

**INGENIERÍA CONCEPTUAL DE UN PROCESO DE RECUPERACION DE ORO
CON MICROONDAS A PARTIR DE MUESTRAS PROVENIENTES DE LOS
MUNICIPIOS DE VETAS Y CALIFORNIA (SANTANDER)**

JUAN SEBASTIAN ABRIL BENJUMEA

JULIÁN ANDRÉS GÓMEZ GUTIÉRREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2012

**INGENIERÍA CONCEPTUAL DE UN PROCESO DE RECUPERACION DE ORO
CON MICROONDAS A PARTIR DE MUESTRAS PROVENIENTES DE LOS
MUNICIPIOS DE VETAS Y CALIFORNIA (SANTANDER)**

JUAN SEBASTIAN ABRIL BENJUMEA

JULIÁN ANDRÉS GÓMEZ GUTIÉRREZ

**Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

PhD. 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 e iluminado nuestros pasos en la obtención de todos nuestros triunfos en el recorrido de nuestra carrera.

A nuestras familias que nos brindaron su apoyo incondicional en todo este trayecto.

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, por su paciencia y colaboración incondicional ya que fue vital en el desarrollo de este proyecto, deseándole así muchos más éxitos y logros en su carrera profesional.

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

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

Y finalmente a todos nuestros amigos y compañeros por todo su apoyo incondicional y por todos los momentos gratos vividos en la Universidad.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO	15
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	22
1. GENERALIDADES DEL ORO	24
1.1. Usos	25
1.2. Técnicas de obtención (Colombia)	25
1.3. Aspecto ambiental	26
2. DESCRIPCION DEL TRABAJO DE GRADO.....	27
3. INFORMACION DISPONIBLE PARA LA INGENIERIA CONCEPTUAL	28
3.1 Distritos mineros (Vetas y California)	28
3.2 Composición del material proveniente de vetas y california	29
3.3 Recuperación convencional del oro en vetas y california	29
4. RECUPERACIÓN ASISTIDA CON MICROONDAS	31
4.1 Fundamentos teóricos	31
4.1.1 Microondas	31
4.1.2 Calentamiento con microondas	31
4.1.2.1 Tipos de materiales	32
4.1.3 Propiedades de los materiales	32
4.1.3.1 Permitividad y permeabilidad compleja	32
4.1.3.2 Coeficientes de transmisión y reflexión	33
4.1.3.3 Vector de poynting	33
4.1.3.4 Profundidad de penetración	34
4.1.3.5 Polarización.....	35
4.1.3.6 Fuga térmica	35
4.1.4 Tipos de calentamiento	36
4.1.4.1 Rotación dipolar	36
4.1.4.2 Calentamiento resistivo	37

4.1.4.3	Calentamiento electromagnético	37
4.1.4.4	Calentamiento dieléctrico	37
4.2	Barrido bibliográfico de la interacción de minerales preciosos con microondas.....	38
4.2.1	Barrido bibliográfico a nivel nacional	38
4.3.1	Barrido bibliográfico a nivel internacional	40
5.	PROPUESTA DE APLICACIÓN Y SUS COMPONENTES.....	45
5.1.	Metodología general para la implementación de un proceso de recuperación de oro por microondas.....	46
5.2.	Criterios de aplicación	48
5.2.1	Consideraciones técnicas.....	48
5.3.	Construcción e instalación del equipo	49
5.3.1	Costos	49
5.3.1.1	Lugar de instalación	50
5.3.1.2	Operación del equipo	51
5.3.1.3	Mantenimiento del equipo	51
5.3.1.4	Entrenamiento de personal	52
5.3.1.5	Descripción de los componentes de un sistema de microondas para recuperación de oro	54
5.4.	Selección del proceso	63
5.4.1	Calentamiento únicamente con microondas.....	63
5.4.2	Propuesta cavidad rectangular	64
5.4.2.1	Simulación con la cavidad rectangular	64
5.4.3	Propuesta de aplicación en guía de onda	66
5.4.3.1	Simulación de la guía de onda como cavidad	66
5.4.4	Propuesta para recuperación de oro	74
5.5.	ESTUDIO DE SEGURIDAD	77
5.5.1	Equipo de diseño por seguridad:.....	79
6.	COTIZACION DEL EQUIPO ADECUADO PARA LA RECUPERACION DE MINERALES PRECIOSOS USANDO MICROONDAS	80

7. CONCLUSIONES	88
8. RECOMENDACIONES	90
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXO A.....	95
ANEXO B.....	106
ANEXO C.....	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del distrito minero	28
Figura 2: Diagrama de flujo del proceso de extracción convencional en los distritos minero de Vetas y California.	30
Figura 3. Porcentaje de recuperación de oro mina el roble.	39
Figura 4. Porcentaje de recuperación de oro mina el zancudo.	39
Figura 5. Esquema del calentamiento por microondas.	41
Figura 6. Efecto del tiempo de tostación en el contenido de carbono para calentamiento convencional y por microondas.	41
Figura 7. Efecto del tiempo de tostación en el contenido de sulfuro de azufre para calentamiento convencional y por microondas.	42
Figura 8. Respuesta de la muestra sometida a una temperatura durante un tiempo establecido.	44
Figura 9. Flujo de aire contra porcentaje de oxidación de la muestra.	44
Figura 10. Porcentaje de recuperación de oro contra tiempo de lixición en (cianuro).	45
Figura 11. Metodología general para la implementación de una planta piloto para recuperación de oro con microondas.	47
Figura 12. Esquema de componentes básicos de un sistema generador de microondas.	54
Figura 13. Esquema de un magnetrón.	56
Figura 14. Esquema de un circulador.	56
Figura 15. Esquema de un acoplador direccional.	58

Figura 16. Tipos de guías de onda (De izquierda a derecha: Elíptica, rectangular, circular).....	59
Figura 17. Vista interna de una guía de onda	59
Figura 18. Banco de trabajo para monitoreo de señales en un proceso de microondas	62
Figura 19. Distribución de campo eléctrico en la cavidad y temperatura en el material	65
Figura 20. Temperatura de la muestra contra tiempo	65
Figura 21. Dimensiones de la guía de onda. a) Llena completamente con un dieléctrico. b) Con un dieléctrico esférico en su interior.....	67
Figura 22. Propagación del campo eléctrico (Modo TE_{10}).	69
Figura 23. Propagación del campo magnético (Modo TE_{10})	69
Figura 24. Parámetro S_{11} , simulación 1	70
Figura 25 Parámetros S_{21} , simulación 1.....	70
Figura 26. Propagación del campo eléctrico (Modo híbrido).....	72
Figura 27. Propagación del campo magnético (Modo híbrido).	72
Figura 28. . Parámetro S_{11} , simulación 2.	73
Figura 29. Parámetro S_{21} , simulación 2.	73
Figura 30. Diagrama de flujo del proceso para extracción de oro modificado.	74
Figura 31. Esquema cavidad rectangular.	75
Figura 32. Esquema de aplicador como guía de onda.....	76
Figura 33. Cotización equipo Gerling (USA).	83
Figura 34 Planos del equipo necesario para le recuperación de oro con microondas.	84

Figura 35. Cotización banco de trabajo para medición de variables en un sistema microondas.	85
Figura 36. P&ID del proceso de recuperación de oro vía microondas	86
Figura 37. Plano del equipo propuesto para recuperación de oro	87
Figura 38. Selección del tipo de aplicación	110
Figura 39. Asignación de parámetros globales.	111
Figura 40. Construcción de la cavidad.....	112
Figura 41. Selección de dominios (domain) y limites (boundaries).	113
Figura 42. Selección de materiales donde no hay transferencia de calor.	115
Figura 43. Asignación de propiedades del puerto de entrada.....	116
Figura 44. Asignación de parámetros de simulación	116
Figura 45. Selección de la forma de la guía de onda.....	117
Figura 46. Selección de dimensiones de la guía de onda.....	118
Figura 47. Guía llena completamente por un dieléctrico.....	119
Figura 48. Guía con un dieléctrico esférico en su interior	119
Figura 49. Asignación de puerto de entrada y salida	119
Figura 50. Designación de variables a simular	120
Figura 51. Selección de parámetros del análisis transitorio	120

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas del oro.....	24
Tabla 2. Usos del oro.....	25
Tabla 3. Profundidades de penetración de microondas a 2.45GHz.....	34
Tabla 4. Condiciones de operación.....	38
Tabla 5. Parámetros de diseño	49
Tabla 6. Especificaciones del sistema de monitoreo (Workstation FISO).....	62
Tabla 7. Dimensiones de la guía de onda.....	67
Tabla 8. Características de la guía de onda con un semiconductor totalmente su interior.....	67
Tabla 9. Características de la guía de onda con un semiconductor esférico en su interior.....	71
Tabla 10. Límites de exposición a las ondas electromagnéticas (ICNIRP).....	78
Tabla 11. Propiedades del material contenido en la cavidad.....	114

GLOSARIO

ACOPLADOR DIRECCIONAL: Dispositivo pasivo usado para muestrear microondas incidentes y reflejadas. Algunas aplicaciones incluyen monitoreo de líneas, medición de potencia y la fuente de carga de los aisladores.

AISLADOR: Dispositivo ferromagnético de dos puertos el cual es usado para el control de dirección de flujo de una señal. Su funcionamiento se basa en la baja atenuación o pérdidas de inserción cuando la potencia pasa de la puerta 1 a la 2, pero que tiene un gran aislamiento o pérdidas cuando la potencia entra por 2 y se dirige hacia 1, disipando esta potencia y no reflejándola. Sus principales usos son: la protección de dispositivos activos y la eliminación de ondas estacionarias.

ÁNODO: Electrodo positivo de un dispositivo eléctrico. En las microondas el ánodo es un dispositivo que recoge los electrones después de hacer su trabajo, consecuentemente debe absorber la energía cinética que se disipa.

APLICADOR: Dispositivo que se usa para aplicar microondas a un material.

ATENUACIÓN: En la rama de la ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones es una característica que afecta la propagación de las ondas y las señales en circuitos eléctricos, fibras ópticas como también en el aire (ondas de radio). Esto significa la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida. Su unidad es (Np/m) o Nepper/metro.

ATENUADOR: Un dispositivo pasivo que absorbe parte de la señal de entrada y transmite el resto con una distorsión mínima. Se utilizan para ampliar el rango dinámico de dispositivos como medidores de potencia y amplificadores, reducir los niveles de señal de los detectores, encajar los circuitos y se utilizan a diario en aplicaciones de laboratorio para ayudar en el diseño del producto. Los atenuadores se utilizan también para equilibrar las líneas de transmisión que de otra manera tienen niveles desiguales de señal.

CAMPO ELÉCTRICO: Es un campo físico que es representado mediante un modelo que describe la interacción entre cuerpos y sistemas con propiedades de naturaleza eléctrica.

CAMPO MAGNÉTICO: Representa una región del espacio en la que una carga eléctrica puntual de valor q , que se desplaza a una velocidad \mathbf{v} , experimenta los efectos de una fuerza que es perpendicular y proporcional tanto a la velocidad \mathbf{v} como al campo \mathbf{B} .

CAVIDAD MONOMODO: Una cavidad en la que las dimensiones se eligen en relación con la longitud de onda del generador de manera que sólo cierto modo es excitado.

CAVIDAD MULTIMODAL: Es una cavidad en la cual las dimensiones contienen diferentes longitudes de onda orientadas ortogonalmente, mínimo en dos direcciones, es decir, hay más de un modo de propagación.

CAVIDAD RESONANTE: Espacio que contiene las ondas estacionarias utilizadas como un aplicador de energía de microondas.

CIRCULADOR: Guía de onda de tres puertos que permite el avance de potencia en sentido 1-2-3, pero no 3-2-1. Es usado para desviar la potencia reflejada por el generador a una carga no coincidente.

COEFICIENTE DE PROPAGACIÓN: Define la propagación de una onda electromagnética a través de un medio, a lo largo de un eje. Corresponde a un número complejo y se representa por $\gamma [m^{-1}]$.

COEFICIENTE DE REFLEXIÓN: Es un número complejo de la forma $\rho * e^{j\theta}$ (adimensional), donde ρ representa la amplitud, y θ el ángulo de fase de la impedancia de carga reflejada en el circuito.

DIRECTIVIDAD: En un acoplador, es un parámetro que se puede medir como la capacidad de transferir potencia, desde la puerta de entrada a la puerta acoplada, y la capacidad de rechazar la potencia que pueda venir desde la puerta de salida.

FACTOR DE PÉRDIDAS: Es un parámetro que determina la energía disipada en el dieléctrico y equivale al producto de la constante dieléctrica por la tangente de pérdidas.

GUÍA DE ONDA: Nombre designado a las estructuras hechas de un solo conductor con sección rectangular, circular, elíptica, entre otras, para el transporte de energía electromagnética.

KLISTRÓN: Es una válvula de vacío para la generación de potencia microondas a partir de la amplificación de una fuente de bajo poder. Este dispositivo genera un haz de electrones que pasan por una serie de cavidades sintonizadas para adecuar la señal de salida (radiación MO). Generalmente es más robusto y mucho más costoso que el magnetrón.

LONGITUD DE ONDA DE CORTE: Es la longitud más crítica en la cual una onda electromagnética no puede propagarse en un modo si hay alta atenuación. Esto es proporcional a las dimensiones de las guías de onda y su símbolo es λ_c .

MAGNETRÓN: Es un tubo electrónico tipo diodo para la generación de energía microondas. Convierte la energía de alimentación AC en altos voltajes de DC para su normal operación. Este sistema es muy utilizado a nivel industrial gracias a su alto rendimiento en el calentamiento y bajos costos de operación.

MODO (CAVIDAD): Patrón definido de distribución tanto de campo eléctrico como magnético de una señal (onda EM) excitada en un espacio bien definido. Los campos mencionados anteriormente varían de una manera cíclica en el espacio, para cubrir de forma casi pareja los límites de la cavidad.

MODO (GUÍA DE ONDA): Patrón definido de distribución tanto de campo eléctrico como magnético de una señal (onda EM) que se propaga a lo largo de una guía de onda.

MODO FUNDAMENTAL: Modo más bajo establecido en una guía de onda o aplicador.

MODO TE (TRANSVERSAL ELÉCTRICO): Es un modo de guía de onda donde la componente del campo eléctrico en la dirección de propagación es nula.

MODO TM (TRANSVERSAL MAGNÉTICO): Modo de guía de onda donde la componente del campo magnético en la dirección de propagación es nula.

PERMEABILIDAD ABSOLUTA: Es la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material. En el vacío es $\mu_0 = 1.257 * 10^{-6} (H/m)$.

PERMEABILIDAD RELATIVA: Para un material ferromagnético el incremento en la permeabilidad del espacio libre. Dado por $\mu' + j\mu''$, donde μ' es la componente sin pérdidas y μ'' la disipación en el material.

PERMITIVIDAD ABSOLUTA: Constante física que describe la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y de esa forma anular parcialmente el campo interno del material. En el vacío está determinada por $\epsilon_0 = 8.854 * 10^{-12} (F/m)$.

PERMITIVIDAD RELATIVA Es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. Está definida como $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$, donde ϵ' representa la constante de dieléctrica y ϵ'' la disipación en el material.

POLARIZACIÓN: Habilidad del material dieléctrico para responder al campo eléctrico debido a la permanencia o a los dipolos inducidos en su estructura.

PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN: Se denomina profundidad de penetración a la distancia, medida desde la superficie del cuerpo, a la que ha sido absorbida el 37% de la energía inicial que tenía el campo electromagnético.

SWR: En español ROE o relación de onda estacionaria que corresponde a una medida de la energía enviada por el transmisor la cual es reflejada por el sistema de transmisión y devuelta al origen (Transmisor).

TANGENTE DE PÉRDIDAS: La tangente de pérdidas es una cantidad adimensional que refleja las pérdidas de energía en un dieléctrico.

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN EN EL VACÍO: Velocidad de propagación de una onda electromagnética en el espacio libre (velocidad de la luz) $2.99 * 10^8 \frac{m}{s}$,

$$c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}. \text{ su unidad es (metro/segundo).}$$

RESUMEN

TITULO: INGENIERÍA CONCEPTUAL DE UN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO CON MICROONDAS A PARTIR DE MUESTRAS PROVENIENTES DE LOS MUNICIPIOS DE CALIFORNIA Y VETAS (SANTANDER)*

AUTORES:

JUAN SEBASTIAN ABRIL BENJUMEA**

JULIÁN ANDRÉS GÓMEZ GUTIÉRREZ**

PALABRAS CLAVES: Microondas, oro, cavidades, guías de onda, magnetrón, aislador, circulador, lixiviación

DESCRIPCION

Tomando como base la información contenida en el proyecto de grado interacción de las microondas con trazas de oro en muestras provenientes de los municipios de Vetas y California (Santander) [1], se conformó un informe de investigación con la ingeniería conceptual para la recuperación de oro con material originario de estas mismas regiones utilizando la asistencia microondas. Uno de los apartados presenta un esquema con la metodología que brinda la información necesaria para el entendimiento de esta técnica de calentamiento, con el fin de asistir al grupo en la toma de decisiones, o para que sirva como guía para la implementación del proceso a nivel de planta piloto. El documento también contiene un glosario con las principales palabras utilizadas en el proceso de calentamiento. Además, de las generalidades del mineral, como características físicas, usos, y técnicas de obtención, destacando la ubicación del distrito minero y la composición de estos sustratos, Por otro lado se presenta un sucinto barrido bibliográfico de estudios, principalmente a nivel de laboratorio, que se han hecho para la recuperación asistida con microondas de oro. Finalmente se presentan las cotizaciones de los equipos propuestos y una serie de simulaciones, con guías de onda rectangulares, que permiten verificar la orientación de los campos (eléctricos y magnéticos), así como de una cavidad multimodal que especifica puntos de mayor concentración de campo eléctrico determinados por la superposición de los modos en el interior de la misma.

*Trabajo de grado

**Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías, eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Director: Carlos Rodrigo Correa Cely. Codirector: Iván Mauricio Amaya Contreras.

ABSTRACT

TITLE: INGENIERÍA CONCEPTUAL DE UN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO CON MICROONDAS A PARTIR DE MUESTRAS PROVENIENTES DE LOS MUNICIPIOS DE CALIFORNIA Y VETAS (SANTANDER)*

AUTHORS:

JUAN SEBASTIAN ABRIL BENJUMEA**

JULIÁN ANDRÉS GÓMEZ GUTIÉRREZ**

KEYWORDS: Microwaves, gold, cavities, waveguides, magnetron, isolator, circulator, lixiviation.

DESCRIPTION

Based on the information provided by the undergraduate research project "*interacción de las microondas con trazas de oro en muestras provenientes de los municipios de Vetas y California (Santander)*", a document with the conceptual engineering for the recovery of gold from mineral ores of the same region, using microwaves, was written. One section presents a scheme of the methodology used on microwave assisted processes, which can help the research group in decision making, or which can be useful for implementing the process at pilot plant level. This document also contains a glossary, which summarizes the most used words during the heating process. Moreover, some general specifications of the mineral are provided, focusing on its physical characteristics, its uses and the traditional recovery techniques. The geographical location of the mining districts and the composition of its ores, is also shown. On the other hand, a brief bibliographical review of studies, mainly at lab level, where microwaves are used to assist the recovery process, is discussed. Finally, a couple quotations are shown, as well as some simulations with rectangular waveguides which allow verification of the electric and magnetic fields orientation. Furthermore, a multimodal rectangular cavity, which manifest high electric field zones, is also simulated.

