario correspondientes a la trituradora CEC, MS-3248, en función de la APC.



**3.2.2.3 Regresión polinomial del factor del índice de trabajo (Fi).** En la Tabla 5 esta expresada la función polinómica correspondiente a la tabla del factor del índice de trabajo, mostrada en el Anexo D.1. Esta función tiene como variable independiente al índice de trabajo en [kWh/ton] y como variable dependiente el factor del índice de trabajo, En la Figura 7 se muestra un ejemplo grafico de esta regresión polinomial.

Figura 7. Representación gráfica de la regresión polinomial de grado 2 para el factor del índice de trabajo en función del índice de trabajo.

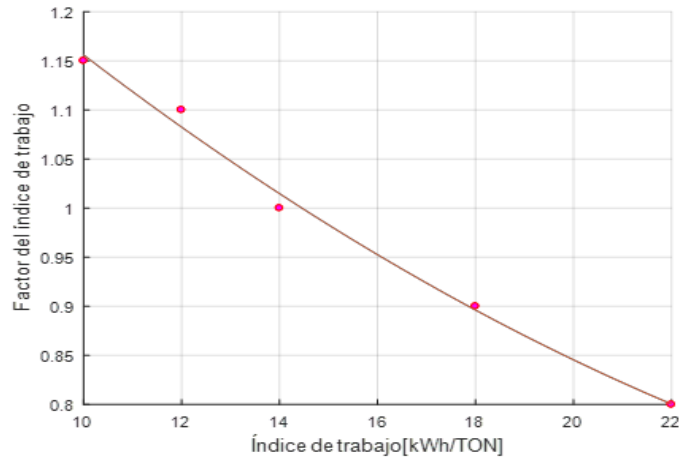


Tabla 5. Función del factor de Índice de trabajo (Fi), donde X toma valores del índice de trabajo en [kWh/ton].

Función del factor del índice de trabajo (Fi)	$R^2$
$f(X) = 0.0007X^2 - 0.0524X + 1.6091$	0.9930

**3.2.2.4 Regresión polinomial del factor del tamaño de alimentación (Ft).** En la Tabla 6 están expresadas las funciones polinómicas correspondientes a la tabla del factor de alimentación, mostrada en el Anexo D.2. Cada función de la Tabla 6 corresponde a una relación (%) entre el tamaño máximo del material y la apertura de entrada de trituradora AA, la variable independiente representa % de alimentación <1/2 APA, y la variable dependiente representa el factor de alimentación. En la Figura 8 se muestra un ejemplo gráfico de esta regresión polinomial.

Figura 8. Representación gráfica de la regresión polinomial de grado 2 para el factor del tamaño de alimentación correspondiente al 30% de Relación entre el tamaño máximo del material y la AA, en función del % de alimentación <1/2 APA.

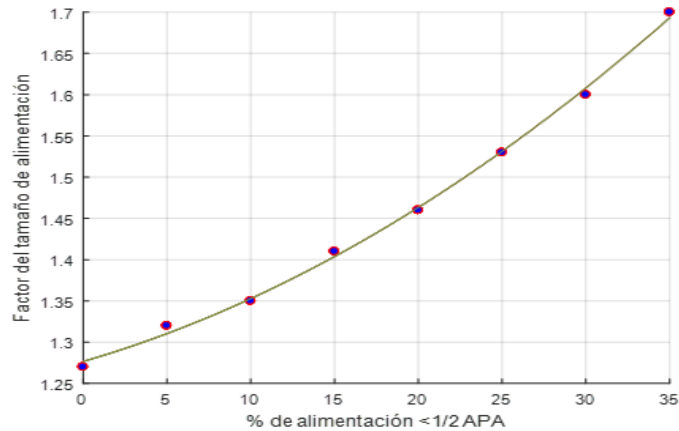


Tabla 6. Funciones del factor de tamaño de alimentación, donde X toma valores del % de alimentación < 1/2 APA.

Relación (%) entre el tamaño máximo del material y la AA	Función del factor de tamaño de alimentación (Ft)	R <sup>2</sup>
30	$0.0002x^2 + 0.0059x + 1.2767$	0.9980
40	$0.0001x^2 + 0.0070x + 1.2204$	0.9995
50	$0.0001x^2 + 0.0063x + 1.1775$	0.9987
60	$0.0001x^2 + 0.0063x + 1.1180$	0.9998
70	$0.0001x^2 + 0.0060x + 1.0392$	0.9999
75	$0.0001x^2 + 0.0036x + 0.9500$	0.9977
80	$0.0001x^2 + 0.0033x + 0.8021$	0.9973

**3.2.2.5 Regresión polinomial del factor de humedad (Fh).** En la Tabla 7 están expresadas las funciones polinómicas correspondientes a la tabla del factor de humedad, mostrada en el Anexo D.3. Cada función de la Tabla 7 corresponde a un % de humedad, la variable independiente la APC en [Plg] y la variable dependiente representa el factor de humedad. En la Figura 9 se muestra un ejemplo gráfico de esta regresión polinomial.

Figura 9. Representación gráfica de la regresión polinomial de grado 2 para el factor de humedad correspondiente al 10% de humedad con menos del 5% de contenido de arcilla, en función de la APC.

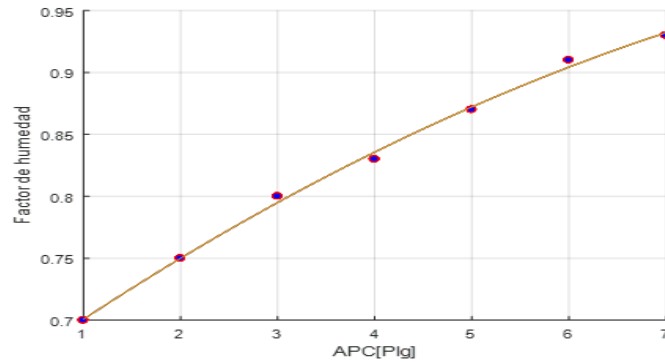


Tabla 7 (a). Funciones del factor humedad, para materiales con contenido de arcilla menor a 5%, donde X toma valores de la APC en [Plg].

