



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**EFFECTO DEL TRATAMIENTO CON MICROONDAS EN LA  
MOLIENDA EN SECO**

**Autor**

**Sindy Paola Llano Gómez**

**Universidad de Antioquia**

**Facultad de Ingeniería**

**Departamento de Ingeniería Química**

**Medellín, Colombia**

**2019**

**EFECTO DEL TRATAMIENTO CON MICROONDAS EN LA MOLIENDA EN  
SECO**

**Sindy Paola Llano Gómez**  
**Estudiante de Ingeniería Química**

**Informe final proyecto de investigación**  
**Requisito para optar al título de Ingeniera Química**

**Asesora:**

**Adriana Marcela Osorio Correa**  
**Doctora en Ingeniería**

**Universidad de Antioquia**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Departamento de Ingeniería Química**  
**Medellín, Colombia**  
**2019**

*A mi pilar más fuerte,  
mi familia*

## **Agradecimientos**

Al hogar que me formó como profesional, persona íntegra y ética, mi alma mater, la Universidad de Antioquia.

A los profesores de la facultad de ingeniería y del departamento de Ingeniería Química, en especial a la profesora Adriana Osorio Correa, por enseñarme con la actitud, el amor, el gesto y la palabra.

A mi compañera Laura Colorado, por inculcarme pasión y motivación, por orientarme en este proceso.

A mis amigos, por su apoyo incondicional, por aprender conmigo en una mesa, en la calle y en salón de clase.

A mi familia, son la base de esto, cuando pude fracasar, no lo hice, ellos eran mi soporte, hoy lo logramos.

## Tabla de contenido

1.	Resumen.....	9
2.	Introducción .....	10
3.	Objetivos .....	11
3.1	Objetivo General.....	11
3.2	Objetivos específicos .....	11
4.	Marco Teórico.....	12
4.1.	Molino de Bolas .....	12
4.2.	Circuitos de molienda.....	14
4.3.	Tamaño de partícula .....	16
4.4.	Conceptos básicos de mecánica de fractura .....	17
4.5.	Consumo de energía .....	18
4.6.	Microondas.....	18
4.7.	Estudios previos del pretratamiento de microondas en la molienda .....	20
4.8.	Coque mineral .....	22
5.	Metodología .....	24
5.1	Revisión y análisis bibliográfico .....	24
5.2	Selección y caracterización del material .....	24
5.3	Determinación de condiciones de operación.....	25
5.4	Preparación de muestras .....	26
5.5	Ensayos con microondas .....	26
5.6.	Ensayos de Molienda .....	27
6.	Resultados .....	29
6.1	Selección y caracterización del material .....	29
6.2	Determinación de condiciones de operación.....	31
6.3	Ensayos con microondas .....	33
6.4.	Ensayos de Molienda .....	35
7.	Conclusiones .....	45
8.	Referencias Bibliográficas .....	46

## Lista de Figuras

Figura 1: Zonas al interior de molino de bolas.....	12
Figura 2: Grado de llenado al interior del molino .....	13
Figura 3: Circuito Abierto .....	15
Figura 4: Distribución de temperatura con calentamiento de microondas Vs Convencional .	19
Figura 5: Tangente de perdidas dieléctricas de materiales de carbono. ....	23
Figura 6: Coque metalúrgico sin pretratamiento y sin molienda .....	26
Figura 7: Serie de tamices .....	28
Figura 8: Sistema de molienda .....	32
Figura 9: Diagrama de caja y bigotes.....	33
Figura 10: Esquema del pretratamiento .....	44

## Lista de Tablas

Tabla 1: Temperatura alcanzada después de pretratamiento.....	20
Tabla 2: Tiempos evaluados para diseño de experimentos .....	25
Tabla 3: Características de Molino de Bolas.....	27
Tabla 4: Tiempos evaluados en la molienda .....	28
Tabla 5: Caracterización del alimento por FRX.....	29
Tabla 6: Distribución granulométrica de material sin pretratamiento ni molienda.....	29
Tabla 7: Resultados del análisis estadístico .....	32
Tabla 8: Temperatura y energía usada en la irradiación .....	34
Tabla 9: Serie de tamices .....	35
Tabla 10: Granulometría Alimentación.....	36
Tabla 11: Granulometría muestra 5 segundos de exposición.....	37
Tabla 12: Granulometría muestra 10 segundos de exposición.....	39
Tabla 13: Granulometría muestra 15 segundos de exposición.....	40
Tabla 14: Resultado del $P_{80}$ .....	41
Tabla 15: Porcentaje de disminución de partícula .....	42
Tabla 16: Análisis FRX- muestra a los 15 segundos .....	42

## Lista de Gráficos

Gráfico 1: Histograma granulometría inicial .....	30
Gráfico 2: Método de Schumann muestra inicial.....	31
Gráfico 3: Cernido Vs Abertura – Alimentación .....	36
Gráfico 4: Método de Schumann para alimentación.....	37
Gráfico 5: Cernido Vs Abertura – 5 segundos .....	38
Gráfico 6: Método de Schumann para 5 segundos.....	38
Gráfico 7: Cernido Vs Abertura – 10 segundos .....	39
Gráfico 8: Método de Schumann para 10 segundos.....	40
Gráfico 9: Cernido Vs Abertura – 15 segundos .....	41
Gráfico 10: Método de Schumann para 15 segundos.....	41

## **1. Resumen**

La molienda de coque representa para la industria siderúrgica, aproximadamente un 70% del valor de los costos en materias primas para el acero. Con el objetivo de reducir estos valores, se han implementado diferentes alternativas para disminuir los requerimientos energéticos en esta etapa del proceso, la radiación por microondas es uno de ellos, puesto que, mediante el mecanismo de transferencia de calor, permite generar micro fallas en la estructura del material, que posteriormente favorezcan una fractura más eficiente. De acuerdo con la importancia del coque metalúrgico en la industria de la construcción y a la necesidad existente de implementar un proceso más eficiente con menores requerimientos energéticos, se propuso la evaluación de la incorporación de las microondas como tratamiento previo a la molienda con molino de bolas del coque metalúrgico y su influencia en la moliendabilidad del material. Para la determinación de la experimentación, con el fin de encontrar condiciones adecuadas, para lo cual se realizó una irradiación del material a una potencia de 1600 W de 5, 10, 15 segundos y posteriormente molienda de 2 minutos para cada uno de las muestras, se encontró que el  $P_{80}$  de la alimentación con respecto a las muestras irradiadas son reducidas en un 15.10%, 15.274 % y 16.22% respectivamente representando de esta forma la absorción de las microondas por el coque, con un consumo de energía del microondas de 8.78, 17.56 y 26.35 kWh /Ton respectivamente lo que permitió alcanzar fracturas en el límite del grano en tiempos pequeños y a su vez una reducción significativa en el tamaño de partícula.

### **Palabras clave:**

Molienda, Molino de bolas, Coque, Moliendabilidad, granulometría.

## 2. Introducción

El uso de operaciones con sólidos a escala industrial se ha incrementado en los últimos años puesto que en el proceso productivo existe por lo menos un proceso que involucra el manejo de sólidos, especialmente operaciones que implican la reducción de tamaño, siendo esta la que consume entre el 50 y 70% de la energía de todo el proceso (Walkiewicz, Clark, & McGill, 1991, p. 239). Por lo tanto, a nivel industrial es necesario un proceso que implique una alta eficiencia, por ello la mejora en la tecnología o el uso de alternativas no convencionales puede dar lugar a ahorros económicos.

En la reducción de tamaño, los circuitos de molienda consisten en transformar un material reduciendo el tamaño de las partículas sin alterar su naturaleza a través de mecanismos como el impacto, la compresión o la abrasión. En la molienda seca se utiliza materiales con un bajo contenido de humedad lo que disminuye el gasto de procesos como el filtrado y el secado, pero esto sigue generando un alto costo a nivel energético, por ello para estudiar una alternativa más viable es importante reconocer los factores que influyen en la eficiencia de este tipo circuitos y así a partir de ellos mejorar el proceso. En un molino de bolas los factores que influyen en la eficiencia del proceso, dependen de las condiciones de operación y de diseño, entre los que se encuentran, la geometría del molino (diámetro, longitud, etc.), la carga, el tamaño de partícula, razón de recirculación, eficiencia del clasificador y tiempos de residencia (Austin, 1994, Chapter 5). Otro factor de gran relevancia para la ruptura del material, es la velocidad específica de fractura, es usual en los molinos de bolas encontrar diversos mecanismos de fractura como desintegración, astillamiento y abrasión; así esta velocidad específica de ruptura será el efecto neto de la suma de estos mecanismos (Austin, 1994, Chapter 5).

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, en este proyecto se planteó utilizar el calentamiento por radiación electromagnética usando microondas para la inducción de fracturas alrededor de los límites del grano como consecuencia de la disipación de calor y de la expansión térmica de los materiales, partiendo de la incidencia que tiene el tiempo de exposición sobre el tamaño de partícula en el  $P_{80}$  (Tamaño por el que pasa el 80% del producto de la molienda), de un material comúnmente utilizado en la industria, y así evaluar la viabilidad de la tecnología en la energía requerida para el proceso de reducción de tamaño.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo General**

- ✓ Determinar el efecto del tratamiento con microondas en la molienda en seco de un material de uso industrial.

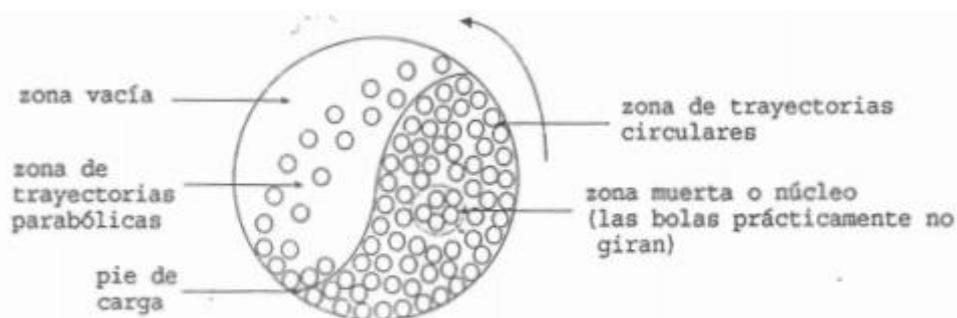
#### **3.2 Objetivos específicos**

- ✓ Identificar y caracterizar el material en términos de sus propiedades individuales y como masa de partículas.
- ✓ Identificar condiciones de operación para el uso de las microondas.
- ✓ Analizar la incidencia del tratamiento con microondas en el  $P_{80}$  a partir de la mejor condición operacional hallada con el material.
- ✓ Establecer las ventajas de la aplicación de un tratamiento en el proceso de molienda.

## 4. Marco Teórico

### 4.1. Molino de Bolas

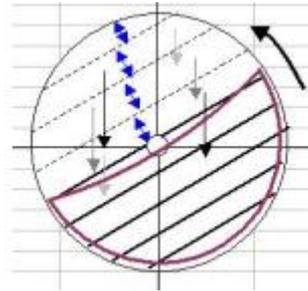
Un molino de bolas transforma partículas de tamaño grande en partículas pequeñas a través de elementos moledores, donde es importante considerar factores físicos y condiciones de operación como el diámetro del molino, la velocidad y la potencia del molino. La velocidad crítica del molino es aquella a la cual las bolas comienzan a centrifugar en las paredes del molino en el cual se considera el movimiento del material al interior de este. Esta velocidad puede ocasionar que las partículas del material entren o no al interior del molino, donde se logran evidenciar diferentes zonas de rotación, abrasión, impacto, muerta etc., las cuales dependen directamente de la fracción de velocidad crítica bajo la cual se esté operando, es por esto que con una velocidad baja las bolas presentan acción de volteo suave y el material tiende a deslizarse hacia atrás, pero a medida que se aumenta la velocidad, la acción de volteo aumenta causando que el material se encuentre en la superficie (Austin, 1994, Chapter 5). De acuerdo con lo anterior la potencia que se requiere en el proceso de molienda pasa a través de un máximo cuando la velocidad de rotación aumenta, es decir, el máximo consumo de potencia se obtiene cuando se opera a velocidades máximas (Austin, 1994, Chapter 5).