*Degree work

**Physics Mechanical Engineering Faculty Electric, Electronic and telecommunications. Director: Carlos Rodrigo Correa Cely. Codirector: Iván Mauricio Amaya Contreras.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería conceptual es la etapa inicial de un proyecto de ingeniería. Dicha fase propone una metodología con objetivos y especificaciones definidos, para el desarrollo de un bien en general. El presente informe inicia con un breve vocabulario técnico de apoyo para el proceso de calentamiento con microondas. Posterior a esto, en el capítulo uno, se hace una introducción al tema, que describe las generalidades del oro, seguida por los objetivos del trabajo de grado. En el capítulo tres, se muestra la información disponible para realizar la ingeniería conceptual, donde se ubican geográficamente los distritos mineros de vetas y califonia. También se explica el proceso tradicional de recuperación de oro que permitirá entender los fundamentos de esta técnica.

En el capítulo cuatro, se muestran los fundamentos teóricos de la radiación con microondas y se explican las propiedades de los materiales semiconductores o aislantes. En este capítulo, también es presentado un sucinto barrido del estado del arte a nivel nacional e internacional, enfocado en artículos publicados sobre recuperación de minerales preciosos con aplicación de microondas.

Luego de la fundamentación teórica, este informe se enfoca en la definición de la metodología general para llevar a cabo el proceso de recuperación de oro, donde se especifican los criterios de aplicación, los costos de operación, el funcionamiento de los dispositivos y las herramientas para la generación y análisis de microondas, la propuesta y selección del modelo para llevar a cabo la recuperación de oro y, finalmente, un estudio de seguridad para orientar al usuario sobre el cumplimiento de la exposición a campos electromagnéticos, basados en la norma UIT-T K52 de Colombia. Todo esto presentado en el capítulo cinco.

El siguiente apartado del informe muestra cada una de las cotizaciones de los dos equipos para generación y transporte de las microondas, así como la de la

estación de trabajo para la medición de las variables concernientes al proceso de calentamiento.

Al final se muestra una serie de conclusiones y recomendaciones, en aras de motivar el estudio en este campo de investigación

Cada uno de los capítulos del informe investigativo verifica rasgos importantes de la ingeniería conceptual en el proceso, y permite al usuario tener una idea de los avances científicos aplicados a la recuperación de minerales preciosos.

1. GENERALIDADES DEL ORO

Este mineral precioso ha participado en la vida social, cultural y económica de la humanidad. A los egipcios miles de años antes de Cristo, se les atribuye haber efectuado las primeras explotaciones de oro, inventado los sistemas de fundición, y de haber asignado un valor económico a este. Algo parecido ocurre en el siglo XV cuando llegan los europeos a América, quienes buscaban el mineral precioso con ánimo de lucro personal y de sus reinos, diferente de los nativos quienes concedían al mismo el carácter sagrado, como lo demuestran en sus trabajos de orfebrería (Precolombina) las figuras alegóricas de sus dioses.

Se puede considerar entonces que el oro, una vez conocido su valor, se convierte en el eslabón principal para crear imperios, incitar a las conquistas, guerras y para dar poder político, económico a las naciones y potencias mundiales [2].

Por otro lado este mineral precioso viene asociado geológicamente a yacimientos o depósitos minerales, los cuales se dividen en metálicos y no metálicos; Los primeros se forman sobre la superficie de la tierra y se explotan especialmente por sus propiedades físicas (minerales sedimentarios). Los no metálicos se localizan en el interior de la litosfera y se extraen por su contenido de elementos químicos valiosos (rocas ígneas y metamórficas) [3].

Este metal se caracteriza por su maleabilidad, ductilidad, presenta varias tonalidades de color amarillo según su pureza, no se corroe ni se empaña, en lingote se trocea, en frío se modela y martilla, es de fácil soldadura autógena y es excelente conductor eléctrico y térmico [4]. A continuación se presentan una tabla con algunas características físicas del mismo:

Tabla 1. Propiedades físicas del oro.

Símbolo	Numero atómico	Densidad	Punto de fusión	Punto de ebullición	Dureza
Au	79	19,32 <i>gr/cm</i> ³	1063 °C	2970°C	2,5-3 Mohs

Fuente: Tomado de [4].

1.1. Usos

Su uso se puede agrupar en tres categorías, resumidas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 2. Usos del oro.

FINES		
ECONÓMICOS	JOYERIA- ODONTOLOGÍA	INDUSTRIA
-Respaldo al papel moneda -Protección contra la inflación	-En joyería se alea plata, cobre y níquel. -En la ortodoncia se usa en la elaboración de soldadura de piezas dentales	-Electrónica el oro tiene aplicación en la construcción de circuitos integrados y semiconductores

Fuente: Tomado de [5].

1.2. Técnicas de obtención (Colombia)

Actualmente hay dos técnicas de obtención de oro, las cuales son:

- **Minería aluvial**

Explotación de aluviones en donde el buscador de oro procede a llenar la fuente con arena o grava mezcladas con pequeñas partículas de oro, agitándolas con una corriente de agua. Las partes más ligeras de la grava se van con el agua y las partículas de oro van quedando en el fondo de la batea.

- **Minería de veta**

El oro se extrae de rocas trituradas, disolviéndolas en disoluciones de mercurio (proceso de amalgama) o de cianuro (proceso de cianuración) [6].

1.3. Aspecto ambiental

La actividad minera ha ocasionado muchos daños, especialmente al suelo y al agua. Se ha cambiado el paisaje de muchas zonas, contaminándose el suelo y los ríos con mercurio y cianuro por los escasos métodos de recuperación de estos.

2. DESCRIPCION DEL TRABAJO DE GRADO

Este informe de investigación se realiza para desarrollar la ingeniería conceptual de un proceso de recuperación de oro con microondas a partir de muestras provenientes de los municipios de Vetás y California (Santander), así como para evidenciar el cumplimiento de todos los objetivos presentados en el plan de trabajo de grado y enunciados en las siguientes subsecciones.

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar la ingeniería conceptual para la recuperación de oro, a través de procesos de calentamiento volumétrico: irradiación de materiales con microondas, a partir de las técnicas que implementa la ingeniería de diseño.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

2.2.1. Llevar a cabo una revisión bibliográfica correspondiente al estado actual de la investigación sobre el calentamiento volumétrico con microondas o “microwave heating” para la recuperación de trazas (pequeñas cantidades) de materiales preciosos.

2.2.2. Mostrar de manera sencilla el esquema de un proceso a pequeña escala de microondas para recuperación de pequeñas muestras de oro.

2.2.3. Presentar la terminología básica que detalla el fundamento de la técnica de calentamiento volumétrico, para ayudar al desarrollo técnico y desenvolvimiento del operador con las herramientas.

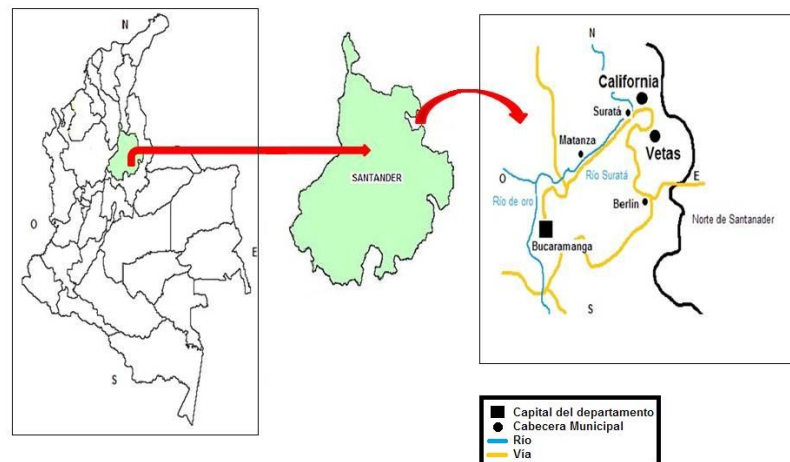
3. INFORMACION DISPONIBLE PARA LA INGENIERIA CONCEPTUAL

La ingeniería se desarrolló con base en la información obtenida del trabajo de grado “Interacción de las microondas con trazas de oro de los municipios de California y Vetás (Santander) [1]. En la definición de los componentes que hacen parte de la infraestructura del proyecto se consideran los criterios generales establecidos por los autores de la tesis mencionada anteriormente.

3.1 Distritos mineros (Vetas y California)

Están conformados por los municipios del mismo nombre, se localiza al oriente del departamento de Santander en límites con Norte de Santander (ver **Figura 1**). Tiene una extensión de 139 km² y una población de 4.153 (2006) distribuida en forma homogénea entre las cabeceras municipales y las zonas rurales. Estos dos municipios, corresponden al Núcleo Provincial Soto Norte que tiene como capital a Matanza. En el Distrito Minero se identificó como principal Encadenamiento Productivo Minero el del Oro.

Figura 1. Ubicación geográfica del distrito minero



Fuente: Tomado de [7].

3.2 Composición del material proveniente de vetas y california

El oro se presenta en filones asociados a una mineralización hidrotermal con presencia adicional de cuarzo, plata y sulfuros (especialmente pirita). En forma general puede definirse que el oro grueso (mayor a 75 micrones) ocurre con mayor frecuencia en Vetas y oro fino (menor a 75 micrones) en California. En esta última localidad normalmente se encuentran minerales cianicidas como acompañantes de calcosina, calcopirita, sulfosales, etc. Además se puede diferenciar el sector de California como “high sulfidation-type” (alta sulfuración), y al de Vetas como “low sulfidation-type” (baja sulfuración), según [7].

3.3 Recuperación convencional del oro en vetas y california

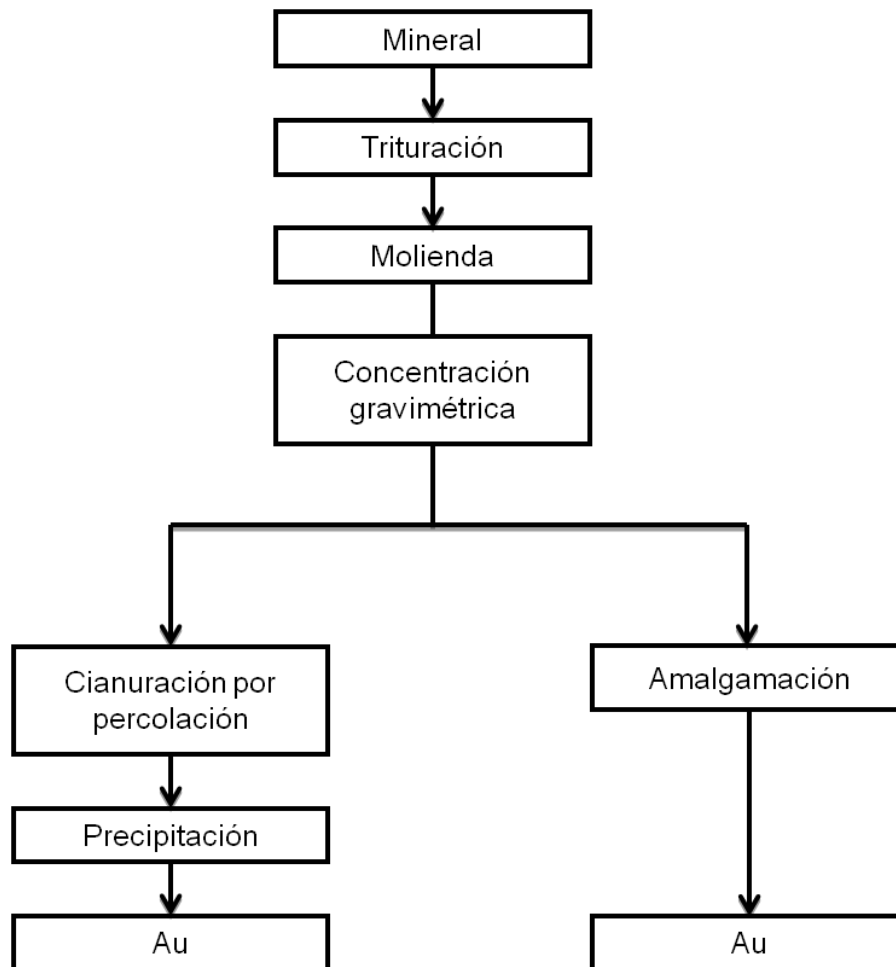
En la **Figura 2** se puede observar el diagrama de bloques del proceso de extracción de oro convencional en los municipios de vetas y california, el cual comienza con:

- Trituración: El mineral proveniente de la mina es triturado con el fin de obtener un tamaño de partícula adecuado para la etapa de molienda. Esta reducción de tamaño se realiza comúnmente de manera manual.
- Molienda: En esta etapa el mineral triturado pasa por molinos de pisones o en algunos casos, de bolas con el objetivo de reducir el tamaño de este.
- Concentración gravimétrica: Después de que se muele el mineral es transportado por una canaleta cubierta de paños hacia una zona de concentración, cuyo fin es reunir la mayor cantidad de material valioso para posteriormente ser separado.
- Amalgamación: El mineral de mayor tamaño es llevado a barriles donde sufre un proceso de amalgamación, que se presenta debido a la gran afinidad del oro por el mercurio, formando así al solo contacto una amalgama de Hg-Au. Posteriormente esta amalgama es quemada para recuperar el “oro grueso” (filón mayor a 75 micrones).

- Cianuración por percolación: Las colas provenientes del proceso de amalgamación se someten al proceso de cianuración por percolación, que dura aproximadamente 20 días permitiendo de esta manera precipitar el “oro fino” (filón menor a 75 micrones) dando como resultado procesos globales de recuperación de oro menores al 50%.

En todos los casos, los residuos son vertidos en las corrientes de agua más cercanas, teniendo en cuenta unas descargas controladas por la CDMB [8], [9].

Figura 2: Diagrama de flujo del proceso de extracción convencional en los distritos minero de Vetas y California.



Fuente: Tomado de [9].

4. RECUPERACIÓN ASISTIDA CON MICROONDAS

4.1 Fundamentos teóricos

Para una mejor comprensión del proceso asistido con microondas, en esta sección se repasan algunos conceptos como: Las microondas, las características de los materiales y su reacción frente al calentamiento.

4.1.1 Microondas

Se denomina a estas como la porción del espectro electromagnético con una longitud de onda de 1mm a 1m, que corresponde a frecuencias entre 300MHz y 300GHz. Haciendo referencia a un medio homogéneo, la velocidad de propagación de las microondas dependerá de la permitividad y permeabilidad, ver ecuación (1), e influye sobre su longitud de onda, ver ecuación (2) [9].

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (1)$$

$$\lambda_p = \frac{v_p}{f} \quad (2)$$

Las dos frecuencias 0.915GHz y 2.45GHz fueron reservadas por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, siglas en ingles), para propósitos industriales, científicos y médicos [10].

4.1.2 Calentamiento con microondas

Cuando se calienta un material empleando microondas, se crea un desplazamiento de cargas bajo la influencia de un campo eléctrico, aplicado a través de electrodos, donde dichas partículas serán atraídas a las placas (según polaridad), dando lugar al calentamiento.

En algunos materiales (dieléctricos y aislantes) las moléculas están formadas por dipolos que se reorientan según el campo eléctrico, girando sobre sí mismas y produciendo fricción entre ellas, dando lugar al calentamiento de la muestra.

Este proceso ofrece la ventaja de poder colocar la energía directamente dentro del material, donde las microondas penetrarán para causar el calentamiento volumétrico. Por otro lado, para materiales conductores las microondas pueden ser reflejadas y el proceso no se hará de forma efectiva.

4.1.2.1 Tipos de materiales

Dependiendo de cómo reaccionan ante el campo de microondas los materiales se clasifican en:

- **Reflejantes:** Son materiales en los cuales las microondas no penetran, debido a que la onda incidente crea en el cuerpo una vibración, que hace que la onda se refleje.
- **Absorbentes:** La radiación se absorbe parcial o totalmente, calentándose fácilmente.

4.1.3 Propiedades de los materiales

Los materiales presentan propiedades eléctricas que, dependiendo de sus valores, los caracterizan como buenos materiales absorbentes de energía microondas o no. Su interacción viene dada por la aplicación de campos eléctricos y magnéticos que excitan los átomos del material creando movimientos internos que por fricción se convierten en calor.

4.1.3.1 Permitividad y permeabilidad compleja

En el calentamiento de materiales por medio de microondas, las pérdidas dieléctricas tienen mayor peso. Sin embargo hay que tener en cuenta que algunos materiales tienen pérdidas magnéticas que son significativas. Estas propiedades están definidas por:

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' \quad (3)$$

$$\mu = \mu' + j\mu'' \quad (4)$$

La ecuación (3) muestra la permitividad compleja, donde ε' (parte real) representa la constante dieléctrica, que se define como la capacidad de un medio para almacenar energía de microondas. Por otra parte, ε'' (parte imaginaria) representa el factor de pérdidas dieléctricas, y es una forma de cuantificar la disipación de potencia en un capacitor cuando se llena con un dieléctrico[11].

4.1.3.2 Coeficientes de transmisión y reflexión

Cuando se trabaja con medios que presentan discontinuidades, se presentan dos conceptos importantes:

- El coeficiente de reflexión: Relaciona la amplitud de la onda incidente con la amplitud de la onda reflejada.
- El coeficiente de transmisión: Describe la intensidad de la onda transmitida con respecto a la onda incidente.

4.1.3.3 Vector de poynting

El teorema de poynting permite relacionar de manera cuantitativa la energía que se propaga en una onda electromagnética. Matemáticamente, el vector de poynting se puede definir como al producto vectorial del campo eléctrico y el campo magnético, cuyo módulo permite obtener la intensidad de la onda. Ver ecuación (5).

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \left[\frac{\text{watts}}{\text{m}^2} \right] \quad (5)$$

Si se deseara obtener el flujo de energía en la unidad de tiempo, en la superficie de un volumen, basta con integrar el vector poynting. En un sistema real de calentamiento por microondas, este vector permite analizar las pérdidas de potencia que hay durante la propagación de las ondas.

4.1.3.4 Profundidad de penetración

La conducción eléctrica juega un papel importante en el calentamiento de los materiales y, dependiendo de si es un metal o un semiconductor, se calentará en mayor o menor medida.

Los aislantes, por ejemplo, con bajas pérdidas, son difíciles de calentar a temperatura ambiente aunque la penetración de las microondas es bastante significativa. Si la conductividad del material es muy alta, el campo se atenúa por el efecto piel. La incidencia del campo magnético y eléctrico produce una fuerza que impulsan los electrones creando un flujo denominado profundidad penetración ds la cual está definida como la distancia medida, desde la superficie en donde se tiene una energía de incidencia (e), hasta donde esta se reduce a $1/e$ [11].

Para su cálculo, se utiliza la ecuación (6).

$$ds = \frac{2}{(\mu_0 * \mu' * \sigma)^{0.5}} [\text{m}] \quad (6)$$

La distancia de penetración es un parámetro importante, debido a que indica la distribución del calor dentro del material, y puede encontrarse en el orden de los micrómetros hasta los pocos metros. Esta distancia, sin embargo, no debe relacionarse con que no exista calentamiento más allá de ds . En la **Tabla 3** se presentan las profundidades de penetración de microondas a 2.45GHz en algunos materiales [12].

Tabla 3. Profundidades de penetración de microondas a 2.45GHz.

Material	Temperatura(°C)	Profundidad de penetración (cm)
Agua	25	1,5
Agua	95	5,7

Hielo	12	100
Madera	25	3-350
Cristal Hueco	25	35
Porcelana	25	56
Resina Epoxi	25	4100
Teflón	25	9200
Cristal de cuarzo	25	1600

Fuente: Tomada de [12].

