

**INTERACCIÓN DE LAS MICROONDAS CON TRAZAS DE ORO EN
MUESTRAS PROVENIENTES DE LOS MUNICIPIOS DE
CALIFORNIA Y VETAS (SANTANDER)**

Autores:

ROY DANIEL AGUIRRE CARVAJAL

WILIAM ALBERTO BOTERO MANTILLA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO - MECANICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA

Y TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2012

**INTERACCIÓN DE LAS MICROONDAS CON TRAZAS DE ORO EN
MUESTRAS PROVENIENTES DE LOS MUNICIPIOS DE
CALIFORNIA Y VETAS (SANTANDER)**

Autores:

ROY DANIEL AGUIRRE CARVAJAL

WILIAM ALBERTO BOTERO MANTILLA

Trabajo de grado para optar al título de INGENIERO ELECTRÓNICO

Ph.D CARLOS RODRIGO CORREA CELY

DIRECTOR TRABAJO DE GRADO

Ing. IVÁN MAURICIO AMAYA

CODIRECTOR TRABAJO DE GRADO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO - MECANICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA

Y TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2012

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haber guiado nuestros pasos en la obtención de todos nuestros triunfos en el recorrido de nuestra carrera.

A Carlos Rodrigo Correa Cely, Director del proyecto, por darnos la oportunidad de trabajar junto a él, y por todo el tiempo y la orientación dedicada durante el desarrollo de este trabajo.

A Iván Mauricio Amaya Contreras, Codirector del proyecto de grado, por toda la paciencia que tuvo en el transcurso de este trabajo, por toda su colaboración incondicional que fue vital para la finalización del proyecto de grado.

A Ambrosio Carrillo Carrillo, que aunque no tenía nada que ver con este proyecto, ofreció su infinita amabilidad y colaboración, además de las instalaciones del laboratorio de pirometalurgia y el espacio de trabajo para la realización de esta investigación.

A Fabián Ortiz, por su colaboración y orientación en la elaboración del sistema de medición de temperatura.

A la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, puesto que allí fue donde obtuvimos las bases necesarias para la conclusión del proyecto de grado.

A la Vicerrectora de Investigación por la posibilidad que nos ofreció al financiar el proyecto 5551.

Y a todos nuestros amigos y compañeros, por todo su apoyo incondicional y por todos los momentos agradables vividos dentro de la Universidad

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	15
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
2. CONSIDERACIONES PRELIMINARES.....	16
2.1 BASES TEORICAS	16
2.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	19
3. RESULTADOS.....	22
3.1 EQUIPOS, INSUMOS Y PRUEBA PRELIMINAR.....	24
3.2 SISTEMA DE SENSADO DE TEMPERATURA.....	28
3.3 MEDICIÓN DE LA POTENCIA ENTREGADA POR EL MAGNETRÓN A UNA CARGA DE AGUA	43
3.4 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN LAS MUESTRAS.....	46
3.5 EJECUCIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	50
3.6 CONSUMO DE POTENCIA.....	54
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
BIBLIOGRAFIA	60
APENDICE A.....	63
APENDICE B.....	71
APENDICE C.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Muestra preparada para el proceso de fundición.....	9
Figura 2. Proceso de fundición mediante el uso de Muflas	9
Figura 3. Material fundido una vez enfriado.....	10
Figura 4. Horno microondas y campana extractora de gases.....	11
Figura 5. Crisol de arcilla	12
Figura 6. Horno microondas con agujeros, para incorporar las termocuplas....	12
Figura 7. Esquema general del sistema de encendido del magnetrón y del sistema de sensado de temperatura.....	13
Figura 8. Esquema del circuito de sensado de temperatura.....	14
Figura 9. Sistema de activación del circuito del magnetrón	13
Figura 10. Sistemas de fuentes de alimentación	13
Figura 11. Sistema de sensado de temperatura.....	13
Figura 12. Termómetro Fluke 52 II.....	13
Figura 13. Temperatura obtenida con el sistema de sensado y el Fluke, a temperatura constante (Termocupla 1 (Rojo), Termocupla 2 (azul), Termocupla 3 (Purpura), Fluke (Verde)).....	19
Figura 14. Plancha Thermolyne Cimarec 3.....	21
Figura 15. Temperatura obtenida con el sistema de sensado y el Fluke, a temperatura variable (Termocupla 1 (Rojo), Termocupla 2 (azul), Termocupla 3 (Purpura), Fluke (Verde))	22
Figura 16. Primera replica de la calibración a altas temperaturas (Fluke 1 (verde), Fluke 2 (amarillo), term1 (azul), term2 (rojo), term3 (cian)).....	26
Figura 17. Segunda replica de la calibración a altas temperaturas (Fluke 1 (verde), Fluke 2 (amarillo), term1 (azul), term2 (rojo), term3 (cian)).....	27
Figura 18. Medición de la potencia real proporcionada por el horno microondas.....	27
Figura 19. Puntos de medición de la temperatura	31

Figura 20. Perfil de Temperatura para una masa de 30 gramos, tiempo de exposición de 40 min y una potencia de 1000 W.....	31
Figura 21. Perfil de Temperatura para una masa de 60 gramos, tiempo de exposición de 40 min y una potencia de 1000 W.....	32
Figura 22. Perfil de Temperatura para una masa de 60 gramos, tiempo de exposición de 40 min y una potencia de 600 W.	32
Figura 23. Perfil de Temperatura para una masa de 30 gramos, tiempo de exposición de 40 min y una potencia de 600 W.	32
Figura 24. Relación de recuperación del oro en función de la potencia – masa.....	37
Figura 25. Relación de recuperación del oro en función de la potencia – tiempo.....	37
Figura 26. Relación de recuperación del oro en función de la masa – tiempo.	38
Figura 27. Montaje del equipo de medición de potencia.....	39
Figura 28. Potencia Activa y Aparente consumida por la Mufla.....	39
Figura 29. Potencia Activa y Aparente consumida con el horno microondas, a una potencia de 1000W ideal... ..	40
Figura 30. Consumo de Energía en la mufla	41
Figura 31. Consumo de energía en el horno microondas.....	41
Figura 32. Circuito de acondicionamiento y de alarma.....	48
Figura 33. Diagrama de bloque funcional del CD4051BE	49
Figura 34. Diagrama de bloque funcional del ISO122PJ.....	49
Figura 35. Filtro de cuarto orden.....	50
Figura 36. Fuente de alimentación de ± 12 [Vdc].....	51
Figura 37. Circuito habilitador del Horno.....	52
Figura 38. Circuito de habilitación del sistema de sensado.....	53
Figura 39. Circuito visualizador de termocuplas	53
Figura 40. Capa superior del circuito de activación del magnetrón.....	55

Figura 41. Capa inferior del circuito de activación del magnetrón.....	55
Figura 42. Esquema general del circuito de alimentación.....	56
Figura 43. Capa superior del circuito de alimentación.....	56
Figura 44. Capa inferior del circuito de alimentación.....	56
Figura 45. Esquema general del circuito de sensado de temperatura.....	57
Figura 46. Capa superior del sistema de sensado de temperatura.....	58
Figura 47. Capa inferior del sistema de sensado de temperatura.....	58
Figura 48. Selección del modo de operación	60
Figura 49. Selección de los tiempos de encendido del magnetrón, sensado y duración total del proceso.....	61
Figura 50. Esquema de generación de las señales de activación y desactivación de los relés.....	62
Figura 51. Generación de las señales enviadas al multiplexor analógico.....	63
Figura 52. Señales generadas con la herramienta Labview para selección de los canales del multiplexor.	63
Figura 53. Demultiplexor de las señales.	64
Figura 54. Selección de la forma de sensado y de interrupción del tiempo de calentamiento... ..	64
Figura 55. Generación de las señales de activación y desactivación de los relés cuando se ejecuta el programa en forma manual.	65
Figura 56. Generación de las señales enviadas al multiplexor cuando se ejecuta el programa en forma manual.....	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diseño de experimentos	5
Tabla 2. Niveles de los factores	6
Tabla 3. Orden de ejecución de las pruebas.....	6
Tabla 4. Hipótesis Nulas y Alternativas.....	7
Tabla 5. Distribución de masa según el tamaño de las partículas.....	8
Tabla 6. Contenido de oro obtenido con el procesamiento convencional.....	10
Tabla 7. Medición a temperatura constante.....	18
Tabla 8. Medición a Temperatura Variable.....	21
Tabla 9. Valores de temperatura obtenida en la primera replica a altas temperaturas.....	24
Tabla 10. Condiciones de evaluación al 100% de la potencia máxima ideal....	29
Tabla 11. Condiciones de evaluación al 60% de la potencia máxima ideal.....	30
Tabla 12. Resultados obtenidos	34
Tabla 13. Porcentaje de recuperación del oro, mediante el uso del método de calentamiento con microondas .	35
Tabla 14. Análisis de ANOVA.....	36

RESUMEN

TITULO: INTERACCIÓN DE LAS MICROONDAS CON TRAZAS DE ORO EN MUESTRAS PROVENIENTES DEL MUNICIPIO DE CALIFORNIA Y VETAS (SANTANDER)*.

AUTORES: William Alberto Botero Mantilla, Roy Daniel Aguirre Carvajal **.

PALABRAS CLAVES: Microondas, oro, sistema de medición, tostación, potencia del horno.

DESCRIPCIÓN: Los métodos tradicionales para el proceso de extracción de oro son algo rústicos, y no se ha visto una gran búsqueda que conlleve a nuevos caminos que faciliten dicha actividad. Esto significa que hay un campo en el cual pueden centrarse futuros trabajos de investigación y, mediante estos, generar nuevas formas de llevar a cabo el proceso de extracción. La investigación que resume este informe, tiene como objetivo verificar que el uso de microondas para el proceso de extracción permite una notable mejora en la recuperación de este material. Las muestras usadas provienen de la mina Tajo Abierto, ubicada en el municipio de Vetas, Santander. Este informe empieza con una breve explicación acerca de cómo interactúan las microondas con los minerales, basándose en trabajos anteriormente publicados. Luego de esto se explica cómo se lleva a cabo el proceso de tostación y de recuperación de oro usando el método tradicional. Posteriormente se muestra el diseño de un sistema encargado de medir la temperatura dentro del horno microondas. Se realizó un diseño de experimentos, tomando como factores la potencia del horno, el tiempo de exposición y la masa de la muestra para comparar ambos métodos (el tradicional y el aquí planteado) y concluir acerca de si el uso de las microondas realmente genera un beneficio en el proceso de extracción de minerales. Luego, se hizo un análisis de la potencia consumida en el horno microondas para verificar, en primer lugar, que la potencia máxima que dice ofrecer el horno sea cierta.

* Trabajo de Investigación

** Facultad Fisicomecánicas. Ingeniería Electrónica. Director: Rodrigo Correa Cely.

ABSTRACT

TITLE: MICROWAVE INTERACTION WITH TRACES OF GOLD IN SAMPLES FROM THE MUNICIPALITY OF CALIFORNIA AND VETAS (SANTANDER) *.

AUTORS: William Alberto Botero Mantilla, Roy Daniel Aguirre Carvajal **.

KEYWORDS: Microwave, gold, measuring system, roasting furnace power

DESCRIPTION: Traditional recovery methods for gold mineral ores are somewhat outdated, and during the literature review, a significant effort for new ways of improving the situation, was not found. This means that there is a feasible area for future researches, which focus on new ways of recovering gold that allow an economically feasible and an environmentally friendly process. This report summarizes a research where microwaves were used to verify if they are able to enhance the precious mineral recovery. The samples used during the research come from the mine known as "Tajo Abierto", located at Vetas (Santander). This report begins with a brief explanation on the interaction of microwaves and minerals, mainly based on previously reported results. Afterwards, the traditional smelting process for recovery of gold is explained. After that, the design of a system for measuring temperature within the cavity, through thermocouples, is shown. Moreover, a calibration of the sensors was carried out, in order to validate the measuring system. A design of experiments was carried out, considering factors such as the magnetron's power, the exposure time and the samples' mass, and seeing if the recovery margins remained constant and/or if an enhancement in the process was achieved. Finally, an analysis of the energy consumption on both devices (traditional oven and microwave applicator) was performed, finding that reductions of about 81% were possible.

* Trabajo de Investigación

** Facultad Fisicomecánicas. Ingeniería Electrónica. Director: Rodrigo Correa Cely.

INTRODUCCIÓN

El estudio y desarrollo de las microondas se remonta a la década de los 40, donde encontró sus primeras aplicaciones con el radar, y, a lo largo de la historia, ha venido evolucionando hacia procesos industriales, tales como el calentamiento rápido de alimentos y de materiales, en la esterilización, la pasteurización, entre otros. A manera de ejemplo se puede tomar el caso de la minería, donde se ha explorado y analizado la posibilidad de usar este tipo de ondas con el fin de determinar si puede llegar a ser un método eficiente respecto al usado convencionalmente. El uso del calentamiento con microondas, tal y como lo afirman algunos autores [1–3], puede ser una técnica viable que se podría utilizar para el tratamiento de minerales como el oro, con el fin de aumentar la eficiencia de extracción a partir del aprovechamiento de algunas características propias de éste. Además, en algunos casos ha proporcionado ventajas sobre los métodos de calentamiento convencionales, permitiendo reducir el consumo de energía y la cantidad de residuos, obteniendo un calentamiento rápido y selectivo [1–5].

El presente documento, describe como se aplica el tratamiento con microondas a una muestra proveniente de la mina Tajo Abierto, del municipio de Vetas (Santander, Colombia) luego de la etapa de molienda, con el fin de verificar lo anteriormente planteado y, llegado el caso, establecer condiciones favorables que permitan recuperar la mayor cantidad de oro posible. De igual forma se analiza el comportamiento de la temperatura en función de los diferentes factores, mediante la implementación de un sistema de sensado, el cual ha sido calibrado previamente. Seguidamente se asegura que la potencia que dice generar el horno coincida con la entregada a una carga de agua. Se realiza una medición de consumo de potencia entre el método convencional y el método con microondas, mediante la herramienta Power Visa. Por último se plantea y ejecuta un diseño experimental 2^k para analizar los resultados obtenidos.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

Este informe de investigación se realiza con el fin de recopilar el proceso, y los resultados alcanzados, en el desarrollo del trabajo de grado: “Interacción de las microondas con trazas de oro en muestras provenientes de los municipios de California y Vetás (Santander)”. Así mismo, se evidencia que se cumplieron todos los objetivos presentados en el plan de trabajo de grado y enunciados en las siguientes subsecciones.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Verificar el efecto que tiene el uso del método de calentamiento con microondas en la extracción de trazas oro.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- 1.2.1 Realizar pruebas de laboratorio para establecer el efecto que tiene el uso del calentamiento con microondas sobre las muestras de oro.
- 1.2.2 Mediante un modelo estadístico, determinar el efecto que tiene el tratamiento con microondas sobre los residuos de oro, contemplando la aplicabilidad de este procedimiento para aumentar la eficiencia en la extracción de porcentaje del mineral.
- 1.2.3 Establecer criterios de viabilidad del uso de este método bajo preceptos de consumo de recursos energéticos.