**Figura 1:** Zonas al interior de molino de bolas

En la figura 1 se evidencia las zonas de baja y alta actividad dentro del molino de bolas, donde se tienen diferentes zonas de acuerdo con el grado de llenado, se considera que hay elementos que influyen significativamente en este, como la fracción de llenado, la humedad y el tipo de material (relación agua/sólido en los productos de la alimentación).

La fracción de llenado, es la proporción del volumen interno del molino que ocupa la carga y elementos moledores, es decir, la fracción del molino lleno por el lecho de bolas en el reposo (Austin, 1994).



**Figura 2:** Grado de llenado al interior del molino (Ii, Molienda, & De, n.d.)

De acuerdo con lo anterior la fracción de llenado se obtiene a partir de los siguientes modelos de cálculos:

$$J = \frac{\text{Volumen real de las bolas/ Fracción en volumen en el lecho}}{\text{Volumen del molindo}} \quad \text{Ec. 1}$$

$$J = \frac{\text{Masa de bolas} \times \text{Densidad de bolas}}{\text{Volumen del molino}} \times \left( \frac{1.0}{1 - \text{porosidad del lecho}} \right) \quad \text{Ec. 2}$$

Para bolas de acero, la porosidad formal es de 0.4, se obtiene que la expresión a la fracción de llenado es:

$$J = \frac{\text{Masa de bolas} / \text{Densidad de bolas}}{\text{Volumen del molino}} \times \left( \frac{1.0}{0.6} \right) \quad \text{Ec. 3}$$

Así, la carga de polvo de un molino se expresa como:

$$f_c = \frac{\text{Masa de polvo} / \text{Densidad de bolas}}{\text{Volumen del molino}} \times \left( \frac{1.0}{0.6} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

Y para relacionar la carga de polvo con la carga de bolas se usa la expresión U, la cual expresa los huecos entre las bolas en reposo ocupada por el lecho de partículas (Austin, 1994).

$$U = \frac{\text{Volumen del lecho de partículas}}{\text{Volumen de huecos en el lecho de bolas}} \quad \text{Ec. 5}$$

Realizando procedimientos algebraicos con las Ec 3 a Ec 5, se tiene que la expresión para U es:

$$U = \frac{f_c}{0.4 J}$$

Ec. 6

De acuerdo con las expresiones matemáticas anteriores es posible encontrar el volumen de llenado, el volumen ocupado por el polvo, número de bolas, el peso total de material y de bolas al interior del molino.

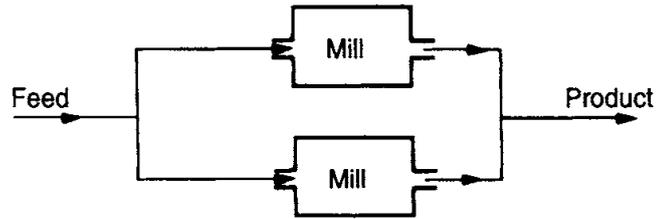
## 4.2. Circuitos de molienda

Para el caso de circuitos de molienda, el alimento puede ser húmedo o seco, dependiendo de los procesos subsecuentes y la naturaleza del proceso del producto esperado. La molienda en seco es necesaria cuando se trata de materiales que pueden sufrir cambios físicos o químicos debido a la adición de agua. La molienda en húmeda se utiliza generalmente en operaciones de procesamiento mineral debido a las condiciones económicas de la operación (Wills, 2011).

Las ventajas de la molienda en húmeda:

- ✓ Consume menos potencia por tonelada de producto
- ✓ Tiene una mayor capacidad por volumen unitario de molino
- ✓ Hace posible el uso de tamizado en húmedo o clasificación para control de producto
- ✓ Elimina el problema de la generación de material particulado
- ✓ Hace posible el uso de métodos de manejo simple y de transporte tales como bombas, tuberías y lavadores.
- ✓ Control del circuito de molienda

Los circuitos pueden ser abiertos o cerrados. En un circuito abierto el material es alimentado al molino a una razón de flujo calculada para producir el producto deseado en un solo paso. Se utiliza poco debido al poco control sobre la distribución de partícula del producto. En este caso, el flujo de alimento debe ser lo suficientemente bajo como para garantizar el tiempo de residencia en el molino. Como resultado de ello, muchas partículas son sobre procesadas, lo cual consume energía innecesariamente y el producto subsecuente puede ser difícil de tratar (Wills, 2011). Un diagrama de circuito abierto puede visualizarse en la Figura siguiente.



**Figura 3:** Circuito Abierto

En la operación de circuito cerrado, no se efectúa un gran esfuerzo para llegar a la reducción total en cuanto a tamaño de partícula en un solo paso. Por el contrario, el consumo se centra en la remoción de material tan pronto éste ha alcanzado el tamaño requerido. De forma general, al trabajar con circuitos cerrados, se incrementa la capacidad en un 35% con respecto al circuito abierto (Wills, 2011).

En el control del circuito, el propósito de la molienda es reducir el tamaño de partícula hasta que la liberación económica del mineral toma lugar. Por tanto, es esencial que el molino no únicamente reciba un flujo de alimento específico por día, sino que también rinda un producto cuyo tamaño de partícula sea controlable y conocido. Las principales variables que pueden afectar el control de este proceso son:

- ✓ Cambios en la razón de alimentación y la carga circulante
- ✓ Distribución de partícula
- ✓ Dureza del mineral
- ✓ Interrupciones en la operación

Es importante resaltar las características de la molienda en seco y húmeda, donde la molienda en húmedo, los sólidos son acarreados con un lodo, usualmente con la inclusión de surfactantes conocidos como aditivos de molienda que modifican la viscosidad del lodo y previenen la aglomeración de las partículas. Las partículas más pequeñas pueden formarse con mayor facilidad en la molienda en húmedo que en la molienda en seco. Sin embargo, el trabajo requerido en molienda húmeda es menor que el necesario en molienda en seco para el mismo cambio de tamaño de partícula. Para la molienda en húmedo, el índice de trabajo es normalmente de 75% del índice de trabajo para molienda en seco.

La molienda en húmedo ocasiona menor formación de material particulado que el producido por molienda en seco. En algunos casos, el uso de equipos de limpieza con gas

puede evitarse, resultando en menores costos de operación, además tiende a causar mayor velocidad de corrosión en los equipos usados. La abrasión es otro componente muy importante. Debido a estas circunstancias, se hace necesario un plan de mantenimiento más detallado.

Del mismo modo, la molienda en seco será más conveniente en aquellos casos donde los procesos subsecuentes requieran condiciones especiales de producto. Las principales ventajas de este tipo de procesamiento son (Srl & Dallari, n.d.).

- ✓ Una reducción drástica en el costo de las materias primas
- ✓ Ahorro considerable en consumo energético, tanto eléctrico como térmico.
- ✓ Bajas emisiones de gases procedentes de equipos de secado.
- ✓ Menor consumo de agua.
- ✓ Eliminación de los costos asociados al manejo de lodos,
- ✓ Recuperación total de residuos del producto.
- ✓ Reducción de estructuras y espacio necesario para instalación.

Para la molienda en seco, se tiende a tener un circuito abierto, pero la molienda húmeda en molino de bolas produce capacidades superiores que la molienda en seco, lo cual indica que la capacidad de la molienda húmeda en escala industrial es 1.3 veces aquella para la molienda seca. (Austin, 1994).

Pero estas características y la eficiencia de la molienda dependerán del medio de la molienda, donde una carga bien distribuida, el tiempo de residencia. La selección de molienda sea húmeda o seca, se determina principalmente por los procesos requeridos de forma subsecuente a ésta. Si los sólidos están inicialmente húmedos o si el líquido usado para moler es compatible con las operaciones aguas abajo del proceso entonces se prefiere la molienda en húmedo. Si se introducen aditivos o surfactantes entonces deberán ser compatibles de igual modo con los procesos aguas abajo (Equipment, n.d.).

### **4.3. Tamaño de partícula**

El tamaño de partícula debe ser el adecuado de acuerdo con el diámetro del molino y el tamaño de los elementos moledores, de esta manera las partículas más pequeñas son más

fuertes por el contenido de fallas Griffith en el cual una grieta existente en el material permanece estable o se prolonga en algunas condiciones de tensión. De tal forma, el tamaño de partícula se ve afectado por condiciones geométricas del molino y a su vez afecta la velocidad específica de fractura; cuando las partículas son muy grandes para ser atrapadas y fracturadas por las bolas, la velocidad de fractura suele ser lenta, en cambio, cuando los tamaños son pequeños existe una fractura de primer orden (Elastic & Mechanics, 1957).

Así el tamaño de la partícula se reduce de acuerdo con los diferentes mecanismos de fractura, en especial abrasión e impacto y este suele realizarse por vía húmeda o vía seca y el resultado de efectuar una reducción de tamaño por un molino con cuerpos demoledores como bolas tiene como consecuencia un resultado en tamaño más fino, puesto que estas tienen una mayor superficie específica que otro tipo de cuerpos demoledores.

#### **4.4. Conceptos básicos de mecánica de fractura**

Una grieta en un sólido puede ser sometida a tensión en formas diferentes, en modo de apertura, modo deslizante o modo de rotura transversal, estos se basan en la aplicación de las tensiones normales o transversales en el sólido de tal forma que se produzca desplazamientos longitudinales en las superficies de los planos, pero se debe definir si la grieta ya existente en el sólido permanecerá estable o por el contrario se prolongará bajo unas condiciones de tensión (Elastic & Mechanics, 1957).

La tensión de fractura de Griffith se basa en términos de balance de energía, en la cual no podría utilizarse la tensión como criterio de la propagación de grietas sino en términos de balance de energía. A medida que la grieta comienza a incrementarse, entra en un estado de equilibrio inestable bajo las tensiones aplicadas y así el sistema transfiere energía de la zona no fracturada a la zona fracturada (Elastic & Mechanics, 1957). De acuerdo con lo anterior se tiene que la fractura resulta de un proceso de conversión de energía, que depende tanto de la tensión aplicada y el tamaño de la grieta.

Así, la extensión de la grieta debido a disipación de calor se obtiene en términos de la energía disponible que es suministrada por las fuerzas externas y la energía que requiere la grieta, es decir, para que la grieta ya existente

se propague se requiere que la energía disponible sea igual a la energía requerida para su propagación (Elastic & Mechanics, 1957).

#### 4.5. Consumo de energía

El consumo energético en los procesos de trituración, molienda/clasificación y remolienda, se encuentra estrechamente relacionado con el grado de reducción de tamaño alcanzado por las partículas en la correspondiente etapa de conminución, aun cuando la eficiencia energética de estos procesos rara vez supera el 10% del total de energía mecánica suministrada a los mismos (Gutiérrez y Sepúlveda, 1986). Lo anterior pone en relieve la necesidad de establecer nuevas tecnologías o el uso de alternativas no convencionales que puede dar lugar a ahorros energéticos y económicos considerando la eficiencia energética de los respectivos equipos, además de facilitar su propia elección y proyectar su correcto dimensionamiento a escala industrial.