4.1.3.5 Polarización

Este proceso consiste en la distribución de las cargas eléctricas de un material. Cuando se le aplica un campo, se origina una reorientación de las cargas de las partículas, induciendo unos dipolos. Esta polarización puede ser electrónica, influyendo sobre la nube de electrones en el átomo, o iónica, causada por el movimiento de los iones.

4.1.3.6 Fuga térmica

Existen materiales cuya relación entre la capacidad de absorción de microondas y la temperatura, es proporcional. Por tanto, si se tienen dos tipos diferentes de compuestos, es posible que al aplicar microondas se presenten puntos calientes (en las zonas donde se encuentre el material con mayor factor de pérdidas), lo que aumentará su capacidad de absorción de energía, incrementando aún más su temperatura. Eventualmente, se llegará a un resultado destructivo, por lo que a este fenómeno se le conoce como fuga térmica.

Este fenómeno sucede cuando la disipación de energía térmica en una parte del volumen del material supera la diferencia de transmisión con el entorno,

aumentando su entalpía y llevando a la descomposición de la muestra. Lo anterior significa que no existe control sobre el diferencial $\frac{d\varepsilon''}{dT}$ que permite el calentamiento con microondas para muchos materiales que no son buenos absorbentes a temperatura ambiente.

4.1.4 Tipos de calentamiento

La conversión de la energía microondas en calor está relacionada con la incidencia de un campo eléctrico que genera movimientos en las moléculas del material, al reorientarse en el sentido del campo, como se plantea en el libro “Hornos de alta frecuencia y microondas” [13]. Esta interacción puede ser presentada por tres procesos:

- Cargas Espaciales debidas a la conducción electrónica
- Polarización iónica asociada con las vibraciones infrarrojas
- Rotación de los dipolos eléctricos

Para poder visualizar el proceso, se tiene en cuenta la tangente de pérdidas:

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (7)$$

La ecuación (7) representa el acople óptimo entre la energía microondas y el material, además resulta ser el parámetro más importante en el procesamiento para recuperación de materiales. Adicionalmente ésta relación está sujeta a una penetración adecuada y elevadas pérdidas, lo que se traduce en una $\tan\delta$ y ε'' máximas [14].

4.1.4.1 Rotación dipolar

Consiste en la orientación de las moléculas polares eléctricamente neutras hacia las cargas positivas o negativas. Las moléculas que están expuestas al campo rotan hacia la dirección del incremento de la amplitud del mismo. La fricción molecular resultante del movimiento de los polos genera calor de manera instantánea y uniforme a través del compuesto.

4.1.4.2 Calentamiento resistivo

Se presenta en conductores o semiconductores de baja conductividad. Ocurre generalmente por redireccionamiento de los dipolos en el material donde dicho movimiento se convierte en energía que se disipa en forma de calor. Para este fenómeno se pueden destacar dos categorías de materiales que pueden experimentar este tipo de calentamiento al ser expuesto a energía de microondas. En el primer grupo están aquellos materiales que poseen electrones libres, como el carburo de silicio (SiC), mientras que en el segundo grupo se encuentran materiales que tienen iones en movimiento capaces de generar corriente.

4.1.4.3 Calentamiento electromagnético debido a pérdidas magnéticas

Ocurre en materiales con gran susceptibilidad magnética, expuestos a energía de microondas. En este fenómeno los polos magnéticos rotan de manera análoga a las moléculas polares cuando hay campos magnéticos variantes. Un ejemplo de estos materiales son los óxidos magnéticos.

4.1.4.4 Calentamiento dieléctrico

Es una combinación de rotación dipolar y calentamiento resistivo, e indica que tan buena es la interacción entre la onda y el material, representado mediante la ecuación (8), donde P es la potencia, f la frecuencia ϵ_0 y ϵ_r son la permitividad en el espacio libre y la relativa del material, $\tan\delta$ el factor de pérdidas y E la magnitud del campo eléctrico [15].

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r \tan\delta E^2 \quad (8)$$

4.2 Barrido bibliográfico de la interacción de minerales preciosos con microondas

En esta sección se hace una recopilación de investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional que corresponden a la interacción de minerales preciosos como el oro con las microondas.

4.2.1 Barrido bibliográfico a nivel nacional

Un estudio a nivel nacional verifica la respuesta de muestras refractarias a la aplicación del proceso de oxidación con microondas, el cual transforma los sulfuros a óxidos para que posteriormente sean lixiviados en cianuro sódico [16].

Este proceso se llevó a cabo con minerales procedentes de las mina el Roble (Chocó) y el Zancudo (Antioquia), los cuales presentan una refractariedad física y química debido a las asociaciones del oro especialmente con calcolpirlitas, arsenopirlitas y pirlitas.

Cada una de las muestras (20 gramos) se expusieron a las microondas dentro de una cavidad multimodal cuya frecuencia es de 2450 MHz y a una potencia de 1000 W; logrando oxidar más del 90% de los sulfuros en un tiempo no superior a los 10 minutos, posteriormente, el material es sometido a lixiviación con cianuro sódico bajo las condiciones operacionales mostradas en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Condiciones de operación.

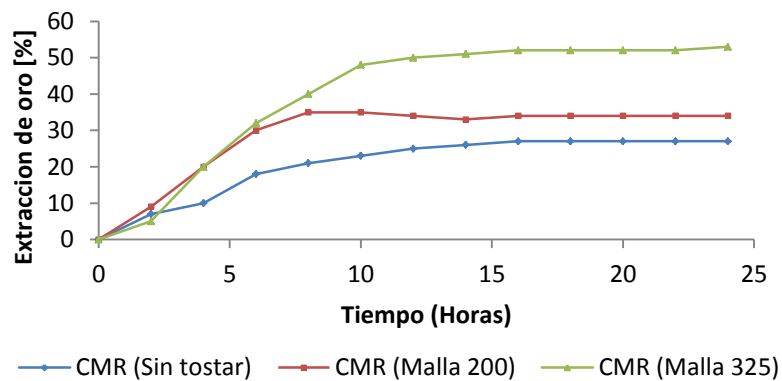
Parámetro	pH de trabajo	Porcentaje de sólidos	Concentración de NaCN	Cantidad de mineral
Valor	10,5-11	25%	1 kg/ton	100 g

Fuente: Tomada de [16].

De las especificaciones dadas anteriormente se obtienen los porcentajes de recuperación de oro bajo una lixiviación en cianuro donde los resultados de dichas pruebas para ambas minas se observan en la **Figura 3** y **Figura 4**.

- Mina el Roble

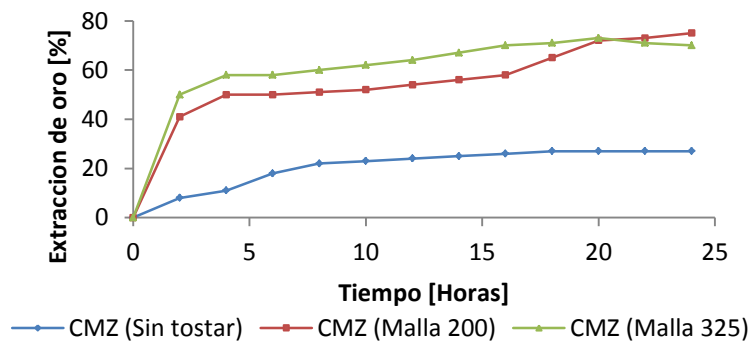
Figura 3. Porcentaje de recuperación de oro mina el roble.



Fuente: Tomado de [16].

- Mina el Zancudo

Figura 4. Porcentaje de recuperación de oro mina el zancudo.



Fuente: Tomado de [16].

Los anteriores resultados permiten verificar que la asistencia al proceso con microondas permite oxidar los sulfuros de la muestra mucho más rápido, y

aumentar el porcentaje de recuperación de oro después de la cianuración cuando el mineral ha sido tostado[16].

4.3.1 Barrido bibliográfico a nivel internacional

La concentración gravimétrica de oro es muy eficiente si el metal está totalmente libre y si el tamaño de las partículas es lo suficientemente grande. La liberación se consigue normalmente por trituración, pero debido a la asociación con otros minerales, se produce la compactación que conduce a la recuperación ineficaz. Las microondas se usan para crear fracturas de estas compactaciones, que hacen más fácil la recuperación del mineral. Las mejoras en el rendimiento de obtención del material se encuentran en rangos de 28% a 40% después del tratamiento previo con microondas. Algunos de los procesos de pretratamiento comprenden: Trituración o molienda, tostación, incineración entre otros.

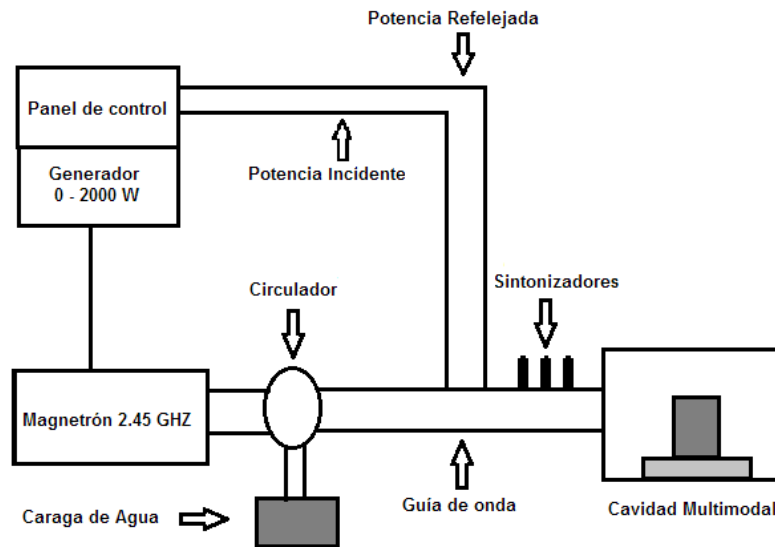
Dos casos ligados a la tostación e incineración de materiales refractarios, se nombran a continuación

- Presencia de carbón o sulfuros (materiales refractarios).
- Presencia de carbón y sulfuros (materiales doblemente refractarios).

La compactación de estos materiales (carbón o sulfuros) en una matriz mineral, lleva a una recuperación más complicada e ineficaz durante la lixiviación de cianuro. Este tipo de situación se conoce como “robo” y una manera de evitar este fenómeno es someter la muestra a ciertos tratamientos como: tostado, cloración, oxidación a presión, corte y biooxidación.

Las microondas pueden ser una opción viable para tratar estos minerales y es posible con un equipo compuesto por: Un generador, un panel de control, un magnetrón con refrigeración por aire, una guía de onda rectangular de aluminio, un circulador con carga de agua y una cavidad multimodal que contiene la muestra procesada, como se observa en la **Figura 5** [17].

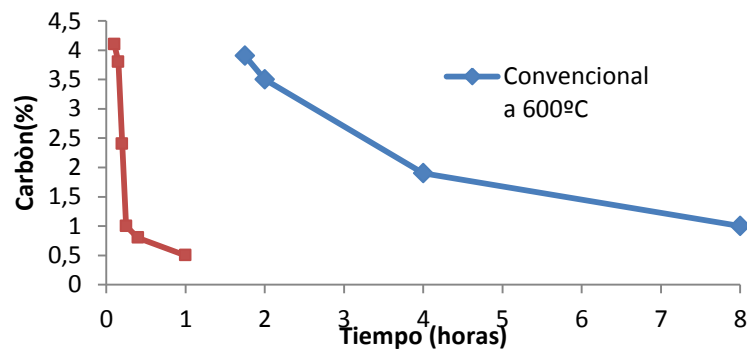
Figura 5. Esquema del calentamiento por microondas.



Fuente: Tomado de [17].

Todo este equipo permite llevar cabo una serie de experimentos donde se verifica que antes de lixiviar el oro es necesario hacer un pretratamiento a la muestra para eliminar el carbono y los azufres presentes en esta. La **¡Error! No se encuentra el rigen de la referencia.** y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestran un paralelo entre el calentamiento por microondas y el calentamiento tradicional.

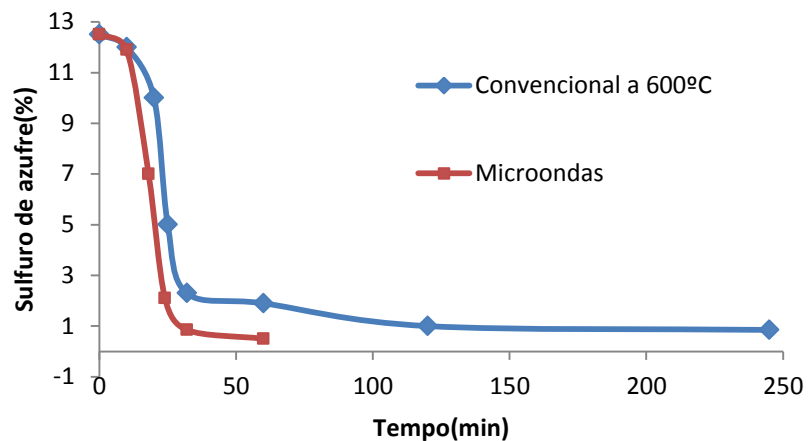
Figura 6. Efecto del tiempo de tostación en el contenido de carbono para calentamiento convencional y por microondas.



Fuente: Basado en [17].

Se observa que, cuando las muestras se calientan con microondas, el porcentaje de carbono se reduce más rápidamente que en el calentamiento convencional.

Figura 7. Efecto del tiempo de tostación en el contenido de sulfuro de azufre para calentamiento convencional y por microondas.



Fuente: Basado en [17].

De igual manera es de notar que el porcentaje de sulfuro de azufre se reduce considerablemente cuando las muestras son irradiadas por microondas en comparación al calentamiento convencional. Dicha disminución (carbono y sulfuros) en las matrices de la muestra, permiten una recuperación del mineral precioso de una forma más eficiente en cuanto a tiempo de procesamiento del mismo y un consumo de energía menor respecto al método convencional [17].

Un segundo proceso que se analiza en este barrido bibliográfico utiliza tecnologías que generan residuos de carbón activado con altos valores de oro. Dichos desechos son quemados con radiación microondas y después tratados por lixiviación con cianuro de una forma convencional para recuperar el mineral precioso.

Dicho estudio inicia con una muestra de carbón activado virgen (50 miligramos), colocada en un crisol calentándose a 3°C/min. Esta tasa es controlada con un

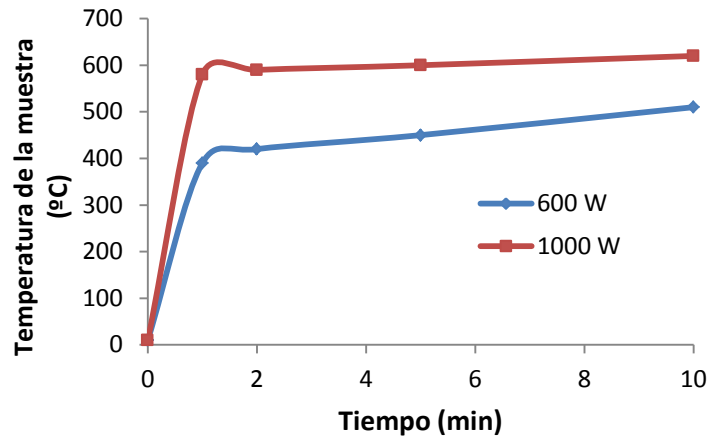
Netzsch STA-409 diseñado para análisis térmico y provisto de aceleradores de rango calorimétrico. Dichos cambios se llevan desde una temperatura ambiente hasta unos 900°C con frecuencias de oxidación entre 915 MHz y 2450 MHz.

Con la muestra en el microondas se mide la temperatura con una termocupla K, inmediatamente encendido el aparato. Las variables estudiadas son: La potencia incidente de microondas, el tiempo de procesamiento, la masa de la muestra y el tamaño de las partículas. Enseguida el material se incinera por combustión y se ingresa a una cavidad multimodal donde se inyectan flujos de aire para causar oxidación sobre ella. Después de este procedimiento el oro se concentra en la ceniza y se extrae por lixiviación a través de una solución acuosa de cianuro de sodio con pH de 10.5 pulpas de ceniza al 5% en un recipiente de un litro con una duración de 24 horas [18].

A este proceso se le hace un análisis termogravimétrico que revela pérdidas de masa en tres etapas. La primera a menos de 200°C, eliminándose humedad y gases en el material. La segunda entre 320°C y 600°C por oxidación del carbón y por último, a partir de 1250°C por descomposición del material en ceniza.

El análisis también muestra respuestas a factores como la temperatura sobre la muestra, a dos distintas potencias (600 W y 1000 W) durante 5 minutos. En la **Figura 8** se puede verificar que durante los primeros 2 min el calentamiento es casi lineal para ambas muestras, alcanzando una temperatura específica (400°C y 610°C) que no varía hasta los 10 segundos.

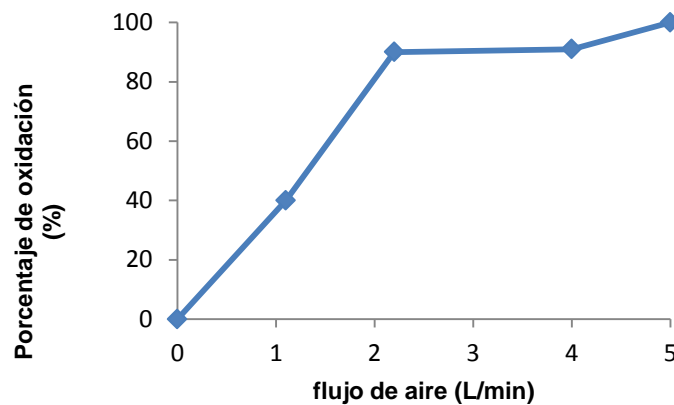
Figura 8. Respuesta de la muestra sometida a una temperatura durante un tiempo establecido.



Fuente: Basado en [18].

Otro resultado que se puede verificar es que con el aumento en el caudal de aire que se le suministra a la muestra, el porcentaje de oxidación también se incrementa como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura 9.Flujo de aire contra porcentaje de oxidación de la muestra.

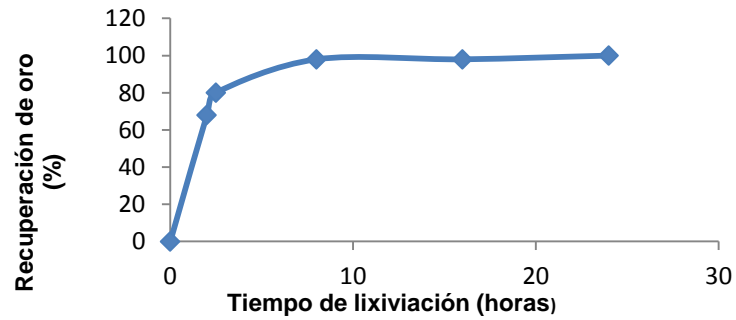


Fuente: Basado en [18].

Por último se observa una muestra de carbón activado (50 miligramos) irradiada con microondas a una potencia de 600W, donde se recuperó cerca del 98% del

oro en la ceniza, luego de aproximadamente 20 horas con un consumo de 1.28Kg de cianuro por tonelada de residuo de carbón, algo que resulta ventajoso frente a la obtención del mineral cuando es calentado inductivamente. Ver **Figura 10**

Figura 10. Porcentaje de recuperación de oro contra tiempo de lixiviación en (cianuro).



Fuente: Tomado de [18].

5. PROPUESTA DE APLICACIÓN Y SUS COMPONENTES

Antes de empezar un proceso que tenga como referencia la interacción de materiales con microondas es importante tener en cuenta como punto de partida el planteamiento de una metodología que describa las etapas principales y que a su vez permita establecer si el proceso es viable económicamente, energéticamente.

