

**IRRADIACIÓN CON MICROONDAS A MINERALES RICOS EN ORO EN  
MUESTRAS PROVENIENTES DE LA ZONA DEL SUR DEL BOLÍVAR**

**DANILO ESTEBAN BERNAL BEJARANO**

**SERGIO MAURICIO GARNICA CAÑIZARES**

**YAMIT MAURICIO RESLEN QUINTERO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2012**

**IRRADIACIÓN CON MICROONDAS A MINERALES RICOS EN ORO EN  
MUESTRAS PROVENIENTES DE LA ZONA DEL SUR DEL BOLÍVAR**

**DANILO ESTEBAN BERNAL BEJARANO**

**SERGIO MAURICIO GARNICA CAÑIZARES**

**YAMIT MAURICIO RESLEN QUINTERO**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Electrónico**

**Director:**

**DR. CARLOS RODRIGO CORREA CELY**

**Codirector:**

**IVÁN MAURICIO AMAYA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2012**

## CONTENIDO

|                                                                                           | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| INTRODUCCIÓN                                                                              | 16   |
| 1. CONOCIMIENTOS PREVIOS                                                                  | 18   |
| 1.1 INTERACCIÓN DE LAS MICROONDAS CON LOS MATERIALES                                      | 18   |
| 1.2 PROCESAMIENTO DE MINERALES AURÍFEROS A ESCALA DE<br>LABORATORIO                       | 20   |
| 2. TRABAJOS ANTERIORES                                                                    | 21   |
| 3. CAVIDAD COMPLETA                                                                       | 23   |
| 3.1 SIMULACION                                                                            | 23   |
| 3.1.1 Modos del campo electromagnético                                                    | 24   |
| 3.1.2 Simulación del campo electromagnético                                               | 27   |
| 3.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS                                                                | 30   |
| 3.2.1 Pruebas preliminares                                                                | 30   |
| 3.2.2 Ejecución del diseño de experimentos                                                | 35   |
| 3.3 ANÁLISIS DE POTENCIA                                                                  | 48   |
| 3.4 ANÁLISIS DE RAYOS X                                                                   | 52   |
| 4. MEJORAS PROPUESTAS                                                                     | 54   |
| 4.1 SIMULACIONES                                                                          | 54   |
| 4.2 PRUEBAS PRELIMINARES PARA LA REDUCCIÓN DE LA CAVIDAD                                  | 58   |
| 4.2.1 Pruebas experimentales para la reducción de la cavidad                              | 59   |
| 4.2.2 Pruebas experimentales para encontrar el punto de mayor concentración<br>de energía | 64   |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES                                                         | 69   |
| BIBLIOGRAFÍA                                                                              | 71   |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                           | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1 Modos del microondas                                              | 26   |
| Tabla 2 Pruebas para realizar el diseño de experimentos                   | 39   |
| Tabla 3 Relación entre los factores y sus niveles                         | 40   |
| Tabla 4 Tipo de errores en las pruebas de hipótesis                       | 43   |
| Tabla 5 Especificaciones técnicas del horno microondas utilizado          | 43   |
| Tabla 6 Recuperación del oro en gramos por tonelada                       | 45   |
| Tabla 7 Porcentajes de la recuperación del oro                            | 46   |
| Tabla 8 ANOVA para la selección del modelo factorial                      | 46   |
| Tabla 9 Análisis cuantitativo antes de la tostación                       | 52   |
| Tabla 10 Análisis cuantitativo después de la tostación                    | 53   |
| Tabla 11 Modos en el microondas para las nuevas dimensiones de la cavidad | 56   |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                            | Pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1 Distribución de la densidad de potencia para todos los modos presentes en el plano XZ. $Y = 4\text{cm}$                           | 26   |
| Figura 2 Distribución de la densidad de potencia para todos los modos presentes en el plano YZ. $X = 4\text{cm}$                           | 26   |
| Figura 3 Temperatura superficial de la esfera de agua luego de una exposición a las microondas de 60 segundos                              | 27   |
| Figura 4 Comportamiento de la temperatura en el centro de la esfera durante la exposición a las microondas                                 | 28   |
| Figura 5 Comportamiento del campo eléctrico sobre planos XY                                                                                | 28   |
| Figura 6 Comportamiento del campo eléctrico sobre planos ZY                                                                                | 29   |
| Figura 7 Temperatura superficial del agua al cabo de 60 segundos de radiación con microondas en un punto de mayor concentración de energía | 29   |
| Figura 8 Comportamiento del campo eléctrico para la nueva posición de la esfera de agua                                                    | 30   |
| Figura 9 Disposición de la tabla de madera en el horno microondas para realizar el mapeo                                                   | 31   |
| Figura 10 Disposición del mineral para la tostación                                                                                        | 31   |
| Figura 11 Mineral con una pequeña porción tostada                                                                                          | 32   |
| Figura 12 Sinterización y tostación parcial de la muestra                                                                                  | 33   |
| Figura 13 Tostación del mineral en la nueva posición                                                                                       | 33   |
| Figura 14 Posición final para la tostación                                                                                                 | 34   |
| Figura 15 Sinterización parcial del mineral                                                                                                | 35   |
| Figura 16 Mineral "Juan Blanco" malla 50 sinterizado por sobrecalentamiento                                                                | 37   |
| Figura 17 Mezcla manual del mineral Juan Blanco malla 50, para mantener homogénea la temperatura en la muestra                             | 38   |
| Figura 18 Mufla utilizada para la fundición                                                                                                | 44   |

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 19 Crisoles con los reactivos para la fundición                                                                                   | 45 |
| Figura 20 Efecto del tiempo sobre el diseño                                                                                              | 47 |
| Figura 21 Efecto de la malla sobre el diseño                                                                                             | 47 |
| Figura 22 Horno eléctrico Terrígeno modelo D8                                                                                            | 48 |
| Figura 23 Analizador de calidad de potencia PowerVisa                                                                                    | 49 |
| Figura 24 Potencia activa y aparente consumida por la mufla eléctrica                                                                    | 50 |
| Figura 25 Potencia activa y aparente consumida por el horno microondas                                                                   | 50 |
| Figura 26 Energía consumida por la mufla eléctrica                                                                                       | 51 |
| Figura 27 Energía consumida por el horno microondas                                                                                      | 52 |
| Figura 28 Temperatura superficial de la esfera de agua en la cavidad reducida<br>luego de una exposición a las microondas de 60 segundos | 54 |
| Figura 29 Comportamiento en el centro de la carga de agua durante la<br>exposición a las microondas, para la cavidad reducida            | 55 |
| Figura 30 Comportamiento del campo eléctrico sobre planos XY en la cavidad<br>reducida                                                   | 55 |
| Figura 31 Comportamiento del campo eléctrico sobre planos ZY en la cavidad<br>reducida                                                   | 56 |
| Figura 32 Distribución de la densidad de potencia para todos los modos<br>presentes en el plano XZ. $Y = 4$ cm.                          | 56 |
| Figura 33 Distribución de la densidad de potencia para todos los modos<br>presentes en el plano YZ. $X = 4$ cm                           | 57 |
| Figura 34 Comportamiento de la temperatura en el centro de la esfera<br>ubicándola en un punto de mayor concentración de campo eléctrico | 58 |
| Figura 35 Comportamiento del campo eléctrico luego del cambio de posición<br>de la esfera en la cavidad                                  | 58 |
| Figura 36 Disposición de la prueba para la cavidad reducida 4 cm de ancho                                                                | 59 |
| Figura 37 Imagen térmica luego de una exposición a las microondas de 1<br>minuto para la cavidad reducida 4 cm de ancho                  | 60 |
| Figura 38 Disposición de la prueba para la cavidad reducida 8 cm de ancho                                                                | 60 |
| Figura 39 Imagen térmica luego de una exposición a las microondas de 1                                                                   |    |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| minuto para la cavidad reducida 8 cm de ancho                                                                            | 61 |
| Figura 40 Disposición de la prueba para la cavidad reducida 12 cm de ancho                                               | 61 |
| Figura 41 Imagen térmica luego de una exposición a las microondas de 1<br>minuto para la cavidad reducida 12 cm de ancho | 62 |
| Figura 42 Disposición de la prueba para la cavidad reducida 16 cm de ancho                                               | 62 |
| Figura 43 Imagen térmica luego de una exposición a las microondas de 1<br>minuto para la cavidad reducida 16 cm de ancho | 63 |
| Figura 44 Variación de la temperatura máxima alcanzada en función del<br>tamaño de la cavidad                            | 63 |
| Figura 45 Disposición para la primera prueba con el cartón paja en el horno<br>completo                                  | 64 |
| Figura 46 Imagen térmica para la primera prueba con el cartón paja                                                       | 64 |
| Figura 47 Disposición para la segunda prueba con el cartón paja en el horno<br>completo                                  | 65 |
| Figura 48 Imagen térmica para la segunda prueba con el cartón paja                                                       | 65 |
| Figura 49 Disposición para la tercera prueba con el cartón paja ubicado sobre<br>el plano XZ de la cavidad reducida      | 66 |
| Figura 50 Imagen térmica para la prueba con el cartón paja ubicado sobre el<br>plano XZ de la cavidad reducida           | 66 |
| Figura 51 Disposición para la tercera prueba con el cartón paja ubicado sobre<br>el plano YZ de la cavidad reducida      | 67 |
| Figura 52 Imagen térmica para la prueba con el cartón paja ubicado sobre el<br>plano YZ de la cavidad reducida           | 67 |
| Figura 53 Disposición del vaso en el punto de máximo de energía con la<br>cavidad reducida                               | 68 |
| Figura 54 Imagen térmica para la carga de agua en un punto de máxima<br>concentración de energía con la cavidad reducida | 68 |

## RESUMEN

### **TÍTULO:**

IRRADIACIÓN CON MICROONDAS A MINERALES RICOS EN ORO EN MUESTRAS PROVENIENTES DE LA ZONA DEL SUR DEL BOLÍVAR.\*

### **AUTOR(ES):**

DANILO ESTEBAN BERNAL BEJARANO\*\*

SERGIO MAURICIO GARNICA CAÑIZARES\*\*

YAMIT MAURICIO RESLEN QUINTERO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Cavidad resonante, microondas, modos electromagnéticos, tostación, oro.

### **DESCRIPCIÓN:**

El presente informe de investigación describe el estudio realizado sobre el posible uso de las microondas para mejorar el proceso de tostación de minerales. Se tomaron dos muestras piríticas (y por tanto difíciles de tratar por medios tradicionales), del sur de Bolívar (Colombia), correspondientes a la zona de mayor y menor concentración de oro, de la mina conocida como "Juan Blanco". Se inicia con una sucinta descripción de algunos trabajos realizados con anterioridad, donde se verifica el efecto de las microondas en diferentes materiales. Luego de esto, se presenta una simulación de los modos y de la distribución de campo eléctrico dentro de un horno microondas doméstico, obtenidos a partir de una serie de consideraciones; con el fin de verificar la similitud de los resultados con lo asumido, así como de verificar el incremento de temperatura estimado para una carga de agua, se realiza una simulación en un programa especializado en solución de problemas electromagnéticos, encontrando un ajuste entre los campos y una transformación de energía en calor aceptables. Se continúa con un diseño de experimentos, utilizado para determinar si la tostación por microondas puede llegar a ser mejor que la tradicional; para ello, se parte de unas pruebas preliminares, enfocadas a definir el rango de los factores del proceso. Adicionalmente, se evalúa el consumo de potencia de la alternativa tradicional y de la microondas, para verificar el posible ahorro energético derivado del cambio de procesamiento. Se encontró una reducción en el tiempo de procesamiento de 75%, y un ahorro en consumo de potencia de 88,1%. Sin embargo, el margen de recuperación alcanzado con la muestra tratada con ondas electromagnéticas fue, como máximo, el 90% del alcanzado luego de la tostación tradicional, por lo que se propone una serie de posibles mejoras al proceso.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Carlos Rodrigo Correa Cely. Codirector: Iván M. Amaya Contreras.

## ABSTRACT

### TITLE:

MICROWAVE IRRADIATION IN SAMPLES RICH GOLD ORE FROM THE AREA SOUTH OF BOLÍVAR.\*

### AUTHOR(S):

DANILO ESTEBAN BERNAL BEJARANO\*\*  
SERGIO MAURICIO GARNICA CAÑIZARES\*\*  
YAMIT MAURICIO RESLEN QUINTERO\*\*

**KEY WORDS:** Resonant cavity, microwave, electromagnetic modes, roasting, gold.

### DESCRIPTION:

This research report describes the study done about the possible use of microwave to improve ore roasting process. We take two pyritic samples (therefore difficult to treat by conventional means), from south of Bolívar (Colombia), corresponding to the area of higher and lower concentrations of gold, of the mine known as "Juan Blanco". It begins with a brief description of some previous research, which verifies the effect of microwaves on different materials. After this, we present a simulation of the modes and the distribution of electric field inside a domestic microwave oven, obtained from a number of considerations, with the aim of verify similar results with the assumptions, as well as check the temperature increase estimated for a load of water, is performed a simulation in a specialized software in solving electromagnetic problems, finding a adjustment between the fields and transformation of energy into heat acceptable. It continues with a design of experiments used to determine if the roasting by microwave can be better than the traditional, for this, we started of preliminary tests, aimed at defining the range of process factors. Additionally, it evaluates the power consumption of the traditional alternative and the microwaves, to verify the possible energy saving resulting of the change of processing. There was a reduction in processing time of 75%, and a saving in power consumption of 88.1%. However, the range of recovery achieved with the sample treated with electromagnetic waves was 90% of the obtained after the traditional roasting; therefore we propose a series of improvements to the process.