Este se puede ver reflejado en términos de la cantidad que se carga al MW (Ruisánchez, Arenillas, Juárez-Pérez, & Menéndez, 2012), con el siguiente modelo de cálculo:

$$E\left(\frac{J}{g}\right) = \frac{P_{MW} \times t}{w} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$P_{MW}$  = Potencia del microondas.

$t$  = Tiempo de irradiación

$w$  = Carga de material al microondas.

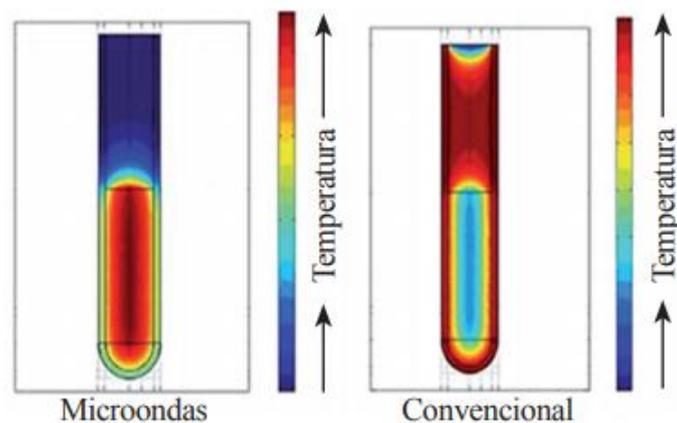
#### 4.6. Microondas

Desde hace algunas décadas se ha aumentado la necesidad de mejorar los procesos a partir de los procesamientos térmicos, esto con el fin de mejorar la eficiencia de las etapas de producción, reduciendo tiempos y el consumo de energía. Por ello se comienza a implementar metodologías no convencionales, puesto que los mecanismos rápidos de calor en especial para sólidos no se logran con la conducción de calor convencional, por ello el uso de microondas no solo se limita a usos domésticos, sino, industriales.

El calentamiento por medio de la microondas se basa en el electromagnetismo, donde su frecuencia de ondas se encuentra en un rango de 300 MHz y 300 GHz (Regier, 2017). En

la literatura el uso de microondas tiene una ventaja en cuanto al contenido de humedad, puesto que la energía electromagnética se disipa en las regiones donde se encuentra humedad y la expansión de materiales a través de la conducción de calor desde la superficie del sólido, pero es importante resaltar que no todos los materiales se calientan y se producen una microfractura bajo la acción de las microondas, es decir, su efecto es insignificante. Lo anterior depende del tipo de material que se esté evaluando, los cuales se clasifican entre conductores, dieléctricos y aislantes. Los materiales con características dieléctricas tienen una mejor respuesta a la exposición a las microondas, donde se produce intercambios energéticos a través de la absorción de las ondas electromagnéticas.

La onda electromagnética se clasifica en dos componentes principales, uno eléctrico y otro magnético, donde la eléctrica se refleja, se transmite y se absorbe, en el caso de los materiales dieléctricos, estos son capaces de hacer uso del componente que absorbe la onda electromagnética y transferir esta energía al interior del material.



**Figura 4:** Distribución de temperatura con calentamiento de microondas Vs Convencional (Prado-gonjal & Morán, 2011)

Cuando se expone el material a una irradiación, la energía es transferida mediante una interacción molecular y esto provoca una extensión de las grietas naturales de este sólido, lo cual se puede evidenciar en la figura 4, donde al usar métodos convencionales, la energía se transfiere por medio de la conducción y convección (Prado-gonjal & Morán, 2011). De acuerdo con lo anterior, la eficiencia del pretratamiento con la microondas varía de acuerdo con el material y sus propiedades dieléctricas, frecuencia de la microondas, tamaño de muestra, potencia del microondas, temperatura y propiedades fisicoquímicas del sólido.

Como se mencionó anteriormente, no todos los materiales son sensibles a este tipo de exposición y por el contrario otros materiales alcanzan temperaturas muy altas en tiempos de exposición pequeñas. A continuación, se presentan algunos materiales sensibles a las microondas y las temperaturas alcanzadas con esta exposición.

**Tabla 1:** Temperatura alcanzada después de pretratamiento (Prado-gonjal & Morán, 2011).

Material	t (min)	T (°C)	Material	t (min)	T (°C)
	Microondas			Microondas	
Al	6	580	NiO	6	1305
C (amorfo)	1	1280	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	11	714
C (grafito)	2	1100	WO <sub>3</sub>	6	1270
Co	3	700	Ag <sub>2</sub> S	5	652
Fe	7	768	Cu <sub>2</sub> S	7	746
Mo	4	660	CuFeS <sub>2</sub>	1	920
V	1	557	Fe <sub>1-x</sub> S	2	886
W	6	690	FeS <sub>2</sub>	7	1019
Zn	3	581	MoS <sub>2</sub>	7	1106
TiB <sub>2</sub>	7	843	PbS	1	1024
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	1290	CuBr	11	722
CuO	6	1012	CuCl	13	619
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	3	1258	ZnBr <sub>2</sub>	7	574
MnO <sub>2</sub>	6	1287	ZnCl <sub>2</sub>	7	609

#### 4.7. Estudios previos del pretratamiento de microondas en la molienda

Un análisis del estado del arte en este campo evidencia la importancia y complejidad del estudio de los efectos de los pretratamientos, propios de los procesos de molienda, algunos de los trabajos más relevantes en este campo son:

- ✓ P. Kumar a,D.D. Kar a (Kar et al., 2010) caracterizaron las microfracturas en muestras tratadas con microondas y concluyeron que estas pueden deberse al agrietamiento por tensión térmica resultante del tratamiento previo de la energía de microondas. Se demuestra que se alcanzan las microfracturas con mayor facilidad en muestras tratadas que en las no tratadas. Como resultado del tratamiento la razón de fractura aumentó de forma considerable, siendo importante para el componente económico del proceso de molienda. Se usaron altos niveles de potencia en períodos cortos de tiempo.

- ✓ Vladimir Rizmanoski (Rizmanoski, 2011) determinó que las exposiciones muy cortas a un alto nivel de potencia de microondas conducen a reducciones de mineral. Este estudio establece la importancia de la caracterización del mineral a tratar para determinar su potencial de reducción de resistencia. Se muestra que el cambio en la resistencia del material depende de forma directa del nivel de potencia aplicada. Como hallazgo principal, se muestra el uso de un tiempo de 5 segundos a una potencia de 5 kW como condiciones a las cuales se mejora ostensiblemente el efecto esperado sobre la muestra. Sin embargo, se puede establecer que potencias por encima del valor mencionado deberían ser usadas para obtener efectos altamente evidenciables.
  
- ✓ E. Ruisánchez, A. Arenillas (Ruisánchez et al., 2012) determinaron que el tratamiento que consiste en pulsos cortos de irradiación de microondas produce mejores resultados que el calentamiento continuo para una posterior molienda. Los autores registraron un ahorro de energía cercano al 40% con respecto a procesamiento sin tratamiento con microondas a escala de laboratorio. Los ciclos de microondas poseen mayor efectividad que la irradiación de modo continuo. En lo que respecta al coque, el contenido de humedad afecta de modo negativo el pretratamiento.
  
- ✓ S. M. Javad Koleini, K. Barani (Koleini, Barani, & Rezaei, 2012.) determinaron que la rotura del mineral de hierro siguió un comportamiento de primer orden para tamaños de alimentación fina y se desvió del primer orden para la alimentación de tamaño grueso con el pretratamiento con microondas. Los autores encontraron una relación en los tamaños gruesos y la efectividad del tratamiento para el caso de mineral de hierro. En términos de tiempo, se presentan mejorías para las muestras tratadas con microondas, al verificar rompimientos más rápidos.
  
- ✓ Amaya Iván, Botero William, Correa Rodrigo (Amaya, Botero, & Correa, 2015) encontraron que es posible obtener una reducción del 81.7 % y del 75 % para el consumo de energía y el tiempo de procesamiento usando microondas como pretratamiento. En términos de temperatura, el tratamiento llevó las muestras hasta 400 °C, en contraposición a metodologías tradicionales donde se llega hasta 750 °C. Se establece que la tensión térmica generada con este tipo de calentamiento dieléctrico mejora de forma significativa el proceso de fundición, por ejemplo. Todos los resultados para este estudio se alcanzaron en un microondas doméstico, con una sola modificación basada

en la remoción del plato giratorio acompañado de un agujero para la medición de temperatura.

- ✓ Zhu, Liu, Yuan, Cheng, Liu, Wang, Zhou y Cen (Zhu et al., 2016), investigaron las características de la molienda de los lignitos con pretratamiento de microondas, así como los efectos del tiempo de irradiación, de tamaño de partícula y humedad inicial. Se obtuvieron distribuciones granulométricas y análisis de barrido, los cuales arrojaron una mejora en la molienda para aquellas muestras que tenían una humedad inicial mas alta, aumento de tiempo de irradiación.
- ✓ Aditya, Tapas K, Samir y Arun K (Prado-gonjal & Morán, 2011), describen Como los procesos que invierten más en energía y como hoy en día existen métodos alternativo de pretratamiento y cuales de ellos han arrojado resultados positivos en términos de reducción de energía y moliendabilidad. Ademas sugiere la dirección que se puede llevar a cabo en estudios actuales y futuros, haciendo de estos procesos los más eficientes energéticamente, entre los cuales la metodología de usar microondas en pretratamiento como medida de expansión de fracturas, ha sido investigada con rigurosidad durante los últimos años.

#### **4.8. Coque mineral**

El carbón mineral se genera luego de la descomposición de la vegetación y otros minerales presentes en la superficie de la tierra, del cual se distinguen diferentes variedades como lignito, antracita, hulla y carbón pardo, los cuales se clasifican de acuerdo con la cantidad de carbono presente, donde la antracita es aquella que posee mayor cantidad de este elemento, entre 90 y 97%. El mineral de carbono generalmente se extrae por un sistema de pozos y galerías subterráneas o en algunos lugares a cielo abierto, esto se diferencia en el costo de extracción y el uso de tecnología. Las reservas de carbón se encuentran alrededor de 70 yacimientos actualmente (EcuRed, 2018).

El coque es el producto de la pirolisis del carbón en ausencia de aire, la cual se refiere a la descomposición química de materia orgánica causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Si la pirolisis se realiza a una antracita, el grado termólisis es casi nulo, puesto que este tipo de carbón es quien presenta mejor estabilidad química en sus enlaces

(Rincon, 1963), esto es importante en el momento de la selección y utilización de un determinado carbón.

Los materiales de carbono tienen una capacidad elevada para absorber la energía electromagnética y convertirla en calor, esto gracias a que tienen una tangente de pérdidas dieléctricas mayores que las del agua (0.118 a 245 GHz a temperatura ambiente), a continuación se presenta las tangentes de pérdidas dieléctricas de materiales que contienen carbono a una frecuencia de 2.45 GHz (Ruisánchez, Arenillas, & Menéndez, 2010).