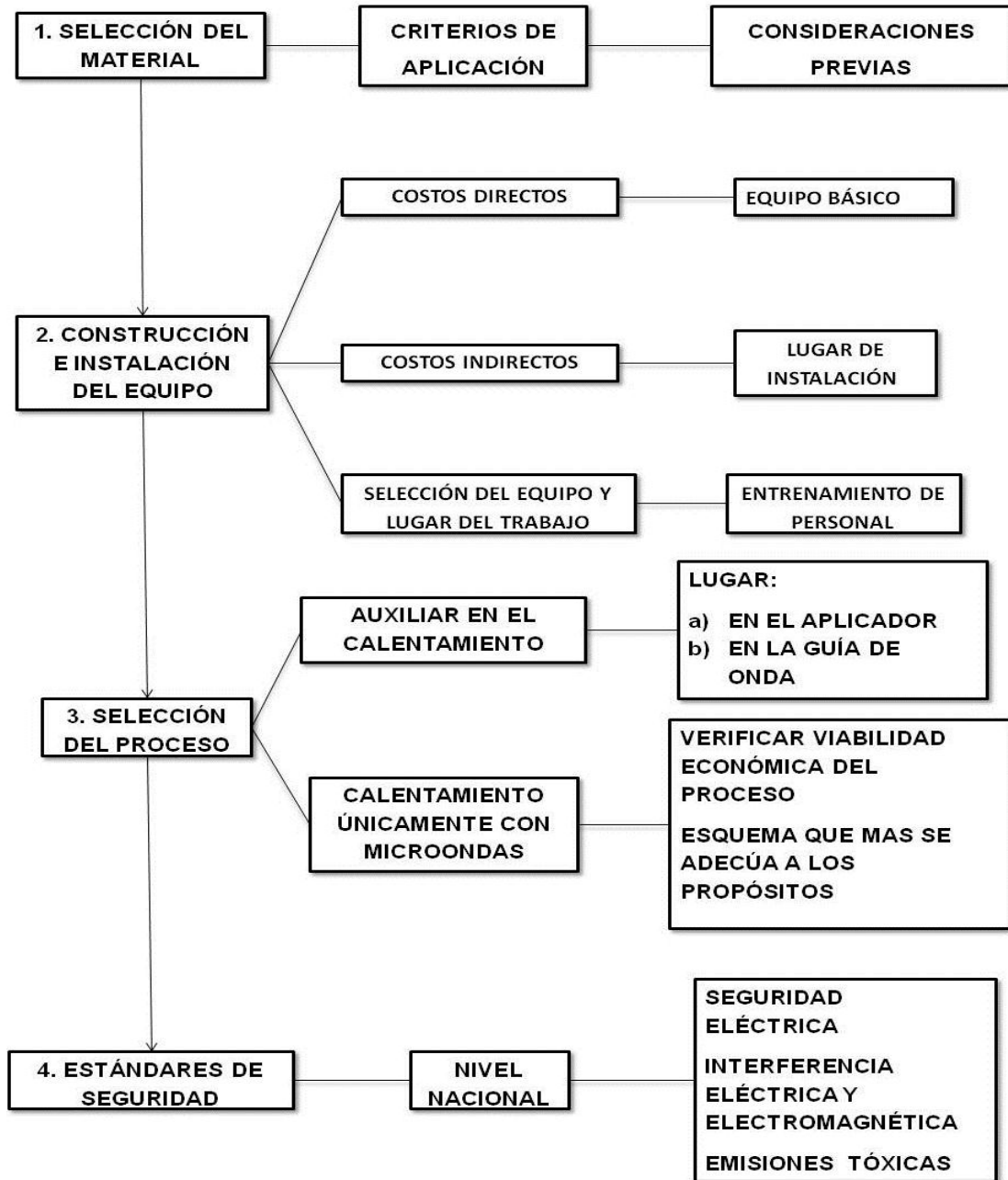
5.1. Metodología general para la implementación de un proceso de recuperación de oro por microondas

En la **Figura 11** se puede visualizar el diagrama que describe la metodología, que está compuesto cuatro (4) secciones principales:

- a) Selección del material: En esta etapa se tendrán en cuenta aquellos criterios que deben ser evaluados previamente que permitan valorar si el proceso es viable. Cada criterio será abordado y analizado en secciones posteriores.
- b) Construcción/adquisición del equipo: Durante esta etapa se realiza la elección y cotización de los equipos y el lugar de trabajo. Luego se describe el funcionamiento de los componentes seleccionados para determinar cómo serán acoplados para conformar el sistema general a implementar, teniendo en cuenta los costos implicados.
- c) Selección del proceso: Se continúa con la selección del proceso, que para este caso específico es calentamiento únicamente con microondas. Esta etapa es de gran importancia debido a que aquí se elige el esquema para llevar a cabo el montaje a nivel de laboratorio. Más adelante se explicará el sistema propuesto, exponiendo sus ventajas y desventajas.
- d) Estándares de seguridad: Aquí se plantea una revisión de los estándares de seguridad, esto con el objetivo de asegurar que las instalaciones, y operarios, cumplan con las normas y reglamentos planteados por los organismos de vigilancia y control.

Lo anteriormente descrito resume los principales pasos que se deben llevar a cabo para analizar la viabilidad del proyecto [19]. En caso de que este estudio sea favorable puede estar sujeto a pequeños cambios. En caso contrario podría ser necesario reformular todo el proceso.

Figura 11. Metodología general para la implementación de una planta piloto para recuperación de oro con microondas.



Fuente: Tomado de [19]

5.2. Criterios de aplicación

El procesamiento de las microondas es complejo y comprende una amplia gama de diseño de equipo electromagnético y materiales, que en muchos casos tienen propiedades que varían con la temperatura.

El éxito de usar esta tecnología está en aprovechar el conocimiento del funcionamiento del equipo para determinar si la implementación del proceso es o no viable. A continuación se muestran algunas consideraciones que pueden ser usadas para este propósito.

5.2.1 Consideraciones técnicas

Para cada aplicación es necesario hacer una evaluación que permita determinar si el calentamiento con microondas es una alternativa viable. Las siguientes consideraciones son los pilares del proceso de evaluación.

5.2.1.1 Tiempo de exposición de las muestras o material

El tiempo de exposición de las muestras está ligado directamente con el aumento de la temperatura, es decir, entre mayor sea el tiempo, se espera que la temperatura sea mayor. Por esto es necesario establecer un rango de tiempo que sea adecuado y que evite la sinterización de las muestras [1]. El rango señalado para irradiar las muestras es entre 25 y 40 min. El primer valor debido a que fue el tiempo mínimo encontrado para que las muestras se tostaran, y el segundo debido que fue el tiempo máximo encontrado antes de que las muestras se sinterizaran, teniendo en cuenta que el proceso se realizaba en intervalos de 5 min con el objetivo de revolver la muestra para que el calentamiento fuera homogéneo.

5.2.1.2 Masa de la muestra

La cantidad de masa expuesta a radiación de microondas es un factor importante en la cantidad de oro a extraer y en la efectividad de esta aplicación o proceso. La temperatura de las muestras tiende a aumentar cuando la masa aumenta (llegando a un límite donde se estabiliza) debido a que hay mas material que

interactúa con el campo eléctrico. Hay que tener en cuenta que las muestras van a estar sujetas a ciertas condiciones como: potencia incidente constante e igual tiempo de procesamiento.

La cantidad rango de masa propuesto por [1], para llevar las muestras a tostación oscila entre los 30 y 60 gramos.

5.2.1.3 Potencia

La cantidad de potencia para generar las microondas es la que se encarga de establecer la tasa de calentamiento. Los requerimientos de nivel de potencia se calculan en base a las propiedades del material a calentar. En este caso se utilizará como potencia máxima 1000 y 600 watts (la equivalente al 100% y 60% de un horno microondas) con el motivo de poder comparar con cuál de las dos potencias se obtiene una mejor recuperación de oro.

A continuación se muestra en la Tabla 5. **Parámetros de diseño**Tabla 5 los parámetros elegidos para realizar el diseño.

Tabla 5. Parámetros de diseño

Parámetros de diseño	de	Valor mínimo	Valor máximo
Potencia del diseño		600 Watts	1000 Watts
Temperatura del diseño	del	0°C	400 °C
Tiempo de exposición	de	25 min	40 min
Masa de la muestra		30 gr	60 gr

Fuente: Tomado de [1].

5.3. Construcción e instalación del equipo

5.3.1 Costos

Cuando se estudia la viabilidad económica de un proceso con esta tecnología se debe tener en cuenta no solo una mejora productivamente hablando, sino también

el costo que puede tener la implementación, operación y mantenimiento de los equipos [20].

Para empezar a evaluar este proyecto es necesario empezar a identificar cuáles van a ser los costos tanto directos e indirectos que se tendrán que hacer.

- **Costos directos:** Están ligados principalmente a la obtención del equipo necesario para la recuperación de oro. El costo del equipo va asociado con el tamaño, potencia, frecuencia, diseño del aplicador, sistema de control de gas, los periféricos, el fabricante, y el tamaño del mercado para este equipo. Debido a estas diferencias, el costo varía dependiendo de la aplicación.

Otro aspecto importante a tener en cuenta dentro de los costos directos es el espacio de trabajo de la planta, que para el caso de los dispositivos para calentamiento con microondas ocupan de un 20% a un 35% del espacio ocupado por unidades de calentamiento convencional.

- **Costos indirectos:** Estos costos están relacionados directamente con el mantenimiento que se realizará a los equipos, que para este caso incluye: la limpieza, reparación o cambio de algún dispositivo defectuoso. También se considera el consumo de electricidad para el funcionamiento de la planta, que en comparación con el método convencional resulta económicamente viable.

5.3.1.1 Lugar de instalación

- Se debe disponer de por lo menos $25 m^2$
- Contar con un diagrama eléctrico indicando el diseño para la distribución y balanceo de cargas en cada sección de la planta piloto.
- Un control maestro (o general) para la potencia de energía eléctrica.
- Un botiquín de primeros auxilios: Deberán fijarse en lugares visibles y de fácil acceso.
- Dos extintores contra incendio: Preferentemente se colocará un extintor por cada área que pueda representar riesgo de incendio.
- Sistema de ventilación adecuado.

- Agua corriente y drenaje: Deberán recibir mantenimiento preventivo y correctivo que los responsables de la planta piloto soliciten.
- Un área o espacio físico para cilindros de gases.
- Señalamientos de protección civil.
- Salida de emergencia.
- Lava-ojos: Deberán estar instalados y funcionar adecuadamente.
- Lámpara de emergencia.
- Alarma de emergencia.

Sistemas de extracción de gases: Mantenerse siempre sin obstáculos que impidan cumplir con su función, deberán recibir mantenimiento preventivo y correctivo que los responsables de la planta piloto soliciten [21].

5.3.1.2 Operación del equipo

El generador de microondas de la planta piloto puede ser utilizado para el secado, tostación y sinterización de minerales, regularmente sus temperaturas oscilan de 60°C a 600 °C. La circulación de aire asegura una intensa transmisión de calor, y por lo tanto una operación más rápida, además cuenta con un orificio de salida de aire en la pared superior (en el techo) que aseguran una renovación continua del aire.

Su correcta operación está basada en la revisión de estos aspectos:

- Este equipo debe estar colocado sobre una superficie nivelada.
- La separación mínima entre este equipo y la pared debe ser aproximadamente 20 cm (distancia mínima para la salida y circulación del aire).
- Encender el equipo con el interruptor de encendido y marcar la temperatura deseada con el control de temperatura.
- Cerciórese que durante el proceso los diferentes indicadores (Termómetros, luz piloto) se encuentren funcionando perfectamente.

5.3.1.3 Mantenimiento del equipo

Es un aspecto que garantiza el funcionamiento del equipo en óptimas condiciones, la calidad de los estudios y los riesgos dentro de los límites permitidos. Para que el mantenimiento del equipo sea efectivo requiere de condiciones especiales:

- Personal técnico debidamente capacitado, dedicado tiempo completo.
- Posibilidad de obtener los repuestos al menor tiempo, lo que significa tener disponibilidad económica y medios para adquirir los repuestos o materiales necesarios, los que por lo general tienen un costo elevado.
- Herramientas e instrumentos de medición adecuados (Específicos y precisos).
- Disponer de los programas de cómputo para mantenimiento.
- Toda la literatura técnica del equipo.
- Posibilidad de comunicación al extranjero (a la fábrica) para efecto de asesoría, compra de repuestos, etc.
- Posibilidad de contratar temporalmente los servicios de mantenimiento tanto del distribuidor como de la fábrica en casos especiales.

Un punto que es importante mencionar es la conveniencia de tener al menos dos equipos de la misma marca y modelo, donde se podrían realizar diferentes pruebas o comparaciones [22].

5.3.1.4 Entrenamiento de personal

- Entrenamiento en operación del equipo

Por la constitución misma del equipo, en la cual se incluyen sistemas eléctricos, mecánicos, electrónicos, de microondas, de cómputo requiere de un personal con ciertas cualidades especiales:

- Preferiblemente profesional
- Conocimientos de electrónica, electricidad, computo, microondas, etc.
- Dedicado exclusivamente al equipo
- Capacitación del personal (Industrial)

El encargado de la protección contra radiación microondas y operación del equipo deberá:

Brindar charlas sobre las características del sistema microondas, haciendo énfasis en la naturaleza de sus fuentes y sus características de emisión como también velar por el cumplimiento de las normas de seguridad y el equipo para operar con este sistema:

- Protección ocular: (Gafas industriales) Se debe dotar protecciones para la cara y ojos en áreas donde es probable que su empleo evite o reduzca las lesiones relacionada.
 - Protección de los pies: (Botas) Ya que es probable lesiones de los dedos o empeine se sugiere con calzado con punta metálica y suelas antiestáticas o dieléctricas
 - Protección de la cabeza: (Casco) Para evitar el impacto o penetración de objetos en cráneo.
 - Protección de las manos: (Guantes) Cuando el contacto o manejo de materiales sea a altas temperatura, exista peligro de contacto con líneas eléctricas, materiales corrosivos, productos químicos y disolventes peligrosos.
 - Protección respiratoria: (Máscara antigases): Se utilizara cuando exista exposición al polvo, nieblas, humo y vapores por encima de los limites de exposición establecidos[23].
- Entrenamiento en manejo de procesos

Todas las políticas y procedimientos que se desarrollen en un proyecto de aplicación con microondas deben constituir el plan de actuación para asegurar una calidad adecuada donde todas las operaciones se lleven a la práctica diaria de forma controlada y sistemática. Para ello es necesario establecer un método que permita evaluar periódicamente las tareas que se llevan a cabo cada día y comprobar que, éstas, hayan sido efectuadas tal y como se describen. Además se deberá estructurar un sistema activo y de ágil reacción ante la posibilidad de un eventual incumplimiento de los objetivos acordados.

Para poder establecer el sistema de calidad es preciso que se cumplan las siguientes premisas:

- Establecer y reconocer la responsabilidad para la calidad dentro del servicio.
- Asegurar que todos los componentes del sistema se documentan y controlan.
- Desarrollar e implantar procedimientos dentro del servicio para asegurar que se cumplen todos los requisitos de calidad.

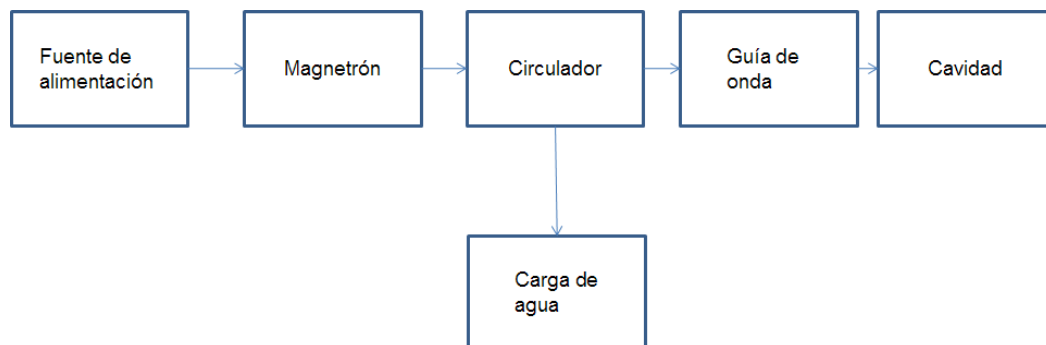
- Asegurar que cada parte desarrollada forma parte de un conjunto.
- Asegurar un enfoque práctico que permita garantizar la mayor eficacia, efectividad y eficiencia de los servicios prestados.
- Asegurar el diseño de métodos que permitan el registro de los datos relativos a la calidad y el inicio de acciones correctivas una vez superados los límites de tolerancia de los diferentes parámetros.
- Establecer revisiones regulares y auditorías, tanto para la implementación, como para comprobar la eficacia del sistema de calidad, lo que incluye la revisión periódica de los estándares de calidad.
- Asegurar que el sistema es adaptable y abierto al cambio y que permite introducir cualquier información pertinente que surja desde otra fuente.

5.3.1.5 Descripción de los componentes de un sistema de microondas para recuperación de oro

Para utilizar las microondas en la recuperación de oro es necesario hacer uso de una serie de dispositivos y accesorios, que van desde la generación hasta la conducción hacia la muestra que se desea calentar.

Mientras que la descripción de los componentes básicos de este sistema como el generador, aplicador, sistemas de control y monitoreo de variables es bastante simple, la interacción de los materiales con las microondas y los cambios en sus propiedades durante el procesamiento, hacen complejo el diseño y el desarrollo de los procesos con microondas. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar cada uno de los componentes básicos de un sistema de generación y transporte con microondas.

Figura 12. Esquema de componentes básicos de un sistema generador de microondas.



Fuente: Autores.

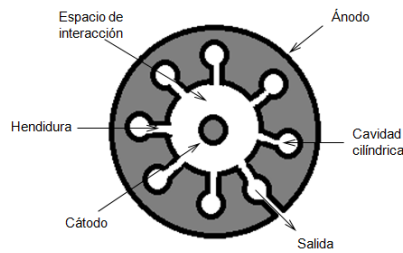
- **Generadores de microondas**

Es la parte principal del equipo, ya que ahí la corriente eléctrica se transforma en ondas electromagnéticas a una frecuencia deseada. Dichos instrumentos funcionan teniendo en cuenta el movimiento balístico de un electrón en el vacío, influenciado por campos eléctricos o magnéticos. Entre estos se encuentran el magnetrón, el klistrón y el girotrón. Parámetros como la potencia o la frecuencia son importantes al momento de seleccionar el generador de microondas aunque también es necesario considerar factores como la ganancia, el ruido, la amplitud y la fase, el tamaño, el peso y el costo [24].

- **Magnetrón**

En las frecuencias de microondas más usuales (915MHz y 2.45GHz), el magnetrón es la opción más económica para generar energía [24]. Este dispositivo es un tubo electrónico tipo diodo. En la **Figura 13** se puede observar un esquema que representa la forma del magnetrón, que es un emisor de electrones cilíndrico o cátodo, rodeado por una estructura concéntrica o ánodo. Aquellos electrones que son emitidos del cátodo al ánodo bajo la influencia de campos magnéticos generados por imanes internos que describen una trayectoria o recorrido curvo, creando así un régimen permanente en el que los electrones giran en torno al cátodo a una velocidad angular constante. Una parte de esta energía de alta frecuencia es transmitida a la carga mediante un acoplamiento adecuado.

Figura 13. Esquema de un magnetrón



Fuente: Tomado de [13].