% de humedad	Funciones del factor de humedad (Fh) con menos del 5% de contenido de arcilla	R <sup>2</sup>
1.5	$f(x) = 1.0100$	1
3	$f(x) = \begin{cases} 0.0133x^3 - 0.0850x^2 + 0.2017x + 0.8000 & < 4 \\ 1.1 & \geq 4 \end{cases}$	1
5	$f(x) = \begin{cases} 0.0038x^4 - 0.0408x^3 + 0.1613x^2 - 0.2342x + 1.0000 & < 5 \\ 1.1 & \geq 5 \end{cases}$	1
8	$f(x) = 0.0019x^3 - 0.0201x^2 + 0.0965x + 0.7386$	0.9935
9	$f(x) = -0.0008x^2 + 0.0399x + 0.7414$	0.9992
10	$f(x) = -0.0021x^2 + 0.0557x + 0.6471$	0.9976

Tabla 7 (b). Funciones del factor humedad, para materiales con contenido de arcilla mayor a 5%, donde X toma valores de la APC en [Plg].

% de humedad	Funciones del factor de humedad (Fh) con mas del 5% de contenido de arcilla	R <sup>2</sup>
1.5	$f(x) = 1.0100$	1
3	$f(x) = \begin{cases} 0.0038x^4 - 0.0408x^3 + 0.1613x^2 - 0.2342x + 1 & < 5 \\ 1.1 & \geq 5 \end{cases}$	1
4	$f(x) = 0.0017x^3 - 0.0162x^2 + 0.0793x + 0.7614$	0.9919
5	$f(x) = -0.0006x^3 + 0.0061x^2 + 0.0145x + 0.7700$	0.9976
8	$f(x) = -0.0003x^3 + 0.0004x^2 + 0.0513x + 0.6486$	0.9998

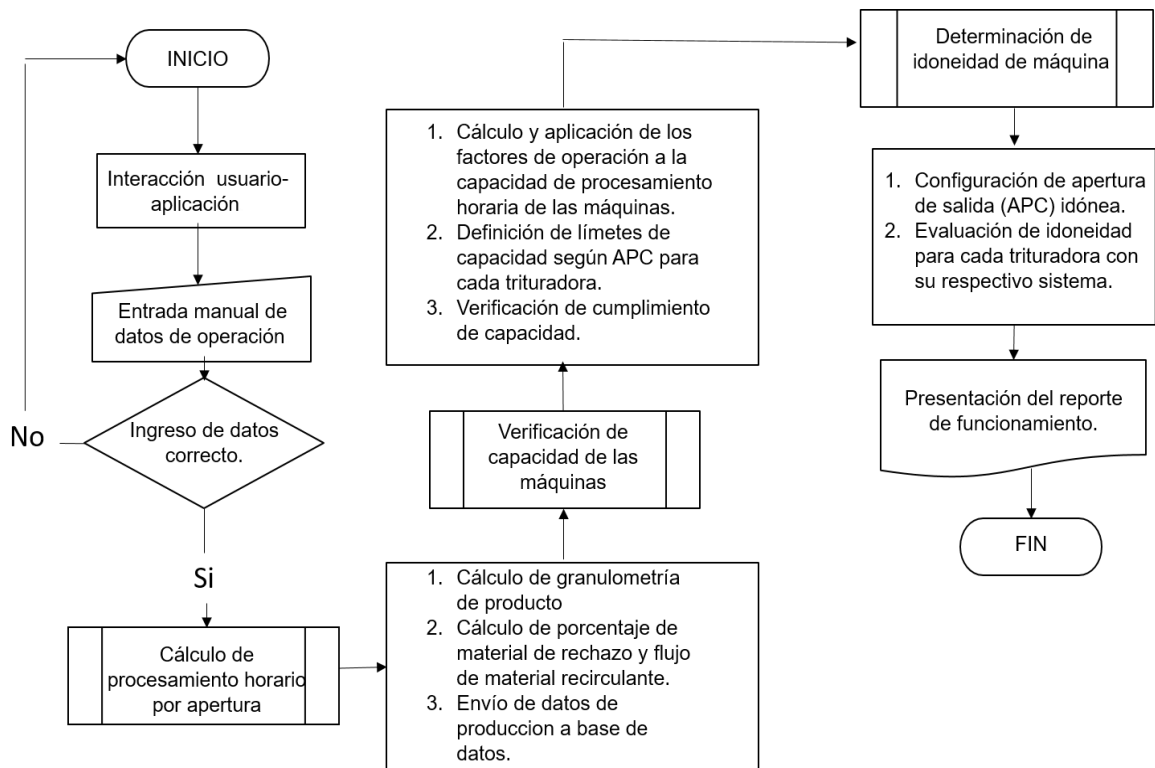
### 3.3 FASE DE DISEÑO DEL ALGORITMO DE OPERACIÓN

Debido a que la construcción del simulador se basa en una metodología en cascada (lineal) se diseñó un diagrama de flujo que defina la secuencia de actividades y operaciones que debe realizar la aplicación para procesar la información ingresada por el usuario y obtener una respuesta fundamentada en los conceptos teóricos referenciados en la sección 2.

Se realizó un diagrama de flujo general que describa las actividades principales del algoritmo de operación y varios sub-diagramas que describan los procedimientos que se utilizan para el cumplimiento de cada actividad.

En la Figura 10 se muestra el diagrama de flujo general propuesto, el cual incluye los siguientes procedimientos o actividades.

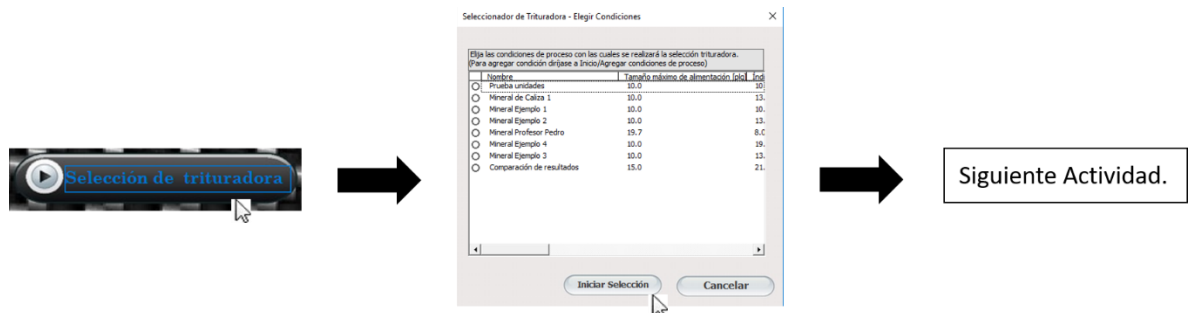
Figura 10. Diagrama de flujo general del algoritmo de operación de la aplicación.