2. CONSIDERACIONES PRELIMINARES

2.1 BASES TEORICAS

Cuando se hace referencia a las microondas, se debe tener muy claro que son ondas electromagnéticas, en el rango de 300 MHz hasta 300 GHz, y con longitudes de onda correspondientes al rango de $\lambda = 1\text{m}$ hasta $\lambda = 1\text{mm}$. En éste, las microondas se generan mediante un magnetrón y se transportan hasta la cámara de cocción por medio de una guía de onda. Un horno microondas casero normalmente trabaja a 2,45 GHz. La cámara de cocción posee forma de cubo y está compuesta por paredes metálicas, y por consiguiente se comporta como una jaula de Faraday (impide en el interior de la cavidad la actuación de campos eléctricos provenientes del exterior). Dentro de la cavidad, los electrones semi-libres de las paredes metálicas poseen una interacción bastante fuerte con los campos eléctricos de las ondas. Los electrones del metal, que se aceleran, irradian ondas electromagnéticas en la misma frecuencia y fase que las microondas, haciendo que estas sean perfectamente reflejadas, de tal forma que la mayoría de la irradiación sea aplicada a la carga que es objeto del proceso.

Para una mejor comprensión del comportamiento de las microondas, es conveniente realizar un análisis de la interacción de los campos eléctricos y magnéticos que se presentan en una cavidad resonante, para lo cual se debe acudir a las ecuaciones de Maxwell, indicadas por las ecuaciones(1)-(4).

$$\nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

Las ecuaciones de Maxwell se complementan cuando se definen las relaciones constitutivas, las cuales describen las propiedades macroscópicas del medio y están dadas por las ecuaciones(5)-(7):

$$J = \sigma E \quad (5)$$

$$D = \epsilon_0 \epsilon' E \quad (6)$$

$$B = \mu_0 \mu' H \quad (7)$$

Siendo E el campo eléctrico (V/m), H el campo magnético (A/m), ϵ_0 la permitividad del vacío (8.854×10^{-12} F/m), μ_0 la permeabilidad del vacío (1.257×10^{-6} H/m), D es la densidad de corriente, B es la densidad del flujo magnético, ρ_v es la densidad de carga volumétrica, μ' y ϵ' es la permeabilidad y la permitividad del medio respectivamente. Esta última es descrita en la ecuación(8):

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (8)$$

donde ϵ' describe la capacidad del material para almacenar energía y ϵ'' representa el factor de disipación de calor. De igual forma, la interacción entre el campo eléctrico generado y el material irradiado, es función de varios factores, tales como la permeabilidad y la tangente de pérdidas. Para un material con permitividad compleja, ésta última se define según la ecuación (9), donde ϵ_r es la permitividad relativa y σ es la conductividad del material.

$$\tan(\delta) = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r} \quad (9)$$

Por su parte, la potencia disipada por un material sometido a la irradiación microondas puede describirse en términos del campo eléctrico, y omitiendo el campo magnético (dicha componente es función directa del campo eléctrico e inversa a la impedancia característica, lo que lleva a que este valor sea pequeño respecto al primero) tal y como se indica en(10).

$$P = 2\pi f \varepsilon'' E^2 \quad (10)$$

La profundidad de penetración indica la distancia, medida desde la superficie del material, hasta donde el flujo de potencia ha decaído en un factor de e^{-1} [5]. La razón de la pérdida de potencia es función de la permitividad relativa y del factor de pérdidas, como se ve en la ecuación(11), donde C es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s).

$$D_p = \frac{C}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon'} [\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1]^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

La cámara de cocción presente en todos los microondas se puede aproximar a una cavidad resonante de forma rectangular[6]. Dentro de esta cámara se generan ondas estacionarias, que pueden representarse mediante las ecuaciones(12)-(14), donde se tiene que ω es la frecuencia angular proveniente del magnetrón, y k_x, k_y y k_z se pueden definir según la ecuación (15), donde L_x, L_y y L_z son las dimensiones de la cámara de cocción (cavidad).

$$E_x = E_1 \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z) e^{i\omega t} \quad (12)$$

$$E_y = E_2 \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) e^{i\omega t} \quad (13)$$

$$E_z = E_3 \sin(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z) e^{i\omega t} \quad (14)$$

$$k_x = \frac{m\pi}{L_x}, k_y = \frac{n\pi}{L_y}, k_z = \frac{p\pi}{L_z} \quad (15)$$

$$(m, n, p = 0, 1, 2 \dots)$$

Por consiguiente, todas las combinaciones de m, n, p permiten la obtención de los distintos modos presentes en el campo eléctrico, de los cuales solo se toman los que establecen una frecuencia mayor a la de corte y que pueden obtenerse a partir de la ecuación(16).

$$\frac{(\omega_{m,n,p})^2}{C^2} = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (16)$$

Para la realización de otros análisis es importante determinar la densidad de potencia absorbida por un material, la cual se define según la ecuación (17):

$$p = w * \text{Im}[\epsilon] * E^2 \approx E^2 \quad (17)$$

donde $\text{Im}[\epsilon]$ es el factor de pérdidas del material, y en donde E^2 se puede expresar como en la ecuación(18):

$$\begin{aligned} E^2 &= \frac{1}{2} (|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2) \\ &= \frac{1}{2} [E_1^2 \cos^2(k_x x) \sin^2(k_y y) \sin^2(k_z z) \\ &\quad + E_2^2 \sin^2(k_x x) \cos^2(k_y y) \sin^2(k_z z) \\ &\quad + E_3^2 \sin^2(k_x x) \sin^2(k_y y) \cos^2(k_z z)] \end{aligned} \quad (18)$$

2.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Se llevó a cabo un diseño experimental como una estrategia para reunir información, y para analizar los datos obtenidos. Para ello, se deben establecer cuatro pasos, los cuales se encuentran relacionados el uno con el otro, y que son[7]:

1. Definir el objetivo de la investigación: Verificar la interacción de las microondas con las trazas de oro.
2. Definir las variables que serán controladas: Para este caso, en este análisis se estudiarán los factores o variables de tiempo de exposición, masa de la muestra y potencia del horno. Se mantendrá constante o no serán variables del proceso el tamaño de la partícula y el tipo de muestra (diferentes minas), entre otras.
3. Definir las variables que se medirán: El propósito es establecer el contenido de oro que se obtiene tras la aplicación del calentamiento con microondas.
4. Elegir entre los diseños estándar disponibles uno que sea compatible con el objetivo, el número de variables de diseño, la precisión de las mediciones y los

costos: Para este caso se usa el diseño de experimento factorial, con tres factores y dos niveles (alto y bajo) y con un análisis estadístico de una cola respecto a una media conocida.

Muchos experimentos implican el estudio de más de dos factores, por lo que el diseño factorial es muy eficiente, ya que combina las posibles interacciones entre ellos. En el diseño experimental se debe establecer, para cada factor (variable independiente del proceso), niveles de interés. El efecto de un factor es definido como el cambio en la respuesta producido por un cambio de su nivel. El caso 2^k es el más importante de los diseños factoriales, puesto que tiene k factores cada uno con 2 niveles. Estos pueden ser clasificados de manera cuantitativa. Un ejemplo de esto serían valores de presión, temperatura, masa etc. Sin embargo, también pueden clasificarse en niveles cualitativos, o, en el proceso del experimento, puede ser vistos como la presencia o ausencia de cierto factor. Al tener 2 niveles por factor, estos reciben el nombre de nivel bajo (-) y nivel alto (+). El mínimo diseño que se puede encontrar es cuando $k = 2$ factores.

2.2.1 Factores De Análisis

2.2.1.1 Tiempo de exposición de la muestra a la radiación.

El tiempo de exposición está directamente relacionado con el aumento de la temperatura. Entre mayor sea el tiempo de radiación, se espera que mayor sea la temperatura en la muestras. Se debe establecer un rango de tiempo de exposición adecuado, ya que se puede llegar a la sinterización de éstas[6]. Para el diseño de experimentos planteado se toman dos valores de tiempo, que corresponden a 25 y 40 min. El primer valor se escogió porque es el tiempo mínimo que se encontró para que se lograra tostar la muestra, mientras que el segundo corresponde al valor máximo antes de sinterización. El proceso se realiza en intervalos de 5 minutos, momento en el cual se procede a revolver la muestra para proporcionar un calentamiento más homogéneo.

2.2.1.2 Masa de la muestra

Uno de los factores que afecta la cantidad de oro extraído, y del mismo modo la efectividad de la aplicación, está ligado a la cantidad de masa expuesta a la radiación. La temperatura de la muestra bajo condiciones similares de potencia incidente e igual tiempo de procesamiento aumenta a medida que se incrementa la masa (Existe un valor límite, a partir del cual tiende a estabilizarse la temperatura), ya que hay más material que interactúa con el campo eléctrico[8–10].

En este caso se variará la cantidad de masa a irradiar con microondas para llevar a cabo la tostación. Se propone tomar dos valores de masa, 30 y 60 gramos, dado que son los usados mediante el método tradicional.

2.2.1.3 Potencia del horno microondas

Existe una relación directa entre el comportamiento del perfil de temperatura y la potencia del magnetrón [12] [13]. Los análisis realizados se ejecutaron bajo los preceptos de dos potencias de irradiación, una al 100 % la cual corresponde a la potencia máxima proporcionada por el horno, y otra al 60 % de la potencia máxima para después comparar con cual potencia se obtuvo una mejor recuperación del oro (valores escogidos con el fin de lograr la tostación en el menor tiempo posible y al mismo tiempo significativamente diferentes para comparar).

En la Tabla 1, se aprecia el diseño de experimento ejecutado durante el desarrollo del proceso, para una réplica.

Tabla 1. Diseño de experimentos

MASA[Gramos]	
30	60
Tiempo [min]	Tiempo[min]

Potencia	25	40	25	40
[W]				
	600			
				1000

Fuente: Autores

Los niveles que relacionan cada factor de estudio dentro del diseño experimental 2^k , se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Niveles de los factores

	Nivel bajo (-)	Nivel alto (+)
Potencia (A)	600 W	1000 W
Masa (B)	30 g	60 g
Tiempo (C)	25 min	40 min

Fuente: Autores

La ejecución de cada prueba debe ser aleatoria, para que el diseño sea completamente randómico, por lo que se debe establecer una guía de desarrollo (Tabla 3) en función de los diferentes factores.

Tabla 3. Orden de ejecución de las pruebas

Número de la prueba	Orden de ejecución	Bloque	Nivel del Factor A	Nivel del Factor B	Nivel del Factor C
1	1	1	-	-	-
2	7	1	-	-	+
3	13	1	-	+	-
4	18	1	-	+	+
5	24	1	+	-	-
6	4	1	+	-	+
7	10	1	+	+	-
8	21	1	+	+	+

9	17	2	-	-	-
10	22	2	-	-	+
11	6	2	-	+	-
12	12	2	-	+	+
13	19	2	+	-	-
14	2	2	+	-	+
15	9	2	+	+	-
16	15	2	+	+	+
17	3	3	-	-	-
18	23	3	-	-	+
19	16	3	-	+	-
20	8	3	-	+	+
21	11	3	+	-	-
22	20	3	+	-	+
23	5	3	+	+	-
24	14	3	+	+	+

Fuente: Autores

2.2.2 Planteamiento De Las Hipótesis

Las hipótesis nulas (Ho) y las alternativas (H1) que se usaron para plantear y llevar a cabo los respectivos análisis del diseño de experimentos son [7]:

Tabla 4. Hipótesis Nulas y Alternativas

Hipótesis Nula (Ho)	Hipótesis Alternativa (H1)
1. No existe relación entre la cantidad de oro obtenido y la potencia incidente en la muestra.	1. Existe relación entre la cantidad de oro obtenido y la potencia incidente en la muestra.
2. No existe relación entre la cantidad de oro obtenido y la cantidad de masa irradiada.	2. Existe relación entre la cantidad de oro obtenido y la cantidad de masa irradiada.
3. No existe relación entre la cantidad	3. Existe relación entre la cantidad de

de oro obtenido y el tiempo de exposición.	de oro obtenido y el tiempo de exposición.
4. No existe relación entre la cantidad de oro obtenido, la potencia del horno y la cantidad de masa irradiada.	4. Existe relación entre la cantidad de oro obtenido, la potencia del horno y la cantidad de masa irradiada.
5. No existe relación entre la cantidad de oro obtenido, la potencia del horno y el tiempo de exposición.	5. Existe relación entre la cantidad de oro obtenido, la potencia del horno y el tiempo de exposición.
6. No existe relación entre la cantidad de oro obtenido, el tiempo de exposición y la cantidad de masa irradiada.	6. Existe relación entre la cantidad de oro obtenido, el tiempo de exposición y la cantidad de masa irradiada.
7. No existe relación entre la cantidad de oro obtenido, la potencia del horno, la cantidad de masa irradiada y el tiempo de exposición.	7. Existe relación entre la cantidad de oro obtenido, la potencia del horno, la cantidad de masa irradiada y el tiempo de exposición.

Fuente: Autores

3. RESULTADOS

3.1 EQUIPOS, INSUMOS Y PRUEBA PRELIMINAR

Las muestras usadas para el desarrollo del estudio provienen de la mina Tajo Abierto, del municipio de Vetas (Santander-Colombia). Inicialmente, se buscó determinar su tenor (gramos de oro por tonelada de roca). Como primer paso, la muestra fue procesada con un molino de bolas, durante aproximadamente 25 minutos, y luego fue tamizada. La masa total fue de 576.737 gramos, distribuida como se muestra en la Tabla 5

Tabla 5. Distribución de masa según el tamaño de las partículas

MALLA	MASA[GRAMOS]
-------	--------------

20	42.897
35	100.08
50	125.14
100	89.03
120	43.984
170	45.484
-170	130.14
MASA TOTAL	576.737

Fuente: Autores

Una vez separada, se tomaron cuatro muestras de 30 gramos (mallas 50, 100, 170 y -170) y se colocaron dentro de un horno (Mufla) hasta alcanzar una temperatura de tostación equivalente a 750°C, que se mantuvo por 20 minutos. Terminado este proceso, se procede a fundir el material, para lo cual es necesario mezclarlo con 45 gramos de óxido de plomo, 40 gramos de carbonato de sodio, 7 gramos de bórax y 5 gramos de harina de trigo. Este conjunto (Figura 1) es llevado al horno hasta alcanzar una temperatura de 1000°C (Figura 1) y mantenido por 40 minutos.

Figura 1. Muestra preparada para el proceso de fundición



Fuente: Autores

Figura 2. Proceso de fundición mediante el uso de Muflas



Fuente: Autores

Se elimina el contenido de vidrio (obtenido de la etapa anterior) y el material resultante, el cual contiene plomo, oro y plata, se coloca en una copela y se funde nuevamente, con el fin de eliminar el plomo existente (las copelas están hechas de hueso y cemento, y el primero tiene la capacidad de absorber el plomo).

Figura 3. Material fundido una vez enfriado



Fuente: Autores

A las partículas obtenidas se les ataca químicamente con ácido nítrico, teniendo como resultado el oro contenido en las diferentes muestras (ver Tabla 6).

Tabla 6. Contenido de oro obtenido con el procesamiento convencional.

MALLA	CANTIDAD DE ORO EN 30 GRAMOS DE
-------	------------------------------------

MASA	
50	Trazas de oro
100	0.00010
170	Trazas de oro
-170	0.00003

Fuente: Autores

Para la ejecución de la técnica de calentamiento propuesto, se usó un horno de microondas, marca Whirlpool con un magnetrón de 2450 [MHz] y con una potencia máxima de 1000 [W], la cual puede ser graduada a 20%,40%,60%,80% y 100% de su valor máximo. Las dimensiones de la cavidad son 37x37x22 cm (ancho, profundidad y altura) (Figura 4).

Figura 4. Horno microondas y campana extractora de gases



Fuente: Autores

Como reactor, o recipiente para calentar la muestra, se utilizó un crisol de arcilla con una serie de agujeros en la parte inferior, por donde se ingresan las termocuplas (Figura 5, Figura 6). Se usaron otros aditivos, como óxido de plomo, bórax, Carbonato de sodio, ácido nítrico y alcohol etílico para los respectivos análisis de contenido de oro, tras el proceso de calentamiento con microondas.