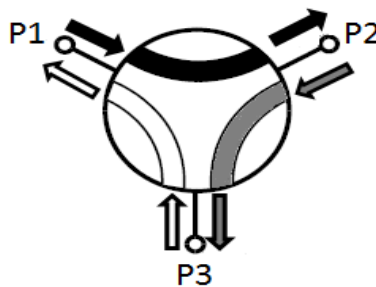
- **Circulador**

Es un dispositivo usado en la modernidad para aplicaciones de RF y microondas.

El uso de este puede mejorar la estabilidad, rendimiento y fiabilidad de los sistemas. Se caracteriza por ser un dispositivo con 3 o más puertos que transfiere energía de uno a otro según ha sido diseñado. La **Figura 14**

muestra un circulador que funciona de la siguiente manera: La energía que entra por el puerto 1 sale por el puerto 2, mientras que el puerto 3 es desacoplado, la energía que entra por el puerto 2 sale por el puerto 3, mientras que el puerto 1 es desacoplado y la energía que entra por el puerto 3 sale por el puerto 1, mientras que el puerto 2 esta desacoplado.

Figura 14. Esquema de un circulador.



Fuente: Tomado de [25].

Para el procesamiento de materiales con microondas, el circulador desvía la onda reflejada (onda de la puerta 2 a la 3) a una cámara de agua, donde la energía es

absorbida evitando así el retorno de esta por la guía de onda hacia la fuente, previniendo daños al generador [25].

- **Carga de agua**

Su función es la de absorber la energía microondas reflejada del aplicador o final de guía de onda. Generalmente se utiliza en conjunto con un circulador para obtener una máxima absorción de cualquier onda reflejada que pueda poner en peligro el magnetrón o el generador [26].

- **Sintonizadores**

Este dispositivo permite ubicar el patrón de ondas dentro de la guía de onda o la cavidad, de manera que se optimice la energía que se suministra al sistema. Se puede sintonizar la onda cambiando la longitud de la guía o poniendo obstáculos en ella.

- **Acoplador direccional**

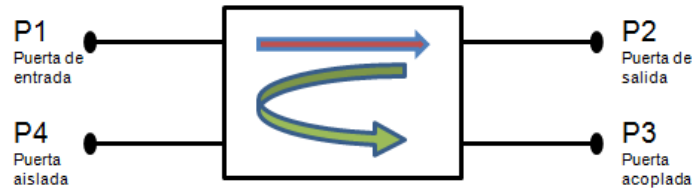
Un acoplador direccional es un componente de las microondas que se puede establecer como elemento pasivo debido a que no necesita ningún tipo de energía para funcionar de manera correcta.

Físicamente está compuesto de 4 puertas. Ver **Figura 15**:

- Puerta de entrada (P1), donde se inyecta la señal de entrada.
- Puerta de salida (P2), donde se encuentra la señal de salida.
- Puerta acoplada (P3), donde se puede obtener una muestra de la señal de entrada.
- Puerta aislada (P4), que debe terminar con una carga que va a depender directamente de la impedancia característica del componente.

Este dispositivo básicamente permite medir una señal que dependa de la onda progresiva, es decir la onda que va de P1 a P2, más no de la onda regresiva. Generalmente son utilizados en los puentes de medida [27].

Figura 15. Esquema de un acoplador direccional



Fuente: Tomado de [27].

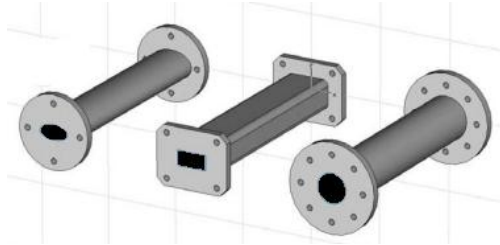
- **Guías de onda**

Nombre designado a las estructuras hechas de un solo conductor con sección rectangular, circular o elíptica, para el transporte de energía electromagnética, ver **Figura 16**. La dirección de la energía electromagnética debe ser principalmente conducida lo largo de la guía y limitada en sus fronteras. Las paredes conductoras del tubo confinan la onda al interior por reflexiones en la superficie, donde el tubo puede estar vacío o relleno con un dieléctrico. Este material le da soporte mecánico al tubo, pero reduce la velocidad de propagación.

En las guías, los campos eléctrico y magnético están confinados al espacio que se encuentra en su interior. De este modo no hay pérdidas de potencia de radiación y tampoco por conducción ya que el material dieléctrico generalmente suele ser el aire.

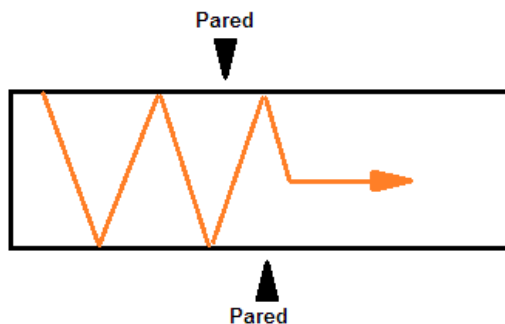
Por otro lado se puede visualizar la guía de onda internamente, ver **Figura 17**, suponiendo que está formada por dos láminas conductoras y que el transporte de la energía electromagnética se lleva a cabo mediante reflexiones continuas.

Figura 16. Tipos de guías de onda (De izquierda a derecha: Elíptica, rectangular, circular).



Fuente: Autores

Figura 17. Vista interna de una guía de onda



Fuente: Autores.

Dando por hecho que la guía de onda de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** está compuesta por un material real al chocar la onda contra las paredes del conductor esta va cediendo energía al material, por tal hecho a medida que la onda avanza va perdiendo amplitud.

La guía está diseñada fundamentalmente para operar en un solo modo de propagación con el ancho de banda requerido. En otras palabras, esto quiere decir que transmite óptimamente la frecuencia de la portadora, para la cual se ha seleccionado la guía con su respectivo ancho de banda de transmisión.

Aunque en este informe se mostrará solo la guía de onda rectangular, existen otras entre las cuales las más importantes son:

- Guía de onda circular y elíptica.

- Guía de onda de haz: Constituida por una sucesión de lentes o espejos capaz de guiar una onda electromagnética.
- Guía de onda tabicada: Formada por dos cilindros metálicos coaxiales unidos en toda su longitud por un tabique radial metálico.
- **Aislador**

Es un dispositivo de dos puertas que presenta baja atenuación o pérdidas de inserción cuando la potencia pasa de la puerta 1 a la 2, pero que tiene un gran aislamiento o pérdidas cuando la potencia entra por 2 y se dirige hacia 1. El aislador debe disipar esta potencia y no reflejarla [15].

Se nombra porque es un componente de un sistema microondas, pero para el modelo propuesto es descartado para reducir costo en el equipo y porque tanto el sintonizador como el acoplador para el sistemas propuesto puede sustituir esta función respectivamente.

- **Cavidades o aplicadores de microondas**

Las dos clases fundamentales de aplicadores de microondas son monomodo y multimodo, los últimos son los más familiares, puesto que se encuentran en los hornos microondas caseros. Una fuente de microondas puede generar una sola frecuencia, pero la salida se puede reflejar e interactuar con el aplicador antes de que la onda alcance el material que va a ser calentado. Esto hace que la energía de las microondas presente diferentes orientaciones al interior del aplicador, cada una de las cuales se denomina modo. Un modo es una onda electromagnética que se propaga a una frecuencia determinada. En un dispositivo multimodo la geometría de la cavidad es tal que los modos pueden existir y reflejarse en su interior. Los patrones de radiación en este tipo de cavidad se comportan como un fluido turbulento pero que en promedio es algo isotrópico.

En un dispositivo monomodo solo se usa una estructura de radiación microondas para el calentamiento. Pueden existir otros modos en ciertas ubicaciones dentro del dispositivo, pero estos normalmente no se propagan muy lejos o no presentan

niveles significativos de radiación comparados con la energía total presente. Los dispositivos monomodo no pueden llenar un gran espacio con un campo de radiación uniforme. A cambio, éstos poseen la capacidad de concentrar grandes cantidades de energía en un espacio pequeño, lo cual los hace ideales para calentar piezas pequeñas o secciones transversales. Los dispositivos monomodo pueden ser aplicadores de una o múltiples pasadas. En un aplicador de una sola pasada, el objeto que se desea calentar es colocado en la ruta de la onda viajera. Sólo una pequeña porción de la energía penetra en el objeto y el resto es reflejado por la superficie.

La otra clase de dispositivo monomodo es el aplicador de múltiples pasadas, en el cual la energía no es absorbida por el material durante la primera pasada. La potencia se refleja hacia éste nuevamente una o varias veces para tener más oportunidad de ser absorbida. Este tipo de dispositivo usualmente toma la forma de una cavidad resonante, la cual es muy similar a la utilizada en los dispositivos multimodo. Es un espacio encerrado por paredes de metal pero sus dimensiones están diseñadas para que tengan una interacción específica con las microondas. La altura y el ancho de la cavidad son tales que permiten un modo específico de propagación. Su longitud debe ser múltiplo entero de la mitad de la longitud de onda del modo fundamental que existe en la cavidad. Esto asegura que las ondas que se reflejen a lo largo del eje propagación interfieran constructivamente con las ondas que viajan en sentido contrario para crear una onda estacionaria en la cavidad[28].

- **Sistema de monitoreo**

Con el objetivo de tener un control del proceso de calentamiento de minerales preciosos, es necesario conocer en cualquier momento las condiciones en que se encuentren, por ejemplo la temperatura de la muestra o la potencia que se le está suministrando. Estas son variables que requieren un monitoreo constante. Para sistemas que emplean microondas existen empresas especializadas, como *FISO*, que ofrecen instrumentos de medición industrial. Una de estos sistemas es el

“Microwave Workstation” (MWS) que se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Está diseñado para medir la temperatura en el interior de un horno microondas por medio de sensores de fibra óptica que ofrecen inmunidad completa a las microondas, proporcionando medidas más exactas y confiables.

Figura 18. Banco de trabajo para monitoreo de señales en un proceso de microondas



Fuente: Tomado de [29].

La estación de trabajo MWS permite recolectar automáticamente datos y a su vez intercambiarlos sin riesgo de perderlos con hojas de cálculo estándar, como Microsoft Excel. Estos datos incluyen lecturas de las variables monitoreadas durante la sesión de prueba. Esta valiosa información puede ser fácilmente clasificada y recuperada en cualquier momento permitiendo así el análisis de los datos. En la **Tabla 6** se pueden observar las especificaciones de este sistema [29].

Tabla 6. Especificaciones del sistema de monitoreo (Workstation FISO)

ESPECIFICACIONES	
Número de canales	8
Tasa de muestreo	20 Hz
Tiempo de conmutación	150 ms entre cada canal
Promedio	1 a 500 muestras
Rango dinámico	40 -300 (°C)

Comunicación	RS-232
Actualización	Flash ROM Firmware
Peso	15 Kg
Dimensiones	304x555x480 mm
Capacidad del horno microondas	0,05m ³
Dimensión de la cavidad del horno	220x418x470 mm
Máxima salida de potencia del horno	1200 W
Requerimientos de energía	120 VAC, 60Hz
Temperatura de operación	15 -35 (°C)

Fuente: Tomado de [29].

5.4. Selección del proceso

En este informe de investigación se encuentra la implementación del calentamiento únicamente con microondas (ondas electromagnéticas) en torno a los 2,45 GHz.

5.4.1 Calentamiento únicamente con microondas

Para este tipo de procesamiento se utilizan solo las microondas como fuente de energía para producir calentamiento sobre el mineral de forma continua o por lotes; El primero significa que una carga con masa fija es ubicada dentro de un horno y se le inyecta una cantidad predeterminada de energía, como indica la ecuación (8).

$$E = \int_0^T P dt \quad (8)$$

Donde E representa la energía total dentro de la carga, P es la potencia total aplicada a la carga, que puede variar con el tiempo, T equivale al tiempo del proceso. Este tipo de transformación se utiliza generalmente para producir una cantidad relativamente baja a intermedia de producto por año.

En un proceso continuo la carga es alimentada a través de una cámara de microondas, donde la muestra es irradiada de forma continua y circula de forma constante [30].

En el momento de elegir el tipo de proceso se deben tener en cuenta ciertos factores:

- Facilidad de controlar los parámetros de la carga, por ejemplo masa, temperatura de inicio, etc.
- Disponibilidad de espacio para el equipo y los materiales.
- Tipo de carga, por ejemplo: Los sólidos (bloques), líquidos o partículas en contenedores, son las indicadas para proceso por lotes, en cambio los sistemas continuos se sugieren para sólidos extruidos, polvos depositados o partículas en un transportador.
- La gestión de control dependerá de las condiciones locales, siendo más fácil en algunos casos para uno de los procesos o viceversa.

5.4.2 Propuesta cavidad rectangular

En el esquema mostrado en la **Figura 31**, el lugar de aplicación es una cavidad rectangular donde el mineral puede colocarse en cualquier parte de esta. La propuesta permite el control de la velocidad de calentamiento mediante la regulación de la potencia, también permite tomar medidas de temperatura y presión mediante sensores en la cavidad que envían la información a un computador para su análisis.

5.4.2.1 Simulación con la cavidad rectangular

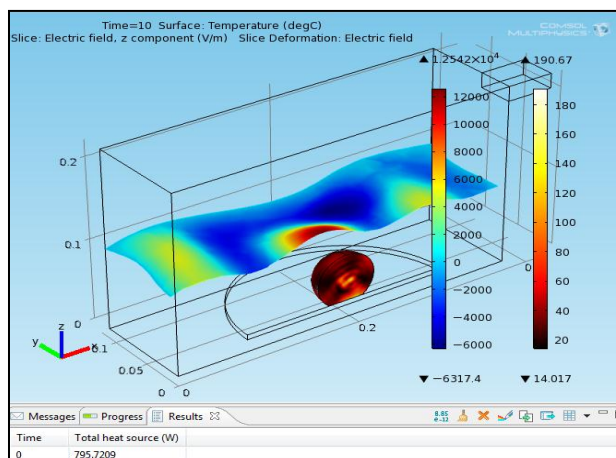
Para realizar esta simulación se usó el software COMSOL con licencia de prueba empleado para análisis y resolución de varias aplicaciones físicas y de ingeniería. En este caso se mostraran los cambios térmicos presentes en un material dieléctrico alojado dentro de una cavidad rectangular al ser expuesto a las microondas. Si se desea ver como se realizo la construcción de la cavidad referirse al anexo C.

Para lograr una simulación acorde a la realidad se toma la cavidad de un horno microondas LG de dimensiones 37x22x22 cm que servira como modelo.

Se realizaron una simulación con potencia incidente de 1000 watts.

La **Figura 19** dan a conocer los cambios de temperatura en el material al interactuar con las microondas y también la intensidad del campo eléctrico dentro de la cavidad, mostrando los puntos máximos de intensidad de campo eléctrico propicios para calentar el material. De igual manera en la **Figura 19** se puede apreciar en la parte inferior izquierda la cantidad de potencia que absorbe la muestra.

Figura 19. Distribución de campo eléctrico en la cavidad y temperatura en el material

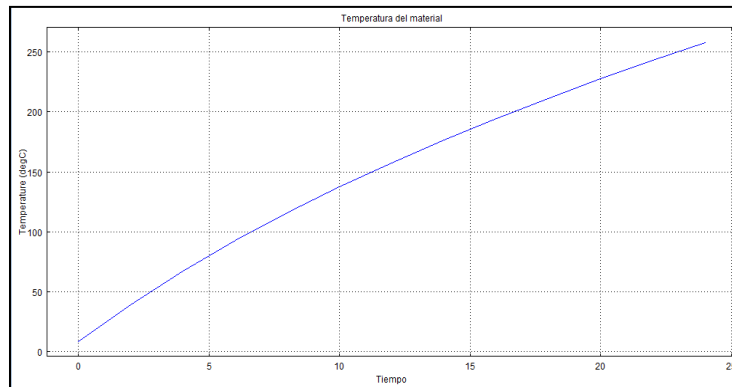


La

Figura 20 muestra el cambio de temperatura en el material en un punto específico de la muestra a medida que cambia el tiempo. Se puede ver que en la

Figura 20 el material alcanza una temperatura un poco mayor a 250°C a los 20 minutos de que la muestra es irradiada.

Figura 20. Temperatura de la muestra contra tiempo



5.4.3 Propuesta de aplicación en guía de onda

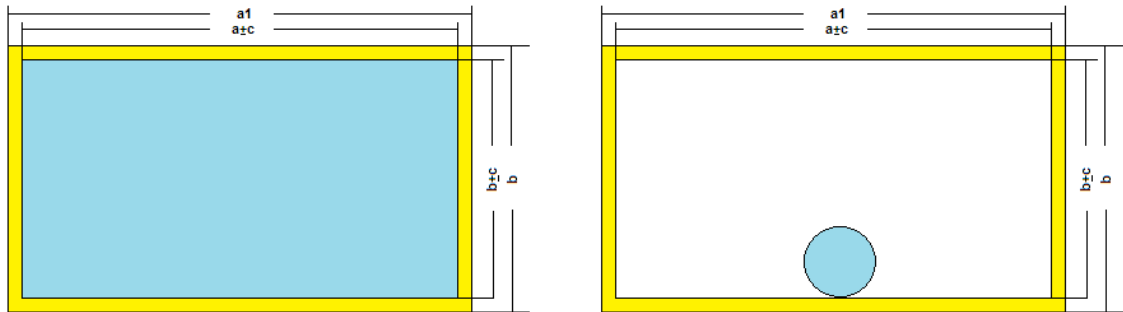
La propuesta presentada a continuación es muy útil para trabajar tanto a nivel de laboratorio como en planta piloto, como se puede observar en la Figura 32 se usa la misma guía de onda como aplicador para la muestra, esta propuesta se convierte en una alternativa muy útil para ensayos a nivel de laboratorios ya que no utiliza una cavidad como tal, disminuyendo el número de equipos en el sistema necesario para la recuperación de oro, convirtiendo el sistema en un proceso más fácil para ser estudiado y así mismo conllevando a una reducción de costos.

5.4.3.1 Simulación de la guía de onda como cavidad

Para la prueba se utiliza el software CST STUDIO SUITE bajo una licencia de prueba, el cual ofrece soluciones eficientes y rápidas para trabajar a altas frecuencias como son las microondas.

Para lograr la simulación cercana a la realidad, se decide presentar una guía de onda rectangular con especificaciones existentes en el mercado, donde se puede encontrar gran variedad, en un rango de frecuencia establecida. En la Figura 21, se describen las dimensiones de una guía de onda rectangular.

Figura 21. Dimensiones de la guía de onda. a) Llena completamente con un dieléctrico. b) Con un dieléctrico esférico en su interior.



La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta como complemento a las medidas presentadas en la **Figura 21.**

Tabla 7. Dimensiones de la guía de onda

Superficie exterior	Superficie interior	Tolerancia
a1=90,42 mm b1=47,24 mm	a=86,36 mm b=43,18 mm	C=0,17 mm

En este caso se han realizado dos simulaciones, la primera de ellas sin material dieléctrico dentro de la guía de onda y la segunda con un material dieléctrico dentro de esta misma.

PRIMERA SIMULACIÓN

Tabla 8. Características de la guía de onda con un semiconductor totalmente su interior.