**3.3.1 Interacción Usuario-Applicación.** El objetivo principal de esta actividad es obtener la información necesaria acerca de las condiciones de proceso con las que el usuario desea realizar la simulación. Para tal fin se propone la construcción de una interfaz gráfica a través de las herramientas de interacción que ofrecen los entornos de programación en los que se desarrolla la aplicación (Matlab ® y Visual Basic for Applications ®); dentro de éstas herramientas se pueden encontrar formularios, controladores y objetos propios de cada entorno; las cuales deben interactuar entre sí para brindar una interfaz de fácil comprensión y estéticamente agradable.

Para lograr la correcta interacción entre los objetos de interfaz es fundamental la programación de eventos, tales eventos son respuestas de la aplicación a ciertas acciones que realiza el usuario, por ejemplo, al pulsar la etiqueta “Selección de Trituradora” la aplicación envía una serie de formularios para configurar las condiciones de proceso que se desean simular y posteriormente enviar estos datos a la siguiente actividad. Éste ejemplo se ilustra en la Figura 11.

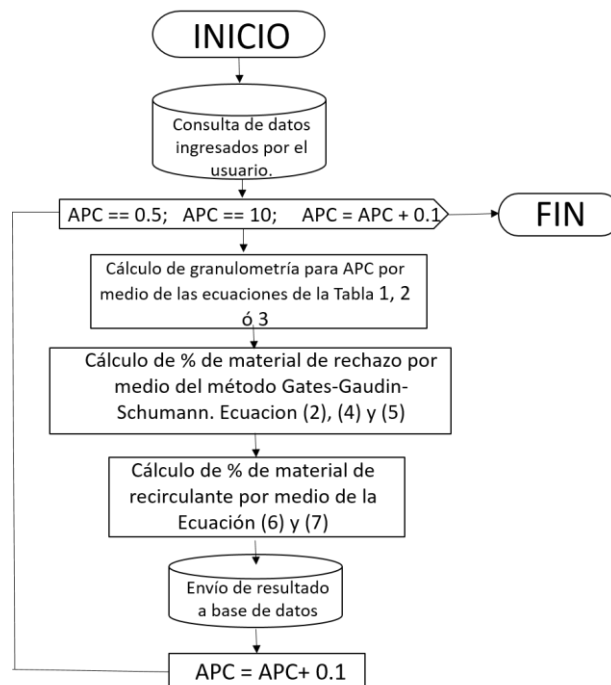
Figura 11. Ejemplo de interacción entre objetos de interfaz (Visual Basic for Applications ®).



**3.3.2 Cálculo de procesamiento horario en cada apertura.** Esta actividad es realizada automáticamente por la aplicación, una vez que el usuario active el procedimiento de cálculo por medio de los eventos descritos anteriormente y se

seguirá ejecutando el algoritmo hasta la presentación de resultados. Se realizó éste cálculo para cada una de las posibles aperturas salida en posición cerrada de las máquinas disponibles (0.5 Plg – 10 Plg) y se toma un paso de 0.1 Plg entre aperturas para obtener una exactitud confiable en los resultados de los cálculos. En la Figura 12 se presenta el diagrama de flujo que describe el algoritmo de operación para ésta actividad.

Figura 12. Diagrama de flujo del procedimiento “Cálculo de procesamiento horario en cada apertura.” Siendo APC el valor de la apertura de salida en posición cerrada en [Plg].



### 3.3.3 Verificación de requisitos de capacidad de las trituradoras disponibles.

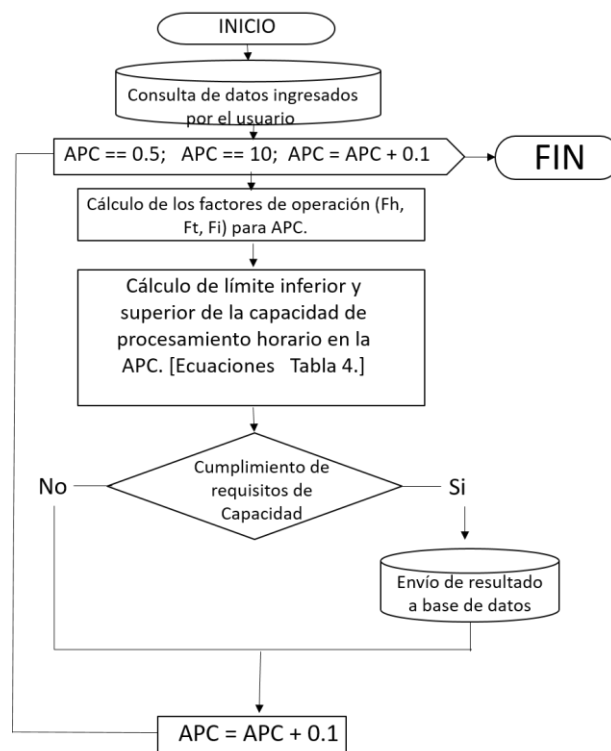
Se realiza un recorrido por todas las aperturas posibles; tal como el punto anterior; y se verifica el cumplimiento de los requisitos de funcionamiento de cada una de las trituradoras disponibles, tales requisitos son:

**3.3.3.1 Límites de capacidad de procesamiento horario.** Si la cantidad de material que se procesa con una APC determinada no está dentro de los límites de

capacidad de las trituradoras (Definido por las ecuaciones del Tabla 4 y modificado por los factores de operación), esta opción no es considerada. Cabe mencionar que cada trituradora tiene un rango específico de APC disponibles y solo se analizará tal rango para cada una. La Figura 13 muestra el diagrama de flujo de ésta actividad.

**3.3.3.2 Tamaño máximo de alimentación.** Se compara el valor máximo de alimentación con el tamaño de partícula máximo que acepta cada trituradora, si este lo excede, la opción es eliminada.