<b>Material de Carbono</b>	<b><math>\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'</math></b>
Hulla	0.02-0.08
Esponjas de Carbono	0.05-0.20
Carbón vegetal	0.11-0.29
Negro de humo	0.35-0.83
Carbón activado	0.57-0.80
Carbón activado <sup>1</sup>	0.22-2.95
Nanotubo de Carbono	0.25-1.14
Nanofibras de CSi	0.58-1.00

<sup>1</sup> Carbón activado a una temperatura media de 398K

**Figura 5:** Tangente de pérdidas dieléctricas de materiales de carbono (Ruisánchez, Arenillas, & Menéndez, 2010).

Por ello, los materiales sólidos con factores dieléctricos altos pueden ser sometidos a procesos con calentamiento asistidos por microondas, donde los materiales con carbono son buenos absorbentes de este tipo de energía. Es por ellos que existen diferentes formas para aprovechar esta capacidad de este tipo de materiales con pretratamientos como este, ya sea para adaptar su química superficial, como para generar rupturas y grietas en el material.

En el campo del tratamiento de materiales se ha aplicado en el proceso de la molienda, donde al generar fracturas se ha logrado hasta el 50% de la reducción en la molidabilidad relativa (Ruisánchez et al., 2010).

## **5. Metodología**

### **5.1 Revisión y análisis bibliográfico**

En el proyecto de investigación se realizó una revisión bibliográfica permanente en revistas y patentes, que permitieron identificar avances y condiciones relacionadas con la ejecución del proyecto para lograr tener un adecuado soporte teórico.

Dentro de las actividades metodológicas se encuentra:

- ✓ Documentación sobre las investigaciones relacionadas con la implementación de las microondas en diferentes materiales.
- ✓ Determinación de las condiciones de operación usualmente más efectivas en las diferentes investigaciones evaluadas.
- ✓ Integración de las condiciones de operación encontradas en la literatura para su adaptación dentro del proyecto de investigación.
- ✓ Determinación de las propiedades fisicoquímicas del material para su posterior evaluación.

### **5.2 Selección y caracterización del material**

La selección del material se realizó de acuerdo con la demanda industrial y a su vez teniendo en cuenta el acceso a este y su economía, además el carbono se selecciona principalmente porque dos tercios del acero mundial se producen utilizando coque de carbón, consumiendo en ello 12% de la producción mundial de carbón (EcuRed, 2018), donde la molienda de coque representa para la industria siderúrgica, aproximadamente un 70% del valor de los costos en materias primas para el acero.

De acuerdo con lo anterior se emplearon técnicas para la determinación de las propiedades fisicoquímicas de material antes y después del tratamiento y a su vez en la molienda que se le efectuará. Para ello se efectuaron análisis para la determinación de la composición del coque.

Los análisis realizado para este material incluyen:

El análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), es una técnica que determina la composición elemental de una muestra dada. Se basa en la medición de la emisión secundaria o fluorescente de radiación X que se genera al excitar una muestra con

una fuente de radiación X. Su finalidad es el análisis químico tanto cualitativo como cuantitativo de elementos comprendidos entre el flúor y el uranio, sin requerir preparación de la muestra a analizar. Pueden darse mediciones de hasta unas pocas partes por millón, de alta utilidad para mineralogía, procedencia, entorno deposicional e historia diagenética.

### 5.3 Determinación de condiciones de operación

En la determinación de las características de operación se realizó una revisión bibliográfica de las condiciones de operación para el pretratamiento con microondas, en el cual se especifica el uso de exposiciones por ciclos o continuo, usando el segundo para este estudio. Los tiempos de exposición usados fueron de 5, 10 y 15 segundos correspondientes con una frecuencia de 2.45 GHz de irradiación a partir de la recomendación de no usar períodos largos de la misma. La elección de tales tiempos corresponde a evidencia en la literatura (Ruisánchez et al., 2012) indicando que el coque alcanza altas temperaturas en corto tiempo al ser sometido a microondas.

El equipo para generar microondas se seleccionó a partir de características similares definidas en la literatura general. Se hace uso de un microondas SAMSUNG MG402MADXBB/AP-SDT, con capacidad de 1.1 pies cúbicos, potencia a 100% de 1600 W. Este equipo cuenta con dimensiones definidas por un alto de 313 mm, fondo de 459 mm y ancho de 555 mm, operando entre 110 y 120 V.

Con objeto de determinar el tiempo de molienda, se efectuó un diseño de experimentos con el fin de encontrar el valor estadísticamente más preciso, a partir de moliendas de 1, 3, 4 y 5 minutos compuestos por cuatro duplicados, hallando el análisis de tamaño de partícula, específicamente la variable  $P_{80}$  como respuesta en el estudio, de acuerdo con esto se obtiene una validez estadística en el tiempo de molienda.

**Tabla 2:** Tiempos evaluados para diseño de experimentos

TIEMPO DE MOLIENDA	NÚMERO DE RÉPLICAS
1	5
2	5
3	5
4	5
5	5

## 5.4 Preparación de muestras

Para la preparación de las muestras se realizará su respectiva distribución granulométrica para obtener un criterio de clasificación.

Se efectúa un cuarteo sobre una cantidad considerable de coque, según se establece en normas de muestreo como ASTM y NTC para suelos y agregados pétreos, resguardando no alterar el tamaño de partícula al distribuir la pila de material de forma circular hasta obtener una altura no superior a 1 in. Se debió garantizar un mezclado eficiente del mineral para luego dividir el montículo circular en cuatro secciones. Seguidamente se toman fracciones de masa de lados opuestos hasta alcanzar la cantidad de muestra establecida según el tamaño máximo nominal registrado, cantidad establecida como 100 g.

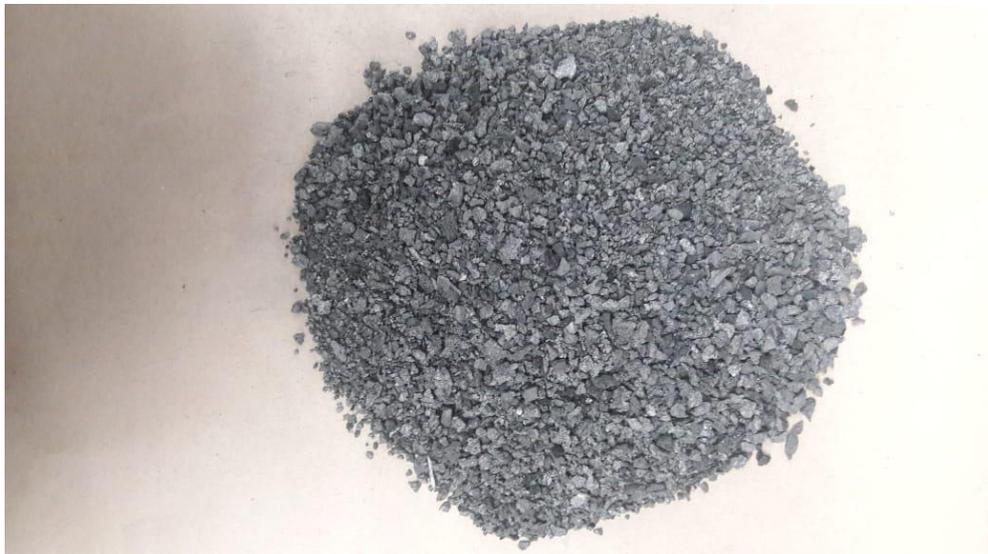


Figura 6: Coque metalúrgico sin pretratamiento y sin molienda

De forma paralela, se verificaron condiciones de humedad relativa y porcentaje de humedad del material con el objeto de evitar formación de aglomeraciones de coque que pudiese alterar el análisis de tamaño de partícula. Del mismo modo, se efectuaron limpiezas sobre los cuerpos de tamiz a utilizar y la verificación de calibración respectiva de los equipos.

## 5.5 Ensayos con microondas

Para efectuar las pruebas respectivas, se establecen muestras representativas de material (100 gramos), llevadas a exposición con radiación electromagnética por medio del uso de las microondas, con una potencia de 1600 W y una irradiación continua bajo tiempos de 5,

10 y 15 segundos, para luego enviar dicha muestra directamente al molino para su posterior granulometría.

## 5.6. Ensayos de Molienda

Se llevaron a cabo ensayos de molienda para cada una de las muestras previamente tratadas con microondas, así como para otro grupo de muestras sin tratamiento, pero con similar distribución granulométrica para posteriormente analizar los resultados y verificar la incidencia del tratamiento en el  $P_{80}$ .

Para la parte experimental se hace uso de un molino con las siguientes características :

**Tabla 3:** Características de Molino de Bolas

<b>Molino</b>	
Diámetro interno (cm)	15,4
Longitud (cm)	19,9
Material	Acero inoxidable
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	7,85
Volumen total (cm <sup>3</sup> )	3706,67
Fracción de llenado	0,30
Volumen de llenado de bolas (cm <sup>3</sup> )	1112,00
Volumen total de bolas (cm <sup>3</sup> )	667,20
Llenado de polvo	0,12
Volumen ocupado por el polvo	444,80
Peso de polvo (g)	631,62
<b>Internos (Bolas)</b>	
Volumen de bola (cm <sup>3</sup> )	3,05
Diámetro de bola (cm)	1,80
Material	Acero inoxidable
Peso bola (g)	23,97
Número de bolas totales	218,49
Peso de bolas totales (g)	5237,53
<b>Material</b>	
Material	Coque
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,42
Fracción de polvo (U)	1,00

El tiempo de molienda es establecido a partir del diseño de experimentos planteado en el ítem 5.3. Inicialmente, el análisis de tamaño de partícula se determinó por medio de una serie de tamices compuesta por ¼", № 4, № 8, № 14, № 20, № 35, № 60, № 80, № 100.

**Tabla 4:** Tiempos evaluados en la molienda

TIEMPOS EVALUADOS	NÚMERO DE RÉPLICAS
5	2
10	2
15	2
ALIMENTACIÓN	2



**.Figura 7:** Serie de tamices

Tan pronto como se incluye el fondo en la serie de tamices, se agrega la muestra al primer tamiz en la parte superior y se tapa por último. Este conjunto se ubica en el equipo denominado Rotap por un tiempo de 15 minutos en el caso de cada muestra.

## 6. Resultados

### 6.1 Selección y caracterización del material

En la caracterización del material a través de los métodos mencionados en el ítem 5.2. De acuerdo con la tabla 5, se puede evidenciar el análisis mineralógico revela que el carbón y el hierro son los minerales en mayor proporción dentro de la muestra del alimento.