---

\* Degree Work

\*\* Physics Mechanical Engineering Faculty. Electric, Electronic and Telecommunications School.  
Director: Carlos Rodrigo Correa Cely. Codirector: Iván M. Amaya Contreras.

## INTRODUCCIÓN

Ya hace algún tiempo se ha ido investigando la posibilidad de calentar una gran variedad de materiales, mediante la aplicación de ondas electromagnéticas en la banda de las microondas (comprendidas entre los 300 MHz y los 300 GHz), donde el incremento de temperatura se deriva de la interacción entre el campo eléctrico y las moléculas, o partículas, que tienen una distribución de carga no nula [1]. Esto induce un calentamiento volumétrico, que puede llegar a ser selectivo y rápido, si las propiedades de la carga lo permiten, y, por extensión, puede permitir un proceso amigable con el medio ambiente y de fácil control (principalmente para tiempo de exposición y potencia). Esto lo diferencia del calentamiento convencional, y lo convierte en objeto de estudio atractivo, para lograr aplicarlo a diferentes procesos [2].

Este calentamiento es un proceso complejo, en cuanto existe una dependencia de las propiedades de la muestra (por ejemplo, su estructura, geometría, constantes dieléctricas y magnéticas, conductividad, etc.). Por otra parte, la presencia de un gran número de modos en un aplicador de microondas, dificulta conseguir distribuciones de campo eléctrico uniforme, donde la interferencia de los modos originan numerosos máximos y mínimos en el campo, lo que conlleva la aparición de puntos fríos y calientes distribuidos en todo el aplicador [3]. Las pruebas preliminares realizadas a las muestras minerales dan una idea de la buena interacción presente entre las menas refractarias, con las que se pretende realizar este trabajo, y las microondas.

Son diversos los campos en los que las microondas están siendo actualmente usadas, tales como las comunicaciones y el calentamiento de alimentos. Pero algunas investigaciones dan una idea que estos no son los únicos usos de esta tecnología. Sectores como la construcción, la cerámica, el caucho y la metalúrgica, entre otros, pueden verse beneficiados por ésta [4–6]. No obstante,

el uso de esta tecnología en países subdesarrollados, como el nuestro, aun no se da, básicamente por la falta de conocimiento tanto de la industria como de los entes investigadores [2].

En el campo de la minería, la refractariedad ha sido relacionada con bajos niveles en la recuperación, por medio de procesos metalúrgicos clásicos, de metales preciosos asociados a sulfuros (Calcopirita, Arsenopirita, Pirrotita, entre otros), materia carbonosa, hidróxidos y otros minerales, que hacen que los procedimientos existentes sean insuficientes y costosos, económica y ambientalmente [2]. Para disminuir el efecto refractario de algunas menas, existen métodos hidrometalúrgicos (por ejemplo, oxidación con permanganato de potasio, oxidación química con sulfuros y/o hidróxidos alcalinos, oxidación con peróxido de hidrógeno) y pirometalúrgicos (por ejemplo, la tostación oxidante), que buscan eliminar los compuestos problemáticos [2]. El calentamiento con microondas hace parte de un proceso pirometalúrgico, en donde la interacción de las ondas electromagnéticas con las menas refractarias hacen posible producir la tostación necesaria para mitigar este problema.

Este trabajo plantea un diseño de experimentos para un proceso de tostación a menas refractarias, provenientes de la mina "Juan Blanco", del Sur de Bolívar. Haciendo un estudio detallado de la cavidad multimodal utilizada para el calentamiento con microondas, la presencia de los modos en el horno, la distribución del campo electromagnético y el punto de mayor incidencia del mismo. De igual forma, se plantea un análisis de las posibles ventajas obtenidas al hacer reducciones en las dimensiones de una cavidad resonante rectangular.

## 1. CONOCIMIENTOS PREVIOS

En esta sección se documenta la información más relevante del calentamiento por microondas, entre la cual se encuentra la característica de las propiedades dieléctricas de los materiales y la densidad de potencia absorbida en función de la permitividad eléctrica, la tangente de pérdidas, la frecuencia de las microondas y la intensidad del campo eléctrico.

### 1.1 INTERACCIÓN DE LAS MICROONDAS CON LOS MATERIALES

Las propiedades dieléctricas y magnéticas del medio, tales como, la conductividad eléctrica ( $\sigma$ ), la permitividad eléctrica ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad magnética ( $\mu$ ), rigen en conjunto la interacción del campo electromagnético con cualquier material.

Para el calentamiento de materiales por medio de microondas, las pérdidas dieléctricas son las que tienen mayor influencia. Sin embargo, es importante tener en cuenta que existen materiales con pérdidas magnéticas significativas, por lo que en estos casos la permeabilidad compleja relativa debe considerarse. Tales propiedades están definidas por:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$

En presencia de un campo eléctrico, la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) y el factor de pérdidas dieléctricas ( $\epsilon''$ ) son usados para expresar la respuesta debido a la interacción de los materiales con dicho campo. Por una parte, la constante dieléctrica describe la habilidad del material para almacenar energía de microondas; mientras que el factor de pérdidas, mide la habilidad de un material para disipar en calor la energía que fue almacenada [7].

Otro parámetro de gran importancia, conocido como la tangente de pérdidas ( $\tan \delta$ ) y dado por la Ec. (3), es un indicativo de que tan bien puede ser penetrado un material por un campo eléctrico, y de cómo es disipada la energía en forma de calor.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3)$$

Principalmente, el calentamiento con microondas se debe a la capacidad que tiene el material dieléctrico para polarizar sus cargas o mover sus iones positivos y/o negativos a lo largo de su volumen en presencia de un campo eléctrico. La dificultad de seguir los cambios rápidos del campo, provoca la disipación de energía en forma de calor [8].

El factor de pérdidas efectivo está expresado como la contribución de las pérdidas debidas a los fenómenos de conducción y polarización.

$$\epsilon''_{eff} = \epsilon''_d(\omega) + \epsilon''_e(\omega) + \epsilon''_a(\omega) + \epsilon''_{MW}(\omega) + \left[ \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right] \quad (4)$$

Donde los cuatro primeros términos corresponden a las pérdidas dieléctricas (mecanismos dipolares, eléctricos, atómicos y el efecto de Maxwell-Wagner), y el último término agrupa las pérdidas por conducción.

Una forma de describir la interacción del campo electromagnético con la materia se describe en la Ec. (5), que representa la potencia absorbida. Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica en el vacío,  $f$  la frecuencia de excitación de las microondas y  $\epsilon''_{eff}$  el factor de pérdidas efectivo, descrito anteriormente. El primer término representa el efecto del campo eléctrico, y el segundo describe el efecto del campo magnético; ignorando este último en la mayoría de los casos, para materiales dieléctricos.

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon''_{eff} * E^2 + 2\pi f \mu_0 \mu''_{eff} * H^2 \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (5)$$

La profundidad de penetración de las microondas ( $D_p$ ), es la distancia medida, desde la superficie en donde se tiene una energía de incidencia ( $e$ ), hasta donde esta se reduce a  $1/e$  [7].

$$D_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon'} [\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1]^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

## 1.2 PROCESAMIENTO DE MINERALES AURÍFEROS A ESCALA DE LABORATORIO

El tratamiento de las menas refractarias se realiza, principalmente, por medio del método de ensaye al fuego. Ésta resulta ser una técnica eficiente y sencilla, la cual, cabe destacar, sólo es utilizada para determinar el tenor de la muestra (cantidad de oro, en gramos por tonelada). Lo anterior debido a que, si se implementa a escala industrial, no resulta rentable. El método consiste en utilizar la propiedad que tiene el plomo para coleccionar el oro y la plata, la cual se manifiesta en el estado de fusión (950– 1050 °C). Luego, el proceso continúa separando el plomo del oro y la plata, por medio de una fusión oxidante (copelación). Por último, se separa la plata del oro con ayuda de ácido nítrico (partición).

## 2. TRABAJOS ANTERIORES

Ya son varios los campos en los cuales se ha centrado el estudio de la aplicación de las microondas para lograr calentamiento en procesos industriales. Una de las grandes ventajas de este método es la reducción en tiempo de procesamiento, en comparación con métodos convencionales, que lleva a un ahorro de tiempo y energía. Se han realizado estudios sobre la manera de poder mejorar el proceso de calentamiento y de lograr un adecuado diseño del sistema, en los que las guías de onda han sido un tema principal de desarrollo e investigación [9].

En el procesamiento de materiales cerámicos, se han logrado importantes beneficios. Se menciona, por ejemplo, el proceso de la sinterización del carburo de tungsteno (WC) con compuestos cerámicos, utilizado para crear un compuesto de metal muy duro, resistente y fuerte, usado para fabricar herramientas cortadoras y taladros bajo tierra. Por medio del calentamiento con microondas se logra la sinterización en un corto periodo de tiempo (entre 10 y 30 minutos), comparado con el tiempo que tarda el procesamiento tradicional (1 día). Además, otra ventaja de esta sinterización con microondas es que el grano del material tiene un mínimo crecimiento durante el proceso, lo que ocasiona que el material tenga mejores propiedades mecánicas en comparación al creado tradicionalmente [10]. Las ventajas de la sinterización por microondas son aplicables a la fabricación de materiales cerámicos transparentes, en los que se debe tener muy en cuenta el tamaño del grano del material, condiciones largas de sinterización y otros procesos que resultan complejos; en este proceso la implementación de las microondas ha resultado útil [10].

En la industria minera, se ha encontrado que las microondas reaccionan muy bien con los sulfuros asociados al mineral, lográndose de esta forma la tostación en un menor tiempo del que normalmente requiere [5]. Además, se ha encontrado que el pretratamiento de minerales auríferos con microondas para el consecuente

proceso de lixiviación, ha permitido recuperar el 81% del oro, comparado a un 37% recuperado tradicionalmente [11].

Otros estudios que se han llevado a cabo acerca del calentamiento con microondas, son el secado, calcinación, tostación y fundición de minerales. Estudios en los cuales, se ha encontrado que los carbones y los sulfuros metálicos, son bastante susceptibles ante las microondas, y estos pueden tener un calentamiento rápido y selectivo. Además, también se encuentra que para el caso particular de la pirita, la máxima temperatura alcanzada al cabo de 7 minutos de exposición a las microondas fue de 1019 °C. Con lo anterior se concluye, que no hay necesidad de emplear susceptores de microondas en minerales ricos en pirita, ya que este alcanzará la temperatura de tostación por si solo [12], [13].

Las aplicaciones de las microondas también atrae el interés de los investigadores en china, en donde han observado, que en el campo de la metalúrgica, las microondas juegan un rol importante en muchos aspectos, tales como la tostación, extracción de metales no ferrosos, tratamiento de minerales de hierro y reciclar la utilización de tierras y escorias. La no sinterización de carbón de concentraciones de magnetita con microondas es un tema de interés considerando reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y protección del medio ambiente [14].

### **3. CAVIDAD COMPLETA**

En esta sección se busca analizar el comportamiento del campo electromagnético dentro de la cavidad del horno microondas. Para ello, se realizó una serie de análisis, incluyendo la determinación de los modos electromagnéticos presentes en la cavidad, el comportamiento del campo electromagnético dentro de ésta y la variación de la temperatura, para una carga de agua, en función del tiempo de exposición. Además, se realiza un conjunto de pruebas preliminares, cuyo objetivo es encontrar los parámetros adecuados para lograr tostar la muestra. Con base en ellos, se realiza un diseño de experimentos, con el que se busca verificar si existe una mejora en el proceso.

#### **3.1 SIMULACIÓN**

El calentamiento por microondas depende, en gran medida, de las propiedades dieléctricas de la muestra, así como del campo electromagnético que actúa sobre ella. Adicionalmente, su distribución se encuentra regida por la superposición de los modos electromagnéticos existentes dentro de la cavidad. Dado que cada uno de ellos obedece a una distribución sinusoidal, tanto los modos, como la superposición, presentarán zonas de mayor intensidad de campo eléctrico, lo que lleva a una mayor transformación de energía eléctrica en calor, y por tanto a la generación de lo que se conoce como un punto caliente. Por tanto, es importante contar con una aproximación de la distribución de campo eléctrico, que permita ubicar la carga en una zona de relativa uniformidad y de elevada intensidad.

Por lo anterior, esta sección muestra el resultado de una serie de simulaciones, enfocadas a determinar la distribución mencionada y a conocer la variación de la temperatura en función del tiempo, para una carga de agua.