Figura 5. Crisol de arcilla



Fuente: Autores

Figura 6. Horno microondas con agujeros, para incorporar las termocuplas



Fuente: Autores

Antes de implementar el proceso, se mapeó el horno con papel cartón, buscando establecer los puntos de mayor concentración del campo electromagnético para garantizar que durante todas las pruebas las muestras se encontraran situadas en el mismo punto.

3.2 SISTEMA DE SENSADO DE TEMPERATURA

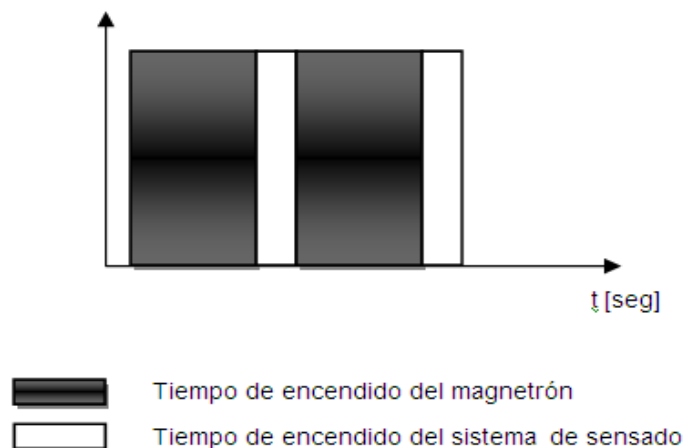
3.2.1 Descripción Del Sistema

Para medir la temperatura en la carga, se utilizó un conjunto de termocuplas (transductores de temperatura, es decir, traducen la magnitud física en una señal eléctrica). Una termocupla está compuesta por dos alambres de metales diferentes, que unidos generan entre sus extremos libres una diferencia de potencial proporcional a la diferencia de temperatura entre ellos. Las

termocuplas son comúnmente usadas para medir altas temperaturas, pero cuando se exponen a la radiación microondas se generan corrientes debido a los campos electromagnéticos alternantes, y por consiguiente se inducen señales de error en la salida[7] [8].

Para la medición de temperatura se usa un sistema de sensado, que se programó con la herramienta Labview 2009. En éste se establecen determinados tiempos de encendido y apagado del magnetrón (Figura 7), al igual que los ciclos durante los cuales se obtendrá la información referente a la temperatura de la muestra. Es claro que esto se hace con el fin de evitar los inconvenientes anteriormente mencionados.

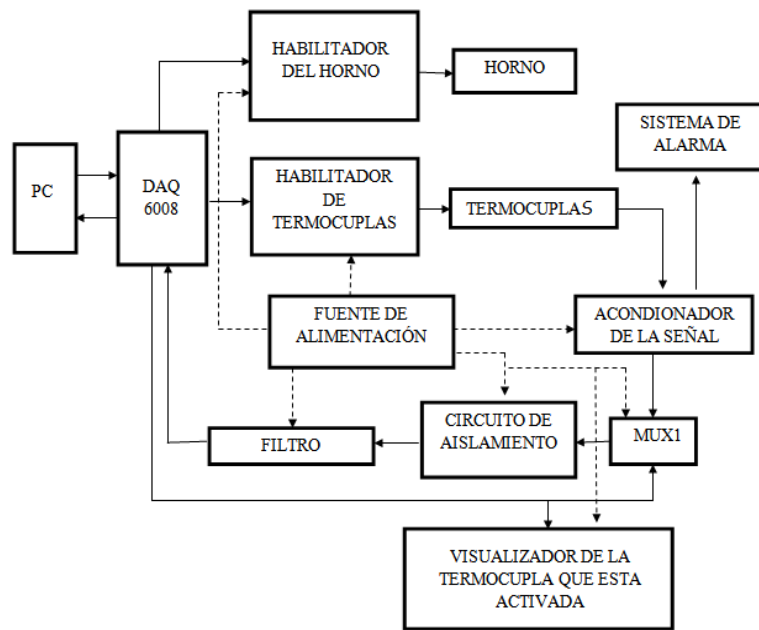
Figura 7. Esquema general del sistema de encendido del magnetrón y del sistema de sensado de temperatura.



Fuente: Autores

Para el sensado de la temperatura en las muestras de oro, se implementa un sistema, cuyo esquema se aprecia en la Figura 8.

Figura 8. Esquema del circuito de sensado de temperatura.



Fuente: Autores

La DAQ 6008 de National Instruments, es la encargada de activar y desactivar los relés tanto del horno microondas como el del sistema de temperatura. Una vez este último es activado, se generan unos voltajes en los terminales de las termocuplas, que entran a los acondicionadores de señal, linealizando los datos y proporcionándole una etapa de ganancia (10 mV/°C). El voltaje de salida de los acondicionadores se envía al MUX analógico, que de acuerdo a las tensiones digitales de selección, escogen una de las cinco entradas.

La tensión de salida del MUX entra al circuito de aislamiento, que se encarga de proteger a la tarjeta de adquisición de altas tensiones y corrientes. Por último, mediante un filtro pasabajos se elimina el ruido de alta frecuencia y la componente de la red. Dicho dato filtrado se adquiere y es el correspondiente al valor de la temperatura medida. En el Apéndice A, se detalla la función de cada etapa, descrita en la Figura 8.

Para el diseño de las PCBs, se usa la herramienta Orcad Capture 10.5 y Layout. En total se tienen tres PCBs, que corresponden a la encargada de manejar el sistema de alta potencia, la encargada de alimentar los integrados

de las PCBs y a la relacionada con el sistema de sensado. En el apéndice B se encuentra información mas detallada acerca del diseño de cada PCB.

El sistema de alta potencia tiene la función de manejar la activación y desactivación del transformador que alimenta el magnetrón (Figura 9). Como entrada a este circuito, se tiene una señal analógica que proviene del magnetrón y una fuente de alimentación de 12 [Vdc] que es la encargada de alimentar el circuito.

Figura 9. Sistema de activación del circuito del magnetrón



Fuente: Autores

En el circuito de alimentación se usan dos transformadores con TAD central, con el fin de poder aislar posteriormente el diseño (tierras diferentes). Como entrada se tienen las tensiones del secundario de los respectivos transformadores (Figura 10).

Figura 10. Sistemas de fuentes de alimentación



Fuente: Autores

Al sistema de adquisición de temperatura (Figura 11) llegan las señales de las cinco termocuplas, las tensiones de alimentación generadas por las dos fuentes duales de ± 12 [Vdc], las señales provenientes de la tarjeta de adquisición encargada de seleccionar los respectivos canales del multiplexor analógico y la señal encargada de activar el sistema de sensado. Como salida se tiene la señal proveniente del filtro, que se conecta a la DAQ.

Figura 11. Sistema de sensado de temperatura



Fuente: Autores

3.2.2 Mejoras Realizadas

Con el rediseño planteado, se lograron realizar varias mejoras respecto a anteriores propuestas. A diferencia de [14], se incorporó un sistema de alarma al cambiar la configuración del acondicionador de señal (AD595), lo que

permite establecer si alguno de dichos integrados está averiado o si alguna de las termocuplas se encuentra desconectada. Se amplió el rango de medición de temperatura de 250°C a 750°C. Adicionalmente, se integró un sistema de visualización que indica cual termocupla se encuentra midiendo. Por último se incrementó el uso de termocuplas (de 1 a 5), lo que permite realizar múltiples mediciones en diferentes puntos de la muestra expuesta a la irradiación.

En relación con [13], se disminuyó en gran medida el número de componentes electrónicos. En este, usaron cinco termocuplas, pero debieron utilizar igual número de tarjetas de adquisición con su respectivo circuito de acondicionamiento. Esto se logró excluir al incorporar el mux/demux analógico, el cual selecciona un canal de cinco posibles, mediante un conjunto de tensiones digitales programadas.

3.2.3 Calibración Del Sistema De Sensado De Temperatura

Para la calibración del sistema de temperatura se realizaron dos pruebas (a temperatura constante y a temperatura variable), con el fin de estimar un valor compensatorio de temperatura.

3.2.3.1 Calibración a temperatura constante

Para la primera etapa de calibración del sistema de sensado, se midió la temperatura en 200 mL de agua a temperatura constante, adquiriendo los datos cada 15 segundos.

Se procedió a registrar los valores obtenidos por un Termómetro Fluke 52 II (Figura 12) y a compararlos con el del sistema implementado.

Figura 12. Termómetro Fluke 52 II



Fuente: Autores

En laTabla 7, se muestra los valores de temperatura medidos con el Fluke y con las termocuplas, de la misma forma que las diferencias entre las mediciones.

Tabla 7. Medición a temperatura constante

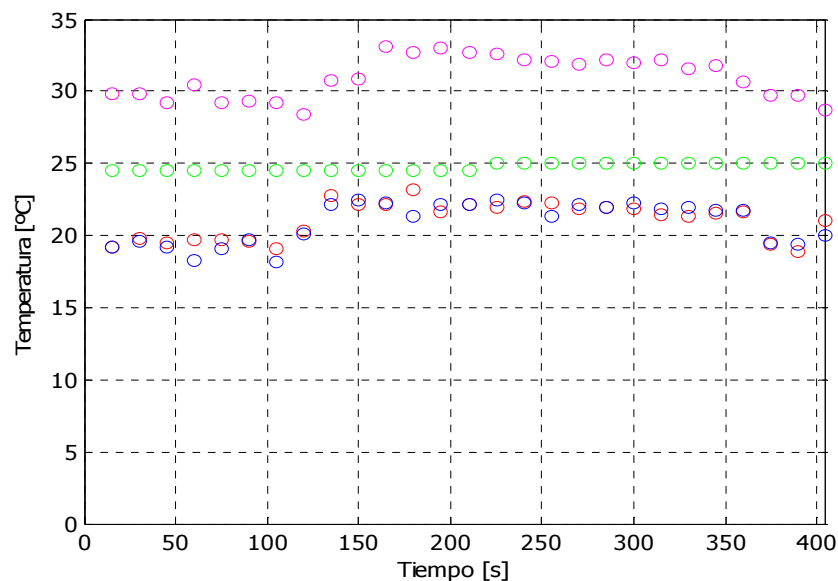
FLUKE	TERM1	TERM2	TERM3	dif1	dif2	dif3
24,50	19,20	19,20	29,80	5,30	5,30	5,30
24,50	19,80	19,60	29,80	4,70	4,90	5,30
24,50	19,50	19,14	29,24	5,00	5,36	4,74
24,50	19,70	18,30	30,40	4,80	6,20	5,90
24,50	19,70	19,10	29,20	4,80	5,40	4,70
24,50	19,60	19,70	29,30	4,90	4,80	4,80
24,50	19,05	18,18	29,20	5,45	6,32	4,70
24,50	20,30	20,12	28,40	4,20	4,38	3,90
24,50	22,80	22,18	30,80	1,70	2,32	6,30
24,50	22,14	22,50	30,84	2,36	2,00	6,34
24,50	22,19	22,28	33,13	2,31	2,22	8,63
24,50	23,21	21,30	32,70	1,29	3,20	8,20
24,50	21,65	22,12	33,00	2,85	2,38	8,50
24,50	22,15	22,18	32,70	2,35	2,32	8,20
25,00	22,00	22,50	32,60	3,00	2,50	7,60
25,00	22,40	22,28	32,17	2,60	2,72	7,17

25,00	22,25	21,30	32,13	2,75	3,70	7,13
25,00	21,80	22,12	31,90	3,20	2,88	6,90
25,00	22,00	22,00	32,20	3,00	3,00	7,20
25,00	21,80	22,21	32,00	3,20	2,79	7,00
25,00	21,40	21,90	32,20	3,60	3,10	7,20
25,00	21,30	22,00	31,60	3,70	3,00	6,60
25,00	21,50	21,70	31,80	3,50	3,30	6,80
25,00	21,64	21,70	30,60	3,36	3,30	5,60
25,00	19,41	19,50	29,70	5,59	5,50	4,70
25,00	18,90	19,40	29,70	6,10	5,60	4,70
25,00	21,00	20,00	28,70	4,00	5,00	3,70
			Promedio	3,83	3,98	6,45

Fuente: Autores

Los valores promedio muestran que las mediciones de la termocupla 3, es la que más difiere a la del Termometro Fluke. En la Figura 13 se aprecia dicho comportamiento.

Figura 13. Temperatura obtenida con el sistema de sensado y el Fluke, a temperatura constante (Termocupla 1 (Rojo), Termocupla 2 (azul), Termocupla 3 (Purpura), Fluke (Verde))



Fuente: Autores

Las señales adquiridas de la termocuplas 1 y 2 son las más similares a las obtenidas por el Fluke. Cabe aclarar que tan solo se estaba obteniendo los datos sin haber realizado ningún tipo de pre calibración. Cualquier caída de tensión en el circuito debido a pérdidas o por el factor de ganancia de las configuraciones, pueden generar errores en la medición, por lo que se debe hacer una compensación en lazo cerrado, para contrarrestar dicho efecto.

3.2.3.2 Calibración a Temperatura Variable

La calibración se realiza en lazo cerrado y no por etapas de cada circuito, debido a que las diferentes configuraciones de los diseños pueden generar etapas de ganancia o atenuación de las señales provenientes de las termocuplas.

Se usó 200 mL de agua, la cual se calentó por un tiempo aproximado de 7 minutos. Cada 15 segundos se tomaba el dato referente a la temperatura medida por cada termocupa.

La plancha usada es una Thermolyne Cimarec 3 (Figura 14), de 10 niveles de potencia.

Figura 14. Plancha Thermolyne Cimarec 3



Fuente: Autores

Los resultados obtenidos del sistema sin calibrar se muestran en laTabla 8.

Tabla 8. Medición a Temperatura Variable

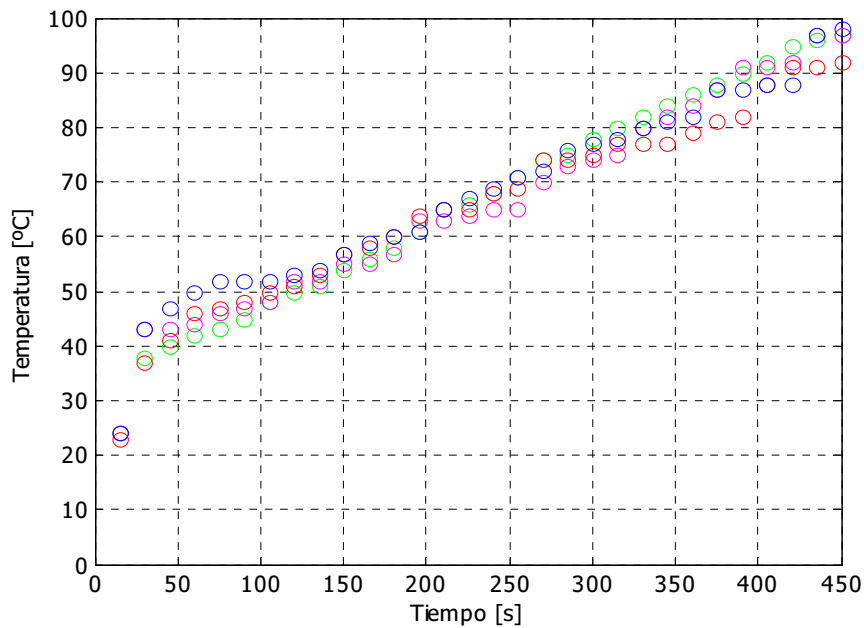
TERM1 [°C]	TERM1 [°C]	TERM3 [°C]	FLUKE
23	24	24	24
37	43	43	38
41	47	43	40
46	50	44	42
47	52	46	43
48	52	47	45
50	52	48	48
51	53	52	50
53	54	52	51
57	57	55	54
58	59	55	56
60	60	57	58
64	61	63	61
65	65	63	65

65	67	64	66
68	69	65	68
69	71	65	71
74	72	70	74
74	76	73	75
75	77	74	78
77	78	75	80
77	80	80	82
77	81	82	84
79	82	84	86
81	87	87	88
82	87	91	90
88	88	91	92
91	88	92	95
91	97	97	96
92	98	97	97

Fuente: Autores

Los valores obtenidos muestran una mayor similitud entre ellos (Figura 15). Para lo cual, se hizo una compensación inicial con el fin de establecer un valor igual a la temperatura ambiente, por lo que se tomó los valores promedios de error hallados en la calibración a temperatura constante.