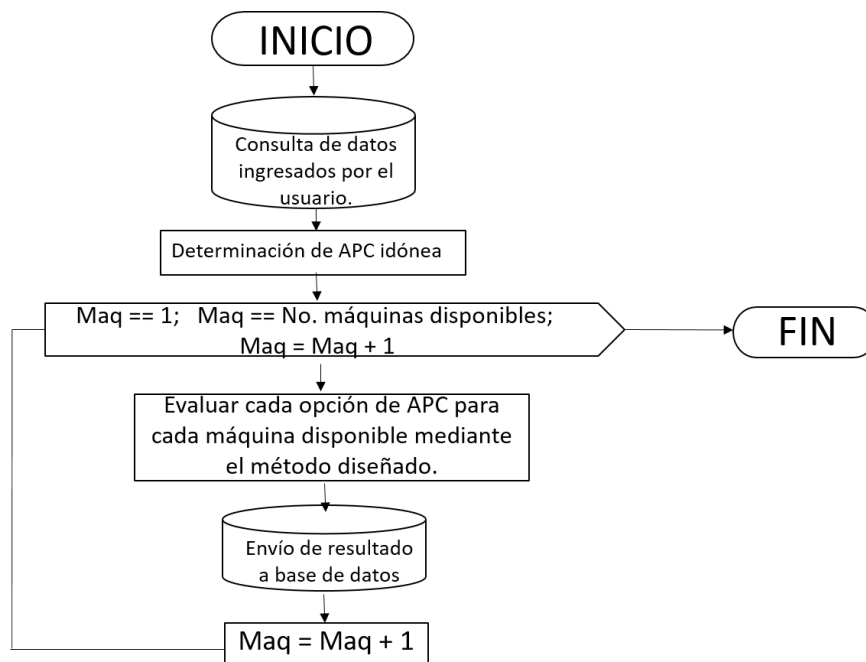
Figura 13. Diagrama de flujo del procedimiento “Verificación de requisitos de capacidad de las trituradoras disponibles.” Siendo APC el valor de la apertura de salida en posición cerrada en [Plg].



**3.3.4 Determinación de idoneidad de máquina trituradora.** En los segmentos anteriores del procedimiento, la aplicación determina las máquinas trituradoras y los rangos de APC en los que es posible realizar el proceso de conminución

especificado, sin embargo, estos resultados pueden ofrecer varias opciones dentro de las máquinas disponibles y dentro de las configuraciones de APC de cada una; por tal razón, para ofrecer un resultado más concreto, se diseñó un método de evaluación de la idoneidad de cada opción con respecto a las necesidades del usuario y el rendimiento de la máquina. Los criterios de idoneidad en los que se basa el método de evaluación se detallan en la sección 4. La Figura 14 muestra el diagrama de flujo de ésta actividad.

Figura 14. Diagrama de flujo del procedimiento “Determinación de idoneidad de máquina trituradora.” Siendo APC el valor de la apertura de salida en posición cerrada en [Plg].



**3.3.5 Presentación del reporte de funcionamiento.** Es la fase final del algoritmo y requiere del diseño de una interfaz que muestre de manera clara y concisa los resultados que se obtuvieron durante todo el procedimiento. El diseño del reporte debe incluir un resumen de los datos con los que se realiza el análisis y la configuración más adecuada de las trituradoras según el método de evaluación empleado, además como complemento se debe mostrar un diagrama del balance

de masa del sistema y datos adicionales como la granulometría del producto, el índice de idoneidad calculado y la potencia necesaria para la conminución.

### **3.4 FASE DE PROGRAMACIÓN DE LA APLICACIÓN**

Para la implementación del algoritmo de operación diseñado se utilizan los lenguajes de programación propios de cada software (Matlab ® y Visual Basic for Applications ®)

**3.4.1 Interacción Usuario-Aplicación.** La construcción de la interfaz de usuario se realizó con las herramientas que ofrece VBA ® y Matlab ® para este fin, es decir, la creación y programación de formularios y objetos; el diseño de los formularios simula la interacción de una aplicación independiente, es decir, durante la ejecución no se muestra la interfaz del software principal (Microsoft Excel ® o Matlab ®), esto con el fin de ofrecer una navegación agradable y menos confusa al usuario. La interfaz desarrollada cumple diferentes funciones dentro de la aplicación, sin embargo, solo se detallará la función principal de este punto (Ingreso manual de datos y guardado en base de datos); tampoco se detallará la programación de la parte estética de la interfaz.

**3.4.1.1 Interfaz Visual Basic for Applications®.** En la Figura 15 se presenta el formulario principal de la aplicación el cual contiene diferentes objetos con su respectiva funcionalidad. El entorno de trabajo de Microsoft Excel ® permite utilizar una hoja de trabajo como base de datos y por medio de macros ingresar, modificar o eliminar datos de la misma, de esta forma se puede tener una base de datos de usuario que pueda ser utilizada por VBA®. En el Anexo G.1 se muestran los pasos a seguir por el usuario para la manipulación de base de datos, el Anexo G.2 muestra la hoja de trabajo en que se guardan los datos y en el Anexo H se encuentra la codificación de los eventos principales de esta secuencia.

Una vez se tienen datos guardados en la hoja destinada para tal fin, se puede iniciar el proceso de selección, tal procedimiento también requiere acciones del usuario

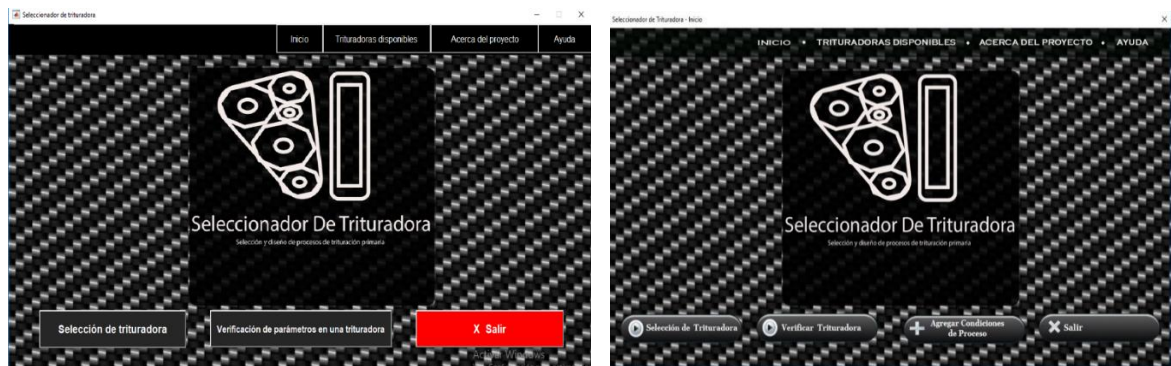
para su activación, las cuales se muestran en el Anexo G.3 y el Anexo I contiene la codificación de los eventos principales.