**3.1.1 Modos del campo electromagnético** Un horno microondas puede aproximarse como una cavidad resonante rectangular, donde se ignora su acople con el magnetrón. dentro de la primera, se generan una serie de ondas estacionarias, por lo que, bajo condiciones ideales, se puede obtener una aproximación de los modos presentes en la cavidad.

Considerando lo mencionado previamente, se pueden derivar las ecuaciones de campo eléctrico para cada componente (Ec. (7)-(9)) [15]:

$$E_x = E_1 \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z) e^{i\omega t} \quad (7)$$

$$E_y = E_2 \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) e^{i\omega t} \quad (8)$$

$$E_z = E_3 \sin(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z) e^{i\omega t} \quad (9)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia angular de las microondas emitidas por el magnetrón; y  $k_x, k_y, k_z$ , están definidas por [15], [16]:

$$k_x = \frac{m\pi}{L_x}, k_y = \frac{n\pi}{L_y}, k_z = \frac{p\pi}{L_z} \quad (m, n, p = 0, 1, 2 \dots) \quad (10)$$

Donde  $L_x, L_y$  y  $L_z$  son las dimensiones de la cavidad. Por lo anterior, cada combinación posible de  $(m, n, p)$  permite obtener diferentes modos del campo eléctrico, para los cuales la frecuencia angular está dada por:

$$\frac{(\omega_{m,n,p})^2}{C^2} = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (11)$$

Donde  $C$  es la velocidad de la luz, y su relación con la frecuencia viene dada por:

$$C = f\lambda \quad (12)$$

Al resolver el sistema dado por las Ec.(10-12), para una longitud de onda dada, se obtienen los diferentes modos de campo electromagnético, para una única frecuencia de excitación. Además, para un análisis más sencillo, se asume que la carga presente en la cavidad no perturba el campo, por lo que la densidad de potencia absorbida por el material es [16]:

$$p = w * Im[\epsilon] * E^2 \approx E^2 \quad (13)$$

Donde  $I_m[\epsilon]$  es el factor de pérdidas del material y  $E^2$  se puede describir de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} E^2 &= \frac{1}{2} (|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2) \\ &= \frac{1}{2} [E_1^2 \cos^2(k_x x) \sin^2(k_y y) \sin^2(k_z z) \\ &\quad + E_2^2 \sin^2(k_x x) \cos^2(k_y y) \sin^2(k_z z) \\ &\quad + E_3^2 \sin^2(k_x x) \sin^2(k_y y) \cos^2(k_z z)] \end{aligned} \quad (14)$$

Utilizando estas expresiones, y considerando un horno microondas marca LG, de referencia MH1449 cuyas dimensiones de la cavidad son de 37,5 cm de ancho, 23 cm de altura y 36 cm de profundidad, con una frecuencia de trabajo del magnetrón de 2,45 GHz, que corresponde a una longitud de onda de 12,25 cm, en el vacío, y una potencia de 1 kW [17], se realizan los cálculos respectivos. Esto da como resultado la información de la Tabla 1, con la que se genera la distribución de campo mostrada en la Figura 1 y en la Figura 2, donde las zonas en rojo y azul corresponden a los lugares con mayor y menor densidad de potencia, respectivamente.

Tabla 1.Modos del microondas

| $\lambda_{m,n,p}(cm)$ | $m$ | $n$ | $p$ |
|-----------------------|-----|-----|-----|
| 12.2052               | 0   | 2   | 5   |
| 12.2165               | 2   | 3   | 3   |
| 12.2599               | 5   | 1   | 3   |
| 12.2680               | 3   | 3   | 2   |

Figura 1. Distribución de la densidad de potencia para todos los modos presentes en el plano XZ. Y = 4 cm

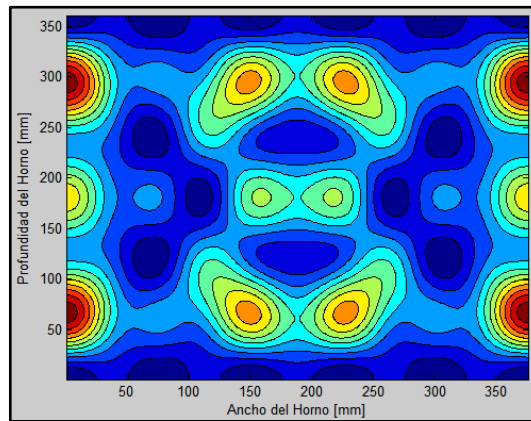
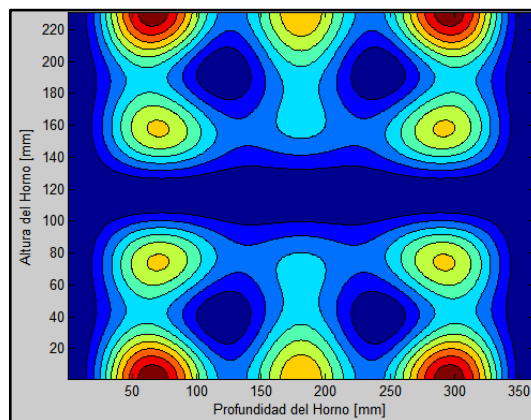


Figura 2.Distribución de la densidad de potencia para todos los modos presentes en el plano YZ. X = 4 cm



**3.1.2 Simulación del campo electromagnético** Además de conocer los modos presentes en la cavidad, también se desea observar el comportamiento del campo electromagnético y la variación de la temperatura en función del tiempo, ante una carga de agua. para ello, se utilizó el software comsol multiphysics® en el cual se realizan simulaciones de problemas en ingeniería. En éste, se pueden definir la geometría de los objetos, las características de la medición y las propiedades físicas de los materiales, buscando dar mayor realismo a los resultados de la simulación.

La primera simulación se realiza para un tiempo de exposición de 60 segundos y una temperatura inicial de 25°C (temperatura ambiente). Al concluir, se observa la respuesta de la temperatura (Figura 3 y Figura 4) y el comportamiento del campo eléctrico (Figura 5 y Figura 6).

Figura 3. Temperatura superficial de la esfera de agua luego de una exposición a las microondas de 60 segundos

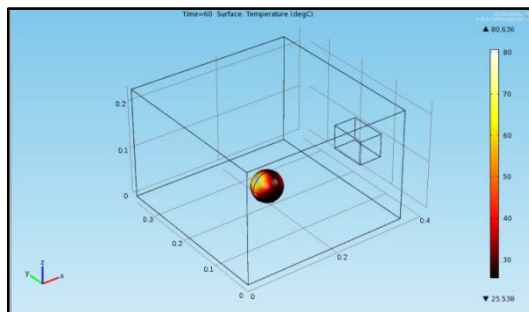
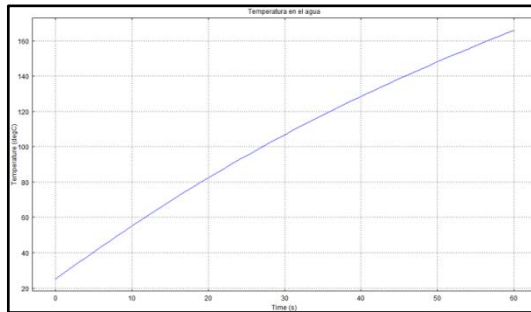


Figura 4. Comportamiento de la temperatura en el centro de la esfera durante la exposición a las microondas



De la Figura 3 se puede observar que la temperatura máxima alcanzada en la superficie del agua, al cabo de 60 segundos, fue de  $80,6^{\circ}\text{C}$ , mientras que en la Figura 4 se observa que la temperatura máxima en el centro de la esfera fue de  $175^{\circ}\text{C}$ , para una temperatura inicial de  $25^{\circ}\text{C}$ .

Además, también se realiza un análisis del comportamiento del campo eléctrico dentro de la cavidad, así como de su intensidad. Este comportamiento se expone en la Figura 5, donde se analiza el campo eléctrico para varios planos XY (siendo para el software X el ancho, Z el alto e Y la profundidad de la cavidad), mientras que en la Figura 6 se expone el comportamiento del campo eléctrico para varios planos ZY.

Figura 5. Comportamiento del campo eléctrico sobre planos XY

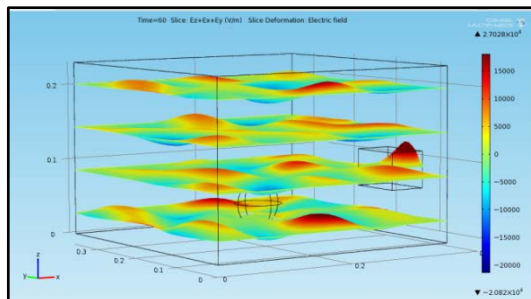
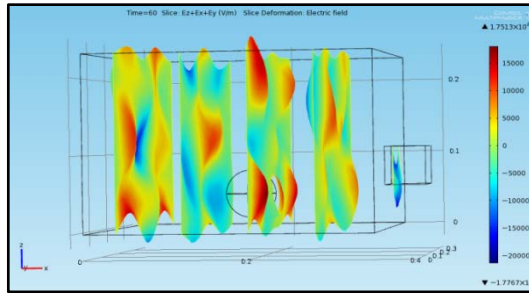
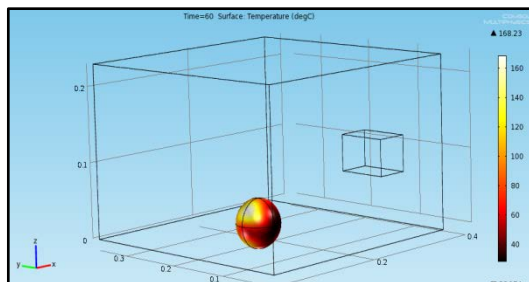


Figura 6. Comportamiento del campo eléctrico sobre planos ZY



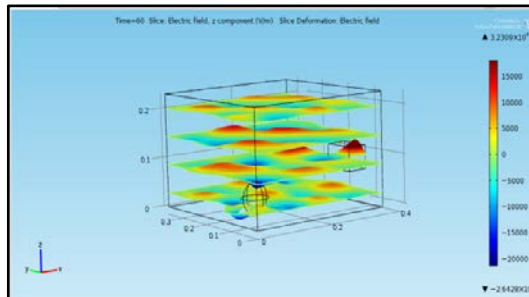
De las figuras anteriores se concluye como puede llegar a ser el comportamiento del campo eléctrico dentro de la cavidad, además de apreciar que sus puntos máximos y mínimos varían en toda la longitud del aplicador, siendo este un punto de partida para identificar los modos presentes y los puntos de mayor concentración de energía en la cavidad. Con esta información, se reubica la esfera, buscando alcanzar una mayor temperatura para un mismo tiempo de simulación. Luego se obtiene un nuevo comportamiento de la temperatura superficial, como lo muestra la Figura 7, la cual incrementa con respecto a la ubicación anterior, concluyendo que la posición de la muestra en la cavidad juega un papel importante a la hora de la tostación.

Figura 7. Temperatura superficial del agua al cabo de 60 segundos de radiación con microondas en un punto de mayor concentración de energía



Además también se observa una leve distorsión del campo eléctrico con respecto a la esfera ubicada en el centro (Figura 8), lo cual indica que el campo se ve afectado tanto por la ubicación de la esfera como por sus propiedades dieléctricas.

Figura 8. Comportamiento del campo eléctrico para la nueva posición de la esfera de agua

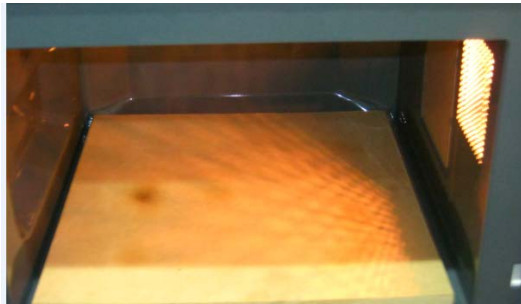


### 3.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En esta sección se definen una serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada del proceso, llamadas factores, para identificar las razones de los cambios que se observan en la respuesta de salida. En la actualidad, gran parte de la investigación en la ingeniería, las ciencias y la industria es empírica y hace un uso extensivo de la experimentación. Los métodos estadísticos pueden incrementar en gran medida la eficiencia de estos experimentos y con frecuencia pueden fortalecer las conclusiones así obtenidas [18].

**3.2.1 Pruebas preliminares** Antes de ejecutar el diseño de experimentos, se deben determinar los parámetros de la tostación. para esto, se realizó una serie de pruebas con el objetivo de determinar los puntos de mayor concentración de energía electromagnética, para ubicar la muestra y proceder con la tostación. Como un primer enfoque, se realizó un mapeo del horno microondas. éste se realizó ubicando superficies de madera, de 3 y 12 mm, sobre la superficie de la cavidad, como se observa en la figura 9, para luego irradiarlas con microondas durante 2 y 5 minutos, respectivamente.