Figura 15. Temperatura obtenida con el sistema de sensado y el Fluke, a temperatura variable (Termocupla 1 (Rojo), Termocupla 2 (azul), Termocupla 3 (Purpura), Fluke (Verde))



Fuente: Autores

De acuerdo a la Figura 15, existen ciertos rasgos de dispersión de los valores medidos, por lo que se hace necesario realizar una compensación en lazo cerrado si se piensa usar el sistema para la medición a altas temperaturas. A pesar de ello, la diferencia de temperatura obtenida es aceptable para la aplicación que se está investigando. Los valores promedios de diferencia de temperatura es de 3, 2.9 y 2.1 grados Celsius en comparación con el obtenido con el Fluke.

3.2.3.3 Calibración a altas temperaturas

Para la calibración a altas temperaturas, se expuso las termocuplas directamente al calor generado por la plancha usada en la calibración anterior. Para ello, se graduó a la máxima potencia, la cual puede generar temperaturas de alrededor de 300°C.

Se realizaron dos replicas para constatar la repetibilidad y la similitud en las mediciones. Para lo cual, cada 15 segundos se tomaban los datos referentes a

la temperatura de cada termocupla. En la Tabla 9 se registran los valores asociados a la temperatura de la primera réplica.

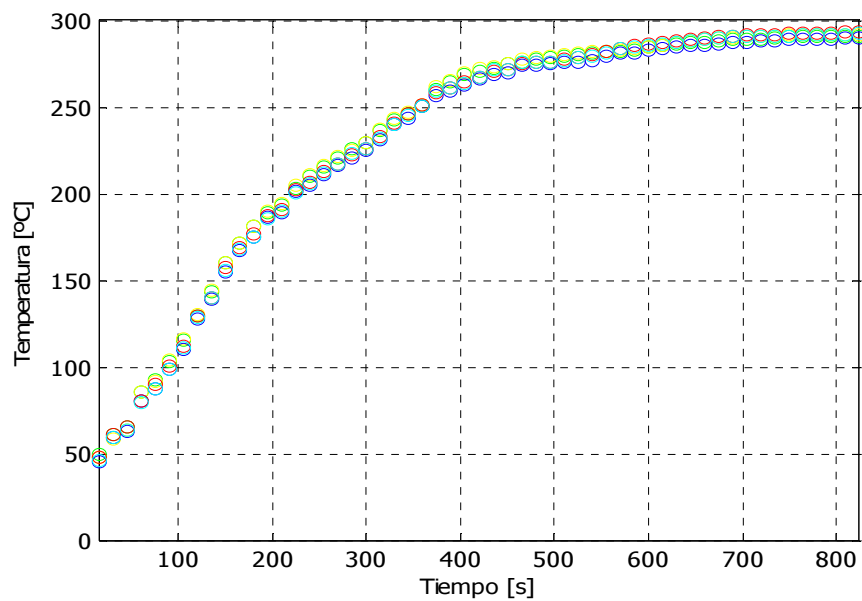
Tabla 9. Valores de temperatura obtenida en la primera replica a altas temperaturas.

fluke1	fluke2	term1	term2	term3
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
49,6	47,6	45,2	50,5	45,1
60,6	58,2	58,8	64,4	58,3
65,5	63,4	62,9	68,2	62,4
85,5	85,4	80,2	83,3	78,8
92,3	92	87,2	92,6	86,6
103,5	103,8	98,4	103,4	98,1
115,4	116,2	110,1	115,2	110
129,6	130,1	127,5	132	127,4
143,6	144,3	139,3	143,2	138,6
160,5	160,2	154,6	160,3	154,9
171,6	171,5	167,2	171,7	167,1
180,9	181,3	175,1	179,4	174,4
189,2	190,1	186,7	190,5	184,9
193,5	194	189,4	193,5	189,3
203,5	204,4	201,1	205,6	199,1
210,5	211,3	204,8	209,8	204,8
215,5	216,4	211,3	215,6	210,9
220,5	221,3	215,9	220,4	216,1
225,5	224,6	220,6	225,6	222,1
229,5	229,6	224,8	229,3	224,6
236	237,2	231,4	235,6	230,8
242,6	243,2	239,7	243,4	238,8
246,3	247	243,1	248,9	244,3
250,5	251,3	250	254,3	249,1
260,3	262,1	256,3	261,7	258,3

264,2	265,3	259,6	264,1	259,9
268,9	269,7	262,7	267,2	262,7
270,2	272,4	266,2	270,4	266,4
272,3	273	268,9	273,9	270,2
274,8	275,1	269,6	274,5	270,8
276,1	277,3	273,8	278,4	274,9
277,8	278,2	274,1	278,9	274,5
278,1	279,1	275,3	279	274,9
279,2	280,3	276	280,4	275,8
280,1	281,2	276,3	281,4	277,1
281	282,2	277,1	283,1	278,4
281,9	282,3	279,2	285	280,1
282,4	283,2	280,9	287,1	282,6
283	284,1	281,3	288,4	283,4
284,4	284,37	282,7	289,1	284,7
285,2	285,6	283,4	290,5	285,4
286,3	287,1	284,6	291,4	286,6
286,9	288,3	285,1	292,2	287,1
287,2	289	285,9	293,2	287,9
288,1	289,5	286,4	293,5	289,1
288,7	290,2	287,2	294,1	289,4
289	290,7	287,6	294,6	289,7
289,4	290,9	287,9	294,8	289,9
289,8	291,1	288,3	295	290,1
290,8	291,4	288,6	295,3	290,2
291	291,6	288,7	295,4	290,4
291,1	291,6	289	295,7	290,6
291,1	291,7	289,4	295,8	290,7
291,1	291,8	289,6	296	290,9
291,2	292	289,8	296,1	291,2

En la Figura 16 se visualiza el comportamiento de la temperatura en función del número de mediciones. Se encontró que existe una diferencia promedio en la medición con respecto a la marcada por el Fluke de 3.16, 2.45 y 2.79 grados Celsius (termocupla 1, 2 y 3 respectivamente).

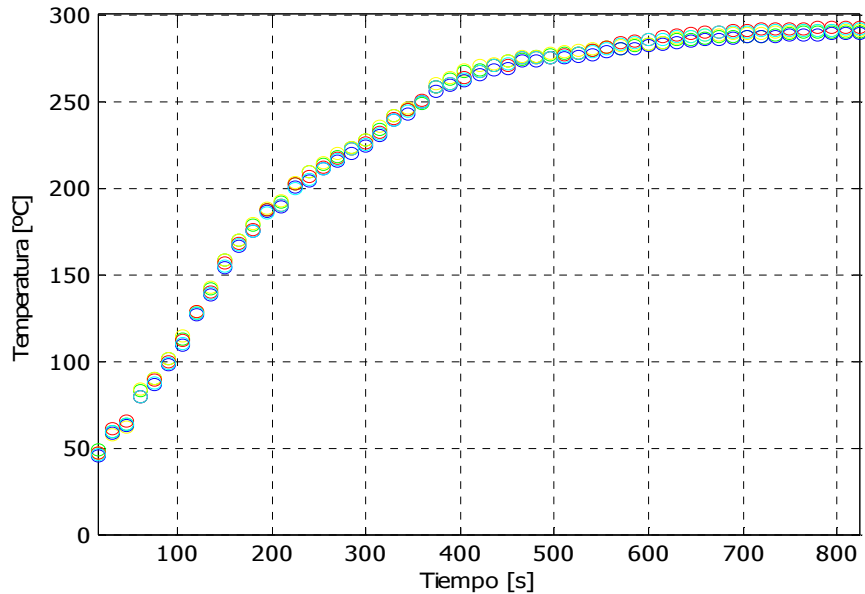
Figura 16. Primera replica de la calibración a altas temperaturas (Fluke 1 (verde), Fluke 2 (amarillo), term1 (azul), term2 (rojo), term3 (cian))



Fuente: Autores

Para la segunda replica (Figura 17), se obtuvo un comportamiento similar al observado en la primera prueba. Para ésta se obtuvo una diferencia promedio de 3.20, 2.98 y 2.95 grados Celsius (termocupla 1,2 y 3) respecto a la medida con el Fluke.

Figura 17. Segunda replica de la calibración a altas temperaturas (Fluke 1 (verde), Fluke 2 (amarillo), term1 (azul), term2 (rojo), term3 (cian))



Fuente: Autores

3.3 MEDICIÓN DE LA POTENCIA ENTREGADA POR EL MAGNETRÓN A UNA CARGA DE AGUA

Dos de los elementos más importantes al momento de caracterizar un horno microondas son la potencia del generador y la uniformidad de distribución de la energía dentro de la cavidad [15]. Para estimar la potencia de cocción generada por el horno microondas y verificar los valores dados por el fabricante, se mide la variación de la temperatura en una carga de agua. Como el material (agua en este caso) absorbe la energía microondas, el incremento de la temperatura es proporcional a distintos parámetros. La potencia requerida para un aumento de temperatura en una masa M (kg) de determinado material desde T_0 °C a T_f °C en t segundos esta dado por [15–17]

$$P = \frac{MC_p(T_f - T_0)}{t} \quad (19)$$

donde C_p es el calor específico del material a una presión constante. También es posible determinar la intensidad del campo eléctrico rms como:

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{MC_p(T_f - T_o)}{w * \epsilon_o * \epsilon''_{eff} * V * t}} \quad (20)$$

donde w es la frecuencia angular, ϵ_o es la constante dieléctrica del espacio libre, ϵ''_{eff} es la parte imaginaria de la permitividad efectiva del dieléctrico y V es el volumen del material dieléctrico. El diferencial de volumen es empleado para realizar análisis acerca de distribuciones volumétricas de una cantidad física, y su expresión es de la siguiente forma:

$$dv = dx \cdot dy \cdot dz \quad (21)$$

Para el análisis de potencia, es necesario establecer los niveles de potencia reales que nos proporciona el microondas, ya que la proporcionada en el manual por el fabricante es ideal.

3.3.1 Determinación de la potencia real al 100% de la potencia ideal

Se usó una masa de agua de 66.74 gramos (Figura 18) la cual fue calentada por 10 segundos. Posteriormente se midió la variación de temperatura (Tabla 10).

Figura 18. Medición de la potencia real proporcionada por el horno microondas



Fuente: Autores

Tabla 10. Condiciones de evaluación al 100% de la potencia máxima ideal

Masa de agua [Kg]	0.06674
Calor específico del agua [J/Kg.°C]	4.1813×10^3
Temperatura Inicial [°C]	24
Temperatura Final [°C]	59
Tiempo transcurrido [s]	10

Fuente: Autores

Con los datos de la Tabla 10 y replazándolos en (19), se obtuvo que la potencia real es de 976.71W.

3.3.2 Determinación de la potencia real al 60% de la potencia ideal

Se usó la misma masa de agua del apartado anterior (66.74 gramos), e igualmente se calentó por 10 segundos, a partir del cual se midió la variación en la temperatura. En la Tabla 11, se muestran las condiciones de operación y los valores de temperatura medidos.

Tabla 11. Condiciones de evaluación al 60% de la potencia máxima ideal

Masa de agua [Kg]	0.06674
-------------------	---------

Calor específico del agua [J/Kg.°C]	4.1813×10^3
Temperatura Inicial [°C]	25.5
Temperatura Final [°C]	41.8
Tiempo transcurrido [s]	10

Fuente: Autores

Con los datos de la Tabla 11 y remplazándolos en (19), se obtuvo que la potencia real es de 454.86 W.

3.4 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN LAS MUESTRAS

La variación de la temperatura en la muestra permite establecer la variación de algunas características en función de la cantidad de masa, tiempo de exposición y variación de la potencia entregada a la carga.

Se midió la temperatura en 5 puntos de las muestras, tal y como lo muestra la Figura 19. En las respectivas figuras (Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23), los puntos rojos, azul, amarillo, cian y magenta corresponden a las mediciones 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente.

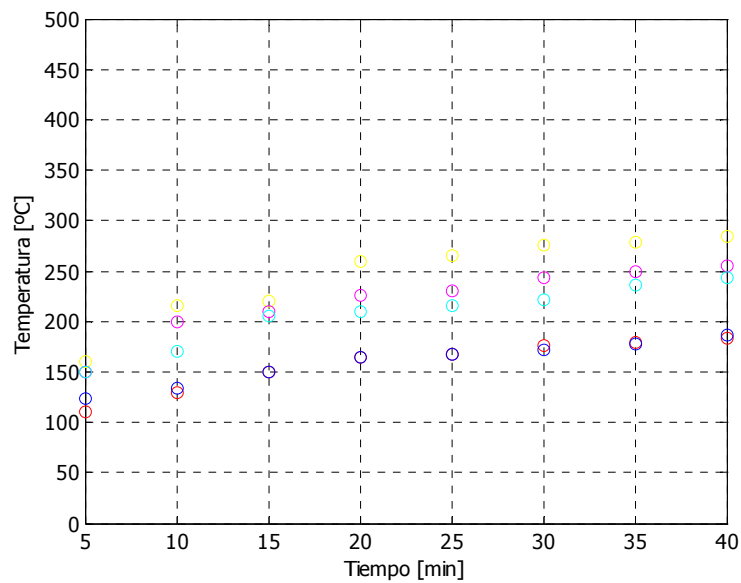
Figura 19. Puntos de medición de la temperatura



Fuente: Autores

La mayor concentración de energía para una muestra de 30 gramos y una potencia de 1000 W, se encuentra en la parte superior del crisol, tal y como se puede concluir de la Figura 20, donde alcanza un valor pico de aproximadamente 300 °C después de un tiempo de irradiación de 40 min.

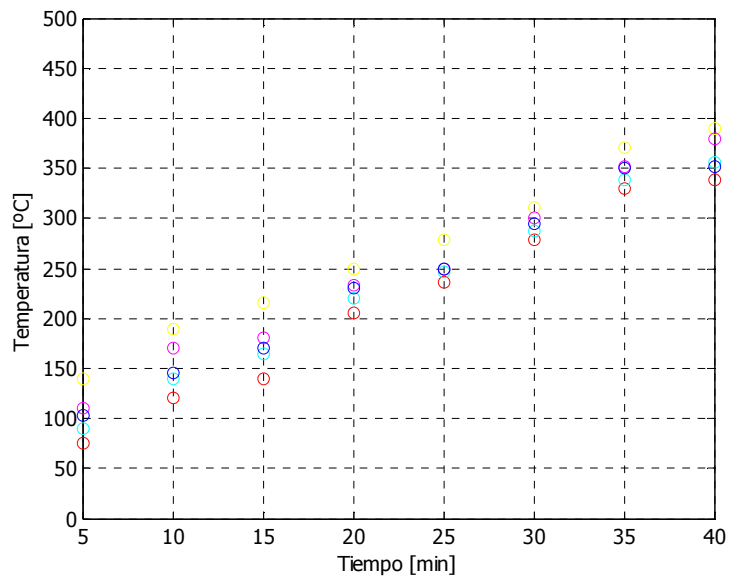
Figura 20. Perfil de Temperatura para una masa de 30 gramos, tiempo de exposición de 40 min y una potencia de 1000 W.