**3.4.1.2 Interfaz Matlab:** En la Figura 16 se presenta el formulario principal de la aplicación en Matlab, el cual esta constituidos por objetos que brindan la interacción con el usuario. El entorno de programación visual GUIDE disponible en Matlab ® proporciona herramientas para diseñar interfaces de usuario. Las interfaces de usuario cuentan con objetos que permiten el ingreso de datos al código en Matlab® y objetos que muestran datos, imágenes y gráficos en la interfaz. En el Anexo J se muestra el procedimiento que debe tener el usuario para iniciar el proceso de selección de una trituradora y el Anexo K contiene la codificación de los eventos principales.

**3.4.2 Cálculo de procesamiento horario por apertura.** Para este segmento se traduce el algoritmo de operación presentado en la Figura 3 al lenguaje de programación de cada software y parte del sub-procedimiento que se activa automáticamente al finalizar la actividad anterior. Se anexa la codificación y la explicación detallada del segmento para VBA® (Anexo L) y Matlab® (Anexo M).

**3.4.3 Verificación de requisitos de capacidad de las trituradoras disponibles.** Hace parte del sub-procedimiento de la actividad anterior y sigue el algoritmo presentado en la Figura 4. Codificación VBA® (Anexo N), Matlab® (Anexo O).

Figura 15. Formulario principal de la aplicación en Matlab® (a) y VBA ® (b).



**3.4.4 Determinación de idoneidad de máquina trituradora.** Hace parte del sub-procedimiento anteriormente nombrado y sigue el algoritmo presentado en la Figura 5. Codificación VBA® (Anexo P), Matlab® (Anexo Q).

**3.4.5 Presentación del reporte de funcionamiento.** Para cumplir los objetivos trazados en la fase de diseño, se construye la interfaz de resultados por medio de la programación de formularios que contengan los datos especificados en el punto 3.2.5. La codificación de los eventos principales de estos formularios se presenta en el Anexo R (VBA®) y Anexo S (Matlab®).

**3.4.6 Manual de uso de la aplicación.** En el Anexo T se presenta el manual de uso de la aplicación, el cual es importante para su correcta utilización y la comprensión de la codificación del algoritmo de operación.

## **3.5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE VARIABLES OPERATIVAS**

Uno de los elementos más importantes para lograr el correcto uso de la aplicación es la capacidad de interpretar los resultados, esto con el propósito de conocer los aspectos básicos del funcionamiento del proceso de conminución y de ésta forma tomar una decisión acertada. El propósito principal de éste capítulo es explicar la información que la aplicación ofrece al usuario para complementar los criterios de selección que se explican en la sección 4, basándose en sus propias necesidades.

**3.5.1 Presentación de resultados.** Es importante recordar que los resultados presentados son el producto de la verificación del cumplimiento de cada trituradora en cada opción de APC teniendo en cuenta el balance de masa respectivo y los factores que afectan la capacidad de las trituradoras; de esta forma, todas las trituradoras posibles se encuentran en una lista en la interfaz de respuesta de la aplicación. Se presentan los resultados de tres ejemplos que se simularon en ambas versiones de la aplicación. En la Tabla 8 se muestran las condiciones de proceso ingresadas y en la Tabla 9 los resultados de ambas versiones.

Tabla 8. Condiciones de proceso de los ejemplos simulados.

Condiciones	Ejemplo		
	1	2	3
Tamaño max. alimentación [cm]	60	60	60
Tamaño F80 [cm]	49.2	49.2	49.2
Tamaño max. de producto [cm]	9	17.8	9
Alimentación horaria [ton/h]	100	250	100
Índice de trabajo [kW h / ton]	11	11	22
Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	1500	1500	1500
Eficiencia de tamiz [%]	95	95	95
Humedad [%]	7.3	7.3	25
Contenido de arcilla [%]	3.2	3.2	6
Aumento deseado [%]	20	20	20

Tabla 9 Resultados de la versión Microsoft Excel® y Matlab®.

Ejemplo 1				
Trituradora	APC [Plg]	Índice de idoneidad	Máximo aumento de alimentación	S( T + R )
Faco, 3240	4.0	2.22	58%	140.5
Ejemplo 2				
Trituradora	APC [Plg]	Índice de idoneidad	Máximo aumento de alimentación	S( T + R )
Faco, 3240	7.3	2.12	5%	340.1
TEREX, JW42	5.7	3.38	32%	280.9
The NILE, PE800x1060	4.5	2.70	62%	250.0
The NILE, PE900x1200	4.1	2.46	105%	250.0
CEC, MS-3248	4.2	2.52	101%	250.0
Ejemplo 3				
Trituradora	APC [Plg]	Índice de idoneidad	Máximo aumento de alimentación	S( T + R )
Faco, 4852	8.2	1.90	21%	419.4

La Figura 17 muestra una captura de pantalla con los resultados obtenidos por ambas aplicaciones, tomando las condiciones de proceso del Ejemplo 2 de la Tabla 9 (a) y (b). En la captura de pantalla se visualizan los resultados para la trituradora mejor calificada.

Figura 16 (a) Interfaz de resultado del Ejemplo 2 para la versión Microsoft Excel®.