**Tabla 5:** Caracterización del alimento por FRX

Compuesto	Mg	Al	Si	P	S	CL	K	Ca	Ti
<b>Concentración (%)</b>	0,479	2,463	6,6979	0,187	2,165	0,53	0,685	2,384	0,685

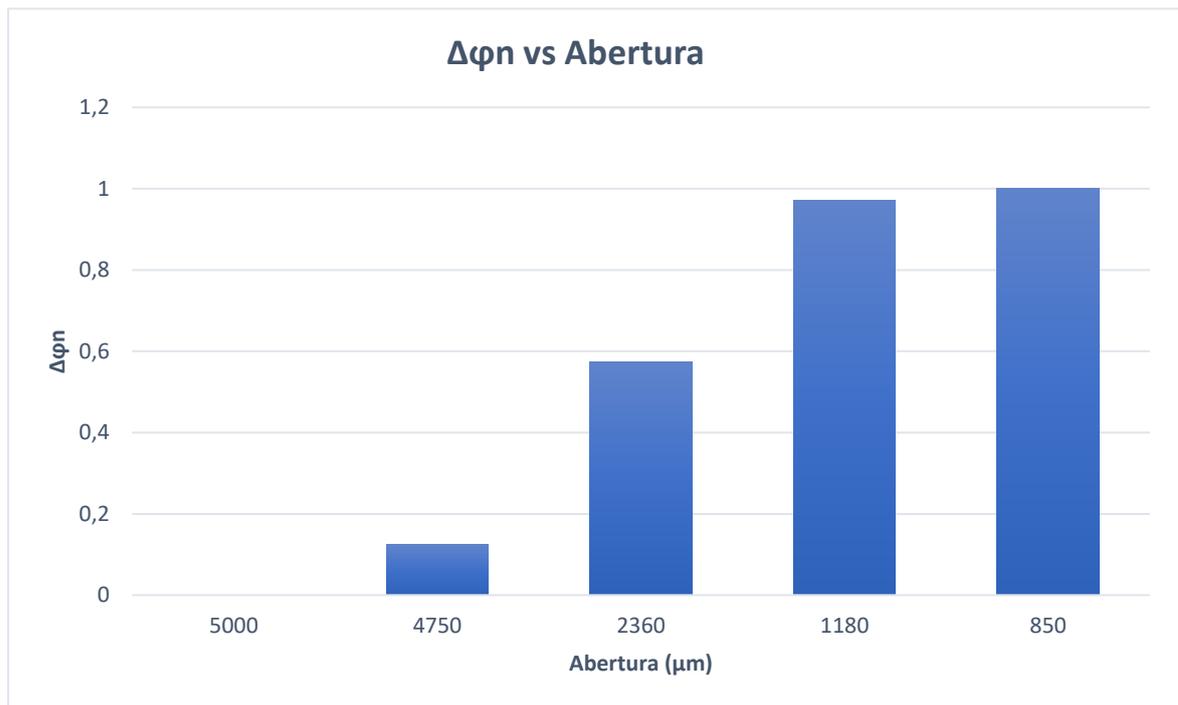
  

Compuesto	Fe	Ni	Cu	Zn	Sr	Zr	Pb	C
<b>Concentración (%)</b>	6,195	0,038	0,089	0,287	0,069	0,04	0,179	76,83

A partir de se realizó una distribución granulométrica del material con una muestra de 500 gramos sin tratamiento y sin molienda, la cual se presenta a continuación:

Tabla 6: Distribución granulométrica de material sin pretratamiento ni molienda

Malla	Abertura (µm)	Masa (g)	Fracción retenida, $\Delta\phi_n$	Acumulado retenido, $\phi_n >$	Acumulado pasante, $(1 - \phi_n) <$
3	5000	0,0	0,0000	0,0000	1,0000
4	4750	62,6	0,1254	0,1254	0,8746
8	2360	223,9	0,4485	0,5739	0,4261
16	1180	198,2	0,3970	0,9710	0,0290
Colector	850	14,5	0,0290	1,0000	0,0000

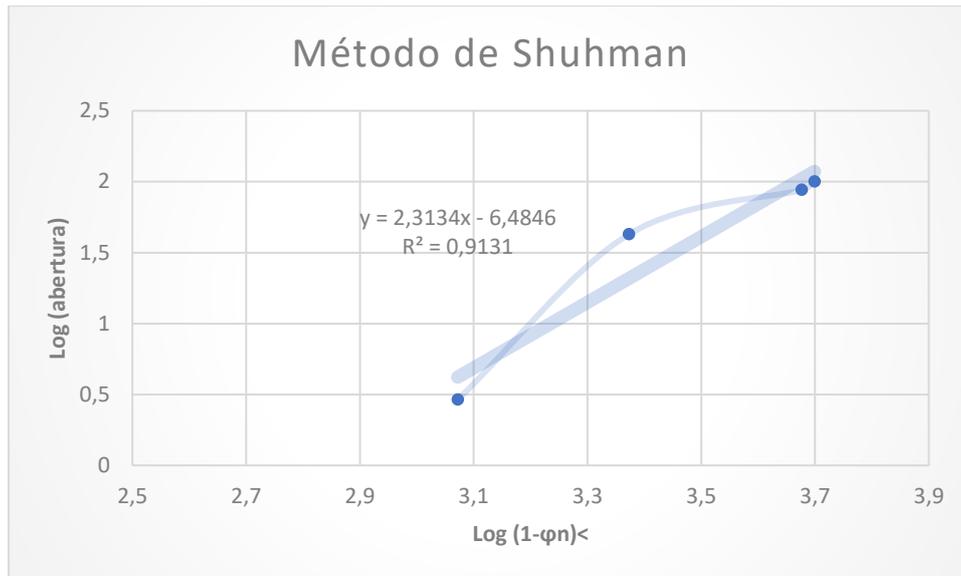


**Gráfico 1:** Histograma granulometría inicial

El análisis granulométrico es una herramienta que nos indica el tamaño de partículas del material, donde se hace uso de tres términos básicos evidenciado en la tabla 6.

- ✓  $\Delta\phi_n$  = Esto se refiere a la masa que queda retenida en el tamiz X.
- ✓  $\phi_n >$  = Es referente a lo que queda acumulado entre mallas
- ✓  $(1-\phi_n) <$  = Lo cernido, es decir, lo que pasa el tamiz X.

Donde un análisis granulométrico puede ser representando por un método gráfico o matemático, en el cual se obtengan un buen coeficiente de correlación, en este proyecto se evalúa estos métodos, donde los métodos matemáticos son los modelos de Schumann y el modelo de Rossin Rammler, aquí se evalúa el mejor coeficiente de correlación, es decir, aquel que se adapte mejor al sistema real para obtener un aproximación del  $P_{80}$  de la muestra.



**Gráfico 2:** Método de Schumann muestra inicial

De acuerdo con la gráfica 2 es posible obtener el  $P_{80}$  de la muestra inicial, correspondiente a  $4223.749 \mu\text{m}$

## 6.2 Determinación de condiciones de operación

En la determinación del tiempo de molienda se emplea 5 tiempos diferentes descritos en el ítem 5. 6 donde se realiza un análisis estadístico con variable de respuesta el  $P_{80}$ , empleando una muestra representativa de material, se lleva al molino de bolas durante los tiempos establecidos, luego este es llevado para su posterior análisis granulométrico y de acuerdo al modelo matemático descrito anteriormente se obtiene el  $P_{80}$ , esto se emplea para cada uno de los tiempos y sus respectivas replicas descritas en la tabla 2.



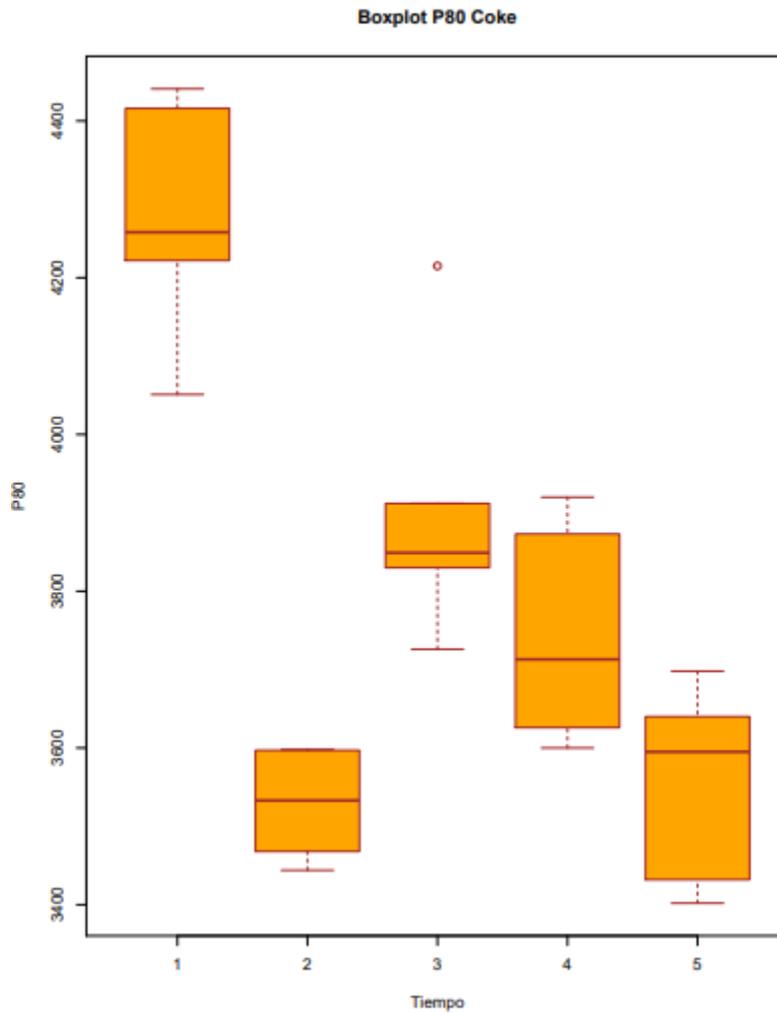
**Figura 8:** Sistema de molienda

De acuerdo con el procedimiento descrito se obtiene la media y la desviación estándar del diseño de experimentos evidenciado en la tabla 7.

**Tabla 7:** Resultados del análisis estadístico

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Mediana (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Media (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Desviación estándar</b>
1	4258	4278	158,65
2	3533	4528	71,31
3	3849	3906	185,03
4	3713	3746	144,23
5	3595	3553	130,19

El diagrama de caja y bigotes para este análisis estadístico se evidencia en la figura 9:



**Figura 9:** Diagrama de caja y bigotes

De acuerdo con la desviación estándar y el diagrama de caja y bigotes, donde se evidencia que el mejor tiempo de molienda es de 2 minutos, el cual se establece como tiempo de molienda para la realización de los ensayos con el pretratamiento y la alimentación en la etapa posterior.

### 6.3 Ensayos con microondas

Se realizaron los ensayos de radiación electromagnética a partir del uso del microondas, donde se toman muestras de 100 gramos de coque, donde se ubicaron en el centro de la base de este equipo, siendo este irradiado en tres tiempos diferentes de modos:

- ✓ 5 segundos
- ✓ 10 segundos
- ✓ 15 segundos

En los tiempos mencionados se toma la temperatura que es alcanzada por material después de someterse a la exposición, evidenciados en la tabla 8.

De acuerdo con la Ec.6 se encuentra que la energía consumida por el microondas en términos de la cantidad de carga y tiempo de exposición son:

$$E_{5s} = \frac{1600 W \times 5s}{253g} = 31.62 \left(\frac{J}{g}\right) = 8.7833 \left(\frac{KW h}{Ton}\right)$$

$$E_{10s} = \frac{1600 W \times 10s}{253g} = 63.24 \left(\frac{J}{g}\right) = 17.5669 \left(\frac{KW h}{Ton}\right)$$

$$E_{15s} = \frac{1600 W \times 15s}{253g} = 94.86 \left(\frac{J}{g}\right) = 26.3504 \left(\frac{KW h}{Ton}\right)$$

**Tabla 8:** Temperatura y energía usada en la irradiación

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Calor específico del agua (kJ/K.kg)	Energía consumida MW (kWh/Ton)
5	35	4,178	8.7833
10	44	4,179	17.5669
15	47	4,18	26.3504

Los resultados demuestran que a medida que se incrementa el tiempo de exposición a la radiación electromagnética a través de las microondas, la energía que puede consumir el material expuesto es directamente proporcional al tiempo de exposición. Lo anterior también se puede evidenciar con los cambios de temperatura alcanzadas por el material, los cuales se relacionan con el calor específico del agua, es decir, la relación entre la pérdida dieléctrica y la cantidad de agua presente en el material hace que la energía electromagnética se distribuya en regiones con mayor proporción de esta, ocurriendo vibraciones de estas partículas y un calentamiento más efectivo, lo que se traduce a un mayor esfuerzo térmico, a través de estrés ocasionado por la energía disipada en los límites del grano.