Fuente: Autores

El perfil de temperatura (Figura 21) para una masa de 60 gramos y una potencia de 1000W, muestra una diferencia respecto a la Figura 20 de aproximadamente 100°C de su valor máximo. En este caso, el comportamiento en el aumento en la temperatura no se mostró tan estable como en el caso de la masa de 30 gramos.

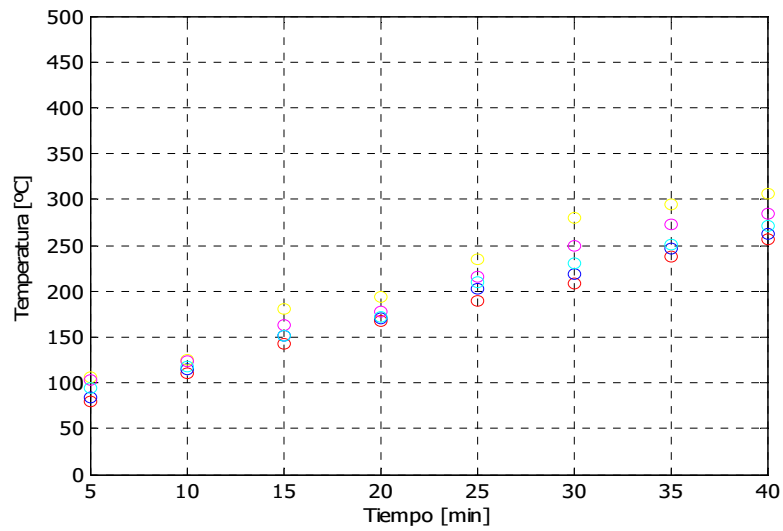
Figura 21. Perfil de Temperatura para una masa de 60 gramos, tiempo de exposición de 40 min y una potencia de 1000 W.



Fuente: Autores

Al disminuir la potencia del horno, la temperatura de la muestra disminuye notablemente. Se puede apreciar (Figura 22) una diferencial de casi 100°C cuando se calienta una masa de 60 gramos, pero se reduce la potencia de 1000 a 600 W.

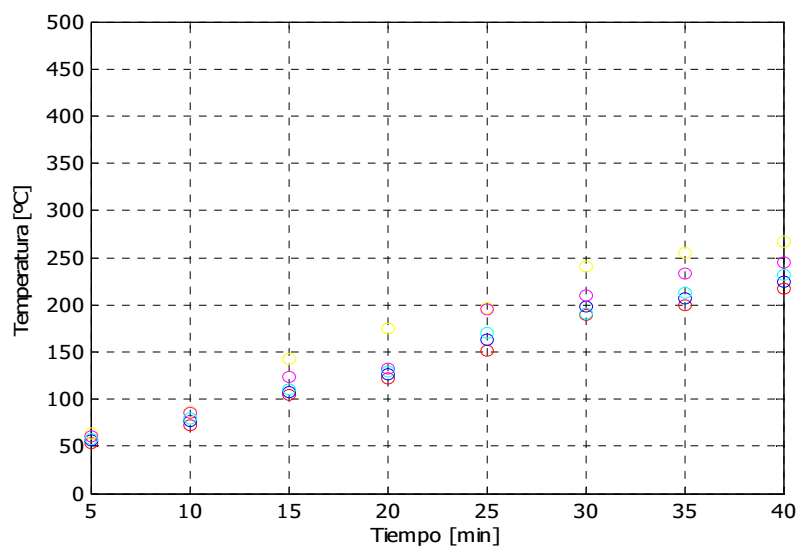
Figura 22. Perfil de Temperatura para una masa de 60 gramos, tiempo de exposición de 40 min y una potencia de 600 W.



Fuente: Autores

La disminución de la temperatura, cuando se reduce la masa de la muestra de 60 a 30 gramos (manteniendo la potencia proporcionada por el horno microondas en 600 W) es de aproximadamente 50°C (Figura 23). Se aprecia un diferencial menor al encontrado cuando se tenía una potencia de 1000W, donde dicho valor era de 100 °C.

Figura 23. Perfil de Temperatura para una masa de 30 gramos, tiempo de exposición de 40 min y una potencia de 600 W.



Fuente: Autores

En general, se puede establecer una relación directa entre el aumento de la temperatura, el aumento de la masa de la muestra y la potencia del horno, de igual forma que mayor uniformidad en la tostación del material.

3.5 EJECUCIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Tras el calentamiento con microondas de unas muestras de tierra proveniente de la mina oro Tajo Abierto, y después de su respectivo tratamiento, se logra extraer la cantidad de oro mostrada en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados obtenidos

BLOQUE	POTENCIA	MASA	TIEMPO	ORO OBTENIDO EN 30 g DE MINERAL	GRAMOS POR TONELADA
1	1000	60	40	0,00009	3.000
1	1000	30	40	0,00003	1.000
1	1000	60	25	0,00008	2.666
1	1000	30	25	0,00003	1.000
1	600	60	40	0,00008	2,666
1	600	30	40	0,00003	1.000
1	600	60	25	0,00001	0,333
1	600	30	25	0,00001	0.333
2	1000	60	40	0,00009	3.000
2	1000	30	40	0,00003	1.000
2	1000	60	25	0.00001	0.333
2	1000	30	25	0,00000	0.000
2	600	60	40	0.00001	0.333
2	600	30	40	0,00003	1.000
2	600	60	25	0,00003	1.000
2	600	30	25	0.0000	0.000

3	1000	60	40	0.00004	1,333
3	1000	30	40	0.00003	1.000
3	1000	60	25	0.00006	2.000
3	1000	30	25	0.00003	1.000
3	600	60	40	0.00006	2.000
3	600	30	40	0.00001	0,333
3	600	60	25	0.00001	0.333
3	600	30	25	0.00000	0.000

Fuente: Autores

De acuerdo a lo obtenido en la Tabla 12, y sabiendo que la cantidad de oro extraído mediante el método convencional es de 3.333 gramos por tonelada (0.00010 gramos/30 gramos), se puede determinar el porcentaje de recuperación (Tabla 13).

Tabla 13. Porcentaje de recuperación del oro, mediante el uso del método de calentamiento con microondas

	MASA[Gramos]			
	30		60	
	Tiempo [min]	Tiempo [min]	Tiempo [min]	Tiempo [min]
Potencia[W]	25	40	25	40
600	10%	30%	10%	79.98%
	0%	30%	30%	10%
	0%	10%	10%	60%
1000	30%	30%	79.98%	90%
	0%	30%	10%	90%
	30%	30%	60%	39.99%

Fuente: Autores

Con la herramienta Statgraphichs, se registró el diseño de experimentos, lo que permite concluir acerca de la efectividad del tratamiento con microondas.

Los resultados del ANOVA se muestran en la Tabla 14

Tabla 14. Análisis de ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS					
PRINCIPALES					
A:potencia	2,66733	1	2,66733	4,76	0,0444
B:masa	5,34965	1	5,34965	9,55	0,0070
C:tiempo	3,12987	1	3,12987	5,59	0,0311
INTERACCIONES					
AB	0,46287	1	0,46287	0,83	0,3768
AC	0,1665	1	0,1665	0,30	0,5932
BC	0,29637	1	0,29637	0,53	0,4775
ABC	4,16667E-8	1	4,16667E-8	0,00	0,9998
RESIDUOS	8,96326	16	0,560204		
TOTAL	21,0359	23			
(CORREGIDO)					

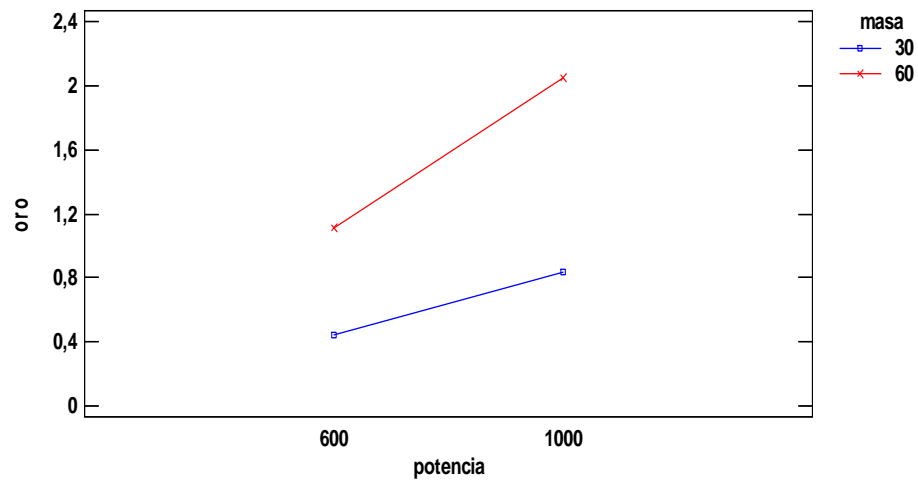
Fuente: Autores

La Tabla 14, descompone la variabilidad de oro en contribuciones debidas a varios factores. La contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás elementos. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 3 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre oro con un 95,0% de nivel de confianza.

En la Figura 24, se observa el comportamiento de la recuperación de oro, en función de la masa y la potencia; de donde se puede concluir que entre mayores sean estos, el porcentaje de extracción aumenta. En general, se

presenta un comportamiento proporcional entre estos factores y la recuperación del mineral.

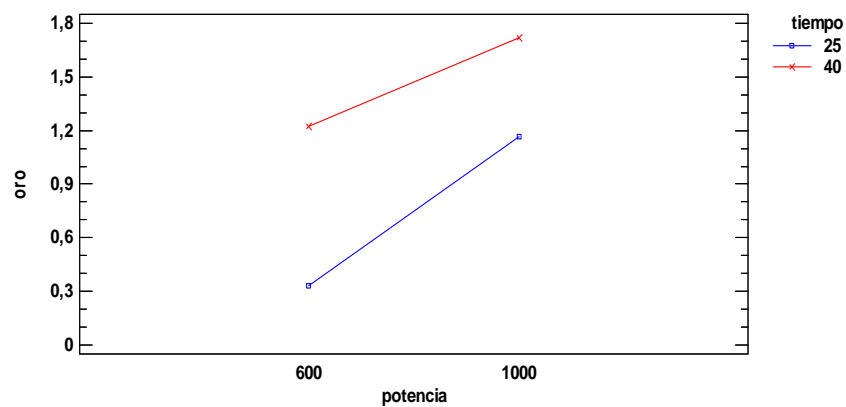
Figura 24. Relación de recuperación del oro en función de la potencia – masa



Fuente: Autores

En la Figura 25 se tiene la relación de la recuperación de oro en función de la potencia del horno y el tiempo de exposición, en el cual se aprecia que entre mayor sean estos factores, el porcentaje de recuperación de oro aumenta, por lo que también se pueden asemejar a un comportamiento directamente proporcional.

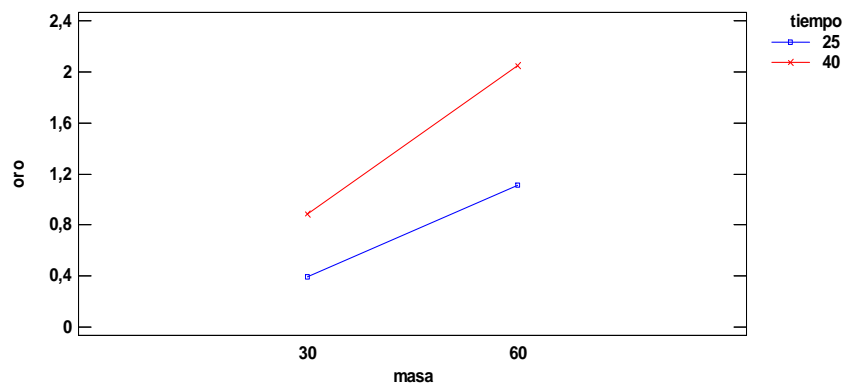
Figura 25. Relación de recuperación del oro en función de la potencia – tiempo



Fuente: Autores

En cuanto a la recuperación de oro en función de la masa y del tiempo, también se obtienen comportamientos similares a los anteriormente descritos. A medida que el tiempo de irradiación y la masa de la muestra aumenta, se logra recuperar más oro, por lo tanto se concluye que la relación masa-tiempo, es directamente proporcional. Esto se puede ver reflejado en los resultados mostrados en la Figura 26.

Figura 26. Relación de recuperación del oro en función de la masa – tiempo

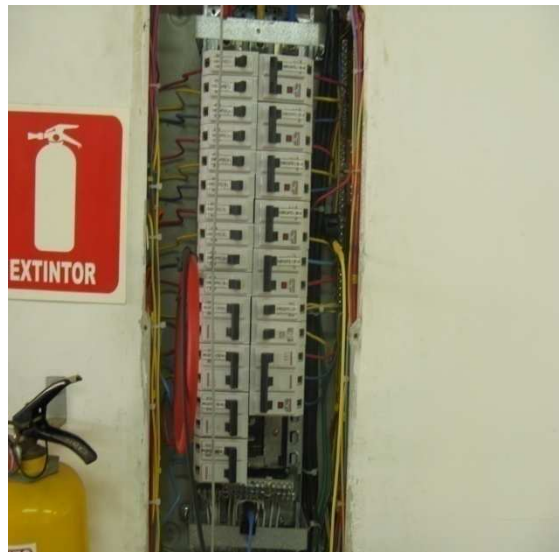


Fuente: Autores

3.6 CONSUMO DE POTENCIA

Con el equipo Power Visa, se midió el consumo de potencia tanto en las muflas como en el horno microondas. En la Figura 27, se aprecia el montaje hecho, para realizar las respectivas mediciones.

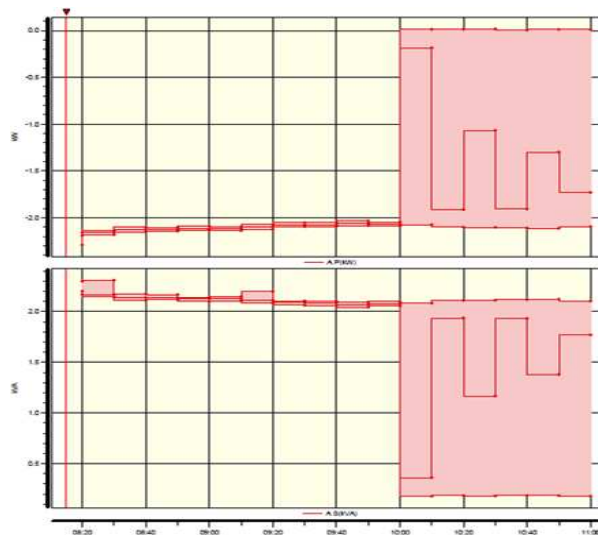
Figura 27. Montaje del equipo de medición de potencia



Fuente: Autores

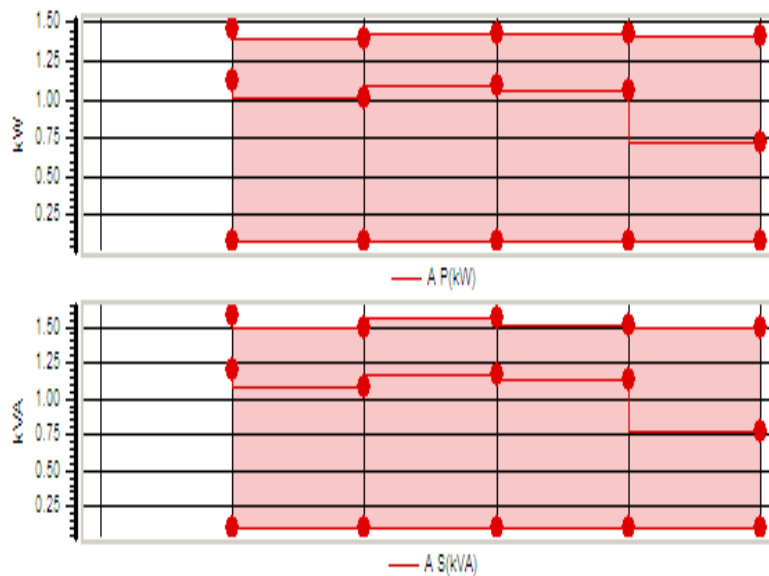
Los resultados de medición en la mufla (Figura 28), muestran que la potencia promedio activa y aparente entregada al circuito es de aproximadamente 2.1 kW y 2.1 kVA. Por su parte, el consumo cuando se trabaja con la potencia máxima entregada por el horno microondas (en forma ideal 1000 W), dichos valores se reducen a 1.2 kW y 1.25 kVA (Figura 29). Esto equivaldría a una disminución del 42.85% y del 40.47% respectivamente. Cabe resaltar que aparte de esto, el tiempo necesario para llegar a la temperatura de 750°C, establecida para la tostación con muflas (2 horas y 40 min), es mucho mayor respecto al empleado mediante el calentamiento con microondas (40 min)

Figura 28. Potencia Activa y Aparente consumida por la Mufla.