Figura 9. Disposición de la tabla de madera en el horno microondas para realizar el mapeo



Luego de varias repeticiones, se realizó un promedio con el fin de determinar el punto de mayor concentración de energía, el cual se tomó como el lugar para ubicar la muestra durante las pruebas. Cabe aclarar que, dado el número de pruebas preliminares, así como el limitado espacio disponible, solamente se comentarán las pruebas más relevantes.

Al ejecutar las primeras pruebas, se encontró que el mineral no incrementaba su temperatura, por lo que se decidió variar la altura y verificar su efecto. Con esto se logró determinar un punto adecuado para la tostación, como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Disposición del mineral para la tostación



Luego, se procedió a realizar la tostación, pero con la ayuda de un elemento sensible a las microondas (susceptor, carburo de silicio, malla 50), con el objetivo

de facilitar la absorción del campo electromagnético al ser mezclado con el mineral. En esta prueba se dispuso de un tiempo de exposición de 10 minutos, luego del cual se tostó una pequeña porción del mineral, como se puede ver en la Figura 11.

Figura 11. Mineral con una pequeña porción tostada



Haciendo un estudio de diferentes factores influyentes en la tostación, se realizó de nuevo una prueba con carburo, en este caso malla 10, donde una vez finalizado el tiempo de exposición (10 min), se obtuvo un cambio notable en el mineral, referente a una pequeña parte de la muestra al rojo vivo (Figura 12), en donde alrededor de ese punto se observaba tostación parcial del mineral. Además, una vez había descendido la temperatura de la muestra, se encontró que una pequeña parte del mineral se había sinterizado, siendo este último un efecto negativo de la sobreexposición de las microondas en un mismo punto.

Figura 12. Sinterización y tostación parcial de la muestra



En las pruebas mencionadas también se observó que la tostación se estaba llevando a cabo en uno de los extremos de la vasija, por lo que se reubicó, buscando centrar la manifestación del fenómeno, Figura 13. Posteriormente, se realizó una prueba en la nueva posición (en este caso sin carburo de silicio), con el mismo tiempo de exposición, obteniéndose un mayor margen de tostación.

Figura 13. Tostación del mineral en la nueva posición



Cabe mencionar que las pruebas anteriores se realizaron con mineral de arcilla, el cual al tostarse no genera gases tóxicos, debido a que éstas fueron hechas en un laboratorio común, y no en uno equipado con campana extractora.

Al disponer de un laboratorio especializado, se realizó una prueba con mineral proveniente de la zona sur de Bolívar, de una mina conocida con "Juan Blanco", la cual tiene contenido de azufre, en forma de pirita, y por ende es más susceptible a las microondas. En esta prueba se expuso el mineral durante 10 minutos, encontrando que no había incrementado su temperatura significativamente. Dado que esto contradice lo esperado, se concluyó que, para este mineral, el punto de mayor concentración de energía se encontraba en una posición diferente. Por ende, se realizó un nuevo mapeo, pero utilizando en este caso, muestra de la mena con pirita. La Figura 14 muestra la nueva ubicación del punto máximo, en el que se obtiene material sinterizado luego de 10 minutos de exposición, como se observa en la Figura 15. Adicionalmente, se observó gran cantidad de emisión de vapores (dióxido de azufre, principalmente).

Figura 14. Posición final para la tostación



Figura 15. Sinterización parcial del mineral



De esta última prueba se concluye que se necesita irradiar el mineral durante intervalos de tiempo, con el fin de que en cada intervalo se pueda disminuir un poco la temperatura del mineral, mezclándolo manualmente, y evitando así la sinterización.

Una vez concluidas las pruebas preliminares se procede a ejecutar el diseño de experimentos, para poder concluir los pasos que se han de seguir para lograr la tostación.

**3.2.2 Ejecución del diseño de experimentos** En la mayoría de estudios experimentales predomina el análisis de los efectos producidos por dos o más factores sobre una variable de salida. en general, los diseños factoriales son considerados los más adecuados para este tipo de experimentos, ya que evitan llegar a conclusiones erróneas cuando existen posibles interacciones entre los factores de un proceso. por diseño factorial se entiende que en cada ensayo o réplica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores, resultando útil para verificar la interacción entre los mismos [18].

Se recomienda el siguiente esquema general de procedimiento, para seguir una línea de trabajo adecuada en la creación y análisis del diseño del experimento:

- Factores
- Niveles de cada factor
- Replicas
- Aleatorización
- Desarrollo del experimento

Son muchos los factores que influyen y determinan el proceso de irradiación con microondas a minerales refractarios. Las pruebas preliminares dan una idea del comportamiento de este proceso, y, al observarlas detalladamente, se puede encontrar cuales son los factores más relevantes:

1. Tiempo de exposición del mineral a las microondas.
2. Masa de la muestra.
3. Temperatura inicial del medio (magnetron y cavidad).
4. Temperatura inicial del material irradiado
5. Potencia emitida por el horno microondas.
6. Posición (vertical y/o horizontal) de la muestra en la cavidad.
7. Tamaño de la cavidad.
8. Porcentaje de humedad en la muestra.
9. Irradiación del mineral mezclado con carburo, utilizando este último como susceptible de las microondas (para acelerar el calentamiento).
10. Irradiación del mineral mezclado con grafito, utilizando este último como susceptible de las microondas.
11. Granulometría del mineral.
12. Granulometría del carburo.
13. Tipo de mineral, compuesto de arcilla o pirita.
14. Tipo de recipiente para la ubicación de la muestra.
15. Forma y tamaño del recipiente utilizado para depositar el mineral durante la irradiación.
16. Periodos de calentamiento-enfriamiento-mezclado (Se suspende el calentamiento para mezclar manualmente y enfriar un poco, para luego

volver a calentar, buscando hacer una distribución de la temperatura más uniforme y al mismo tiempo evitar la sinterización).

Todos los aspectos mencionados son relevantes e inciden considerablemente en el proceso de calentamiento del mineral por microondas. Sin embargo, para este trabajo solamente se variaron los factores número 1, 11 y 13, tomando los demás constantes, por lo que se explica a continuación.

➤ **Tiempo de exposición del mineral a las microondas.**

Son varias las razones por las que el tiempo de exposición a las microondas juega un papel importante en el calentamiento del mineral. La respuesta de las menas refractarias durante la irradiación está muy ligada al tiempo que dure este proceso: tiempos demasiados cortos no afectan significativamente la muestra, y no logran cambios considerables. Por otra parte, tiempos muy largos generan sobrecalentamiento y, por ende, sinterización del mineral, como lo muestra la Figura 16, por lo que es importante definir tiempos que permitan incrementar la temperatura, pero sin llegar a una sinterización.

Figura 16. Mineral “Juan Blanco” malla 50 sinterizado por sobrecalentamiento



Teniendo en cuenta lo anterior, y junto con las pruebas preliminares, se define una pareja de tiempo de prueba, correspondiente a 28 y 42 minutos, con periodos de exposición de 7 minutos, permitiendo la homogenización de la temperatura a

través de un mezclado manual, como se muestra en la Figura 17. Esto sirve, además, para evacuar buena parte de los vapores concentrados en la cavidad, para mitigar algunas llamas producidas (buscando proteger el equipo), para oxigenar tanto la cavidad como el mineral, y, más importante aún, para evitar la sinterización de la muestra.

Figura 17. Mezcla manual del mineral Juan Blanco malla 50, para mantener homogénea la temperatura en la muestra



#### ➤ **Granulometría del mineral**

La eficiencia en la interacción entre la materia y las microondas va muy ligada a las propiedades del mineral, entre las que se encuentra el tamaño de partícula. Para la presente investigación, se tomó 40 g de mineral, previamente secado, molido y tamizado a diferentes números de malla, para verificar el efecto de este factor en la absorción de microondas. Lo anterior debido a los reportes de trabajos previos [5], donde se comenta la influencia que este aspecto tiene en el calentamiento dieléctrico de minerales refractarios.

Para la ejecución del diseño de experimentos, teniendo como referencia tres factores con dos niveles cada uno, se necesitaban aproximadamente 480g de cada malla para cada mineral. Por otra parte, se quiso tener en cuenta dos tamaños de partículas considerablemente diferentes, buscando identificar con facilidad, la influencia que este factor tenía sobre el proceso de irradiación con

microondas a los minerales. Se seleccionaron malla 50 y malla 170 para el diseño de experimentos.

➤ **Tipo de mineral**

Se contó con dos tipos de muestras diferentes, de la zona del Sur de Bolívar, de la mina "Juan Blanco", donde una se extrae de la veta de la mina, y la otra muestra proviene de la zona de menor concentración del metal, con características físicas diferentes pero con la similitud que son minerales compuestos por grandes cantidades de pirita. Esto resultó atractivo para el trabajo, por la dificultad que presenta el tratamiento de este tipo de muestras por métodos convencionales de minería.

Para  $k$  número de factores con  $n$  niveles en cada uno, se obtienen  $n^k$  pruebas, para este caso  $2^3 = 8$  experimentos. Como se desea realizar tres réplicas, se completan 24 observaciones. Para el análisis de la información, se utilizó un software especializado en diseño de experimentos, que en este caso corresponde al programa Design-Expert 8.0.7.1, utilizado con una licencia de prueba.

El orden en que se deben hacer las observaciones debe ser aleatorio, para que el diseño sea completamente randómico. La Tabla 2 presenta esta relación.

Tabla 2. Pruebas para realizar el diseño de experimentos

| <i>Std</i> | <i>Run</i> | <i>Bloque</i> | <i>Factor 1</i><br><i>A: Tiempo</i> | <i>Factor 2</i><br><i>B: Mineral</i> | <i>Factor 3</i><br><i>C: Granulometria</i> |
|------------|------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
| 13         | 1          | Bloque 1      | Nivel 1 de A                        | Nivel 1 de B                         | Nivel 2 de C                               |
| 16         | 2          | Bloque 1      | Nivel 2 de A                        | Nivel 1 de B                         | Nivel 2 de C                               |
| 7          | 3          | Bloque 1      | Nivel 1 de A                        | Nivel 2 de B                         | Nivel 1 de C                               |
| 19         | 4          | Bloque 1      | Nivel 1 de A                        | Nivel 2 de B                         | Nivel 2 de C                               |
| 22         | 5          | Bloque 1      | Nivel 2 de A                        | Nivel 2 de B                         | Nivel 2 de C                               |
| 10         | 6          | Bloque 1      | Nivel 2 de A                        | Nivel 2 de B                         | Nivel 1 de C                               |

|    |    |                 |                     |                     |                     |
|----|----|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1  | 7  | <i>Bloque 1</i> | <i>Nivel 1 de A</i> | <i>Nivel 1 de B</i> | <i>Nivel 1 de C</i> |
| 4  | 8  | <i>Bloque 1</i> | <i>Nivel 2 de A</i> | <i>Nivel 1 de B</i> | <i>Nivel 1 de C</i> |
| 8  | 9  | <i>Bloque 2</i> | <i>Nivel 1 de A</i> | <i>Nivel 2 de B</i> | <i>Nivel 1 de C</i> |
| 20 | 10 | <i>Bloque 2</i> | <i>Nivel 1 de A</i> | <i>Nivel 2 de B</i> | <i>Nivel 2 de C</i> |
| 2  | 11 | <i>Bloque 2</i> | <i>Nivel 1 de A</i> | <i>Nivel 1 de B</i> | <i>Nivel 1 de C</i> |
| 5  | 12 | <i>Bloque 2</i> | <i>Nivel 2 de A</i> | <i>Nivel 1 de B</i> | <i>Nivel 1 de C</i> |
| 14 | 13 | <i>Bloque 2</i> | <i>Nivel 1 de A</i> | <i>Nivel 1 de B</i> | <i>Nivel 2 de C</i> |
| 17 | 14 | <i>Bloque 2</i> | <i>Nivel 2 de A</i> | <i>Nivel 1 de B</i> | <i>Nivel 2 de C</i> |
| 23 | 15 | <i>Bloque 2</i> | <i>Nivel 2 de A</i> | <i>Nivel 2 de B</i> | <i>Nivel 2 de C</i> |
| 11 | 16 | <i>Bloque 2</i> | <i>Nivel 2 de A</i> | <i>Nivel 2 de B</i> | <i>Nivel 1 de C</i> |
| 3  | 17 | <i>Bloque 3</i> | <i>Nivel 1 de A</i> | <i>Nivel 1 de B</i> | <i>Nivel 1 de C</i> |
| 24 | 18 | <i>Bloque 3</i> | <i>Nivel 2 de A</i> | <i>Nivel 2 de B</i> | <i>Nivel 2 de C</i> |
| 18 | 19 | <i>Bloque 3</i> | <i>Nivel 2 de A</i> | <i>Nivel 1 de B</i> | <i>Nivel 2 de C</i> |
| 21 | 20 | <i>Bloque 3</i> | <i>Nivel 1 de A</i> | <i>Nivel 2 de B</i> | <i>Nivel 2 de C</i> |
| 9  | 21 | <i>Bloque 3</i> | <i>Nivel 1 de A</i> | <i>Nivel 2 de B</i> | <i>Nivel 1 de C</i> |
| 6  | 22 | <i>Bloque 3</i> | <i>Nivel 2 de A</i> | <i>Nivel 1 de B</i> | <i>Nivel 1 de C</i> |
| 15 | 23 | <i>Bloque 3</i> | <i>Nivel 1 de A</i> | <i>Nivel 1 de B</i> | <i>Nivel 2 de C</i> |
| 12 | 24 | <i>Bloque 3</i> | <i>Nivel 2 de A</i> | <i>Nivel 2 de B</i> | <i>Nivel 1 de C</i> |

Para los factores seleccionados en el diseño de experimentos, los niveles 1 y 2 respectivos, se señalan en la Tabla 3.