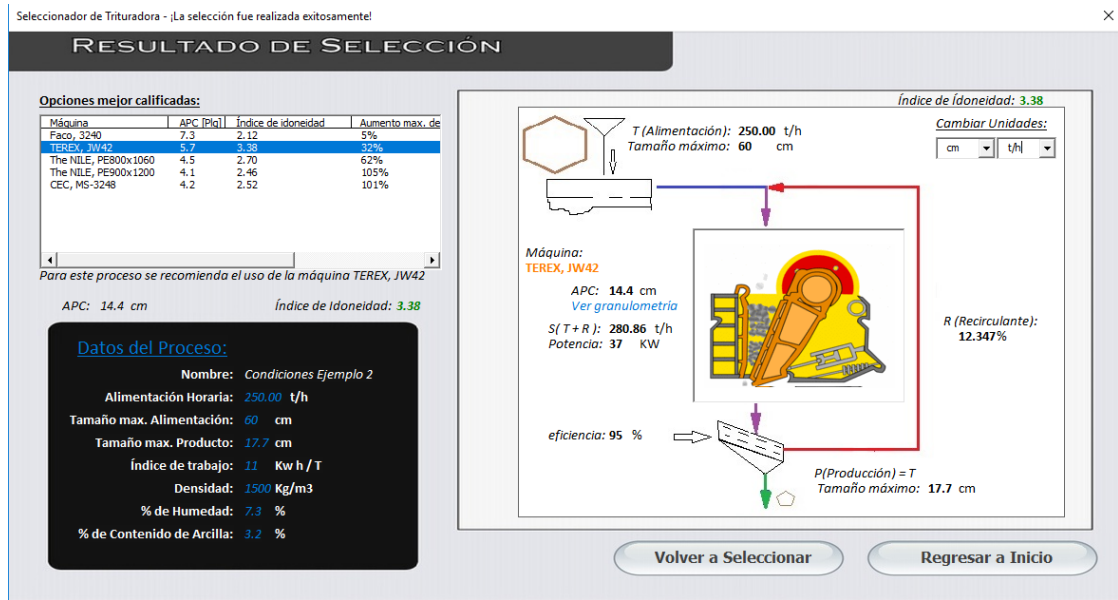
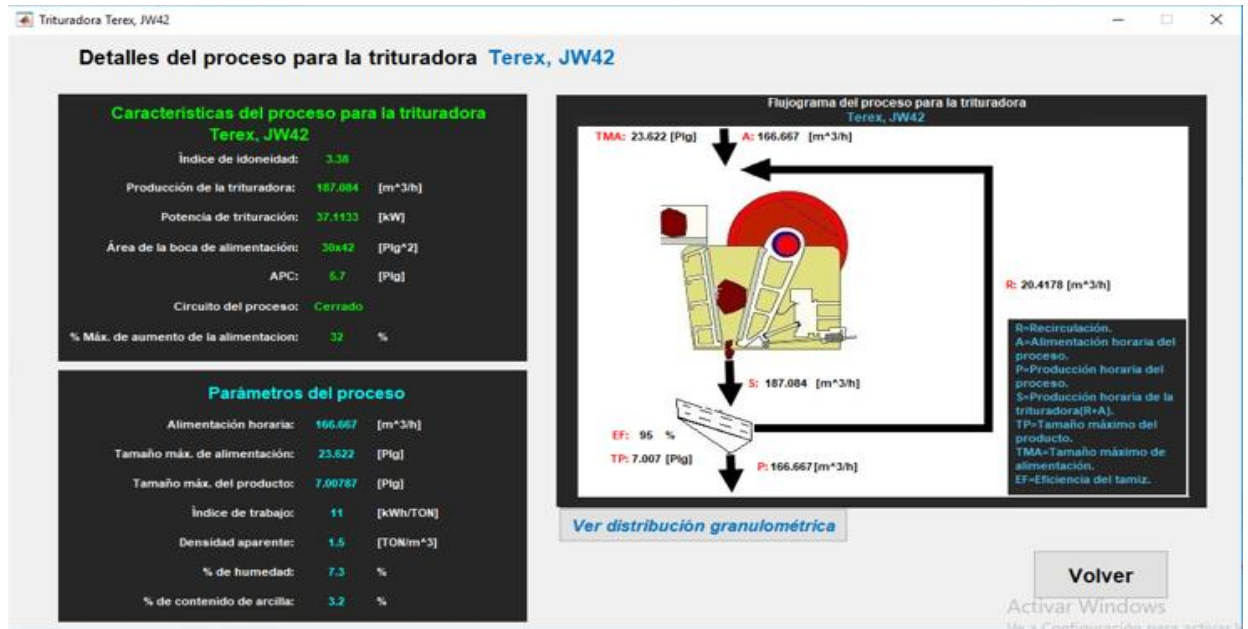


Figura 16 (b) Interfaz de resultado del Ejemplo 2 para la versión Matlab®



### 3.5.2 Interpretación de variables operativas. Es importante reconocer de qué

forma afectan las variables de proceso y operación al cumplimiento de capacidad de las trituradoras y al índice de idoneidad.

**3.5.2.1 Relación de reducción de tamaño.** Esta es una de las variables de operación que más afecta la selección, puesto que, las máquinas trituradoras están diseñadas para aceptar una cierta cantidad de material según las condiciones de

tamaño inicial y final; en otras palabras, la combinación entre las condiciones de tamaño de alimentación, tamaño de producto y alimentación horaria afectan de manera radical el funcionamiento de una trituradora. Por lo general, procesos de conminución con porcentajes de reducción grandes, requieren de trituradoras con mayor capacidad; de tal forma, para optimizar el aprovechamiento de la trituradora se recomienda configurar una relación de reducción de tamaño acorde a la cantidad de material a procesar. Un ejemplo de esto son los resultados de las condiciones 1 y 2 de la Tabla 9, en el cual se modifica la alimentación horaria para que sea más acorde con la relación de reducción de tamaño en la condición 2, obteniendo como resultado trituradoras con mayor índice de idoneidad.

**3.5.2.2 Factores de operación.** Como se menciona anteriormente, éstos factores afectan la capacidad de las trituradoras, por lo tanto, también afectan su funcionamiento. Puesto que los factores dependen de muchas variables; como el porcentaje de humedad, contenido de arcilla, APC, etc.; es difícil predecir qué tanto afectarán al aprovechamiento de la trituradora. Comparando los ejemplos 2 y 3 de la Tabla 9 se puede notar un gran desajuste en el porcentaje de humedad y el índice de trabajo de ambos ejemplos, lo que da como resultado una selección y evaluación diferente en los dos ejemplos, siendo el ejemplo 3 el peor calificado. En general, valores fuera de los rangos normales de las variables de operación, como, por ejemplo; porcentaje de humedad > 10 %, tamaño de alimentación muy pequeño con respecto al tamaño de la apertura de entrada, etc.; provocan un mal aprovechamiento de la capacidad de la máquina.

## 4. MÉTODO DE EVALUACIÓN DE IDONEIDAD

Para escoger la trituradora de mandíbulas adecuada de un proceso, se desarrolló un sistema de evaluación representado por un índice de idoneidad, el cual indica la conveniencia del uso de una trituradora de mandíbulas para un proceso determinado. El valor del índice de idoneidad es arbitrario, y puede tomar valores entre 0 y 5, siendo 0 la calificación más baja y 5 la más alta, para determinar el valor del índice se tiene en cuenta un criterio relativo al aumento máximo de la alimentación horaria y otro criterio relativo al consumo energético del equipo.