También es posible encontrar la energía consumida por las dos etapas críticas en términos de costos, microondas y molienda, a través de un modelo matemático aproximado de acuerdo con las características específicas de estos (Ruisánchez et al., 2012), este es mencionado en la Ec.8

$$E_{MILL+MW} = \frac{P_{MW} \times t_{MW}}{W} + \frac{P_{MILL} \times t}{W} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$P_{MILL}$  = Potencia del molino

$t$  = Tiempo de molienda

$w$  = Carga de material al molino

$t_{MW}$  = Tiempo de irradiación

#### 6.4. Ensayos de Molienda

En los ensayos de molienda se tratan 4 muestras diferentes, tres de ellas corresponde a las muestras tratadas con las microondas y una de ellas sin el tratamiento, pero todas aplicándole una molienda de 2 minutos con las características descritas en la tabla 3, esto con el fin de determinar la eficiencia del pretratamiento.

La molienda se lleva a cabo con 219 bolas de 1.8 cm, asegurándose de distribuir el material y las bolas de forma uniforme en el molino, se usó una velocidad de giro de 60 rpm durante 2 minutos. Posteriormente es llevado a una serie de tamices y a un rotap durante 15 minutos y luego se realiza el respectivo análisis (Ver Tabla 9):

**Tabla 9:** Serie de tamices

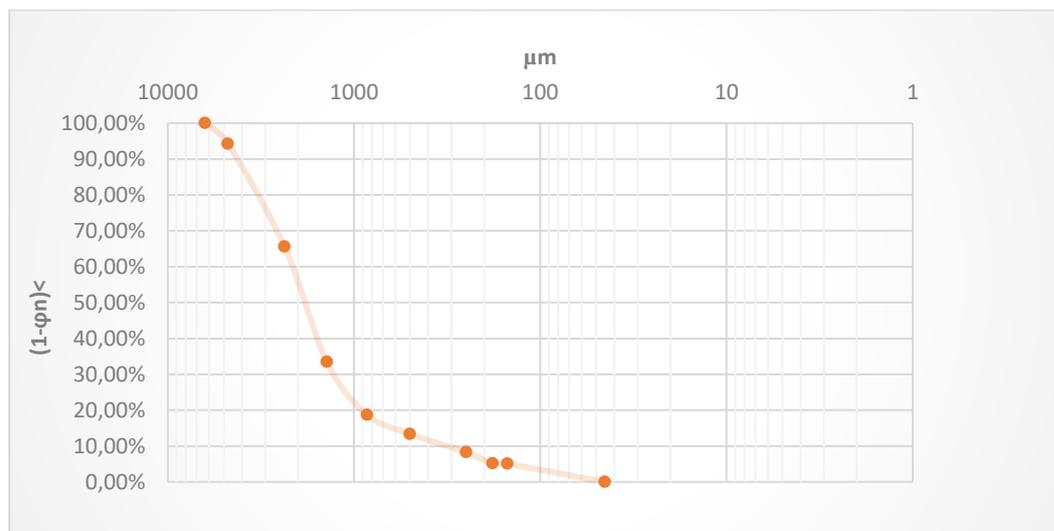
Tamiz	Abertura ( $\mu\text{m}$ )
1/4	6300
4	4750
8	2360
14	1400
20	850
35	500
60	250
80	180
100	150
140	106
Colector	-

✓ Alimentación

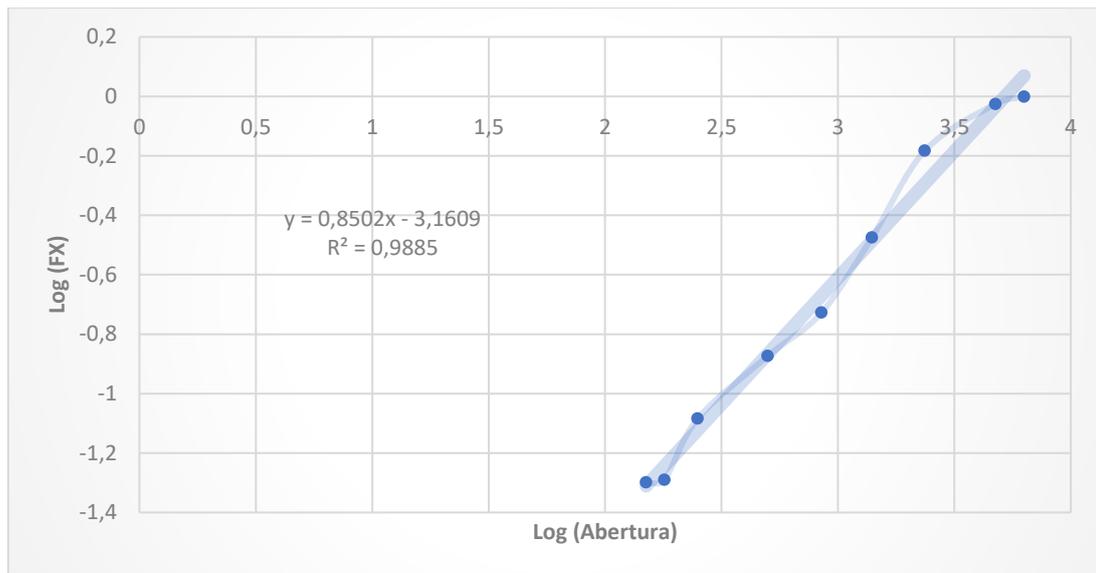
Para la alimentación se obtiene la siguiente distribución granulométrica

**Tabla 10:** Granulometría Alimentación

Malla	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Masa (g)	Fracción retenida, $\Delta\phi_n$	Acumulado retenido, $\phi_n >$	Acumulado pasante, $(1-\phi_n) <$
1/4	6300	0,700	0,003	0,003	0,997
4	4750	5,700	0,057	0,057	0,943
8	2360	28,500	0,287	0,344	0,656
14	1400	31,900	0,321	0,665	0,335
20	850	14,700	0,148	0,813	0,187
35	500	5,300	0,053	0,866	0,134
60	250	5,100	0,051	0,918	0,082
80	180	3,100	0,031	0,949	0,051
100	150	0,100	0,001	0,950	0,050
Colector	45	5,000	0,050	1,000	0,000
Total		99,400			

**Gráfico 3:** Cernido Vs Abertura – Alimentación

Para la alimentación se obtiene un  $P_{80}$  de acuerdo con el método de Schumann encontrados en la tabla 13.



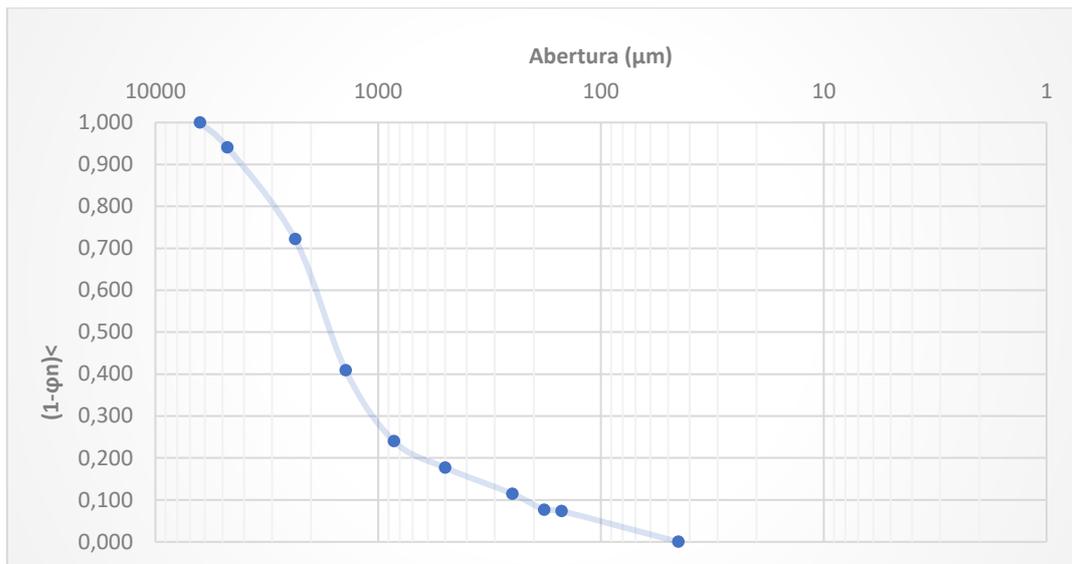
**Gráfico 4:** Método de Schumann para alimentación

Luego de realizar la granulometría para la alimentación se procede a realizar el mismo procedimiento para las muestras con pretratamiento.

- ✓ Muestra de 5 segundos de exposición

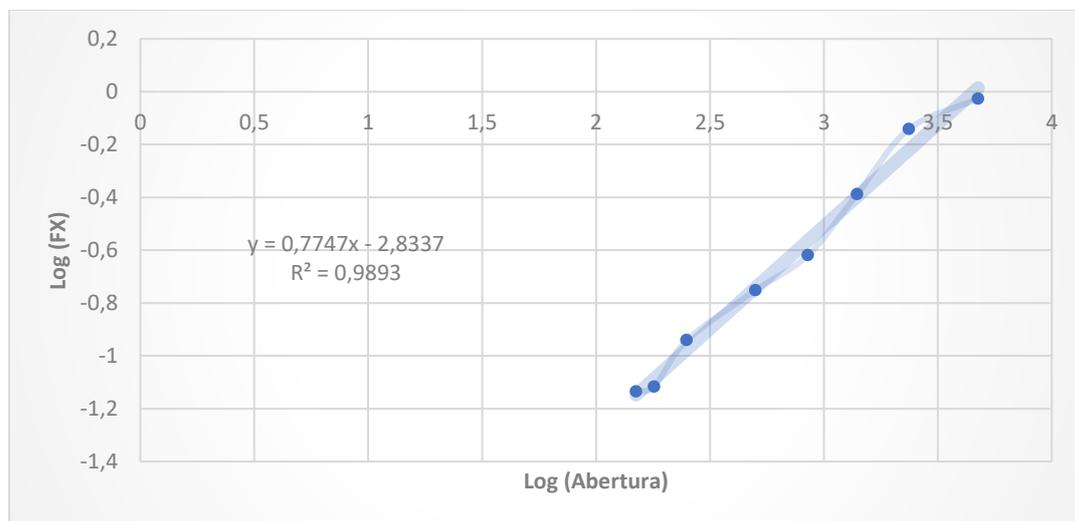
**Tabla 11:** Granulometría muestra 5 segundos de exposición

Malla	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Masa (g)	Fracción retenida, $\Delta\phi_n$	Acumulado retenido, $\phi_n >$	Acumulado pasante, $(1 - \phi_n) <$
4	4750	5,900	0,059	0,059	0,941
8	2360	21,800	0,219	0,278	0,722
14	1400	31,100	0,313	0,591	0,409
20	850	16,800	0,169	0,760	0,240
35	500	6,300	0,063	0,823	0,177
60	250	6,200	0,062	0,885	0,115
80	180	3,800	0,038	0,924	0,076
100	150	0,300	0,003	0,927	0,073
Colector	-	7,300	0,073	1,000	0,000
Total		99,500		0,000	1,000



**Gráfico 5:** Cernido Vs Abertura – 5 segundos

Los resultados de un análisis granulométrico se generalizan de acuerdo a correlaciones matemáticas como lo son las funciones distribución de tamaños, los cuales relacionan el tamaño de partícula con un porcentaje en acumulado retenido o cernido, gracias a estos es posible caracterizar de acuerdo al mejor coeficiente de correlación que para la muestra con exposición de 5 segundos se obtiene un  $P_{80}$  de acuerdo con el método de Schumann encontrados en la tabla 11.