Tabla 3. Relación entre los factores y sus niveles

|                        | <i>Nivel 1</i>             | <i>Nivel 2</i>    |
|------------------------|----------------------------|-------------------|
| <i>Tiempo</i>          | <i>28 min</i>              | <i>40 min</i>     |
| <i>Tipo de mineral</i> | <i>Menor concentración</i> | <i>De la veta</i> |
| <i>Granulometría</i>   | <i>Malla 50</i>            | <i>Malla 170</i>  |

➤ **Hipótesis estadística**

Una hipótesis estadística es una declaración acerca de los parámetros de una distribución de poblaciones, en donde se refleja alguna conjetura sobre el problema de interés [18]. Por otra parte, es importante especificar el conjunto de valores, del estadístico de prueba, que llevan a rechazar una hipótesis, llamando a ésta, región crítica.

La prueba de hipótesis estadísticas y la estimación de los intervalos de confianza son los métodos fundamentales utilizados en la etapa de análisis de los datos de un experimento comparativo. Por medio de modelos, es posible describir las observaciones de un experimento factorial. Uno de estos, es el modelo de los efectos que se muestra en la Ec.(13):

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (13)$$

Donde  $\mu$  es el efecto promedio global,  $\tau_i$ ,  $\beta_j$  y  $\gamma_k$  son los efectos de los niveles  $i, j, k$ -ésimo de los factores A, B y C (tiempo, tipo de mineral y granulometría, respectivamente);  $\varepsilon_{ijkl}$  es un componente del error aleatorio, y los términos restantes hacen referencia a los efectos producidos por las interacciones.

Siendo,

$H_0$ : hipótesis nula

$H_1$ : hipótesis alternativa

Se plantean las siguientes hipótesis, en donde cada una hace referencia al efecto producido, tanto de los factores individuales como de las interacciones, sobre el diseño de experimentos.

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = 0$$

$$H_1: \text{al menos un } \tau_i \neq 0$$

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$$

$$H_1: \text{al menos un } \beta_j \neq 0$$

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = 0$$

$$H_1: \text{al menos un } \gamma_k \neq 0$$

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ para todo } i, j$$

$$H_1: \text{al menos un } (\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

$$H_0: (\tau\gamma)_{ik} = 0 \text{ para todo } i, k$$

$$H_1: \text{al menos un } (\tau\gamma)_{ik} \neq 0$$

$$H_0: (\beta\gamma)_{jk} = 0 \text{ para todo } j, k$$

$$H_1: \text{al menos un } (\beta\gamma)_{jk} \neq 0$$

$$H_0: (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0 \text{ para todo } i, j, k$$

$$H_1: \text{al menos un } (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0$$

Las hipótesis nulas plantean, la igualdad de los efectos de los tratamientos y las interacciones, sobre el diseño factorial.

Ahora, para probar una hipótesis, se toma una muestra aleatoria de la población, se calcula un estadístico de prueba apropiado, y se analiza si la información es suficiente para rechazar o no la hipótesis nula [18].

Sin embargo, existe la posibilidad de rechazar la hipótesis nula, aún cuando ésta sea verdadera, por lo que se puede incurrir en un error tipo I. Por otro lado, puede evitar rechazarse la hipótesis nula, cuando esta sea falsa, por lo que se puede cometer un error tipo II, como se ilustra en la Tabla 4.

Tabla 4. Tipo de errores en las pruebas de hipótesis

| <i>Decisión</i>             | <i>Ho es verdadera</i> | <i>Ho es falsa</i>  |
|-----------------------------|------------------------|---------------------|
| <i>Fallo en rechazar Ho</i> | <i>No hay error</i>    | <i>Error tipo I</i> |
| <i>Rechazar Ho</i>          | <i>Error tipo I</i>    | <i>No hay error</i> |

La probabilidad de cometer un error tipo I es denotado por la letra griega  $\alpha$ , también llamado en algunas ocasiones nivel de significancia.

$$\alpha = P(\text{error tipo I})$$

Para el planteamiento del diseño, se asume un nivel de significancia del 5%.

➤ **Procedimiento**

Se cuenta con un horno marca LG MH1149 con una cavidad multimodo tipo doméstico, con las especificaciones técnicas mostradas en la Tabla 5. Para evitar cualquier inconveniente con los vapores arrojados por la tostación, el equipo se ubica en una campana extractora. Adicionalmente, el horno es utilizado por periodos máximos de una hora, luego del cual se deja enfriar para evitar daños al magnetrón.

Tabla 5. Especificaciones técnicas del horno microondas utilizado

| <i>Horno microondas LG MH1149</i> |                   |
|-----------------------------------|-------------------|
| Potencia máxima                   | 1000 W            |
| Frecuencia de salida              | 2450 MGz          |
| Cavidad interna                   | 37,5 x 23 x 36 cm |

De igual forma, las pruebas preliminares dan claridad en cuanto al punto de mayor incidencia del campo, como lo muestra la Figura 14.

El orden de las pruebas está determinado por los resultados expuestos en la Tabla 2, donde la columna *Run* indica la secuencia a seguir. Observando, la prueba 1 hace referencia a exponer a radiación con microondas el mineral proveniente de la parte de menor concentración de la mina “Juan Blanco”, con una malla 170 por un tiempo de 28 minutos, con periodos de 7 minutos para mezclar, como aparece en la Figura 17.

Para obtener los tenores respectivos de cada una de las pruebas, se realiza un proceso de fundición en una mufla (Figura 18), la cual alcanza temperaturas cercanas a 1000°C. Introduciendo el mineral tostado, resultado de las pruebas, en crisoles, y agregando una serie de fundentes (Figura 19), se garantiza una correcta fundición.

Figura 18. Mufla utilizada para la fundición

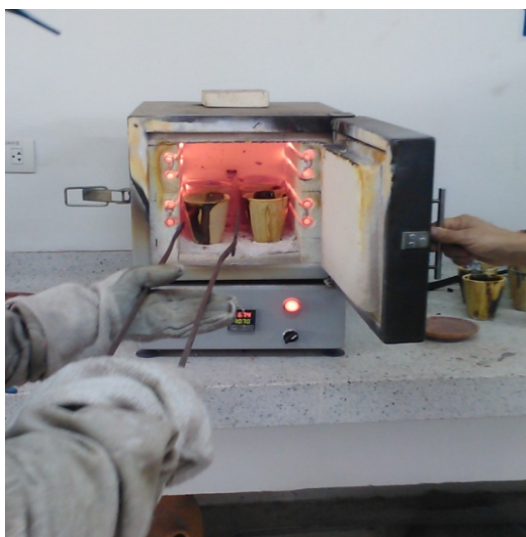


Figura 19. Crisoles con los reactivos para la fundición



El proceso de fundición y posterior ataque de la escoria resultante, arroja los tenores de las 24 pruebas de tostación realizadas a los minerales en el microondas, valores que son necesarios para construir la Tabla 6 y la Tabla 7, las cuales ilustran el comportamiento que se obtuvo en cada una de las tostaciones.

Tabla 6. Recuperación del oro en gramos por tonelada

|                    | <i>Mineral</i> |             |              |             |
|--------------------|----------------|-------------|--------------|-------------|
|                    | <i>1</i>       |             | <i>2</i>     |             |
|                    | <i>Malla</i>   |             | <i>Malla</i> |             |
| <i>Tiempo[min]</i> | <i>50</i>      | <i>170</i>  | <i>50</i>    | <i>170</i>  |
| <i>28</i>          | <i>0,75</i>    | <i>0.75</i> | <i>0.75</i>  | <i>2.25</i> |
|                    | <i>0</i>       | <i>0.75</i> | <i>1.5</i>   | <i>2.25</i> |
|                    | <i>0.5</i>     | <i>0</i>    | <i>0.75</i>  | <i>2.25</i> |
| <i>42</i>          | <i>1.5</i>     | <i>2.25</i> | <i>2.25</i>  | <i>4.5</i>  |
|                    | <i>1.5</i>     | <i>2.5</i>  | <i>1.5</i>   | <i>3.75</i> |
|                    | <i>2.25</i>    | <i>2.25</i> | <i>1.5</i>   | <i>2.25</i> |

Tabla 7. Porcentajes de la recuperación del oro

|                                 | <i>Mineral</i> |             |              |            |
|---------------------------------|----------------|-------------|--------------|------------|
|                                 | <i>1</i>       |             | <i>2</i>     |            |
|                                 | <i>Malla</i>   |             | <i>Malla</i> |            |
| <i>Tiempo[<math>min</math>]</i> | <i>50</i>      | <i>170</i>  | <i>50</i>    | <i>170</i> |
| <i>28</i>                       | <i>25</i>      | <i>25</i>   | <i>15</i>    | <i>45</i>  |
|                                 | <i>0</i>       | <i>25</i>   | <i>30</i>    | <i>45</i>  |
|                                 | <i>16.67</i>   | <i>0</i>    | <i>15</i>    | <i>45</i>  |
| <i>42</i>                       | <i>50</i>      | <i>75</i>   | <i>45</i>    | <i>90</i>  |
|                                 | <i>50</i>      | <i>83.3</i> | <i>30</i>    | <i>75</i>  |
|                                 | <i>75</i>      | <i>75</i>   | <i>30</i>    | <i>45</i>  |

En la Tabla 7 se describe el porcentaje de recuperación de oro para cada mineral, sabiendo que se obtienen, por medio de tostación en la mufla, 5 gramos por tonelada para la muestra proveniente de la mina “Juan Blanco” en la veta (mineral 2), y de 3 gramos por tonelada para la parte de menor concentración de la mina (mineral 1). Esto con el objetivo poder estandarizar los datos.

Mediante el software utilizado para el diseño de experimentos, se obtienen los resultados del análisis de varianza como lo muestra la Tabla 8.

Tabla 8. ANOVA para la selección del modelo factorial

| <i>Fuente</i>            | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>GL</i> | <i>Cuadrado medio</i> | <i>Valor F</i> | <i>Valor P</i>    |
|--------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|-------------------|
| <i>Modelo</i>            | <i>1.27</i>              | <i>7</i>  | <i>0.18</i>           | <i>13.43</i>   | <i>&lt;0.0001</i> |
| <i>A-Tiempo</i>          | <i>0.74</i>              | <i>1</i>  | <i>0.74</i>           | <i>54.87</i>   | <i>&lt;0.0001</i> |
| <i>B-Tipo de mineral</i> | <i>0.044</i>             | <i>1</i>  | <i>0.044</i>          | <i>3.22</i>    | <i>0.0917</i>     |

|                |              |          |              |              |               |
|----------------|--------------|----------|--------------|--------------|---------------|
| <i>C-Malla</i> | <i>0.22</i>  | <i>1</i> | <i>0.22</i>  | <i>16.60</i> | <i>0.0009</i> |
| <i>AB</i>      | <i>0.077</i> | <i>1</i> | <i>0.077</i> | <i>5.67</i>  | <i>0.0301</i> |
| <i>AC</i>      | <i>0.037</i> | <i>1</i> | <i>0.037</i> | <i>2.74</i>  | <i>0.1176</i> |
| <i>BC</i>      | <i>0.13</i>  | <i>1</i> | <i>0.13</i>  | <i>9.35</i>  | <i>0.0075</i> |
| <i>ABC</i>     | <i>0.022</i> | <i>1</i> | <i>0.022</i> | <i>1.61</i>  | <i>0.2229</i> |
| <i>Error</i>   | <i>0.22</i>  | <i>1</i> | <i>0.014</i> |              |               |
| <i>Total</i>   | <i>1.49</i>  | <i>1</i> |              |              |               |

Al comparar el valor  $P$  con el nivel de significancia del diseño, se observa que los factores tiempo y malla tienen un efecto significativo sobre el proceso, así como la interacción AB (tiempo-mineral) y BC (malla-mineral).