Material	Permitividad (ϵ_R)	Permeabilidad (μ)	Pérdidas/W	Pérdidas/%	Factor de calidad (Q)
Material dentro de la guía	5.8×10^7	1	2.3×10^{-4}	18.8	1.2×10^5
Material de la guía: Cobre	5.8×10^7	1	1×10^{-3}	81.2	2.86×10^4
Suma de pérdidas totales			1.24×10^{-3}	100	2.32×10^4

Con el simulador se obtienen algunas características para una guía de onda rectangular WR284 con un material semiconductor que llena todo su interior, ver

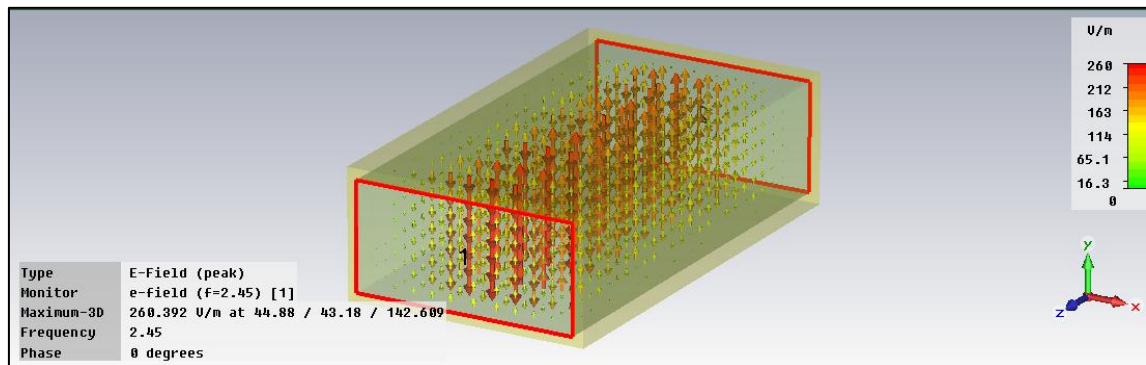
Tabla 8

Otros parámetros que se obtienen a partir de la simulación son: la frecuencia de corte de la guía de onda y la impedancia de onda, valores que se muestran a continuación

$$f_{\text{corte}} = 0.52 \text{ GHz}, \quad Z_{\text{onda}} = 111.8[\Omega]$$

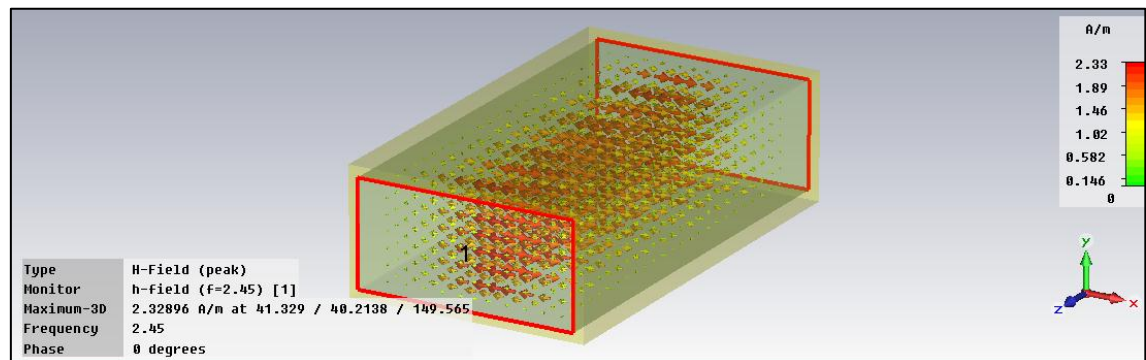
Los resultados de campo eléctrico y magnético para una guía de onda rectangular completamente llena de un semiconductor se aprecian en la **Figura 22** y **Figura 23**.

Figura 22. Propagación del campo eléctrico (Modo TE_{10}).



En la anterior figura se puede verificar la existencia de un campo eléctrico en dirección normal a la propagación de la onda con un máximo de $E= 260.39$ V/m

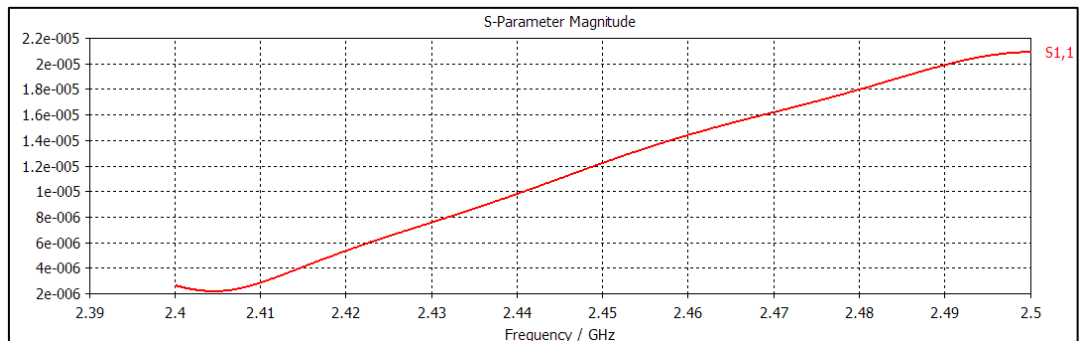
Figura 23. Propagación del campo magnético (Modo TE_{10})



- **Análisis de los parámetros s (dispersión)**

Otro resultado que se puede observar es la magnitud de la onda reflejada sobre el puerto 1 o coeficiente de reflexión de la potencia del puerto de entrada S_{11}

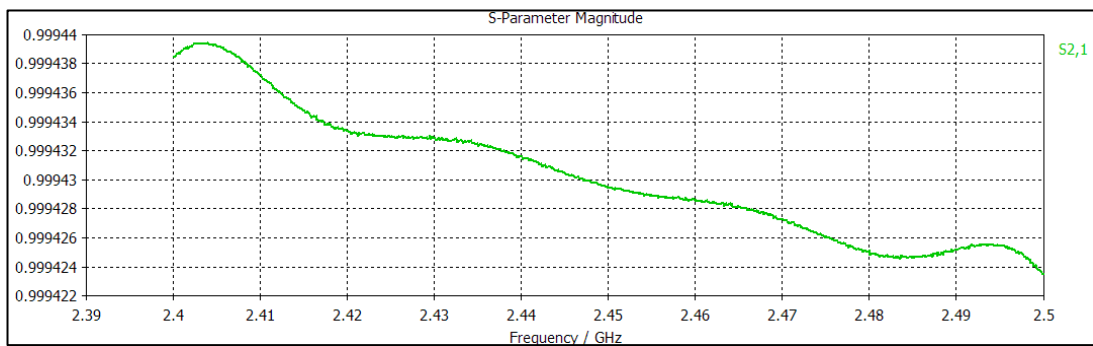
Figura 24. Parámetro S_{11} , simulación 1



Como se puede observar la relación de potencia reflejada e incidente sobre el puerto de entrada es aproximadamente cero. De acuerdo a la gráfica se puede ver que a 2.45 GHz la relación del parámetro S_{11} es 1.2×10^{-5} .

Otro resultado que se puede observar es la magnitud de la onda de salida sobre el puerto 2, respecto al puerto 1 o parámetro S_{21} (Ganancia de potencia en directa)

Figura 25 Parámetros S_{21} , simulación 1.



Como se puede observar en la **Figura 25**, la variación de la potencia de salida es aproximadamente 1, verificándose que a 2.45 GHz el parámetro S_{21} es 0.99943. Esto quiere decir que del 100% de la potencia que aplica se aplica sobre el puerto uno, el 99.99% de esa potencia es transmita al puerto 2.

SEGUNDA SIMULACIÓN

Para una guía de onda rectangular WR284 con un material semiconductor esférico dentro de ella, se pueden encontrar sus características en la Tabla 9.

Tabla 9. Características de la guía de onda con un semiconductor esférico en su interior.

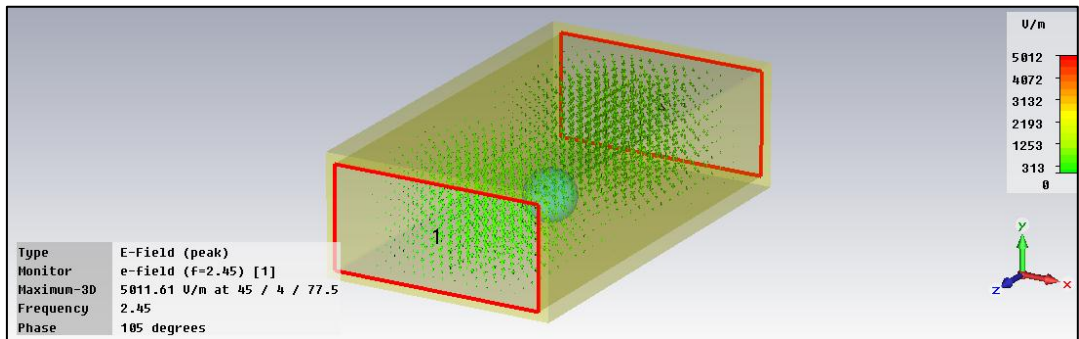
Material	Permtiividad (ϵ_R)	Permeabilidad (μ)	Pérdidas/W	Pérdidas /%	Factor de calidad (Q)
Material dentro de la guía	5.8×10^7	1	$4. \times 10^{-5}$	6.98	2.8×10^5
Material de la guía: Cobre	5.8×10^7	1	6×10^{-4}	93	2.1×10^4
Suma de pérdidas totales			5.8×10^{-4}	100	1.9×10^4

Otros parámetros que se obtienen a partir de la simulación son: la frecuencia de corte de la guía de onda y la impedancia de onda, valores que se muestran a continuación

$$f_{\text{corte}} = 1.8 \text{ GHz}, \quad Z_{\text{onda}} = 570[\Omega]$$

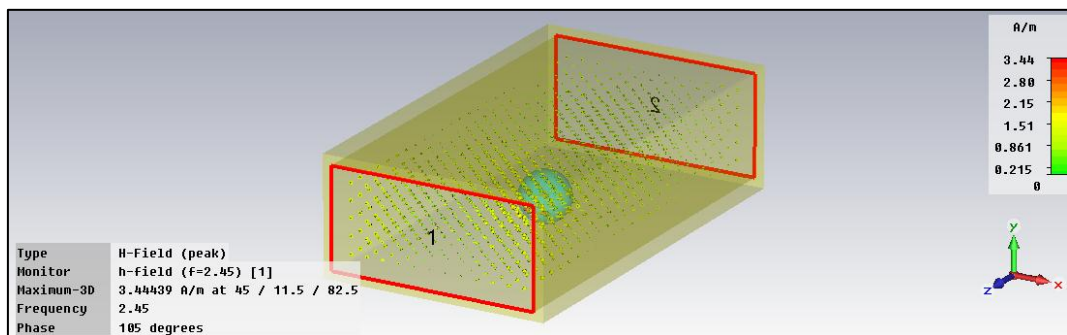
Los resultados de campo eléctrico y magnético para una guía de onda rectangular completamente con un semiconductor esférico en su interior, se aprecian en la Figura 26 y Figura 27.

Figura 26. Propagación del campo eléctrico (Modo híbrido).



Como se puede observar en la anterior figura existe campo eléctrico en la dirección de propagación de la onda, esto quiere decir que $E_z \neq 0$ y el modo pasa de ser TE a un modo EH (Híbrido).

Figura 27. Propagación del campo magnético (Modo híbrido).

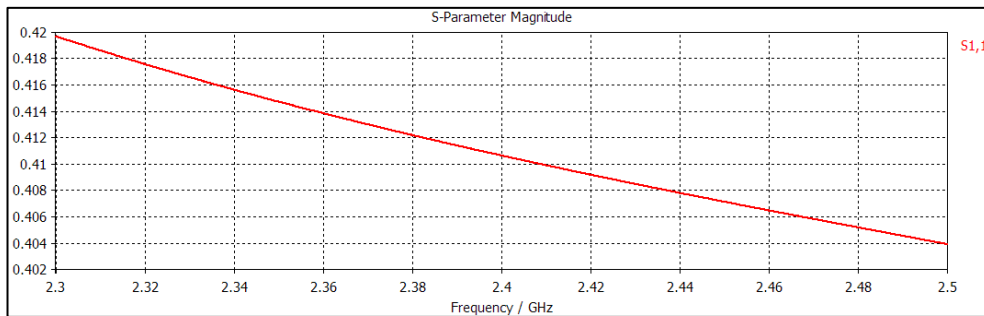


Como se observa en la anterior figura el campo magnético $H_z \neq 0$, que nos ratifica el modo de propagación en la guía de onda de forma híbrida.

- **Análisis de los Parámetros S (Dispersión)**

Otro resultado que se puede observar es la magnitud de la onda reflejada sobre el puerto 1 o coeficiente de reflexión de la potencia del puerto de entrada S_{11} .

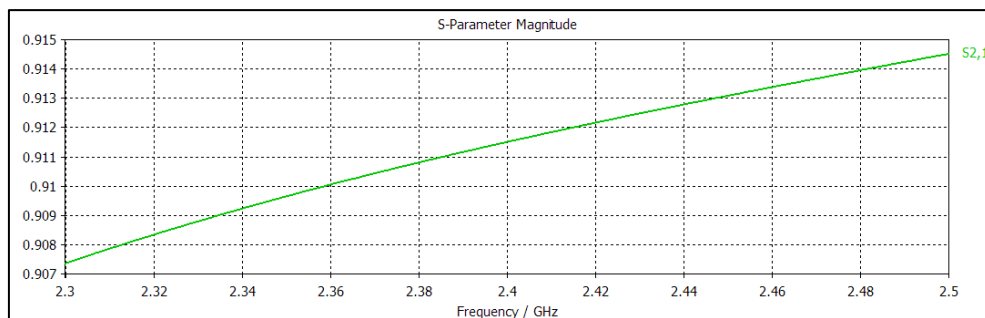
Figura 28. . Parámetro S_{11} , simulación 2.



Con la figura anterior se puede verificar que la relación de potencia incidente y reflejada sobre el puerto de entrada depende del valor de la frecuencia. Se puede observar que a 2.45 GHz que es la frecuencia a la cual se opera la guía de onda la relación de potencia es $S_{11} = 0.407$, lo que significa que del 100% de la potencia que ingresa por el puerto 1, 40.7% de ella se refleja sobre el puerto de entrada para esta configuración.

Otro resultado que se puede verificar es la magnitud de la onda de salida sobre el puerto 2, respecto al puerto 1 o parámetro S_{21} (Ganancia de potencia en directa).

Figura 29. Parámetro S_{21} , simulación 2.



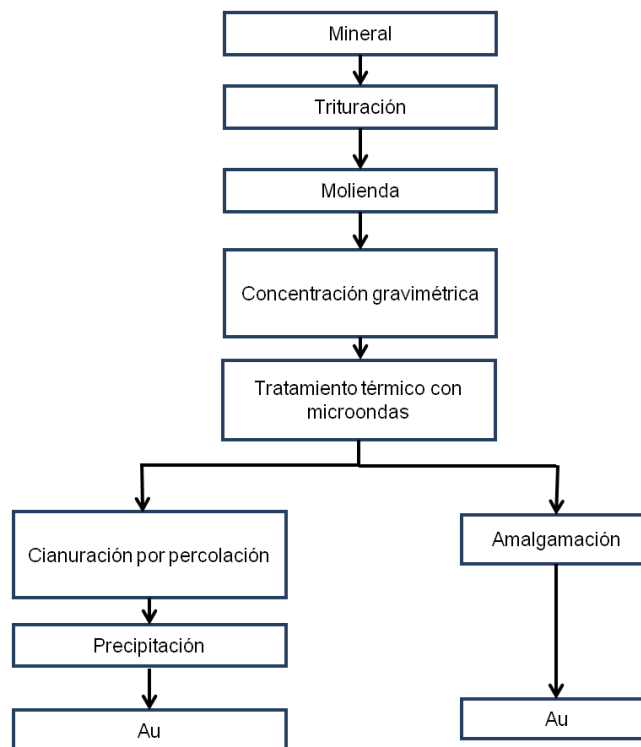
Como se puede observar en la **Figura 29**, la variación de la potencia de salida es aproximadamente 1, verificándose que a 2.45 GHz se encuentra la frecuencia de corte donde el parámetro S_{21} es 0.913 aproximadamente, lo cual significa que del 100% de la potencia que ingresa por el puerto 1, 91.3% de ella sale por el puerto dos. Donde el 8.7 % restante de pérdidas puede corresponder a la potencia reflejada en la guía de onda.

5.4.4 Propuesta para recuperación de oro

Una vez que ya se han dado a conocer los métodos convencionales para la recuperación de oro, en este documento se realizara una propuesta para la recuperación de este mineral empleando las microondas.

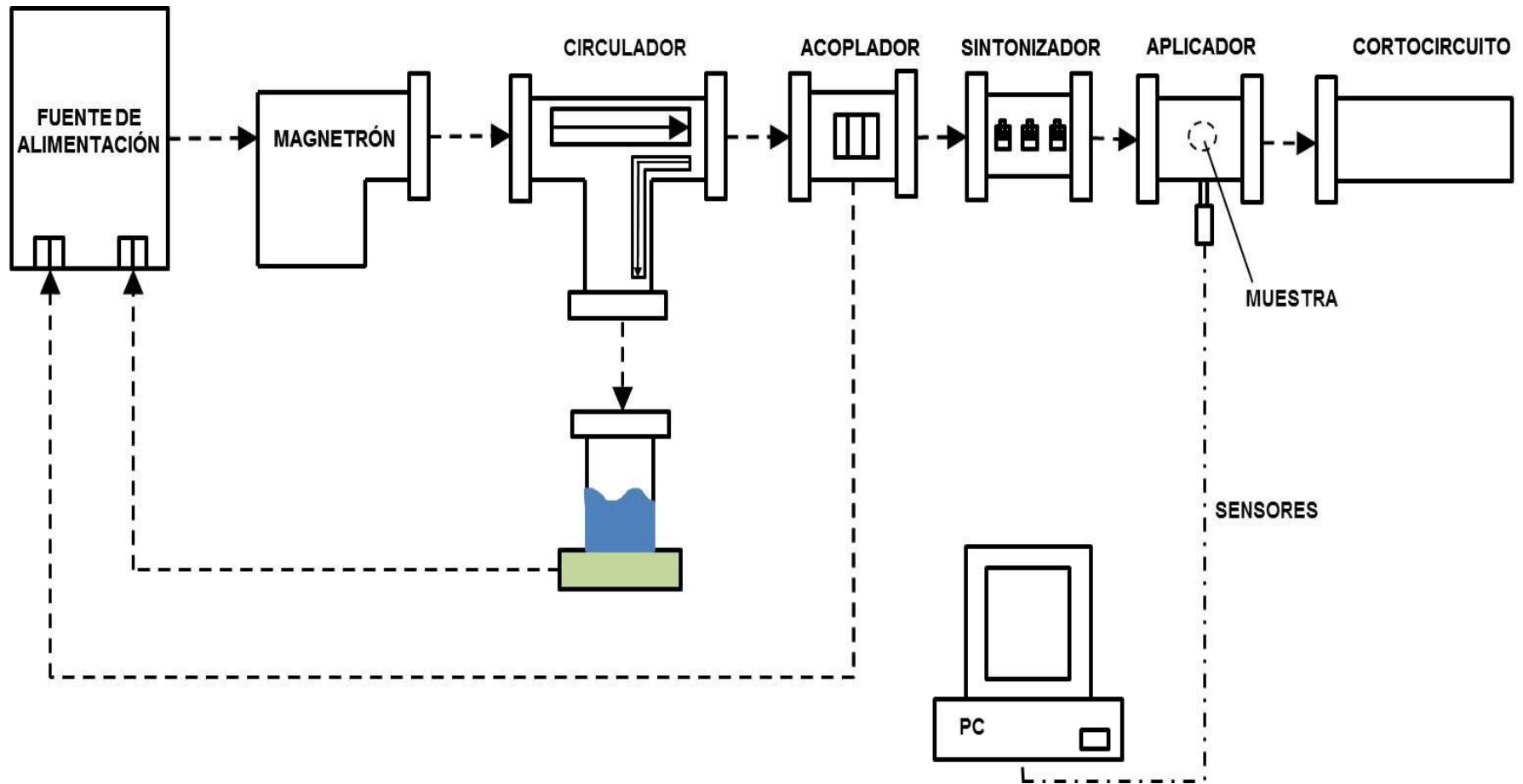
Teniendo en cuenta la **Figura 2** que muestra el modelo convencional de recuperación de oro, la propuesta a grandes rasgos es introducir un nuevo paso como se ve en la **Figura 30**; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se irradiara a las muestras con microondas después de la trituración y molienda con el objetivo no solo de que el mineral original se fragmente para disminuir el consumo de energía mecánica sino que también se puedan llevar a cabo reacciones químicas que faciliten la liberación del mineral presente en las muestras.