Fuente: Autores

Figura 29. Potencia Activa y Aparente consumida con el horno microondas, a una potencia de 1000W ideal.

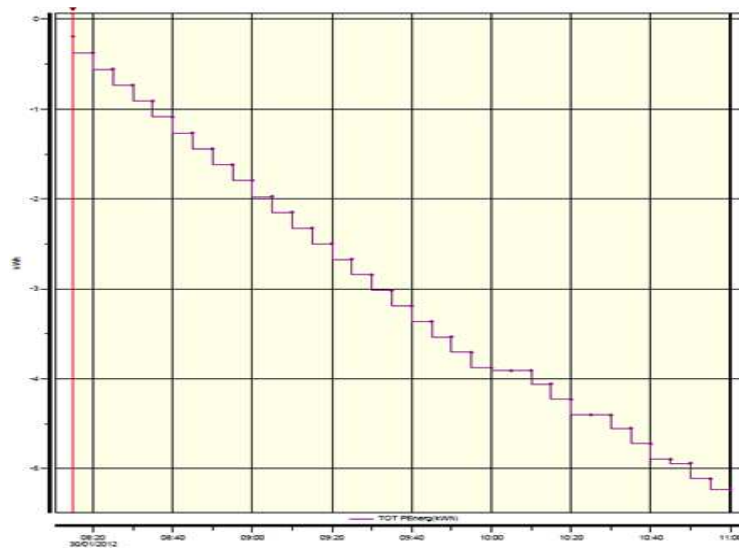


Fuente: Autores

Seguidamente, se plantea analizar el consumo de energía tanto en la mufla como en el horno microondas. Del primero, se obtiene que llega a un consumo total de 5.2 kWh (Figura 30), respecto a 0.95 kWh del segundo (Figura 31). Esto indica que existe una reducción del 81.7%, por lo que convierte al

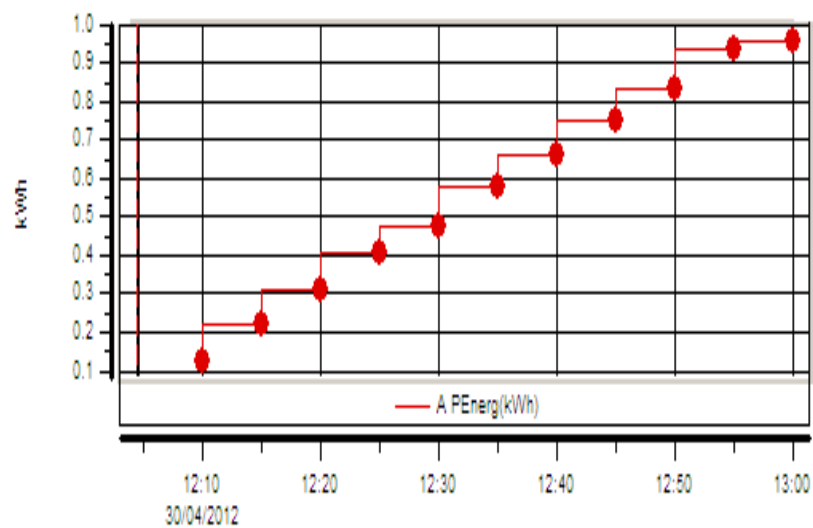
calentamiento con microondas, en una técnica viable en términos económicos y ambientales.

Figura 30. Consumo de Energía en la mufla



Fuente: Autores

Figura 31. Consumo de energía en el horno microondas.



Fuente: Autores

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 4.1** Se cumplió a satisfacción todos los objetivos planteados.
- 4.2** Los resultados obtenidos, referentes a la cantidad de oro extraído, muestran que el calentamiento con microondas es una técnica propicia para el tratamiento de dicho mineral. El porcentaje de recuperación alcanzó un valor máximo del 90%, respecto al obtenido por la tostación con muflas.
- 4.3** El diseño de experimentos planteado arroja que existe interacción entre la cantidad de oro extraído, la cantidad de masa expuesta a la irradiación, la potencia del horno y el tiempo de exposición. Se encontró que a medida que aumentaba la amplitud de dichos factores, se lograba una mayor recuperación del material. En el caso puntual en el que la potencia era 1000 W, la masa 60 gramos y el tiempo de irradiación de 40 minutos, se obtuvo el más alto porcentaje de recuperación (90%).
- 4.4** Los valores de temperatura, obtenidos mediante el sistema de sensado, muestran que a medida que la masa, el tiempo de exposición y la potencia del horno microondas aumenta, esta también lo hace. Se alcanzó una temperatura máxima de aproximadamente 400°C, cuando los niveles de los diferentes factores eran los más altos. De la misma manera, este valor de temperatura va ligado a la cantidad de oro extraído
- 4.5** El consumo de energía de las Muflas superó en gran medida a los del horno microondas (es mayor en un 81% en las muflas), lo que se traduce en una mejora en el aprovechamiento de recursos energéticos y una disminución de costos. De igual forma, desde el punto de vista ambiental se pueden lograr beneficios, lo que hace de esta una técnica propicia de implementar.
- 4.6** El sistema de temperatura implementado, muestra ser una herramienta adecuada para la medición de temperatura dentro de cavidades microondas. Se encontró un diferencial máximo de 3.2 °C para uso a altas

temperaturas. De igual forma se apreció similitud en su respuesta cuando se realizaron varias replicas.

- 4.7** Se sugiere verificar que con el tratamiento con microondas, se pueden generar fracturas en la matriz de minerales y sulfuros que contiene el oro, con lo que se esperaría una mayor interacción entre los agentes químicos (tales como el cianuro) y el material expuesto a la irradiación. Esto reduciría la necesidad de usarlos, lo cual traería beneficios a nivel ambiental.
- 4.8** El análisis de ANOVA propuesto, establece que no existe ningún tipo de relación entre las diferentes combinaciones de los factores (Masa-Potencia, Masa-Tiempo, Potencia-Tiempo y Masa-Tiempo-Potencia), bajo el rango de confiabilidad propuesto (95%)
- 4.9** Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación son realizados a escala de laboratorio, donde la cantidad de la muestra usada no es rentable a nivel industrial, por lo que sería interesante hacer una investigación en la industria, donde se vea la interacción entre estos 3 factores (potencia, masa, tiempo de exposición) y se verifique si, con cantidades más grandes de minerales, se obtienen resultados similares a los encontrados en esta investigación.
- 4.10** La distribución de la densidad de potencia en el horno no es igual en todos los puntos. Se apreciaron diferenciales de temperatura, lo que causa que no haya homogeneidad en la tostación del mineral. Por este motivo sería recomendable implementar algún tipo de guía de onda que permita lograr una mayor uniformidad en el calentamiento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. C. Gaviria, J. Gonzalez, and H. F. Mora, "Using Microwaves In Auriferous Refractory Menas And Their Effect In The Extraction Of Gold," Universidad Nacional de Colombia, 2006.
- [2] D. A. Jones, T. P. Lelyveld, S. D. Mavrofidis, S. W. Kingman, and N. J. Miles, "Microwave heating applications in environmental engineering — a review," University of Nottingham, 2002.
- [3] B. G. Mcconnell and J. T. Chairman, "A Coupled Heat Transfer And Electromagnetic Model For simulating Microwave Heating Of Thin Dielectric Materials In A Resonant Cavity," Institute Polytechnic of Virginia, 1999.
- [4] W. Vorster, "The Effect Of Microwave Radiation On Mineral Processing," University of Birmingham.
- [5] R. Meredith, *Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating.pdf*, Second edi. London, United Kingdom: The institution of Electrical Engineers., 1998.
- [6] M. Vollmer, "Physics of the microwave oven," *IOP Science*, vol. 74, Brandenburg Germany, 2004.
- [7] D. C. Montgomery, *Diseño y Análisis de experimentos-montgomery*, Segunda Ed. 2004.
- [8] R. Amankwah, C. Pickles, and W. Yen, "Gold recovery by microwave augmented ashing of waste activated carbon," *Minerals Engineering*, vol. 18, no. 5, pp. 517-526, Apr. 2005.

- [9] R. K. Amankwah and C. a. Pickles, "Microwave roasting of a carbonaceous sulphidic gold concentrate," *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 13, pp. 1095-1101, Oct. 2009.
- [10] R. K. Amankwah, A. U. Khan, C. a. Pickles, and W. T. Yen, "Improved grindability and gold liberation by microwave pretreatment of a free-milling gold ore," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, vol. 114, no. 1, pp. 30-36, Mar. 2005.
- [11] C. S. Eskilsson and E. Björklund, "Analytical-scale microwave-assisted extraction.," *Journal of chromatography. A*, vol. 902, no. 1, pp. 227-50, Dec. 2000.
- [12] J. Aguilar, "Termopares para medir temperatura muestras expuestas a microondas," Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [13] F. Ortiz, R. Cruz, and R. Correa, "Online Temperature Measurement Of A Sample Inside Of A Microwave Cavity," Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [14] C. A. Giraldo, J. G. Florez, and J. S. Mendez, "Desarrollo De Un Sistema De Medición De Temperatura Y Detección De Fugas De Microondas Para El Estudio De La Interacción Térmica Microondas-Pavimento.," Universidad Industrial de Santander, 2004.
- [15] N. K. Albrecht and M. E. Purchase, "A Comparison of Methods for Determining the Wattage Output and Energy Distribution in Microwave Ovens," vol. I, no. 4, pp. 335-342, 1977.
- [16] S. N. Kharkovsky, S. Member, U. C. Hasar, and S. Member, "Measurement of Mode Patterns in a High-Power Microwave Cavity," *Instrumentation*, vol. 52, no. 6, pp. 1815-1819, 2003.
- [17] T. Barregård, P. Ström, and T. R. Ab, "Optimization of a carton package containing thin metal foil , in order to prevent ionization caused by heating

in a microwave oven Master of Science Thesis in cooperation with Department of Electrosience,” *Optimization*, no. December, 2004.

- [18] J. C. Cruz, A. O. Molina, and F. H. Ramirez, “Sistema de Monitoreo Y Control De Encendido De Un Horno Eléctrico Basado En Un Control Tipo Integral,” Universidad Tecnológica De La Mixteca, 2009.
- [19] C. A. Giraldo, J. G. Florez, and J. S. Mendez, “Desarrollo De Un Sistema De Medición De Temperatura Y Detección De Fugas De Microondas Para El Estudio De La Interacción Térmica Microondas-Pavimento.,” Universidad Industrial de Santander, 2004.

APENDICE A

Como complemento de la información presentada en la sección 3.2, se presenta a continuación de manera más detallada los distintos elementos que conforman el sistema de medición de temperatura junto con sus respectivos esquemas para un mejor entendimiento del funcionamiento de este circuito.

- **Termocupla tipo k**

Las termocuplas tienen la ventaja de ser relativamente económicas y poseen un amplio rango de medición, que para este caso se encuentra en 1250°C . La variación del voltaje en función de la temperatura de una termocupla tipo k es cercano a $41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, aunque no llega a ser totalmente lineal, por lo que es necesario usar algún tipo de dispositivo que cumpla esta función[18].

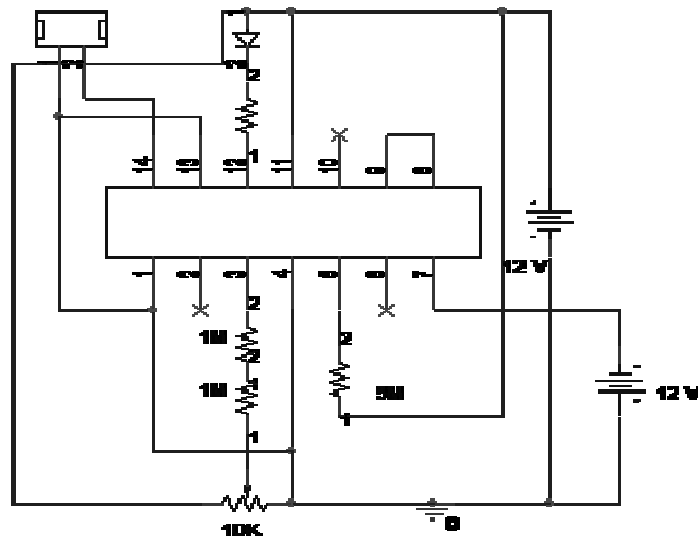
- **Acondicionador de señales**

Las señales de voltaje provenientes de las termocuplas son muy pequeñas y necesitan ser amplificadas, de igual forma que linealizadas y compensadas debido a la junta fría (CJC). Esta temperatura de junta fría es la que aparece en la conexión de los terminales de la termocupla y la del circuito, y si no se realiza dicha compensación se puede incurrir en errores de medición.

El acondicionador usado es el AD595 (Figura 32), el cual es un circuito integrado de Analog Devices. Éste produce un voltaje de salida en función de la temperatura medida por la termocupla ($10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$). El circuito se alimenta con una fuente dual de $+12$ y -12Vdc , que permite extender el rango de medición hasta 1250°C .

La compensación de junta fría se hace mediante un trimmer, el cual permite garantizar los niveles de transferencia entre el voltaje de entrada (proveniente de la termocupla) y el voltaje de salida del acondicionador. Además de esto, se incorpora un sistema de alarma que indica cualquier daño en el circuito, o la desconexión de alguno de los terminales de la termocupla [18], [19],

Figura 32. Circuito de acondicionamiento y de alarma



Fuente: Autores

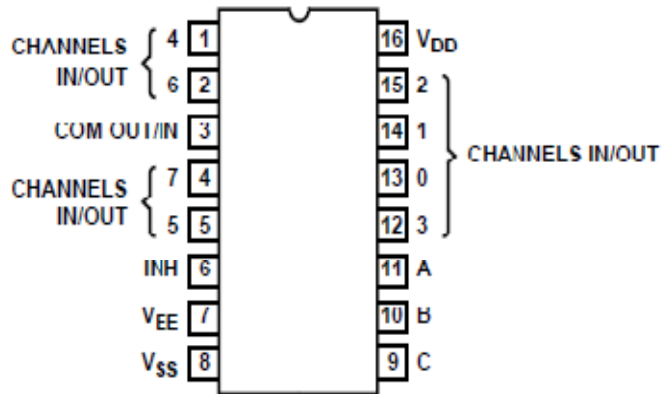
- Multiplexor analógico

Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron cinco termocuplas, con el fin de analizar la distribución de la temperatura en la muestra. Por esto se decidió usar un multiplexor analógico al cual llegan los datos provenientes de los diferentes acondicionadores.