Figura 20. Efecto del tiempo sobre el diseño

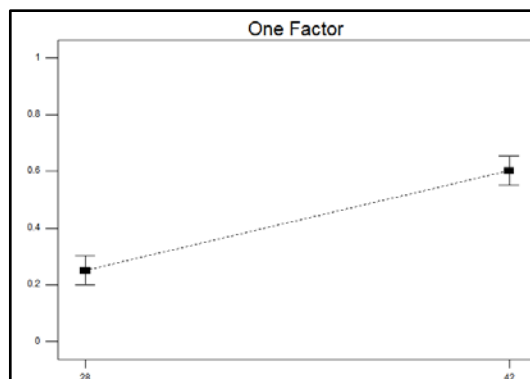
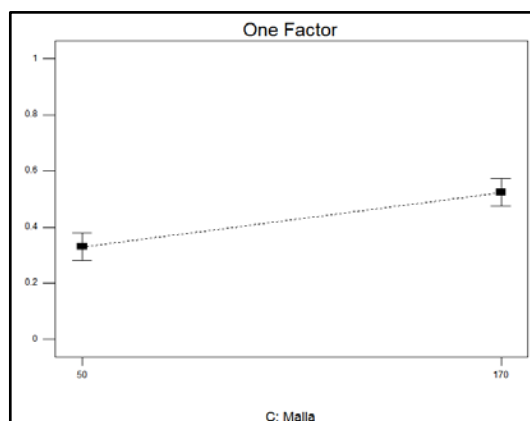


Figura 21. Efecto de la malla sobre el diseño



De la Figura 20 y la Figura 21, se interpretan los principales efectos sobre el proceso, siendo el tiempo y la malla, los que tienen una incidencia positiva, es decir, un aumento en el tiempo de exposición a las microondas incrementa el porcentaje de recuperación, de igual forma que sucede con la malla, variación que es equivalente a la disminución en el tamaño de la partícula.

### **3.3 ANÁLISIS DE POTENCIA**

En esta sección se analiza el consumo de energía de la alternativa tradicional y del calentamiento con microondas. Para ello se registraron datos de potencia activa, aparente y energía consumida, tanto para las mufas eléctricas presentes en el laboratorio (Figura 22), como para el horno microondas utilizado. Estos datos fueron obtenidos mediante el analizador de calidad de potencia PowerVisa (Figura 23), el cual toma medidas en intervalos de 10 minutos, durante las pruebas.

Figura 22. Horno eléctrico Terrígeno modelo D8



Figura 23. Analizador de calidad de potencia PowerVisa



Luego de obtener los datos de la potencia activa y reactiva (instantánea), consumida por la mufla eléctrica (Figura 24), y el horno microondas (Figura 25), se encontró una diferencia significativa, ya que la potencia activa consumida por la mufla fue en promedio de 2,1 kW, mientras que la del horno microondas fue de 0,8 kW, obteniéndose así una reducción del 38,1 % en el consumo de potencia. En cuanto a la potencia reactiva, se observó que en la mufla eléctrica el consumo fue mínimo (aproximadamente cero), debido a que el calentamiento en este se realiza por medio de resistencias eléctricas; mientras que en el horno microondas se marca diferencia notable entre la potencia activa y aparente, indicando un mayor consumo de potencia reactiva (0,68 kVAR). Aún con esto y debido a que el tiempo empleado para la tostación en el microondas es un 75% menor al consumido en la tostación tradicional, la potencia consumida por el horno microondas sigue siendo considerablemente menor.

Figura 24. Potencia activa y aparente consumida por la mufla eléctrica

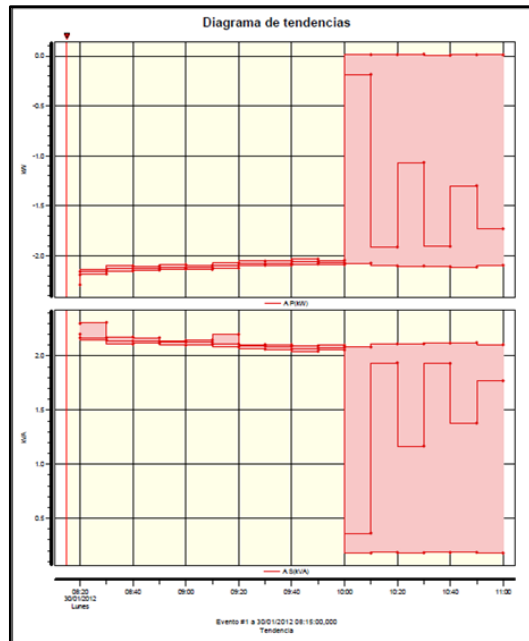
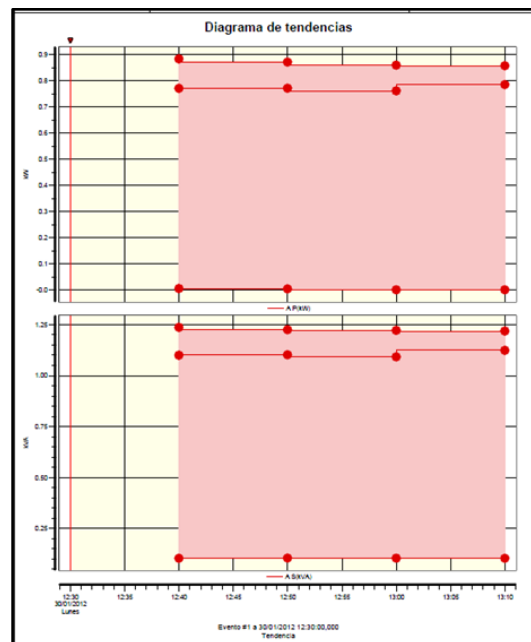


Figura 25. Potencia activa y aparente consumida por el horno microondas



Por último, se realiza un análisis de la energía consumida, para los dos hornos, del cual la Figura 26 corresponde al consumo de la mufla eléctrica y la Figura 27 al

horno microondas. De ellas se obtiene un consumo total de 5,2 kWh y 0,62 kWh, respectivamente. Se concluye así que se obtiene una reducción de energía del 88,1%, la cual es una mejora considerable dada la diferencia del tiempo empleado con el método tradicional, mencionado anteriormente. Por ello se puede decir que la tostación con microondas representa una alternativa económicamente viable (en términos de consumo eléctrico).

Figura 26. Energía consumida por la mufla eléctrica

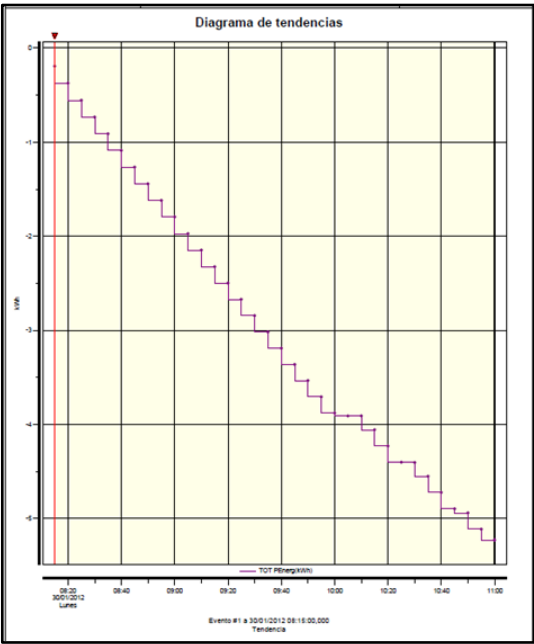
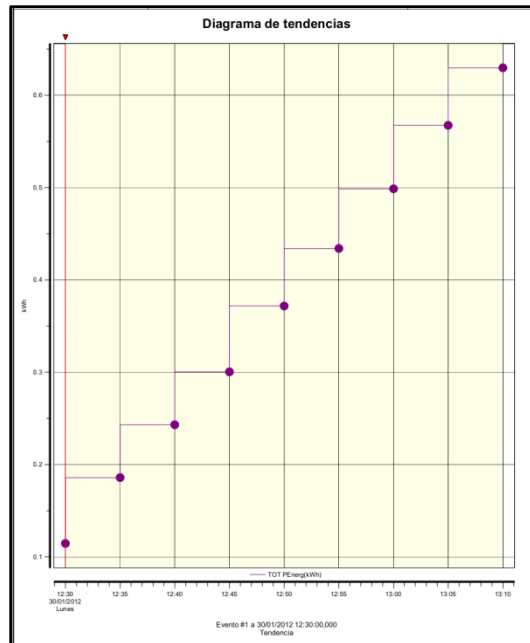


Figura 27. Energía consumida por el horno microondas



### 3.4 ANÁLISIS DE RAYOS X

Se realiza un análisis cuantitativo por difracción de Rayos-X, para la muestra proveniente de la veta de la mina Juan Blanco, antes y después de la tostación con microondas, como se puede observar en la Tabla 9 y la Tabla 10 respectivamente.

Tabla 9. Análisis cuantitativo antes de la tostación

|             | FASE                                                      | NOMBRE       | CUANTITATIVO |
|-------------|-----------------------------------------------------------|--------------|--------------|
| Cristalinos | $\text{Na}_2 \text{Al}_{22} \text{O}_{34}$                | Diaoyudaoita | 3.8 %        |
|             | $\text{Si O}_2$                                           | Cuarzo       | 41.9 %       |
|             | $\text{K Al}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ | Moscovita    | 15.9 %       |
|             | $\text{Fe S}_2$                                           | Pirita       | 29.1 %       |
|             | $\text{Fe}_3 \text{O}_4$                                  | Magnetita    | 0.3 %        |

|                   |                                             |            |        |
|-------------------|---------------------------------------------|------------|--------|
|                   | $\text{Na Fe S}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ | Erdita     | 0.2 %  |
|                   | $\text{As}_4 \text{O}_6$                    | Arsenolita | 0.6 %  |
| Total Cristalinos |                                             |            | 91.8 % |
| Amorfos y otros   |                                             |            | 8.2 %  |

Tabla 10. Análisis cuantitativo después de la tostación

| FASE              |                                            | NOMBRE       | CUANTITATIVO |
|-------------------|--------------------------------------------|--------------|--------------|
| Cristalinos       | $\text{Na}_2 \text{Al}_{22} \text{O}_{34}$ | Diaoyudaoita | 3.0 %        |
|                   | $\text{Si O}_2$                            | Cuarzo       | 24.6 %       |
|                   | $\text{Fe}_2\text{O}_3$                    | Hematita     | 47.7 %       |
| Total Cristalinos |                                            |              | 75.3 %       |
| Amorfos y otros   |                                            |              | 24.7 %       |

Se observa el efecto de oxidación que sufren algunos compuestos, como la pirita, los cuales son causantes de la refractariedad de la mena, y que para la muestra con la que se dispone, se encuentra en grandes proporciones. Siendo esto un resultado positivo, ya que se garantiza, por medio del proceso de tostación con microondas, eliminar los sulfuros que dificultan la recuperación significativa del oro presente en el mineral.

## 4. MEJORAS PROPUESTAS

Con el calentamiento por microondas se ha logrado disminuir el consumo de energía, así como el tiempo para la tostación. Sin embargo, se es consciente que existe la posibilidad de mejorar los resultados aún más, al implementar una serie de modificaciones, entre las que se encuentra la reducción de la cavidad (con el objetivo de lograr una mayor concentración de campo electromagnético). A continuación se detalla un poco más esta idea.

### 4.1 SIMULACIONES

En primera instancia, se reducen las dimensiones de la cavidad a 19,5 cm x 23 cm x 36 cm, y se ejecuta la simulación (manteniendo constantes los parámetros mencionados previamente). Los resultados de la temperatura se pueden evidenciar tanto en la Figura 28, como en la Figura 29, mientras que el campo eléctrico puede ser observado en la Figura 30 y en la Figura 31.

Figura 28. Temperatura superficial de la esfera de agua en la cavidad reducida luego de una exposición a las microondas de 60 segundos

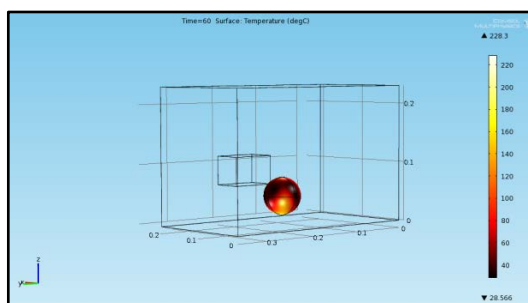
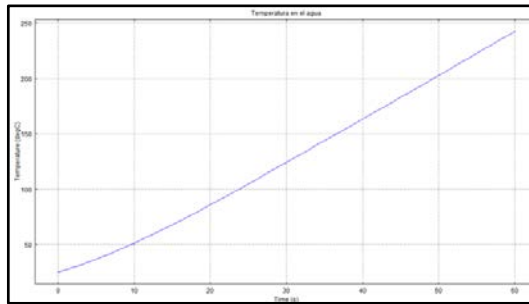


Figura 29. Comportamiento en el centro de la carga de agua durante la exposición a las microondas, para la cavidad reducida



Cabe aclarar que los cambios de estado que puedan generarse en la carga son ignorados, pues el objetivo de la simulación es analizar únicamente si existe una mejoría en cuanto al calentamiento, más no el efecto sobre el estado físico de la carga. Dicho esto, se puede analizar que existe un incremento de 67,5 °C, logrando una temperatura máxima de 242,5 °C (Figura 29), por lo que al reducir la cavidad en un 52%, se logra un incremento de temperatura cercano al 38,6%. En cuanto al campo eléctrico, se encuentra que existe una mayor uniformidad y concentración de energía, lo cual explica el incremento de temperatura previamente descrito. Los modos existentes para esta cavidad fueron calculados de la misma forma explicada en la sección 4.1.1, y se muestran en la Tabla 11.