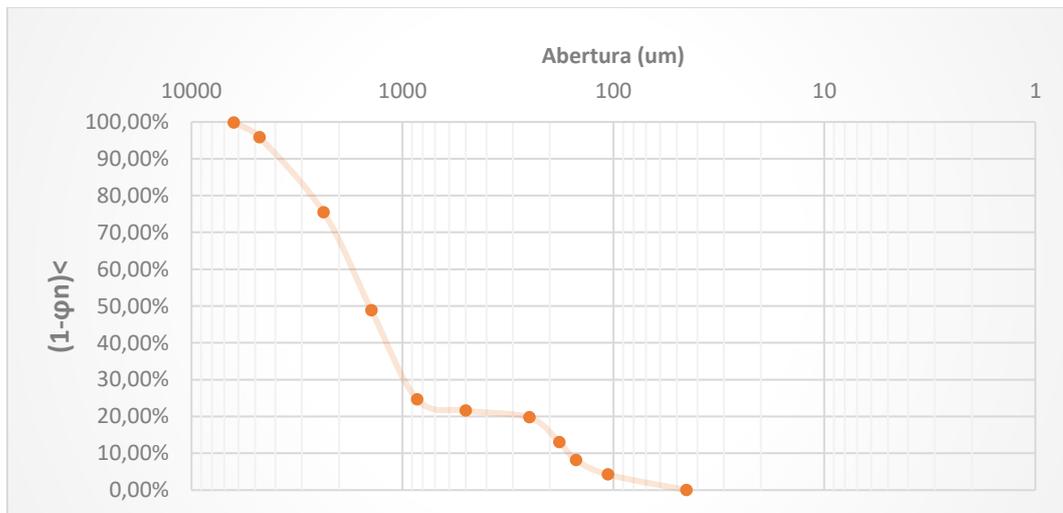


**Gráfico 6:** Método de Schumann para 5 segundos

✓ Muestra de 10 segundos de exposición

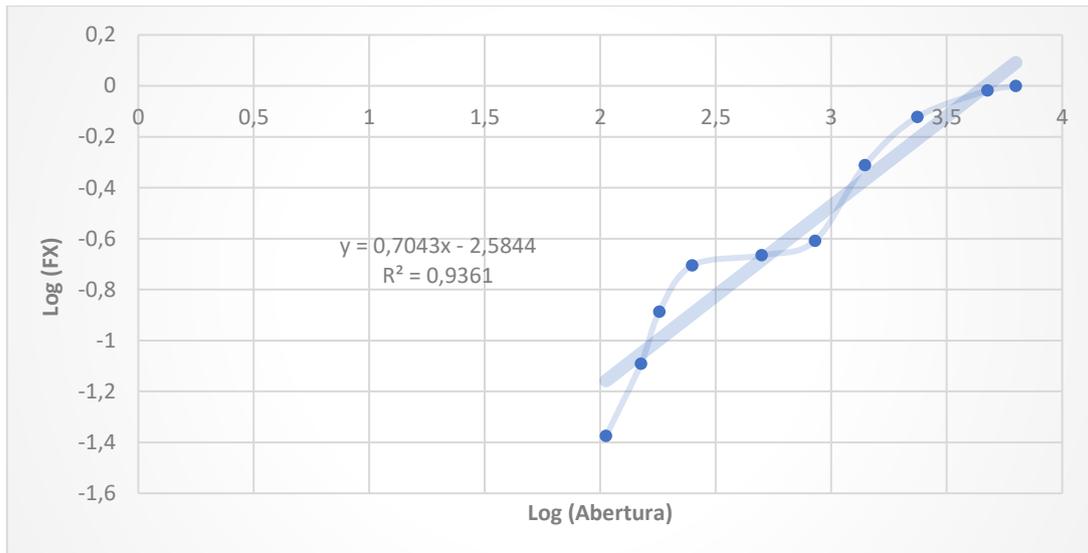
**Tabla 12:** Granulometría muestra 10 segundos de exposición

Malla	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Masa (g)	Fracción retenida, $\Delta\phi_n$	Acumulado retenido, $\phi_n >$	Acumulado pasante, $(1-\phi_n) <$
1/4	6300	0,2	0,0021	0,0021	0,9979
4	4750	3,91	0,0403	0,0424	0,9576
8	2360	19,73	0,2036	0,2460	0,7540
14	1400	25,83	0,2665	0,5125	0,4875
20	850	23,38	0,2412	0,7537	0,2463
35	500	2,95	0,0304	0,7842	0,2158
60	250	1,81	0,0187	0,8028	0,1972
80	180	6,56	0,0677	0,8705	0,1295
100	150	4,7	0,0485	0,9190	0,0810
140	106	3,76	0,0388	0,9578	0,0422
Colector	45	4,09	0,0422	1,0000	0,0000
Total		96,92		1,0000	0,0000



**Gráfico 7:** Cernido Vs Abertura – 10 segundos

Para la muestra con exposición de 10 segundos se obtiene un  $P_{80}$  de acuerdo con el método de Schumann encontrados en la tabla 12.

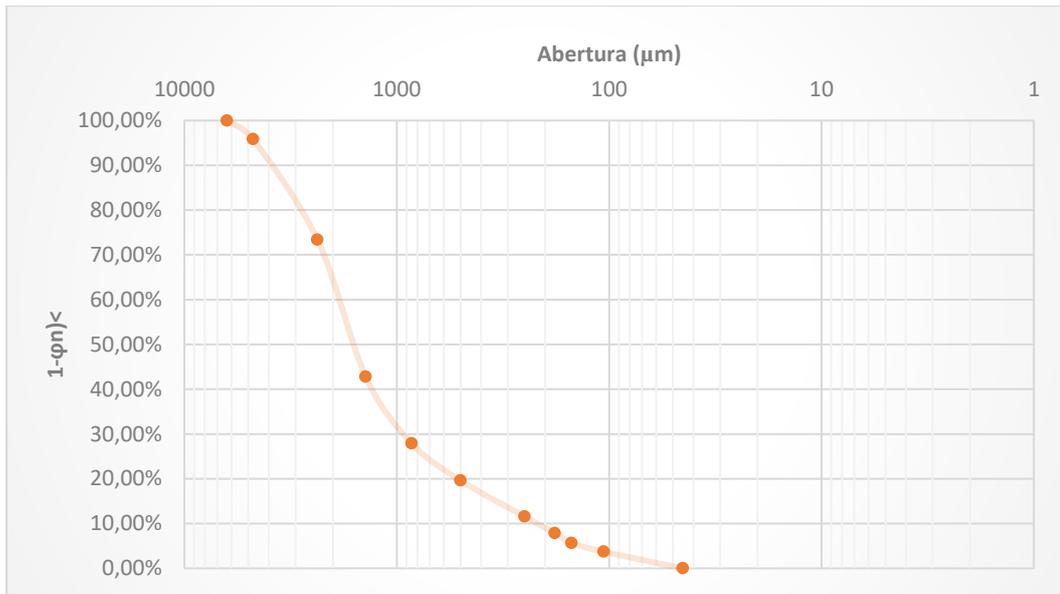


**Gráfico 8:** Método de Schumann para 10 segundos

✓ Muestra de 15 segundos de exposición

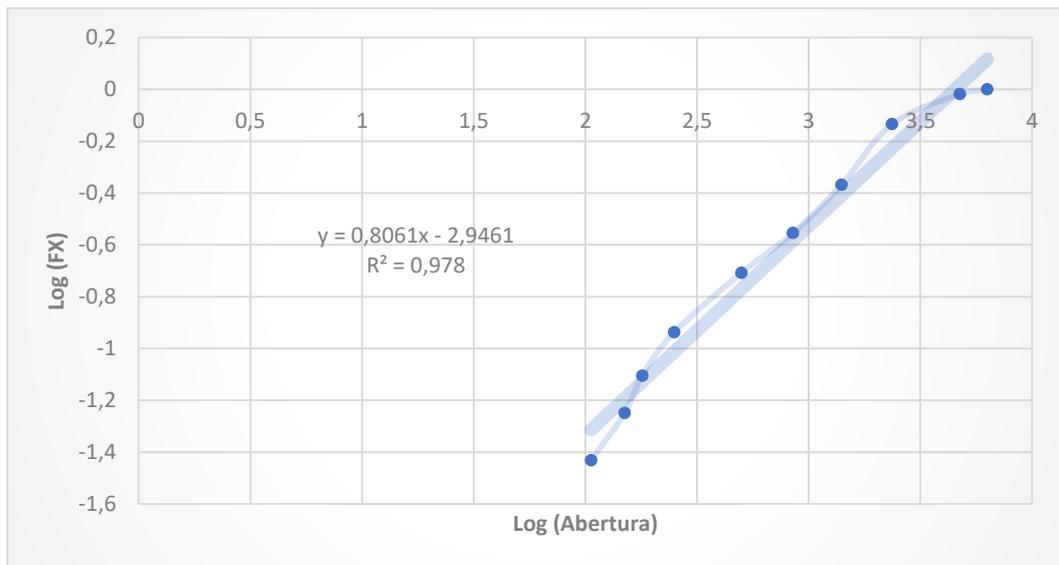
**Tabla 13:** Granulometría muestra 15 segundos de exposición

Malla	Abertura ( $\mu\text{m}$ )	Masa (g)	Fracción retenida, $\Delta\phi_n$	Acumulado retenido, $\phi_n >$	Acumulado o pasante, $(1-\phi_n) <$
1/4	6300	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
4	4750	4,0900	0,0418	0,0418	0,9582
8	2360	21,9600	0,2243	0,2660	0,7340
14	1400	29,9300	0,3057	0,5717	0,4283
20	850	14,6300	0,1494	0,7211	0,2789
35	500	8,1200	0,0829	0,8040	0,1960
60	250	7,8700	0,0804	0,8844	0,1156
80	180	3,6200	0,0370	0,9214	0,0786
100	150	2,1800	0,0223	0,9436	0,0564
140	106	1,8900	0,0193	0,9629	0,0371
Colector	45	3,6300	0,0371	1,0000	0,0000
Total		97,9200		1,0000	0,0000



**Gráfico 9:** Cernido Vs Abertura – 15 segundos

Para la muestra con exposición de 15 segundos se obtiene un  $P_{80}$  de acuerdo con el método de Schumann encontrados en la tabla 13.



**Gráfico 10:** Método de Schumann para 15 segundos

De acuerdo con lo anterior se tiene que los  $P_{80}$  para cada respectiva muestra es :

**Tabla 14:** Resultado del  $P_{80}$

Resultados	$P_{80}$ (μm)
Alimento	4016,485
5 segundos	3409,647
10 segundos	3402,996
15 segundos	3364,870

De acuerdo con los resultados obtenidos se calcula el % de disminución de tamaño de partícula con respecto al tamaño del alimento, estos resultados se evidencian en la tabla 14.