Figura 30. Diagrama de flujo del proceso para extracción de oro modificado.



Fuente: Autores.

Figura 32. Esquema de aplicador como guía de onda



. Fuente: Autores

5.5. ESTUDIO DE SEGURIDAD

Las nuevas tecnologías que utilizan campos electromagnéticos (CEM), ofrecen a la humanidad inmensos beneficios. Además de emplearse en la transmisión de energía eléctrica, las telecomunicaciones y en equipos industriales, médicos y electrodomésticos, los CEM tienen otras y muy diversas aplicaciones. El tratamiento de alimentos, productos de manufactura como el caucho y la minería para recuperación de pequeñas trazas de minerales preciosos, con microondas.

Sin embargo un aspecto importante trata del análisis de seguridad para el tratamiento con este tipo de radiación. Algunos países de Latinoamérica cuentan con normas específicas basadas en las recomendaciones internacionales. Para el caso de Colombia, se encuentra la norma UIT-T K-52 del año 2002 y está orientada sobre el cumplimiento de los límites de exposición a los campos electromagnéticos [31].

En el desarrollo de este informe, la radiación ionizante de microondas (300 MHz y 30 GHz) está catalogada como una muy alta frecuencia cuyos efectos térmicos sobre una persona pueden aparecer inmediatamente o a largo plazo. Entre los problemas térmicos más graves se encuentran:

- Hipertermia
- Quemaduras
- Cataratas
- Esterilidad

Los no térmicos:

- Transformaciones celulares, cromosómicas y genéticas
- Efectos sobre el sistema hematopoyético
- Cambios en el ritmo cardíaco y de la tensión arterial
- Alteraciones endocrinas y neuro-endocrinas
- Efectos sobre la audición
- Variaciones en el comportamiento de los individuos
- Alteraciones electroencefalográficas

Ante los múltiples efectos para la salud que provocan las emisiones microondas (MO), es aconsejable actuar según los principios de limitación prudente y de exposición, según la **Tabla 10**.

Tabla 10. Límites de exposición a las ondas electromagnéticas (ICNIRP)

Tipo de exposición	Gama de Frecuencias	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Intensidad de campo magnético (A/m)	Densidad de potencia de onda plana equivalente Seq(W/m ²)
Ocupacional	Hasta 1Hz	-	$2 * 10^5$	-
	1-8 Hz	20000	$2 * 10^5 / f^2$	-
	8-25 Hz	20000	$2 * 10^5 / f$	-
	0,025-0,82 KHz	500/f	20/f	-
	0,82-65 KHz	610	24,4	-
	0,065-1 MHz	610	1,6/f	-
	1-10 MHz	610/f	1,6/f	-
	10-400 MHz	61	0,16	10
	400-2000 MHz	$3f^{0.5}$	$0.008f^{0.5}$	f/40
	2-300 GHz	137	0,36	50

Fuente: Tomada de [31].

Nota 1: f es la frecuencia en hertzios.

Nota 2: ICNIRP. Comisión de protección a la energía no ionizante

5.5.1 Equipo de diseño por seguridad:

Para fabricar cualquier equipo que emita microondas es necesario que cumpla con las normas establecidas. A continuación se describen las características para realizar el diseño del equipo que cumpla con los estándares y garantice la seguridad del operario.

- **Supresión de Fugas de Microondas:** Cuando se genera energía microondas de alta potencia, esta debe ser contenida dentro del sistema de procesamiento. Esto con el objetivo de evitar fugas y cumplir con las normas de seguridad. Ningún sistema de procesamiento con microondas puede estar completamente aislado, pues este obviamente requiere de un orificio de entrada y uno de salida.

Dependiendo de la geometría del material, los medios para supresión de fugas de microondas se catalogan en dos tipos: reactivos o disipativos; En cualquiera de los dos casos, la energía de las microondas se atenúa debido a que pasa por los orificios, los cuales deben ser diseñados precisamente para mantener la energía en los niveles permitidos.

- **Dispositivos de interrupción por seguridad:** Este tipo de dispositivos son generalmente mecánicos y/o eléctricos. En el caso de sistemas de tratamiento de microondas, generalmente se usan para interrumpir el funcionamiento del generador de microondas si llegara haber un exceso de emisión de microondas. Un ejemplo de esto son las bridas de las guías de onda, en estos lugares se pueden presentar pequeñas fugas (involuntarias) debido a la falta de mantenimiento o mal mantenimiento de los equipos.
- **Etiquetas de advertencia e indicadores visuales:** Por normas es un requisito que todos los dispositivos presenten etiquetas o indicadores visuales de advertencia, que adviertan a los operadores de un equipo si este posee elementos electromagnéticos, riesgo de radiación o si maneja altos voltajes.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, las etiquetas deben tener indicadores tales como: la naturaleza del peligro, las consecuencias de

exposición a este peligro y las medidas necesarias para prevenir estos mismos. También son requeridos indicadores claramente visibles que alerten que los equipos estén en funcionamiento.

6. COTIZACION DEL EQUIPO ADECUADO PARA LA RECUPERACION DE MINERALES PRECIOSOS USANDO MICROONDAS

Como se mencionó anteriormente, un sistema de microondas típico consiste en un generador para producir microondas, una guía de onda para transportarla, un aplicador para poder manipularlas con un propósito determinado y un sistema de monitoreo que permita vigilar las variables de interés.

El trabajo que realiza un ingeniero electrónico consiste en seleccionar aquellos elementos que sean más adecuados para poner en práctica este tipo de calentamiento. Como punto de partida es necesario especificar la frecuencia de trabajo que para el modelo propuesto es de 2450 MHz. La guía de onda seleccionada fue con brida WR284, y se cotiza de acuerdo a la longitud deseada por el comprador. El espesor de las paredes no debe ser menor de 1.5 mm, según lo establecido en los estándares internacionales para esta frecuencia de trabajo. Las dimensiones internas deben ser 0.0864×0.0432 m y $\lambda_c = 0.1728$ m. Entre los otros elementos a considerar se encuentran: el circulador que como se menciono anteriormente protege al magnetón de los niveles excesivos de potencia reflejada. Para niveles de potencia por debajo de 2kW, su uso no es necesario. Para niveles entre 2 y 6Kw, se recomienda pero no es un requisito. Y para niveles por encima de 6kW, se convierte en un requisito obligatorio.

El acoplador direccional es un dispositivo usado como instrumento para medir la potencia reflejada o la potencia en ambas direcciones. Dependiendo del dispositivo escogido, hay que tener en cuenta que en algunos sistemas la fuente de poder o el circulador vienen equipados con instrumentos de medida y el acoplador no es necesario. La cavidad varia para cada esquema y el diseño será escogido para cada aplicación por lo cual su precio será variable.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la cotización ealizada para el modelo propuesto. Este modelo está configurado para desarrollar el calentamiento por microondas, empleando pequeñas muestras del material. Otros dispositivos como los sintonizadores, cargas de agua, y terminal de corto circuito fueron incluidos.

Como sistema de monitoreo se cotizó el *microwave workstation*, donde también se incluye un sensor de temperatura para realizar las mediciones en el aplicador. Ver

.

Figura 33. Cotización equipo Gerling (USA).


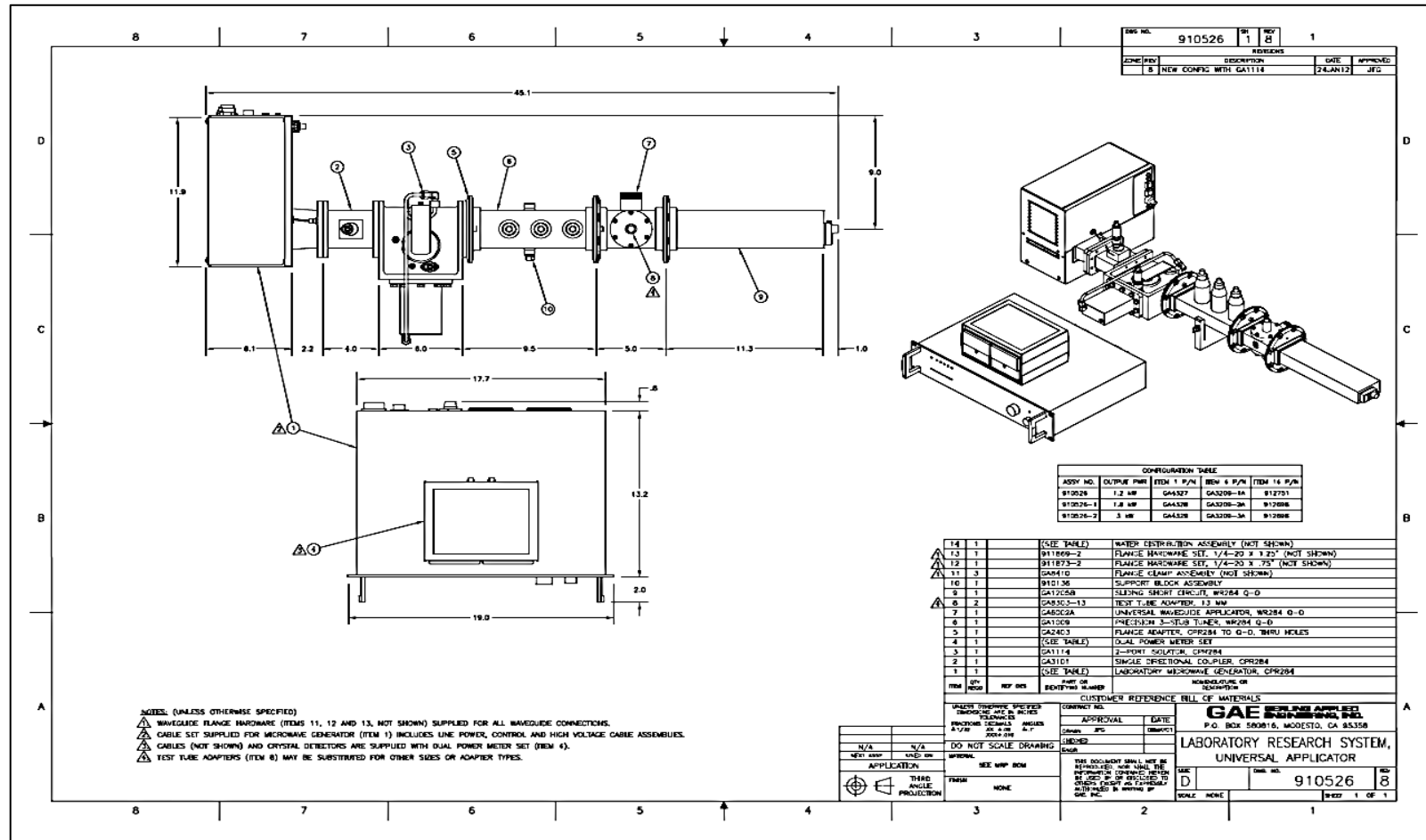
GERLING		GERLING APPLIED ENGINEERING, INC.		Please address purchase orders to: GAE, Inc. P.O. Box 580816 Modesto, CA 95358 Phone: 209-527-8960 Fax: 209-527-5385 Fed ID #: 77-0446517		QUOTATION					
TO: Industrial University of Santander Cra 27 street 9 Bucaramanga, Santander, Colombia Phone: +57-7-6344000		INCOTERMS: EXW		SALESPERSON: JF Gerling		CONTACT: Juan Sebastian Abril Benjumea		QUOTE NO: Q120404-1		DATE: 4-Apr-12	
PAYMENT TERMS: See notes		INCOTERMS: EXW		SALESPERSON: JF Gerling		CONTACT: Juan Sebastian Abril Benjumea		PHONE:			
ITEM	QTY	UNIT	GAE P/N	REV.	CUST P/N	REV.	DESCRIPTION	SHIP	UNIT PRICE	EXT. PRICE	
1	1	ea.	910526	8			1.2kW Laboratory Research System, Universal Applicator Includes the following components: 1.2kW Lab Microwave Generator, CPR284 Single Directional Coupler, CPR284 2-Port Isolator, 3kW, CPR284 Dual Power Meter Set, 1.2kW Scales Waveguide Flange Adapter, CPR284 to Q-D, Thur Holes Precision 3-Stub Tuner, WR284, Q-D Flange Universal Waveguide Applicator, WR284, Q-D Flange Test Tube Adapter, 13 mm Sliding Short Circuit, 3kW, WR284, Q-D Flange Support Block Assembly, WR284 Flange Clamp, Quick Release, 5" Flange Hardware Set, 1/4-20 x .75" Flange Hardware Set, 1/4-20 x 1.25" Water Distribution Assembly	8-10 wks ARO	\$18,536.00	\$18,536.00	
	1	ea.	GA4327								
	1	ea.	GA3101								
	1	ea.	GA1114								
	1	ea.	GA3209-1A								
	1	ea.	GA2403								
	1	ea.	GA1009								
	1	ea.	GA6002A								
	2	ea.	GA8303-13								
	1	ea.	GA1205B								
	1	ea.	910136								
	3	ea.	GA8410								
	1	ea.	911873-2								
	1	ea.	911869-2								
	1	ea.	912751								
2	1	ea.	GA3202				Microwave Leakage Detector, 2.45 GHz	4-5 wks ARO	\$1,300.00	\$1,300.00	
NOTES:							UNLESS OTHERWISE NOTED:				
Standard terms for international sales: 1) Accepted methods of payment include COD, credit card, bank check and wire transfer of funds. 2) Full payment must be received prior to shipment. 3) For orders greater than \$20K, 50% of order amount must be received prior to order acceptance.							All prices quoted are in US dollars. Shipping charges, taxes and duties are not included and are the buyer's responsibility. Availability is subject to prior sale. Payment to be made in US dollars. Our standard warranty covering materials and workmanship for a period of one (1) year after delivery applies to all new products sold, except magnetrons (contact GAE for more information on magnetron warranties). Services rendered are warranted for ninety (90) days. Other sales and warranty terms according to our Standard Terms and Conditions of Sale may also apply. All orders for non-stock items are non-cancelable, non-returnable. A copy of GAE's Standard Terms and Conditions of Sale may be obtained by contacting GAE directly or by downloading from our web site at www.2450mhz.com .				
BY:  (Authorized Sales Representative)											

Figura 34 Planos del equipo necesario para le recuperación de oro con microondas.



Fuente: Gerling Applied Engineering, INC.

Figura 35. Cotización banco de trabajo para medición de variables en un sistema microondas.