### 4.1 CRITERIO DEL AUMENTO MÁXIMO DE LA ALIMENTACIÓN HORARIA.

Con este criterio se evalúa la capacidad que tiene una trituradora de recibir un aumento de alimentación horaria y cumplir con los requerimientos del usuario.

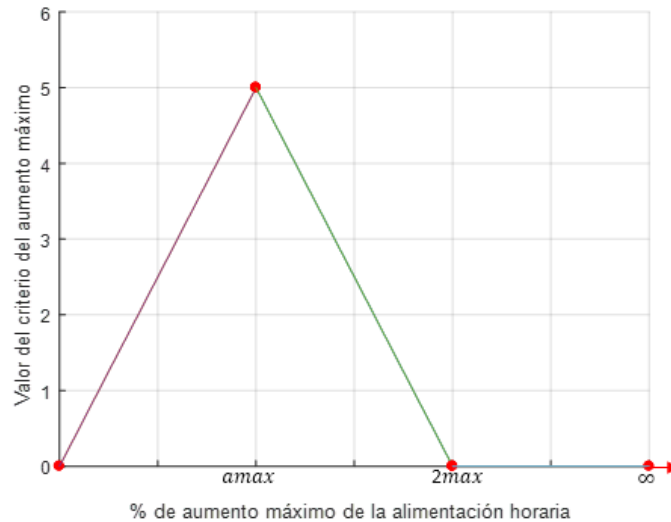
El procedimiento para desarrollar la evaluación de este criterio consiste en encontrar el aumento máximo de alimentación horaria de las trituradoras de mandíbulas que hayan cumplido con las condiciones de la capacidad de procesamiento horario y el tamaño máximo de alimentación, luego, se calcula el valor del índice de este criterio; el cual depende de la proyección de aumento de producción del usuario a corto o mediano plazo. El usuario puede representar su proyección de aumento de producción como porcentaje e ingresar el dato a través de la interfaz de la aplicación. La ecuación (9) es utilizada para el cálculo del índice del criterio de aumento de alimentación horaria.

$$Cau = \begin{cases} mx, & x < amax \\ -mx + b. & amax \leq x \leq 2amax \\ 0 & 2amax > x \end{cases} \quad (9)$$

Donde amax representa el % de aumento ingresado, m y b representan la pendiente y la intersección de una recta que depende del % de aumento ingresado, x representa el % de aumento de una trituradora, y Cau representa el valor del índice

del criterio de aumento máximo de alimentación horaria. En la figura 17 se muestra de manera gráfica la ecuación (9).

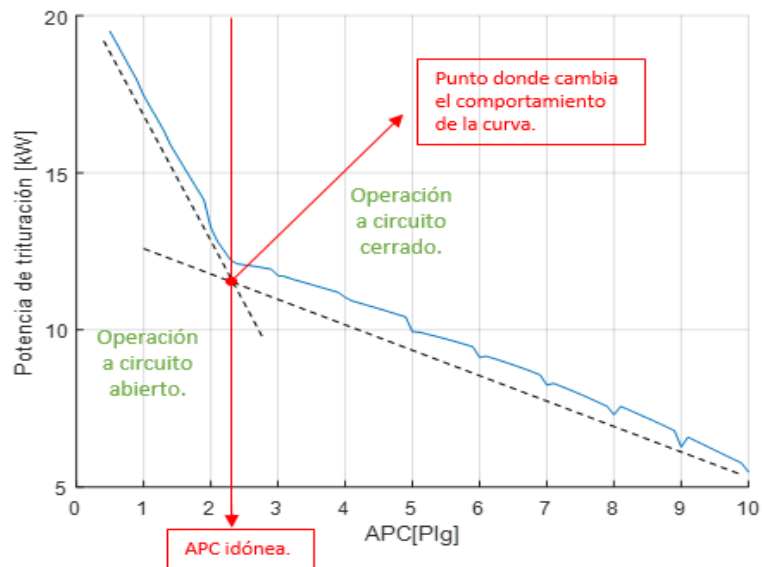
Figura 17. Gráfica de la ecuación del criterio del aumento máximo de la alimentación horaria.



#### 4.2 CRITERIO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DEL EQUIPO.

Este criterio se fundamenta en la teoría de la ley de Bond, mediante la cual se establece una relación entre la potencia de trituración y la APC. En la figura 18 se ilustra un ejemplo del cálculo de la potencia de trituración con un índice de trabajo de 10 [kWh/TON] y un F80 de 18 [Plg], variando la APC. Este ejemplo ayuda a entender el criterio, puesto que se muestra el cambio de comportamiento de la curva en la APC donde el sistema cambia de abierto (sin recirculación) a cerrado (con recirculación). Este cambio de comportamiento en la curva se explica por el aumento en la masa que la trituradora debe procesar horariamente, producto de la recirculación, lo que ocasiona una disminución en la razón de cambio de la potencia de trituración.

Figura 18. Ejemplo de la relación entre la potencia de trituración y la APC.



Cuando el sistema es cerrado, el cálculo del consumo energético de trituración por medio de la ley de Bond tiende a ser menor que el consumo real; producto del cambio en la distribución granulométrica del material que entra a la trituradora, puesto que los gruesos rechazados en el producto entran a ser parte de la alimentación; modificando así la energía necesaria de conminución. Además de esto, se necesitan otros aportes energéticos, tal como el gasto energético de las bandas transportadoras, por lo tanto; se concluye que el consumo energético real del sistema de las APC en esta zona de operación a circuito cerrado será mayor que el calculado con la ecuación de Bond. Teniendo en cuenta, que el valor de la APC donde se cambia el sistema de abierto a cerrado es el punto de menor consumo energético conocido, éste se toma como el valor de la APC idónea. En el caso de un proceso que tenga recirculación en todas las APC de la base de datos, se toma 0.5 [Plg] como el valor idóneo, el cual es el menor valor de APC.

Una vez determinada la APC idónea, se halla el valor más cercano a ésta para cada trituradora que haya cumplido con las condiciones de capacidad de procesamiento horario y de tamaño máximo de alimentación; la cual se configura como la APC de operación.