**Tabla 15:** Porcentaje de disminución de partícula

<b>Tiempos</b>	<b>% Disminución</b>
5 segundos	15,1087%
10 segundos	15,2743%
15 segundos	16,2235%

En base con los resultados reportados en la tabla 15, se lleva a caracterización el material con mejor  $P_{80}$  con el fin de evidenciar la nueva distribución de compuestos después de la exposición a la radiación y la molienda, la cual puede observarse en la tabla 16.

**Tabla 16:** Análisis FRX- muestra a los 15 segundos

<b>Compuesto</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Ti</b>
<b>Concentración</b>	0,284	2,308	6,274	0,174	2,203	0,756	0,729	2,338	0,683
<b>Compuesto</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Sr</b>	<b>Zr</b>	<b>Pb</b>	<b>C</b>
<b>Concentración %</b>	0,112	0,05	4,45	0,106	0,051	0,066	0,036	0,024	79,36

Los cambios en los resultados  $P_{80}$  como el porcentaje de disminución podría atribuirse a la fractura que se propaga debido al calentamiento del mineral, los cuales de acuerdo a los análisis mineralógicos se puede apreciar que el compuesto de mayor presencia es el carbón, el cual tiene la capacidad de absorber las ondas del microondas. Este calentamiento produjo esfuerzo térmico de ruptura, lo que ocasiono que en la molienda se redujera el esfuerzo de moliendabilidad. De lo anterior puede afirmarse que los equipos e implementos asociados a la molienda se verán menos afectados al desgaste de las superficies , ello debido a los menores esfuerzos de conminución.

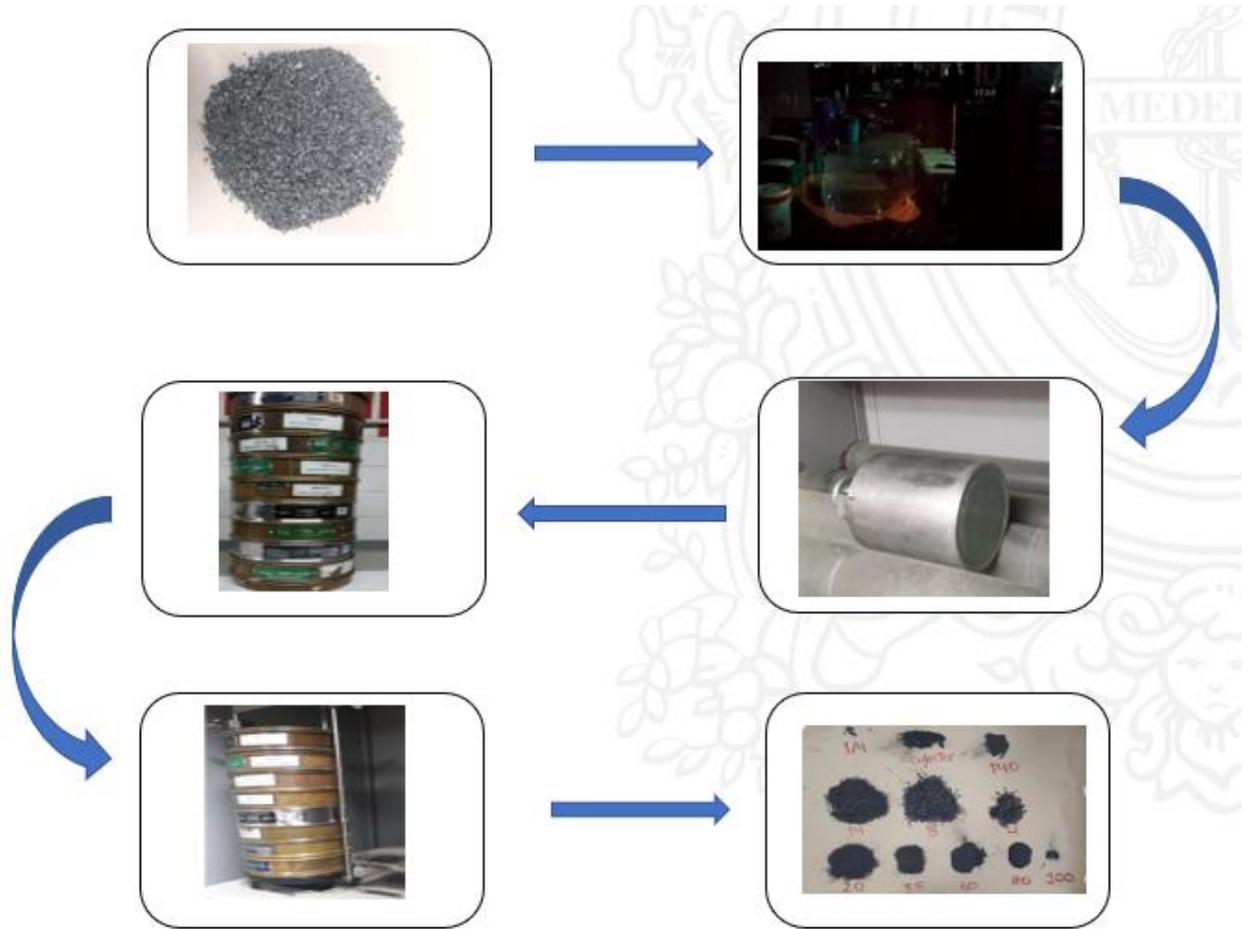
A través de los resultados reportados en la tabla 8 y la tabla 15 se evidencia que el mejor resultado fue tratar las muestras a 15 segundos con potencia constante en comparación con la muestra de alimentación produciendo una equivalencia del 83.77 para un porcentaje de disminución del 16.22%, lo cual mejora la eficiencia del proceso con respecto a los procesos convencionales y reduciendo el número de etapas involucradas en el proceso global. De acuerdo con la tabla 16 se evidencia como los materiales pueden tener frecuencias

específicas para absorber la energía electromagnética, por ello la selección del tiempo de exposición es importante, es decir, en base a los minerales que logren unas altas temperaturas en periodos cortos de exposición se basa el tiempo de irradiación, buscando así la reducción de partícula con un  $P_{80}$  menor.

Este proceso podría ser mejorado si se evalúa la posibilidad de humedecer un poco el material antes de realizar el pretratamiento, es posible que al aumentar la temperatura del material se pueda lograr un incremento en los finos o simplemente causar un choque térmico luego de realizado este procedimiento, esto debido a que los cambios bruscos de temperatura al interior del material pueden producir mayor propagación de las grietas ya existentes y tal vez generar otras, pero se recomienda a través de la literatura (Ruisanchez, 2013, p. 72) y la experiencia en la investigación, el calentamiento en continuo del coque a tiempos muy grandes de exposición puede provocar el riesgo de ignición, por ello otra de las posibilidades para mejorar el proceso es realizar este procedimiento en on-off, es decir, por pulsos hasta llegar al tiempo de irradiación establecido dentro de los objetivos de la investigación.

✓ Esquema básico del pretratamiento

De acuerdo con el procedimiento anterior se tiene que el esquema básico de las etapas de pretratamiento es:



**Figura 10:** Esquema del pretratamiento

## 7. Conclusiones

Se identificó y caracterizó el material en términos de sus propiedades individuales y como masa de partículas logrando así identificar la composición y el número de minerales presentes en la muestra, de esta forma se identificaron cuáles de ellos posiblemente podrían estar influenciando más en la absorción de las ondas electromagnéticas, donde influye en gran parte la selección del material, puesto que algunos materiales como el cuarzo tienen poca sensibilidad a las microondas, es decir, se necesitan temperaturas más altas y a su vez potencias mayores de la microondas, para lograr evidenciar este tipo de efectos, por ello esta selección es una parte crítica de la investigación. Esto da lugar a resaltar como el tamaño de partícula y el tamaño de muestra afecta la velocidad de calentamiento, donde los agrietamientos por estrés pueden ocurrir en los diferentes minerales en tiempos diferentes de exposición.

Al analizar la incidencia del tratamiento con microondas en el  $P_{80}$  a partir de la mejor condición operacional hallada con el material se logra determinar como en el pretratamiento influyen de manera significativa todas las variables (Tiempo de exposición, cantidad de muestra, tipo de material, etc.), a partir de esto se identificó las condiciones de operación más idóneas para que den una respuesta positiva a la variable de respuesta ( $P_{80}$ ), tales fueron tomar una muestra no más de 100 gramos para la exposición a la microondas, el tiempo de moliendabilidad de 2 minutos, un tiempo en el rotap de 15 minutos y así se aseguró una buena distribución granulométrica.. Lo anterior se logra a través de parámetros estadísticos e investigación

## 8. Referencias Bibliográficas

- Amaya, I., Botero, W., & Correa, R. (2015). Microwave assisted roasting for enhanced processing of Colombian gold mining samples. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26), 73–86.
- Austin, L. G. (1994). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CIRCUITOS DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN*.
- EcuRed. (2018). Carbón mineral. Retrieved from [https://www.ecured.cu/Carbón\\_mineral](https://www.ecured.cu/Carbón_mineral)
- Elastic, L., & Mechanics, F. (1957). *MECÁNICA DE FRACTURA Y SU APLICACIÓN AL*.
- Equipment, S. (n.d.). Specification and Design of Solids-Handling Equipment.
- Ii, B., Molienda, C., & De, G. (n.d.). Proceso Etapa Escalón Humedad.
- Kar, D. D., De, S., Meikap, B. C., Kumar, P., Chakraborty, S., & Sahoo, B. K. (2010). Iron ore grindability improvement by microwave pre-treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16(5), 805–812. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2010.05.008>
- Koleini, S. M. J., Barani, K., & Rezaei, B. (2012). Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review : An International The Effect of Microwave Treatment on Dry Grinding Kinetics of Iron Ore, (March 2013), 37–41. <https://doi.org/10.1080/08827508.2011.562947>
- Prado-gonjal, J., & Morán, E. (2011). Síntesis asistida por microondas de sólidos inorgánicos, 107, 129–136.
- Regier, M. (2017). *Microwave Heating. Reference Module in Food Science*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22364-0>
- Rincon, J. M. (1963). Pirolisis del Carbón.
- Rizmanoski, V. (2011). The effect of microwave pretreatment on impact breakage of copper ore. *Minerals Engineering*, 24(14), 1609–1618. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.08.017>
- Ruisanchez, E. (2013). Molienda asistida con microondas de materiales siderurgicos.
- Ruisánchez, E., Arenillas, A., Juárez-Pérez, E. J., & Menéndez, J. A. (2012). Pulses of microwave radiation to improve coke grindability. *Fuel*, 102, 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.030>
- Ruisánchez, E., Arenillas, A., & Menéndez, J. A. (2010). Material de Carbono.
- Srl, S., & Dallari, V. G. M. (n.d.). MS DRYTECH – Continuous evolution in the dry preparation of raw materials, 1–6.

- Talco, Yeso, Calcita, Fluoruro, Apatita, Feldespato, ... Diamante. (n.d.). *Propiedades de los sólidos que afectan la molienda Escala de Mohs de dureza*. Retrieved from <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/csalas/PUN/2contTEMA3PULVERIZACION.pdf>
- Walkiewicz, J. W., Clark, A. E., & McGill, S. L. (1991). Microwave-Assisted Grinding, 27(2).
- Wills, B. A. (2011). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Elsevier Science. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=tQj4zuW2VL0C>
- Zhu, J., Liu, J., Yuan, S., Cheng, J., Liu, Y., Wang, Z., ... Cen, K. (2016). Effect of microwave irradiation on the grinding characteristics of Ximeng lignite. *Fuel Processing Technology*, 147, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.030>