Figura 30. Comportamiento del campo eléctrico sobre planos XY en la cavidad reducida

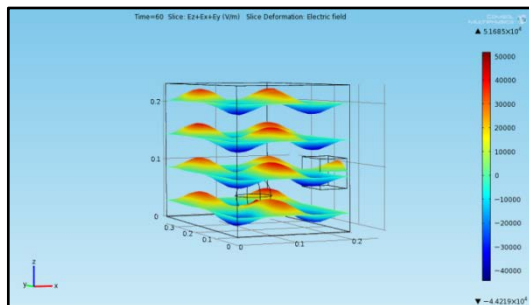


Figura 31. Comportamiento del campo eléctrico sobre planos ZY para la cavidad reducida

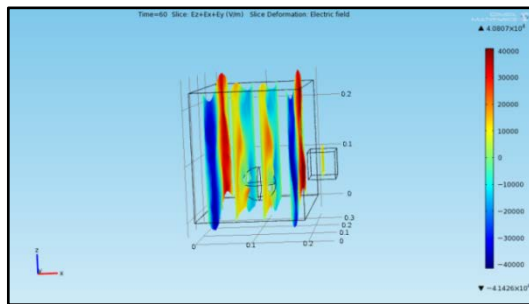


Tabla 11. Modos en el microondas para las nuevas dimensiones de la cavidad

| $\lambda_{m,n,p}(cm)$ | $m$ | $n$ | $P$ |
|-----------------------|-----|-----|-----|
| 12.2052               | 0   | 2   | 5   |
| 12.2272               | 3   | 0   | 2   |
| 12.2657               | 1   | 3   | 3   |
| 12.3254               | 3   | 1   | 1   |

Tomando los modos presentes en la cavidad reducida, se ejecutó una simulación para encontrar la distribución ideal de la densidad de potencia, como se muestra en la Figura 32 para el plano XZ, y en la Figura 33 para el plano YZ.

Figura 32. Distribución de la densidad de potencia para todos los modos presentes en el plano XZ.  $Y = 4\text{ cm}$

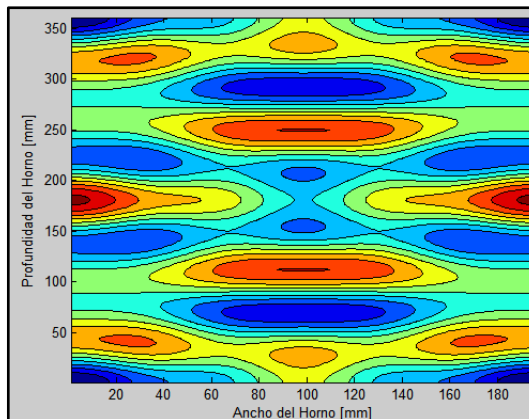
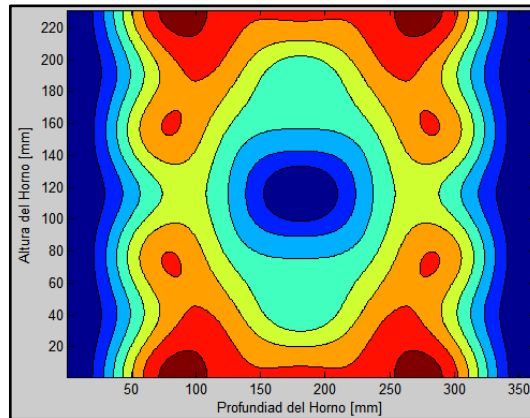


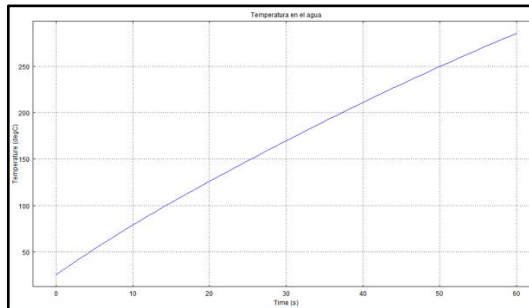
Figura 33. Distribución de la densidad de potencia para todos los modos presentes en el plano YZ. X = 4 cm



Por último, se realizan varias simulaciones reduciendo las dimensiones de la cavidad, con el objetivo de encontrar la longitud mínima a la cual se puede propagar campo electromagnético. Como resultado, se obtuvo un tamaño mínimo de 6,3 cm, para el cual se genera error en la simulación y por tanto no arroja ningún resultado. Esto concuerda con la teoría, pues para una distancia menor a  $\lambda_{\max}/2$  no se debería presentar campo electromagnético, siendo en este caso  $\lambda = 12,25$  cm.

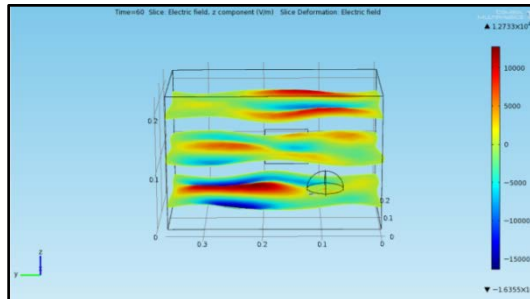
Como se ha podido observar anteriormente, la ubicación de la carga es determinante en el proceso de la tostación. Por ello, se realizó una simulación con la carga en uno de los puntos de alta concentración de campo eléctrico de la Figura 30, para la que se obtuvo una respuesta satisfactoria, con una temperatura máxima de 285,6 °C (Figura 34), es decir, un incremento del 17,77% respecto a la ubicación anterior.

Figura 34. Comportamiento de la temperatura en el centro de la esfera ubicándola en un punto de mayor concentración de campo eléctrico



Además, se observó un fuerte cambio en el campo eléctrico, Figura 35, al compararla con el comportamiento de la Figura 30.

Figura 35. Comportamiento del campo eléctrico luego del cambio de posición de la esfera en la cavidad



## 4.2 PRUEBAS PRELIMINARES PARA LA REDUCCIÓN DE LA CAVIDAD

Luego de las simulaciones realizadas en la sección anterior, se observó que la reducción de la cavidad genera un beneficio en el calentamiento mediante microondas, ya que se obtiene una mayor concentración del campo electromagnético, y por consiguiente, un incremento en la temperatura alcanzada. Por tanto, se realizan una serie pruebas preliminares, con el fin de determinar el tamaño adecuado de la cavidad, y de esta forma lograr concentrar el campo electromagnético.

En primera instancia se utilizaron láminas de cartón paja, recubiertas con papel aluminio. Éstas fueron dispuestas en la superficie de la cavidad, de tal forma que las paredes quedaran planas (pues el horno presenta ciertas irregularidades en la superficie que generan una menor uniformidad del campo eléctrico). Además, se implementó una pared móvil para reducir la cavidad. Cabe mencionar que en el momento de colocar las láminas se debe tener cuidado con los bordes y esquinas, ya que si llegan a quedar en punta, puede generarse un arco eléctrico que expone el magnetrón a un posible daño.

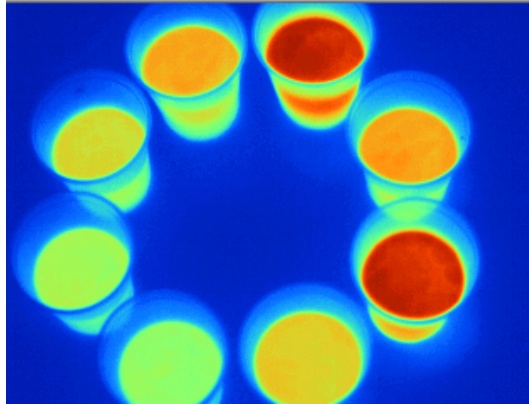
**4.2.1 Pruebas experimentales para la reducción de la cavidad** Esta prueba consiste en disponer vasos de agua en toda la cavidad, y ejecutar la prueba por un minuto. luego de este tiempo, se toma una imagen térmica de las cargas, para determinar cuál experimentó el mayor incremento de temperatura. las pruebas más relevantes fueron las siguientes:

1) Se disponen 8 vasos, con la distribución mostrada en la Figura 36, para una cavidad con una reducción de 4 cm. Al finalizar la exposición, se obtiene la Figura 37, con un máximo de 39,4 °C.

Figura 36. Disposición de la prueba para la cavidad reducida 4 cm de ancho



Figura 37. Imagen térmica luego de una exposición a las microondas de 1 minuto para la cavidad reducida 4 cm de ancho

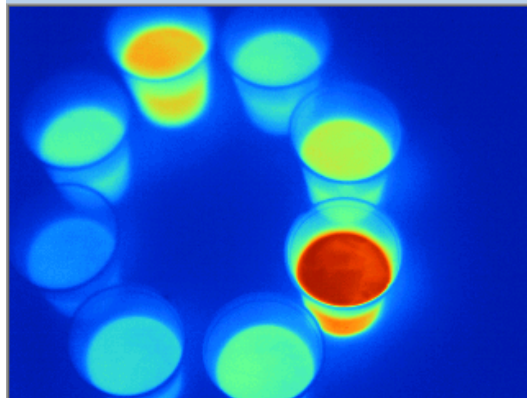


**2)** Se reduce nuevamente la cavidad (4 cm), disponiendo los vasos como se muestra en la Figura 38. Luego de la exposición, se tiene una lectura máxima de 42,8 °C, obtenida de la Figura 39.

Figura 38. Disposición de la prueba para la cavidad reducida 8 cm de ancho



Figura 39. Imagen térmica luego de una exposición a las microondas de 1 minuto para la cavidad reducida 8 cm de ancho

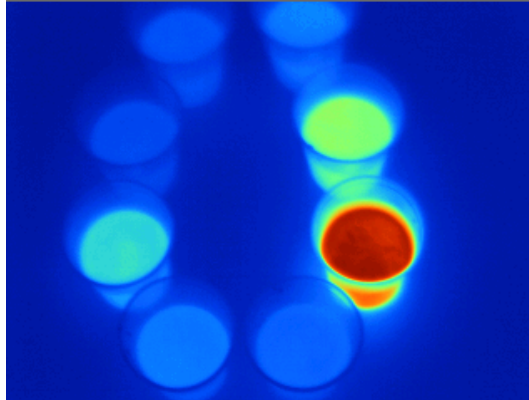


**3)** Una vez más se reduce la cavidad, y se realiza la prueba como se dispone en la Figura 40. En donde al final se obtiene la Figura 41, con una lectura máxima de 43,1 °C.

Figura 40. Disposición de la prueba para la cavidad reducida 12 cm de ancho



Figura 41. Imagen térmica luego de una exposición a las microondas de 1 minuto para la cavidad reducida 12 cm de ancho



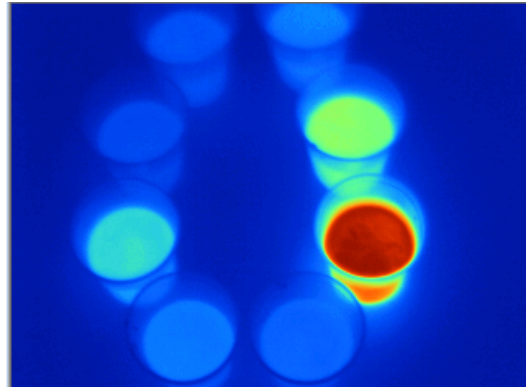
4) Se reduce la cavidad otros 4 cm, quedando en su totalidad con una reducción 16 cm, como se puede observar en la Figura 42.

Figura 42. Disposición de la prueba para la cavidad reducida 16 cm de ancho



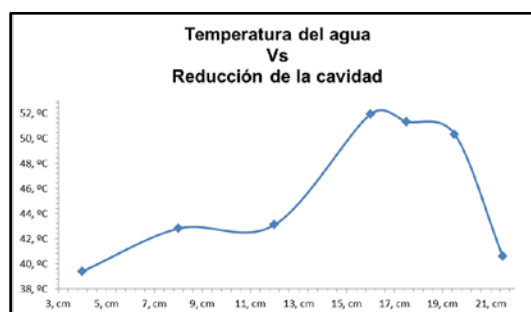
Al finalizar la prueba se obtiene la imagen térmica mostrada en la Figura 43, con un máximo de 51,9 °C.

Figura 43. Imagen térmica luego de una exposición a las microondas de 1 minuto para la cavidad reducida 16 cm de ancho



Comparando las dos últimas pruebas, se observa que se dio un salto en la temperatura máxima de 8,8 °C, siendo esta una diferencia considerable con respecto a las pruebas anteriores, por lo que para las siguientes pruebas la cavidad será reducida en pasos de 1,5 cm para observar cualquier cambio considerable que se pueda producir con la modificación. Luego de varias pruebas se llegó a la conclusión que la mejor opción era reducirla 17,5 cm, ya que para tamaños menores la temperatura empezaba a descender, teniendo en cuenta además con esta reducción se dejaba un espacio considerable para la ubicación de la muestra. Para finalizar, la Figura 44 ilustra la variación de la temperatura en función de la reducción de la cavidad.