Para calcular el valor del criterio de la APC se toma el 5 como valor máximo que corresponde a la APC idónea del proceso. A cada trituradora se le restan 0.1 unidades del valor máximo por cada 0.1 [Plg] que tengan de diferencia la APC idónea y la APC de la trituradora, el resultado de esta resta para cada trituradora corresponde al valor de su índice de criterio de la APC.

### **4.3 ÍNDICE DE IDONEIDAD.**

El cálculo del índice de idoneidad consiste en una ecuación que modela un promedio ponderado, donde el criterio de aumento máximo de alimentación horaria equivale al 40% y el criterio de la APC equivale al 60%. En la ecuación (10) se muestra la forma de calcular el índice de idoneidad.

$$\text{índice de idoneidad} = (Cau * 0.4) + (CAPC * 0.6) \quad (10)$$

Donde, Cau representa el índice del criterio de aumento máximo de alimentación horaria, y CAPC representa el índice del criterio de la APC.

### **4.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.**

Es importante mencionar que el diseño de este sistema de evaluación de idoneidad es en parte subjetivo, puesto que las necesidades y preferencias de los usuarios son generalmente variables, de tal forma que, obtener y analizar de forma estadística toda esa información y resumirla en un solo sistema resulta ser una tarea compleja. Sin embargo, la implementación de este sistema de evaluación ofrece al usuario una referencia de la idoneidad de su trituradora con respecto al catálogo que maneja la aplicación, lo cual le permite detectar problemas de diseño en el proceso de conminución y optimizar la producción de su planta.

## 5. CONCLUSIONES

Se realizó una base de datos, con las distribuciones granulométricas para minerales con diferente índice de trabajo, usando los límites de capacidad de procesamiento horario de algunas trituradoras comerciales y con las dimensiones de éstas. El manejo de la base de datos estuvo regido por el concepto estadístico de la regresión polinomial, que optimizo el proceso de la selección de una trituradora de forma computacional.

Se desarrolló un código en Matlab ® y en Microsoft Excel ®, que relaciona los parámetros involucrados en cada selección y la base de datos, para obtener los resultados de la selección de una trituradora en dicho caso. También se diseñó una interfaz gráfica en Matlab ® y en Microsoft Excel ®, que permite digitar los parámetros que regulan el proceso de la selección de la trituradora de mandíbulas, y mostrar los resultados de ésta. El diseño de las interfaces en los dos programas tiene algunas diferencias, puesto que las herramientas que ofrecen para realizar alguna interfaz son distintas.

Los resultados obtenidos de la selección en la aplicación desarrollada en Matlab ® y en Microsoft Excel ®, muestran las trituradoras de mandíbulas que cumplen con todos los parámetros ingresados, y cuál es la mejor para el proceso teniendo en cuenta el índice de idoneidad arbitrario.

## **6. RECOMENDACIONES**

Para futuras investigaciones que se basen en el presente trabajo ó tenga como finalidad su mejoramiento, se recomienda de manera general evaluar la conveniencia de utilizar nuevas plataformas de desarrollo de software como Visual Studio C++, JavaScript, etc. con la finalidad de aumentar las herramientas disponibles para el desarrollo de la aplicación. También es recomendable la inclusión de catálogos más extensos y con información más detallada del funcionamiento de sus trituradoras para ofrecer mayor cobertura. Por último, se recomienda realizar pruebas de utilización de la aplicación para detectar y depurar posibles errores en el diseño y desarrollo de la aplicación.

## BIBIOGRAFÍA

ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, Beatriz. Análisis de la influencia de la distribución de tamaños de partícula en la determinación de consumos energéticos en molienda mediante el método de bond. Oviedo: Universidad de Oviedo. Dpto. de explotación y prospección de minas, 2005, 424 p.

BRAVO TRINIDAD José Luis; CANTÓN PIRE Alicia; SOUTO IGLESIAS Antonio, Curso básico de programación en Matlab. Madrid: Editorial Tébar, S. L., 2013. 227 p.

BUSH, P.D.; GAULT, G.A.; LESS, M.J.; MORRISON, R.D.; RAO, T.C.; STANLEY, G.G.; WALTER, G.W.; WHITEN, W. J. y WIEGEL, R.L. Mineral crushing and grinding circuits. New York: Julius Kruttschnitt Mineral Research Center, 1977. 342 p.

CENTERS FOR MEDICARE AND MEDICAIDS SERVICES. Selecting a development approach. [En línea] Baltimore, 2005. 10 p. (Recuperado en 9 Julio 2018) Disponible en: <https://www.cms.gov/Research-Statistics-Data-and-Systems/CMS-Information-Technology/XLC/Downloads/SelectingDevelopmentApproach.pdf>

CURRIE, John M. Unit operations in mineral processing. Burnaby: British Columbia Institute of Technology, 1973. 338 p.

FLORES CASTILLO, José Mauricio. MACROS Automatiza tu trabajo - Excel 2016. Ciudad de México: Alfaomega Grupo Editor, 2016. 279 p.

ORELLANA ARAYA, Roberto Patricio. Modelo, control y simulador de planta de molienda semiautógena y molienda secundaria. Tesis de pregrado en ingeniería

civil. Santiago: Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 2010, 214p.

ORTIZ ORTEGA, Edgar Jose y TIRADO ABRIL, Ronald Julián. Diseño y construcción de una trituradora de mandíbulas de excéntrica elevada. Tesis de pregrado en ingeniería mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ciencias físico-mecánicas, 2005, 147p.

PRYOR, E. J. Mineral Processing, third edition. London: Applied Science Publishers Limited, 1965. 844 p. ISBN: 978-94-010-2943-8.

SOLANILLA B, Jorge H. Gerencia de equipos para obras civiles y minería. 1 ed. Bogotá, 2003. 364 p.

TAGGART, Arthur F. Elementos de preparación de minerales. 1 ed. New York: Universidad de Columbia, 1966. 648 p.

VÁSQUEZ ESCAMILLA, Jimena y VERA PEÑA, Yazmin. Propuesta de diseño de una herramienta software para el diseño de plantas de procesamiento de minerales y desarrollo de un primer prototipo aplicado a un circuito de extracción de oro. Tesis de pregrado en ingeniería de sistemas e ingeniería metalúrgica. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánica y Facultad de ingenierías físico-químicas, 2003. 156 p.