A partir de un conjunto de señales programadas en Labview se seleccionan secuencialmente las entradas, las cuales van al circuito de aislamiento. Esto disminuye el número de integrados usados, y, por tanto, los costos. Los datos que llegan en serie después del filtrado a la DAQ se separan mediante programación.

El CD4051BE (Figura 33) es un multiplexor/demultiplexor analógico de 8 canales de Texas Instruments, el cual puede ser alimentado con tensiones duales de +12 y -12 Vdc. Cuenta con tres entradas digitales de control (A, B y C), encargadas de realizar la respectiva selección. También cuenta con una señal digital de entrada INHIBIT, que cumple la función de habilitador o deshabilitador de funcionamiento del circuito.

Figura 33. Diagrama de bloque funcional del CD4051BE

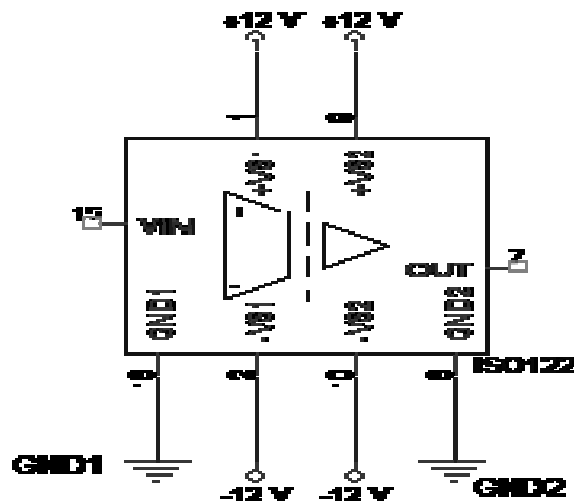


Fuente: Texas Instruments

- Circuito de aislamiento

El circuito de aislamiento cumple la función de proteger la tarjeta de adquisición de sobretensiones o picos de corriente que se puedan generar. Para ello se utilizó el integrado ISO122PJ de Texas Instruments (Figura 34), que es un amplificador de aislamiento que incorpora una novedosa técnica de modulación y demodulación[19]. Es un dispositivo fácil de usar, no requiere componentes externos para operar y tiene una no linealidad de 0.020%. Se alimentan con dos fuentes duales de $\pm 12\text{Vdc}$ las cuales se encuentran aisladas una de la otra y proporciona voltajes máximos de salida de $\pm 10\text{Vdc}$.

Figura 34. Diagrama de bloque funcional del ISO122PJ

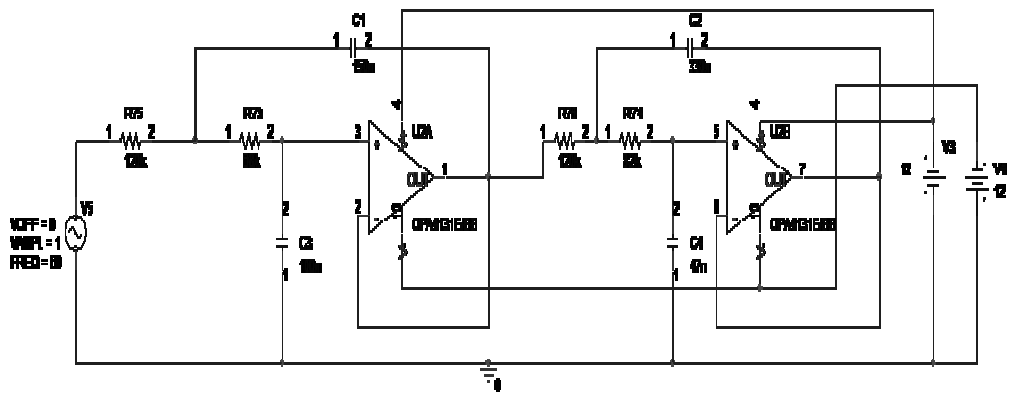


Fuente: Autores

- Filtro

Para eliminar los ruidos de altas frecuencias y la componente de 60 Hz generada por la red eléctrica, se propone un filtro pasabajos de cuarto orden de la topología Sallen-Key (Figura 35). Se usa el integrado OPA4131PJ de Texas Instruments porque tiene un bajo voltaje de offset ($750 \mu\text{V}$) y además una frecuencia de 3 dB igual a 10 Hz, lo que lo hace muy apropiado para esta aplicación, puesto que solo se desea tener la componente continua de las señales de entrada[19]. El valor de la ganancia del circuito en lazo cerrado debe ser unitario, puesto que el máximo voltaje que puede soportar la entrada analógica de la tarjeta de adquisición de datos corresponde a 10 Vdc que equivale al valor límite de la señal proveniente del ISO122PJ.

Figura 35. Filtro de cuarto orden



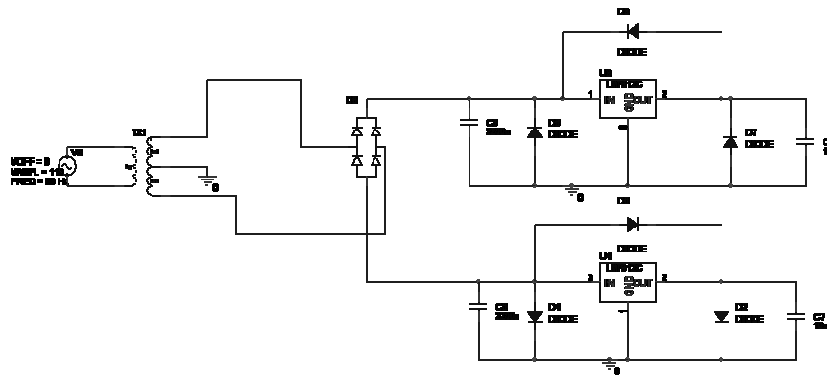
Fuente: Autores

- Fuente de alimentación

Se usan dos fuentes (Figura 36), las cuales se encuentran aisladas eléctricamente. La primera de ellas se encarga de alimentar el acondicionador de señal, el multiplexor analógico, el sistema de visualización de la termocupla activada, el circuito de alarma y la primera etapa del sistema de aislamiento. La otra fuente alimenta la segunda etapa del integrado de aislamiento, el filtro pasabajas y los circuitos de activación de los relés.

Cada fuente proporciona salidas duales de ± 12 Vdc, por lo que se hace necesario utilizar dos transformadores de TAD central, que se alimentan a una tensión de 110Vac.

Figura 36. Fuente de alimentación de ± 12 [Vdc]

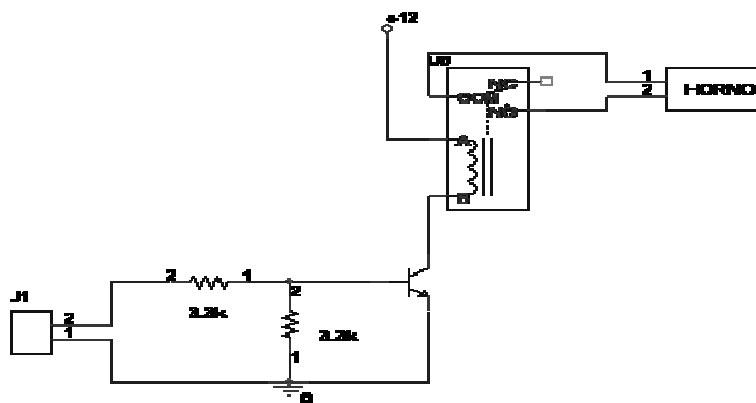


Fuente: Autores

- Habilitador del horno microondas

El sistema habilitador del horno se encarga de activar el relé por medio de una señal procedente de la tarjeta de adquisición de datos que polariza un transistor BJT (Figura 37). Esta señal ha sido programada con el fin de controlar los tiempos de encendido y apagado del magnetrón, dependiendo de las condiciones de operación que el usuario establezca[19]. Se utiliza un relé de 12 Vdc que maneja tensiones de 240 Vac y corrientes de 10 Amperios.

Figura 37. Circuito habilitador del Horno



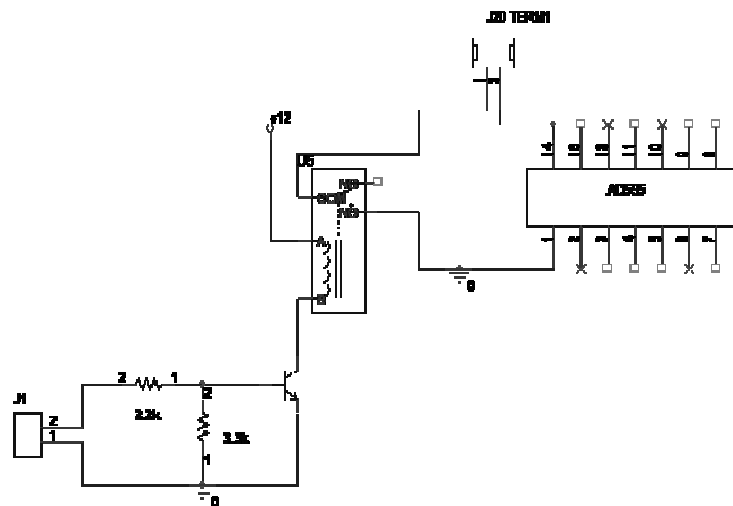
Fuente: Autores

- Habilitador del sistema de sensado

Es el encargado de desconectar o conectar los extremos de las termocupas al acondicionador de señal (Figura 38). Esta acción se controla de igual forma

mediante una señal enviada desde la tarjeta de adquisición a un transistor BJT que se encarga de polarizarlo y de esta forma activar el relé[19]. La acción de habilitación del sistema de sensado y la del horno son mutuamente excluyentes, es decir que mientras uno está funcionando el otro no lo hará.

Figura 38. Circuito de habilitación del sistema de sensado



Fuente: Autores

- Visualizador de la termocupla activada

Mediante el multiplexor/demultiplexor CD4051BE y un conjunto de cinco leds, se programa un visualizador que indica cual termocupla está midiendo en determinado instante (

Figura 39). A la entrada común del integrado se ingresa una señal de dc de 5 [V].Tres señales digitales de control establecen cual indicador debe encenderse. Mediante el pin INHIBIT se deshabilita la visualización cuando esta encendido el magnetrón.

Figura 39. Circuito visualizador de termocuplas

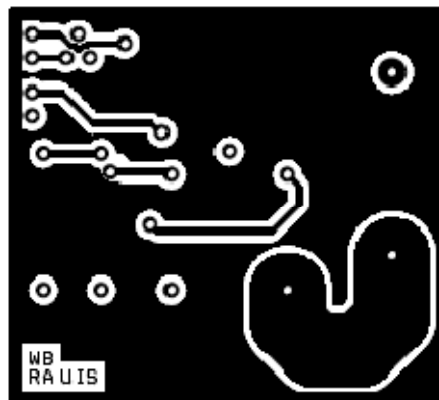
APENDICE B

- Diseño de las PCBs en Layout, circuito de potencia.

Como un complemento al diseño de las PCBs mostrado en la sección 4.2.1, se muestra a continuación las diferentes capas que componen la estructura de los distintos circuitos diseñados para la medición de la temperatura dentro del horno microondas.

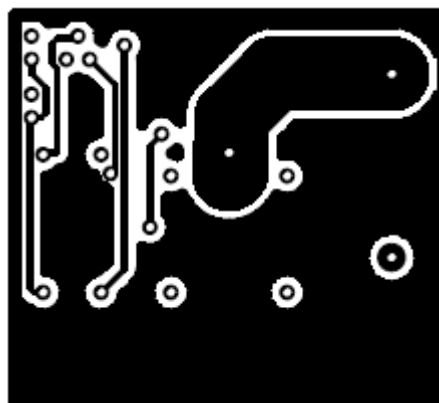
La Figura 40 y Figura 41 son las capas de la PCBs que se encarga de activar o desactivar el magnetrón para que empiece el proceso de calentamiento dentro de la cavidad. Este Layout corresponde al circuito mostrado en la Figura 9.

Figura 40. Capa superior del circuito de activación del magnetrón



Fuente: Autores

Figura 41. Capa inferior del circuito de activación del magnetrón



Fuente: Autores

- **Diseño de las PCBs en Layout, circuito de alimentación**

Como soporte para el circuito de alimentación, se tiene el esquema general de este diseño en la Figura 42, donde se muestra ambas capas de la pcb (Top y Bottom). En las siguientes figuras se muestra por separado cada capa, en la Figura 43 corresponde a la capa superior o Top del diseño, mientras que la Figura 44 corresponde a la inferior o Bottom.

Figura 42. Esquema general del circuito de alimentación

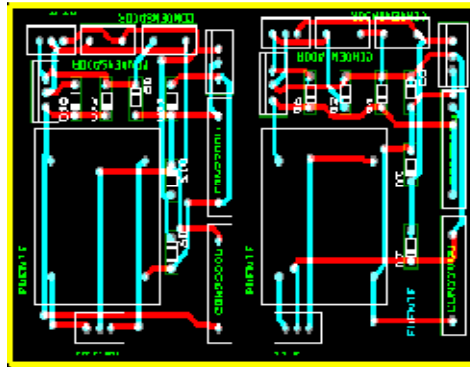


Figura 43. Capa superior del circuito de alimentación

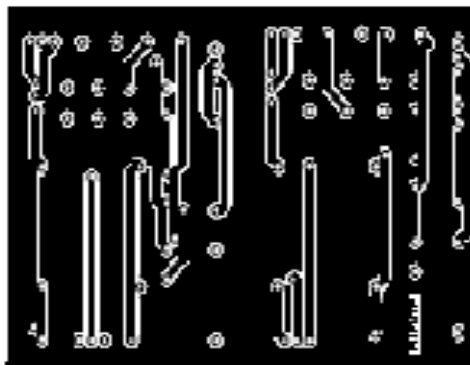
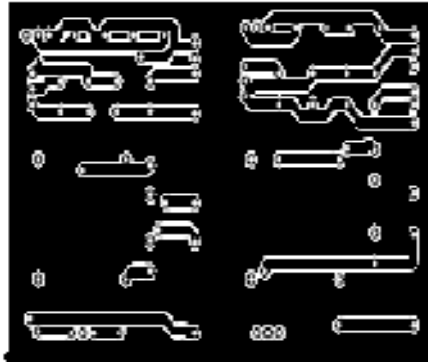


Figura 44. Capa inferior del circuito de alimentación

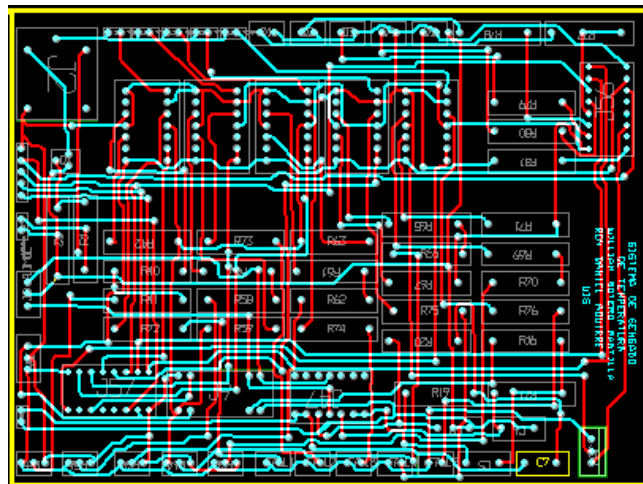


Fuente: Autores

- Diseño de las PCBs en Layout, circuito de sensado y acondicionamiento de la señal

Se complementa la información correspondiente al diseño de las PCBs, de sensado y acondicionamiento de la señal, esta pcb es la de mayor importancia respecto a las anteriores puesto que es la que permite la medición de la temperatura dentro de la cavidad, así como también se encarga de mandar los datos a hacia Labview. La Figura 45 muestra el bosquejo general de la pcb, juntando ambas capas (Top y Bottom).