Figura 44. Variación de la temperatura máxima alcanzada en función del tamaño de la cavidad



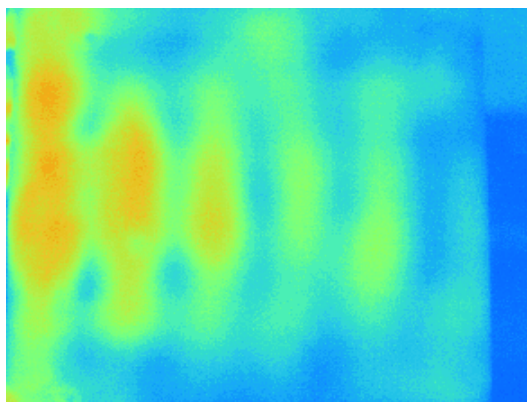
**4.2.2 Pruebas experimentales para encontrar el punto de mayor concentración de energía** En esta sección se dispusieron láminas de cartón paja, sobre la cavidad, de tal forma que se pudiesen identificar los puntos de mayor concentración de energía sobre los planos yz y xy. Las láminas fueron expuestas durante 1 minuto, donde al final de cada prueba se captura una imagen térmica para encontrar los puntos calientes. las pruebas más relevantes se muestran a continuación:

1) Se dispone cartón paja sobre el plano XZ del horno, como se muestra en la Figura 45. Al finalizar prueba se obtuvo la Figura 46 mediante una cámara termográfica.

Figura 45. Disposición para la primera prueba con el cartón paja en el horno completo



Figura 46. Imagen térmica para la primera prueba con el cartón paja



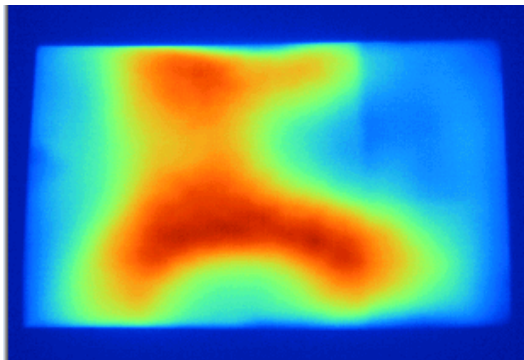
Comparando la imagen térmica de la Figura 46 con la Figura 1 y con la Figura 5, se encuentra cierta relación, teniendo en cuenta que aquellas imágenes se obtuvieron con un conjunto de aproximaciones ideales.

**2)** En esta prueba se dispone cartón paja como se muestra en la Figura 47, con el objetivo de observar las zonas de mayor concentración del campo electromagnético sobre el plano YZ.

Figura 47. Disposición para la segunda prueba con el cartón paja en el horno completo



Figura 48. Imagen térmica para la segunda prueba con el cartón paja



Realizando una comparación entre la figura anterior y la Figura 2 se observa de nuevo cierta relación entre ellas, así como con la Figura 6, pudiéndose decir que

se obtienen buenas aproximaciones con las simulaciones realizadas, a pesar de lo asumido.

**3)** Una vez se tiene la cavidad reducida, con dimensiones de 19,5 cm x 22 cm x 35 cm, se introduce en el horno microondas como se muestra en la Figura 49. Para luego, proceder a realizar las mismas pruebas 1 y 2, en donde los resultados obtenidos se muestran en las Figura 50 y Figura 52.

Figura 49. Disposición para la tercera prueba con el cartón paja ubicado sobre el plano XZ de la cavidad reducida



Figura 50. Imagen térmica para la prueba con cartón paja ubicado sobre el plano XZ de la cavidad reducida

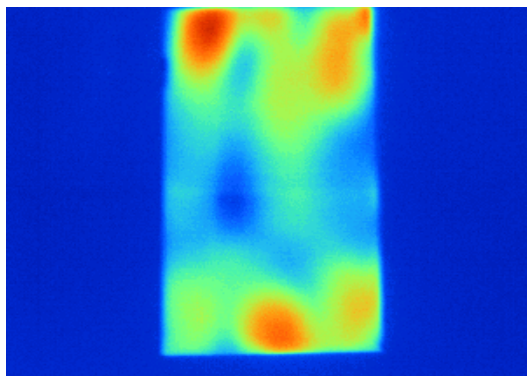
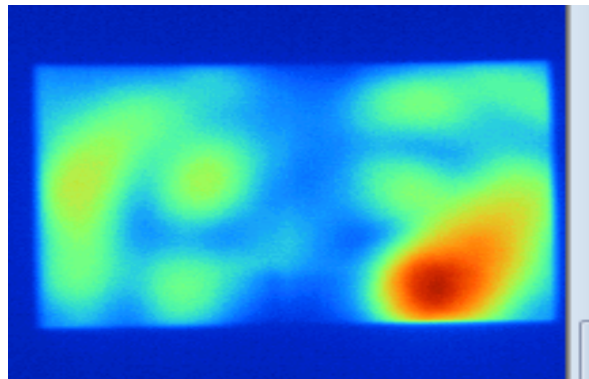


Figura 51. Disposición para la tercera prueba con el cartón paja situado en el plano YZ de la cavidad reducida



Figura 52. Imagen térmica para la prueba con cartón paja situado en el plano YZ de la cavidad reducida



De nuevo se observa similitud entre las dos figuras térmicas anteriores (Figura 50 y Figura 52) con las simulaciones realizadas, lo cual indica nuevamente una buena aproximación de las simulaciones bajo las condiciones asumidas.

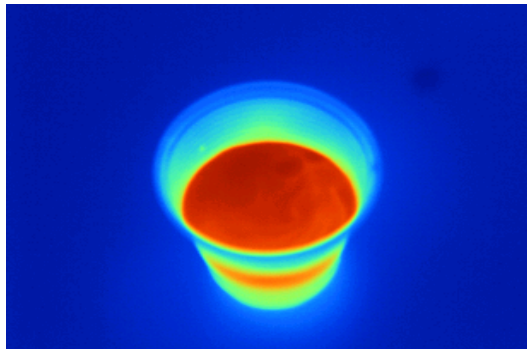
Para finalizar, se dispone de un vaso con agua dentro de la cavidad reducida, como se muestra en la Figura 53. Esta ubicación corresponde a un punto de alta concentración de energía, el cual ha sido determinado con las pruebas anteriores, y que además coincide con las simulaciones previas. Luego, se irradia la carga de agua durante 30 segundos, al cabo de los cuales se obtiene la Figura 54, con un

máximo de 50,5 °C. Este resultado es muy satisfactorio, puesto que se alcanzó una temperatura muy cercana a la lograda en un minuto por el cartón paja.

Figura 53. Disposición del vaso en el punto máximo de energía con la cavidad reducida



Figura 54. Imagen térmica para la carga de agua en un punto de máxima concentración de energía con la cavidad reducida



Una vez determinado el punto de mayor concentración de energía, se dispuso realizar la tostación con la cavidad reducida. Sin embargo, se encontraron serios inconvenientes, pues se generaba arco eléctrico en la cavidad, debido al contacto entre ésta y la superficie del horno, por lo que no se realizan más pruebas. Se continuará en el grupo de investigación la mejora de esta cavidad reducida.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en el diseño de experimentos realizado, se encontró que la tostación por microondas ofrece ventajas importantes respecto a la tradicional, a nivel de laboratorio, en mufla eléctrica. Por una parte, se obtuvo una reducción en consumo de energía de 88,1%, mientras que por otra, se logró reducir el tiempo de procesamiento en 75%. Esto puede representar una mayor utilidad, por lo que se recomienda un análisis económico más profundo, para verificar la viabilidad de su implementación, especialmente debido a que el nivel de recuperación alcanzado con esta fue, como máximo, el 90% del logrado con la tradicional.

El análisis de varianza que resulta del diseño de experimentos planteado, evidencia la influencia de todos los factores sobre el proceso, siendo los más significativos, el tiempo y la malla.

La absorción y distribución del campo electromagnético depende, en gran parte, de las propiedades dieléctricas de la carga presente, por lo que antes de realizar la tostación se recomienda medirla permitividad compleja del mineral. Esto con el fin de poder realizar un análisis previo del comportamiento esperado del mismo, para determinar si es viable utilizar la muestra como elemento sensible a las microondas, o si requiere un elemento suscepto.

En el proceso de tostación se busca oxidar los sulfuros presentes en el mineral, con el objetivo de obtener una mayor recuperación del oro, dado que estos son los causantes de la refractariedad presente en el mineral. Es importante resaltar que un fenómeno observado durante la tostación con microondas fue el volumen de vapores emitidos, en su mayoría sulfuros (reconocido por su característico olor), que superó la emisión con la tostación tradicional. Por ello, se estima conveniente realizar un estudio cuyo objetivo sea obtener un producto derivado del azufre.

Se recomienda, como trabajo futuro, la reducción de la cavidad, realizando un debido acople con el magnetrón, para lograr la tostación sin presencia de arco eléctrico. Esto, junto con un diseño de experimentos apropiado, permitirá obtener los parámetros óptimos para lograr la tostación en el menor tiempo posible. Además, se propone incluir una optimización que se enfoque en la distribución del campo electromagnético, para maximizar así sus beneficios.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Díaz Morcillo, J. Monzó Cabrera, E. Domínguez Tortajada, and M. E. Requena Pérez, "Principios Fundamentales y Aplicaciones del Calentamiento por Microondas," *Telecoforum*, pp. 1-3, 2004.
  
- [2] J. E. Gonzales Acero and H. F. Mora Camacho, "Estudio del Uso de Microondas Asociado a Menas Refractarias," Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia, 2003.
  
- [3] J. Pitarch Portero, J. M. Catalá Civera, A. J. Canós Marín, and M. Contelles Cervera, "Análisis y Optimización de Distribuciones de Campo Eléctrico en Cavidades Multimodo Excitadas con Múltiples Fuentes," in *XX Symposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, 2005, pp. 1-4.
  
- [4] J. Aguilar and J. Rodríguez, "Producción de Carburo de Silicio Utilizando Microondas como Fuente de Energía," in *XXII Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales*, 2000, pp. 338-345.
  
- [5] A. C. Gaviria C., J. González, and H. F. Mora, "Tostación, Empleando Microondas, en Menas Refractarias Auríferas y su Efecto en la Extracción del Oro," *Dyna*, vol. 73, no. 150, pp. 29-37, 2006.
  
- [6] J. Aguilar, U. Ortiz, and S. Salazar, "El grafito como auxiliar térmico en el procesado de espinel  $MgAl_2O_4$  mediante microondas," *Ciencia UANL*, vol. 3, no. 3, pp. 274-280, 2000.
  
- [7] M. Al-Harashseh and S. Kingman, "Microwave-Assisted Leaching—a review," *Elsevier*, vol. 73, no. 3-4, pp. 189-203, Jun. 2004.

- [8] A. A. Almansa Morales, "Estudio Experimental Para la Optimización Energética y Termográfica en Aplicaciones de Calentamiento por Microondas," Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cartagena, 2007.
- [9] F. D. Solano Torrado, "Diseño y Simulación de Guías de Onda para el Calentamiento de Materiales con Microondas," Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2008.
- [10] C. Cárdenas, R. Restrepo, J. García Sucerquia, J. Marin, and C. García, "Las Microondas Como una Alternativa para el Secado de Materiales Cerámicos Tradicionales," *Suplemento de la Revista Latinoamericana de la Metalurgia y Materiales*, vol. 1, no. 1, pp. 427-432, 2009.
- [11] M. Al-Harashseh and S. W. Kingman, "Microwave-Assisted Leaching—a review," *Elsevier*, vol. 73, no. 3-4, pp. 189-203, Jun. 2004.
- [12] K. E. Haque, "Microwave Energy For Mineral Treatment Processes — a Brief Review," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 57, no. 1, pp. 1-24, 1999.
- [13] S. J. Ma, W. J. Luo, W. Mo, X. J. Su, P. Liu, and J. L. Yang, "Removal of arsenic and sulfur from a refractory gold concentrate by microwave heating," *Minerals Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 61-63, Jan. 2010.
- [14] C. Bai, W. Ren, G. Qiu, M. Hu, D. Chen, and L. Wen, "The Review of Microwave Applications in Metallurgical Process in China," *Review Literature And Arts Of The Americas*, vol. 47, no. 4, pp. 528-532, 2007.

- [15]W. Deng, "E&M field in microwave oven: more complicated than you think," *WEN'S Horizon*, 2008. [Online]. Available: <http://www.wensh.net/archive.php/topic/1527.html>. [Accessed: 16-Jan-2012].
- [16]M. Vollmer, "Physics of the microwave oven," *IOP Science*, vol. 74, pp. 74-81, 2004.
- [17]U-Solution, "Magnetron 2M246." U-Solution, pp. 1-6, 2011.
- [18]D. C. Montgomery, *Diseño y Análisis de experimentos*, 2nd ed. Limusa Wiley, 2004, pp. 1-692.