Figura 45. Esquema general del circuito de sensado de temperatura



Fuente: Autores

La figura Figura 46 y Figura 47 muestran la capa superior (Top) e inferior (Bottom) respectivamente. Como nota final vale aclarar que las 3 PCBs se diseñaron con 2 capas porque de esta manera el proceso de enrutamiento se desarrollaba de una manera rápida y menos compleja.

Figura 46. Capa superior del sistema de sensado de temperatura

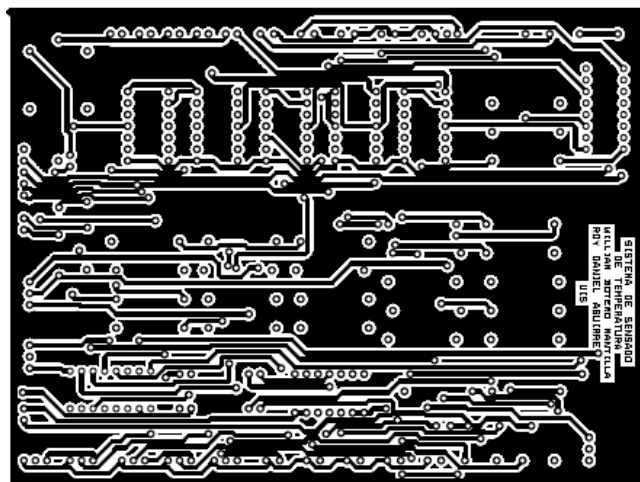
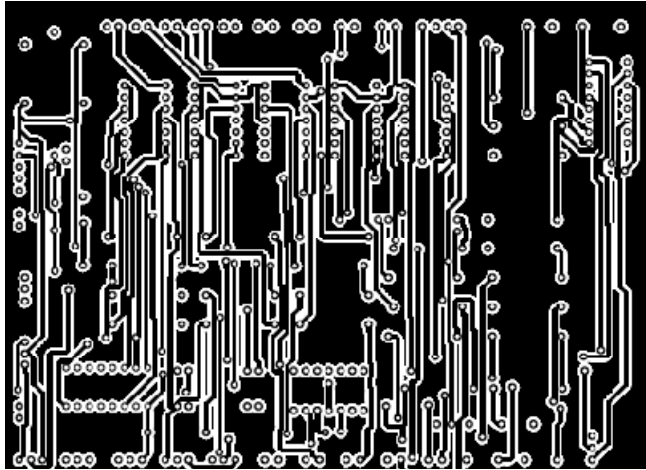


Figura 47. Capa inferior del sistema de sensado de temperatura



Fuente: Autores

APENDICE C

A continuación se presenta el software implementado para llevar a cabo el proceso de sentido de la temperatura dentro del horno. El software usado es Labview, y aquí se describe como se diseñó este programa, además de explicar las señales que son enviadas a la PCB, que se encarga de la medición de la temperatura.

- **Tarjeta de adquisición de datos**

La tarjeta de adquisición de datos, la DAQ 6008 de National Instruments, es la encargada de comunicar al computador con la interfaz. La tarjeta cuenta con ocho entradas análogas de ± 10 Volts y cuatro digitales, también tiene dos salidas análogas con una frecuencia máxima de 150 Hertz. Las salidas digitales (doce en total) proporcionan voltajes entre 0 y 5 Volts. La corriente máxima en los puertos de la tarjeta es de 200 mA si la tensión de salida es de 5 Volts, y de 1 mA si el voltaje es 2.5 Volts.

- **Programación en Labview**

Mediante la herramienta Labview 2009, se ha programado un conjunto de operaciones necesarias para la correcta operación del sistema de sentido. El usuario puede escoger dos formas de operación del programa, como se muestra en la Figura 48.

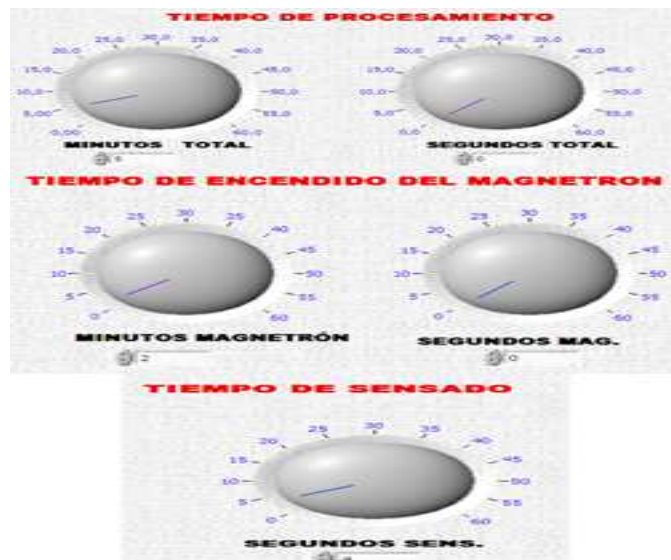
Figura 48. Selección del modo de operación



Fuente: Autores

El primero de ellos es el modo automático, donde se ingresan los tiempos referentes al periodo de encendido y de apagado del magnetrón, así como el tiempo total del proceso (número de ciclos totales) (Figura 49).

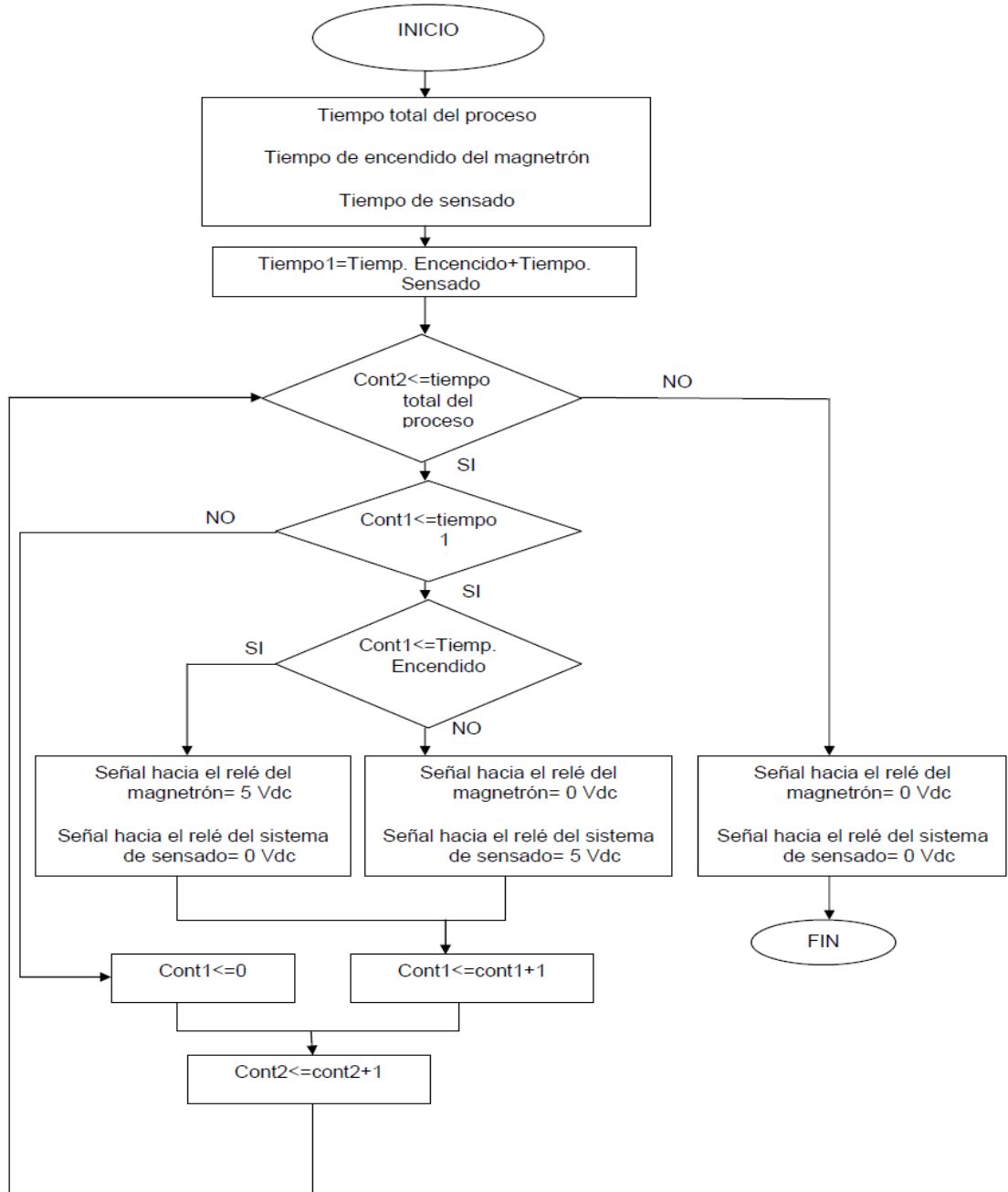
Figura 49. Selección de los tiempos de encendido del magnetrón, sensado y duración total del proceso.



Fuente: Autores

Mediante el uso de 2 señales cuadradas, desfasadas 180° y con un ciclo de trabajo variable, se envía una serie de pulsos a las respectivas salidas, que se transmiten a los circuitos de activación (Figura 50).

Figura 50. Esquema de generación de las señales de activación y desactivación de los relés

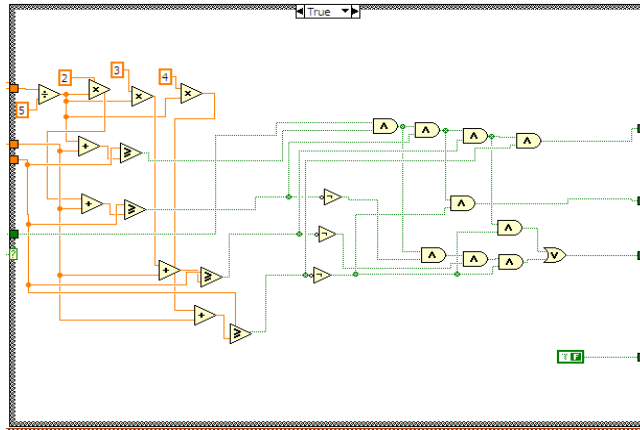


Fuente: Autores

Estas señales se generan solamente cuando la amplitud de la señal analógica enviada al magnetron es 0 [V]. Dependiendo del tiempo de sensado, y

mediante un sistema de comparación se emplea tres señales digitales que se encargan de seleccionar alguna de las entradas del multiplexor (Figura 51).

Figura 51. Generación de las señales enviadas al multiplexor analógico.



Fuente: Autores

Los valores de las señales digitales enviadas al multiplexor (Figura 52) dependen del canal de entrada que se desea seleccionar, y de acuerdo a especificaciones de la hoja de datos del fabricante del CD4051BE.

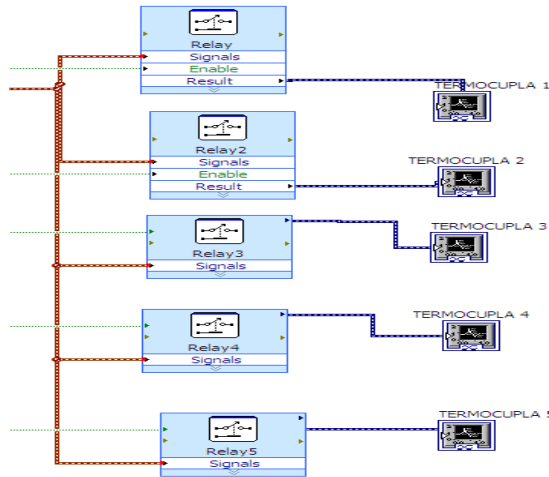
Figura 52. Señales generadas con la herramienta Labview para selección de los canales del multiplexor



Fuente: Autores

Para demultiplexar el dato proveniente del filtro y asociarlo a la señal medida por alguna de las termocuplas, se usan cinco bloques de reset, conectados a la señal de entrada de una serie de indicadores gráficos (Figura 53), y mediante una herramienta que provee Labview se almacena la información en un archivo Excel.

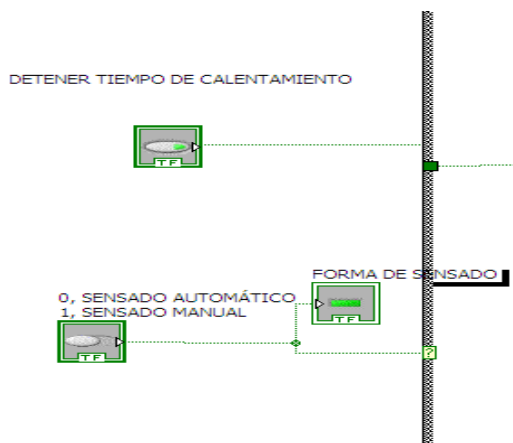
Figura 53. Demultiplexor de las señales.



Fuente: Autores

La segunda forma de operación es la manual, donde el usuario realiza la activación o desactivación del magnetrón. En este modo, el sistema opera de manera similar, con la única diferencia que no hay que ingresar los datos de tiempos antes mencionados. El sensado se realiza cuando el usuario de forma manual haya decidido detener el proceso de calentamiento (Figura 54).

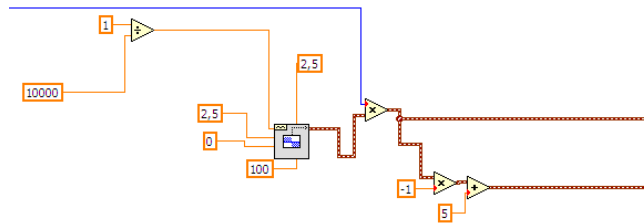
Figura 54. Selección de la forma de sensado y de interrupción del tiempo de calentamiento.



Fuente: Autores

Las señales que se generan, y que se encargan de activar y desactivar los relés del magnetrón y del sistema de sensado, son mutuamente excluyentes, por lo que si una señal es de 5 [V], la otra debe ser 0 [V] (Figura 55).

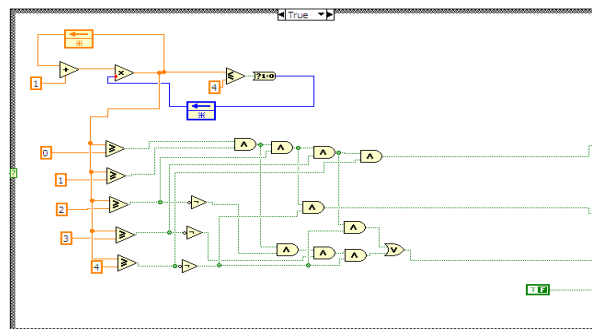
Figura 55. Generación de las señales de activación y desactivación de los relés cuando se ejecuta el programa en forma manual.



Fuente: Autores

Cuando el usuario interrumpe el proceso de calentamiento, se generan cuatro señales que activan el multiplexor, y que se encargan de seleccionar el canal que contiene los datos de la medición. Cada cinco segundos se vuelve a obtener el dato de cada una de las termocuplas (Figura 56).

Figura 56. Generación de las señales enviadas al multiplexor cuando se ejecuta el programa en forma manual.



Fuente: Autores