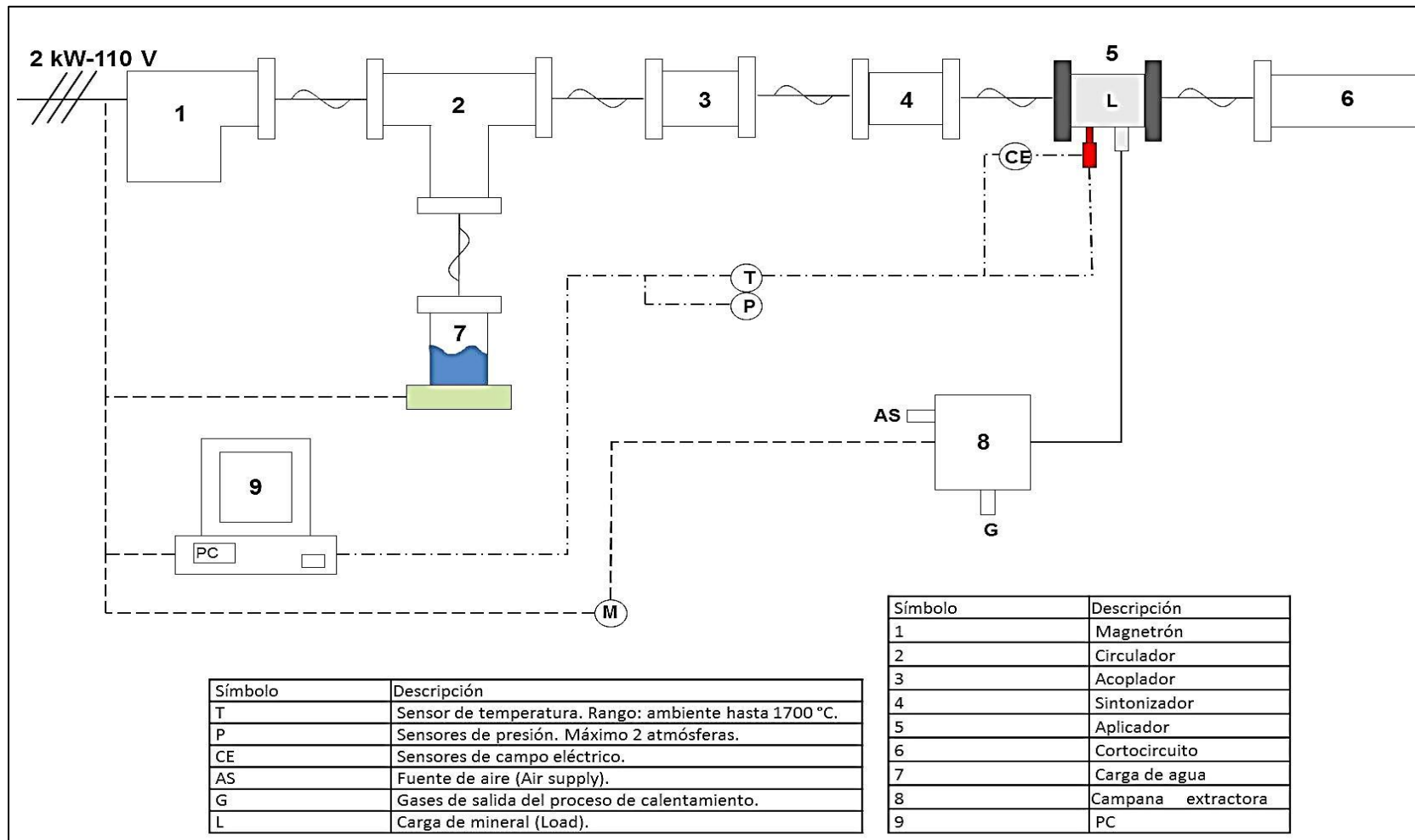
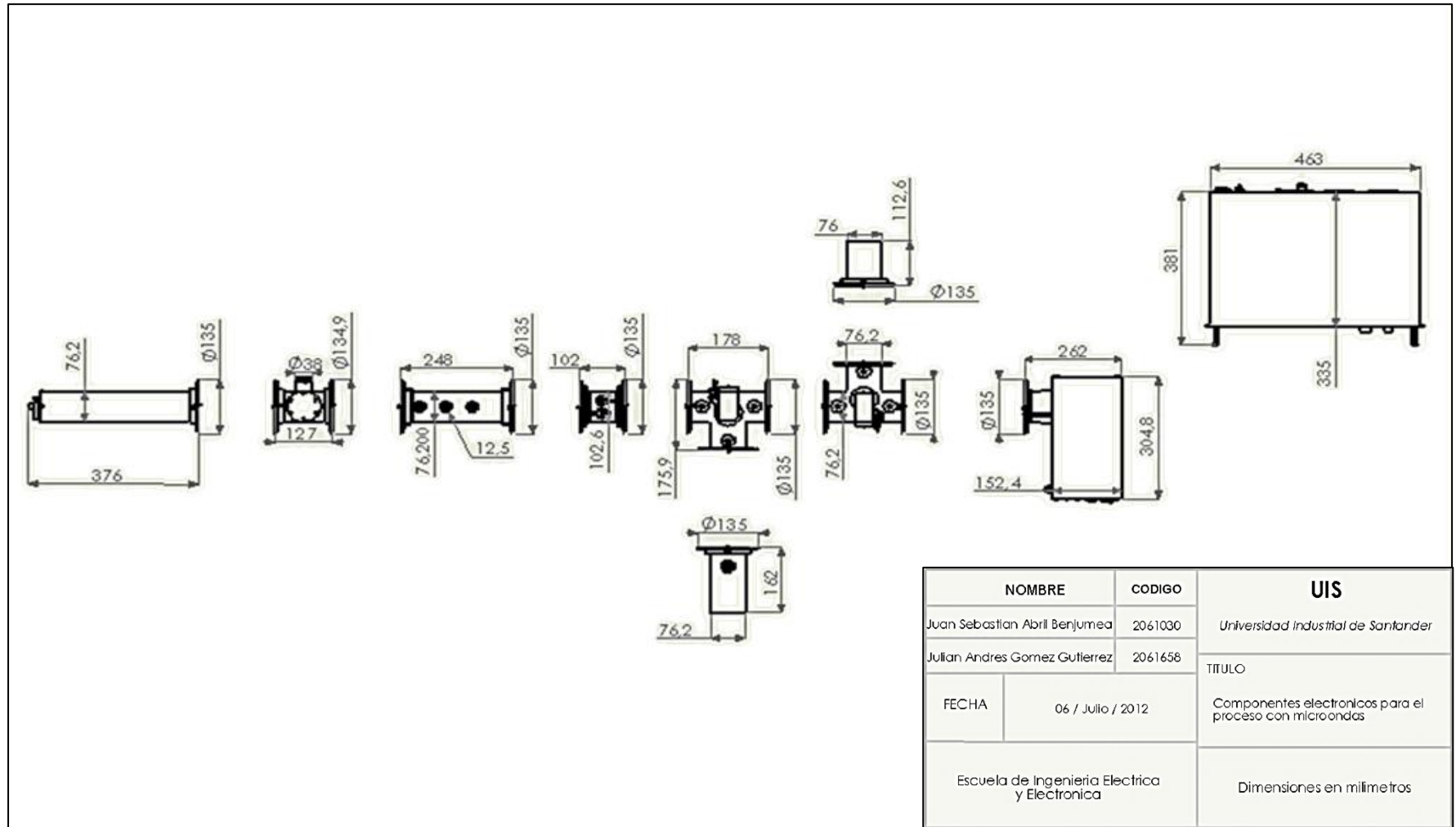
 Fiber Optic Sensors and Solutions		FISO Technologies Inc. Phone : +(418) 688-8066 FAX : +(418) 688-8067 sales@fiso.com http://www.fiso.com					
Bill to Address Universidad Industrial de Santander Contact: Tel: Fax:		Ship to Address Universidad Industrial de Santander Cra. 27 Cl. 9 Bucaramanga, Santander 680002 Colombia Contact: JUAN SEBASTIAN ABRIL BENJUMEA Tel: Fax:					
Delivery Date	Quotation Date	Expiration Date	QUOTATION NO: JA-00583				
6 to 8 weeks ARO	4/11/2012	30 Days					
Reference Number	Customer No.	Salesperson ID	Shipping Method	Payment Terms	Currency		
	DE SANTAND	Jean Audet	NOT INCLUDED	Net 30	USD		
#	Item Number	Description	Quantity	Unit	Unit Price	Discount	Total Price
1	FOT-L-SD-C1-F1-M2-R1-ST	Fiber Optic Temperature sensor; Range of +40 °C to 300 °C; 30 mm standard tip; PTFE cable with 1 mm O.D.; 50 µm fiber; 2 meters; Precision of +/- 1 °C; ST connector.	10	EA	330.00	0.00	3,300.00
2	MWO-8-EU	8-channel Microwave Workstation for food product development; Includes an 8-channel OGR System; 20 Hz sampling rate; 150 ms switching time between each channel; integrated data logger (stores 50 000 samples); RS-232 communication and control port for control of OGR System functions; Includes FISO WORKSTATION COMMANDER software compatible Windows XP, Vista, Windows 7; ST connectors; Microwave Oven 230 to 240 V, 50 Hz maximum output power 1100 watts (IEC-60705). (Microwave Oven Not controlled by software).	1	EA	14,255.00	0.00	14,255.00
Should you have any questions, please contact Jean Audet at 418-688-9510 ext. 2225 or at jean.audet@fiso.com Please send your Purchase Order by e-mail, to: Josee.Blais@fiso.com or by fax to: (418) 688-8067						Subtotal	17 555,00
						GST Tax	
						PST Tax	
						Discount	0.00
						Total	17 555,00
Approved by: _____						Page	1/1
- FCA Factory (Incoterms 2010). - Terms of payments: VISA/MasterCard or Net 30 days (penalty 1,5% per month, 18% per year). - Sale subject to approval by credit department. - All taxes and duties are extra.							

Figura 36. P&ID del proceso de recuperación de oro vía microondas



Fuente: autores.

Figura 37. Plano del equipo propuesto para recuperación de oro



Fuente: Autores

7. CONCLUSIONES

1. Se cumplió con todos los objetivos propuestos en el plan de trabajo de grado.
2. Se planteó una metodología experimental que describe los pasos para la implementación de un sistema microondas de recuperación de oro a nivel de laboratorio y planta piloto utilizando una guía de onda como aplicador para lograr una distribución de campo eléctrico más uniforme que permita calentar de forma más rápida y eficiente el material.
3. La recuperación de materiales preciosos basada en el calentamiento por microondas puede llegar a ser un proceso económicamente viable (según lo encontrado en el barrido bibliográfico realizado), ya que además de ofrecer un porcentaje de recuperación similar al logrado con métodos convencionales, factores como el tiempo de procesamiento y consumo de energía son reducidos. Por tanto, es recomendable realizar un análisis económico profundo, donde se consideren estos aspectos y otros elementos adicionales como costos de mantenimiento, tiempos de parada e inversión inicial, entre otros.
4. Se recopiló un vocabulario técnico y se creó un sitio web (wiki), al que podrán acceder científicos, estudiantes y/u operarios que requieran una documentación relacionada con la generación y transporte de microondas, que sirva como punto de partida para la implementación de esta técnica de calentamiento asistido para la recuperación de oro, además dicha wiki puede ser modificada por terceros, y de igual manera es posible agregar información relevante que no esté actualmente incluida.

5. Para la implementación de la técnica de recuperación de oro asistida con microondas se revisó la recomendación UIT-T K.52 de Colombia para informar sobre los riesgos que puede causar este tipo de energía no ionizante sobre las personas (daños físicos) y sobre los demás equipos (interferencias), cumpliendo así con las normas básicas para un buen desempeño y viabilidad de este proceso de calentamiento en la recuperación del mineral precioso.

6. Modelar las interacciones electromagnéticas es importante para el proceso de diseño de sistemas asistidos con microondas. Por este motivo la simulación puede utilizarse para optimizar el diseño del aplicador y reducir los costos de implementación física de las guías de onda. Estos modelos por computador proporcionan diferentes análisis en cuanto al comportamiento del material dentro de la guía de onda, y sirven como punto de partida para verificar que los resultados son coherentes con la orientación de los campos eléctricos y magnéticos en modo el modo fundamental TE_{10} .

7. La comprensión del valor de las constantes dieléctricas es crucial para la simulación y modelado de las variaciones de temperatura en el material cuando se simula una cavidad rectangular. El software COMSOL, permite determinar que existe una distribución de máximo campo eléctrico en ciertos puntos debido a la superposición de modos, lo cual implica que haya puntos calientes que irradian de forma irregular al material contenido dentro del horno y por consiguiente un calentamiento inadecuado.

8. RECOMENDACIONES

1. Realizar un barrido bibliográfico profundo que estudie la recuperación de otros minerales preciosos para complementar los ya considerados. Adicionalmente, verificar la viabilidad económica, ambiental y energética, de implementar este tipo de tecnología, inicialmente a nivel de planta piloto, y posteriormente a escala industrial.
2. Para grupos de trabajo especializados en el calentamiento por microondas, se les recomienda plantear modelos pieza a pieza adicionales, para la recuperación y procesamiento de otros materiales, que a nivel industrial han tenido gran acogida por sus beneficios económicos con la implantación de esta técnica (e.g tratamiento y soldadura de materiales plásticos, calentamiento de fibras textiles, secado y tratamiento de madera, vulcanización del caucho y fabricación de papel).
3. Conformar un grupo de trabajo multidisciplinario con el fin de buscar una interacción adecuada entre investigadores, ingenieros metalúrgicos, químicos e ingenieros electrónicos, que permita complementar los resultados alcanzados durante esta investigación.
4. Aprovechar la creación de un sitio web (Wiki http://es.fdccm.wikia.com/wiki/Wiki_Fdccm) para que investigadores, operarios o estudiantes interesados en el calentamiento con microondas tengan un punto de partida y, adicionalmente, puedan aportar información que lo enriquezca.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGUIRRE, R. D. W., INTERACCIÓN DE LAS MICROONDAS CON TRAZAS DE ORO EN MUESTRAS PROVENIENTES DEL MUNICIPIO DE VETAS (SANTANDER), UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2012.
- [2] KASSINGER, R., LA FIEBRE DEL ORO, 2009. [Online]. Available: [HTTP://magma.nationalgeographic.com/NGEXPLORER/0901/AX/PA_SPANISH.PDF](http://magma.nationalgeographic.com/NGEXPLORER/0901/AX/PA_SPANISH.PDF).
- [3] ÁLVAREZ, R. R., APROXIMACIÓN A LA EVOLUCIÓN METALOGÉNICA Y AFINIDAD AL MODELO DE ORO OROGÉNICO DE LOS DEPÓSITOS MINERALES DEL SECTOR NORTE DE LA CORDILLERA CENTRAL DE COLOMBIA., 2007. [Online]. Available: [HTTP://www.unalmed.edu.co/RRODRIGUEZ/ORO-OROGENICO-COLOMBIA.PDF](http://www.unalmed.edu.co/RRODRIGUEZ/ORO-OROGENICO-COLOMBIA.PDF).
- [4] PIMENTEL, N., ¿QUÉ ES EL ORO?. SEMINARIO PARA PERIODISTAS SOBRE EL ORO. p. 30, 2010.
- [5] BARILOCHE, P. S. C. D., LA MINERÍA DEL ORO A CIELO ABIERTO UTILIZANDO LA LIXIVIACIÓN CON CIANURO, 2004. [Online]. Available: http://www.incasur.org/0nuevo/noticias/documentos/doc261_2.pdf.
- [6] GAIA, G. D. I. E. G. Y. M. A., CLASE 14-MINERALES PRECIOSOS. [Online]. Available: <http://gaia.udea.edu.co/recurso/Clase14-MineralesPreciosos.pdf>.
- [7] CARRE, E. W., BENEFICIAR MINERALES AURÍFEROS EN LA PEQUEÑA MINERÍA DE VETAS Y CALIFORNIA (SANTANDER) BUSCANDO REDUCIR VERTIMIENTOS DE MERCURIO Y CIANURO ., 2005.

- [8] GÓMEZ, M. F. D. N. M. R., USO DE LAS MICROONDAS EN EL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE TRAZAS DE ORO, UNDERGRADUATE THESIS, 2011.
- [9] CEMOS, G. DE INVESTIGACION, CALENTAMIENTO VOLUMÉTRICO DE NANOLECHOS PARA LA RECUPERACIÓN DE TRAZAS DE METALES PRECIOSOS PRESENTES EN MINERALES Y SUS COLAS. CASO DE ESTUDIO: INDUSTRIA AURÍFERA DE SANTANDER, 18, 2010.
- [10] BARRIOS, E. and BARRIOS, D., Ingeniería Conceptual de un Proceso de Fabricación de un Material Vía Microondas (2450 MHz), Undergraduate Thesis, Universidad Industrial de Santander, 2009.
- [11] ESTEBAN, D., BEJARANO, B., MAURICIO, S., CAÑIZARES, G., MAURICIO, Y., and QUINTERO, R., IRRADIACIÓN CON MICROONDAS A MINERALES RICOS EN ORO EN MUESTRAS PROVENIENTES DE LA ZONA DEL SUR DEL BOLÍVAR, UNDERGRADUATE THESIS, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2012.
- [12] KUBEL, E. and HEATING, I., ADVANCEMENTS IN MICROWAVE HEATING, Industrial Heating, January, 43–53, 2005.
- [13] ASTIGARRA URQUIZA, J. and ASTIGARRA AGUIRRE, J., HORNOS DE ALTA FRECUENCIA Y MICROONDAS. McGraw-Hill, ESPAÑA, 1995.
- [14] ESKILSSON, C. S. and BJÖRKLUND, E., ANALYTICAL-SCALE MICROWAVE-ASSISTED EXTRACTION, Journal of chromatography. A, 902, 1, 24, Dec. 2000.
- [15] GARIB, J. A. A., PROCESAMIENTO DE MATERIALES POR MEDIO DE MICROONDAS EN LA FIME, IV, 13, 32–39, 2001.

- [16] GAVIRIA C., A. C., GONZÁLEZ, J., and MORA, H. F., TOSTACIÓN, EMPLEANDO MICROONDAS, EN MENAS REFRACTARIAS AURÍFERAS Y SU EFECTO EN LA EXTRACCIÓN DEL ORO, 29–37, 2006.
- [17] AMANKWAH, R. K. and PICKLES, C. A., MICROWAVE ROASTING OF A CARBONACEOUS SULPHIDIC GOLD CONCENTRATE, MINERALS ENGINEERING, 22, 13, 1095–1101, Oct. 2009.
- [18] AMANKWAH, R. K., PICKLES, C. A., and YEN, W.-T., GOLD RECOVERY BY MICROWAVE AUGMENTED ASHING OF WASTE ACTIVATED, MINERALS ENGINEERING, 18, 5, 517–526, Apr. 2005.
- [19] MEREDITH, R., ENGINEERS' HANDBOOK OF INDUSTRIAL MICROWAVE HEATING. THE INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS, LONDON, UNITED KINGDOM, 1998.
- [20] ALFREDO, O. A. and GUILLERMO, R., ESTRUCTURACIÓN DE COSTOS: CONCEPTOS Y METODOLOGÍA ÍNDICE, 30, 2006.
- [21] BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA, REGLAMENTO DE USO Y SEGURIDAD PARA LOS LABORATORIOS DE CIENCIAS BÁSICAS. p. 12.
- [22] CABRERA VALVERDE, G., CONTROL DE CALIDAD Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA PARA INGENIEROS DE MANTENIMIENTO. 1991, p. 38.
- [23] REGIOMONTANA, U., ADMINISTRACIÓN DE LA SEGURIDAD Y CONTROL DE PERDIDAS, MANUAL DE EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL. p. 11.
- [24] MATERIALS, C. O. M. P. O., MICROWAVE PROCESSING OF MATERIALS. NATIONAL ACADEMY PRESS, WASHINGTON, D.C, 1994.

- [25] PHILIPS, E., CIRCULATORS AND ISOLATORS , UNIQUE PASSIVE DEVICES, APPLICATION NOTE. p. 31, 1998.
- [26] SAIREM, WATER COOLED DUMMY LOAD REF. CAPWR340MR, DATASHEET, *Water*, Vol. 33, no. 0. SAIREM, p. 1.
- [27] ESPAÑA, S., ACOPLADORES DIRECCIONALES, 2008. [Online]. Available: [HTTP://es.scribd.com/DOC/55818027/ACOPLADOR-DIRECCIONAL-FINAL-9-3-08](http://es.scribd.com/DOC/55818027/ACOPLADOR-DIRECCIONAL-FINAL-9-3-08).
- [28] TORRES, O. M. R., ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE MICROONDAS EN OPERACIONES DE PARCHEO DE PAVIMENTOS, MASTER THESIS, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2005.
- [29] TECHNOLOGIES, F., MWS MICROWAVE WORK STATION, DATASHEET. 2006.
- [30] EMPRESAS, D. D. O. D., EL PROCESO PRODUCTIVO. DISEÑO DE SISTEMAS PRODUCTIVOS Y LOGÍSTICOS. p. 44, 2005.
- [31] TELECOMUNICACIONES, U. I. D., ORIENTACIÓN SOBRE EL CUMPLIMIENTO DE LOS LÍMITES DE EXPOSICIÓN DE LAS PERSONAS A LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS., 52, 2000.

ANEXO A.

Especificaciones técnicas de los equipos

Magnetron Power Supply

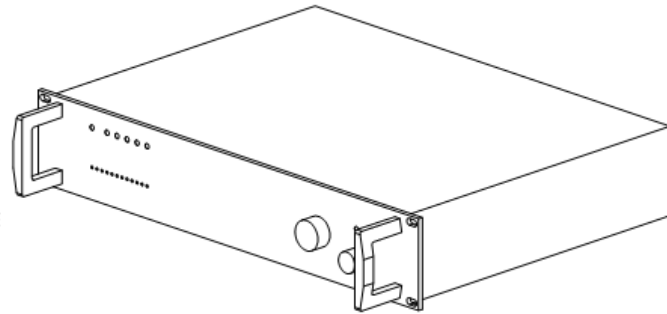
GERLING

Model GA4104A
Model GA4105A

The GA410x series Magnetron Power Supplies utilize state-of-the-art inverter technology to provide high performance in a very compact and light weight package. When used with the GAE model GA400x series Magnetron Heads, these units make up a complete microwave power generation system ideal for laboratory or production system applications.

Front panel controls include a main power switch and power level control dial, while indicators include system and HV enable, output power level, and interlock status. Remote analog controls include HV enable, output power adjust, anode current sense and external interlock.

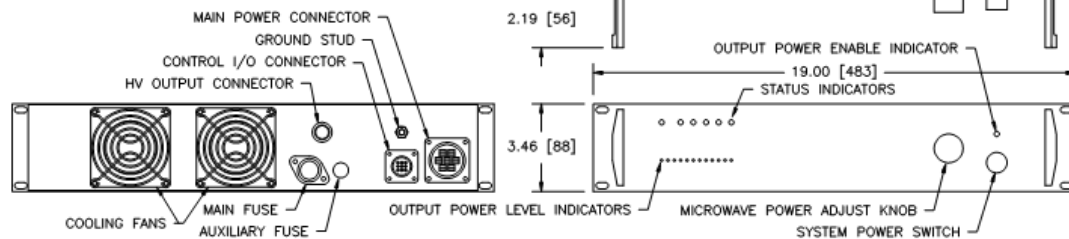
Cables are provided for connecting line power to the GA410x and control and HV signals to the magnetron head. Contact GAE for more detailed technical specifications.



General Specifications:

Mw Power (max)*	GA4104A: 1.2kW GA4105A: 1.8kW
Output Control	10-100%
Output Ripple	GA4104A: <4% of full power GA4105A: <5% of full power
Regulation	<1% for +/- 10% line voltage variation
Magnetron Head	GA4104A: GA4001A GA4105A: GA4002A
Line Voltage	180-265 VAC, 50/60 Hz, single phase
Line Current	GA4104A: 12 A @ 230 VAC GA4105A: 17.5 A @ 230 VAC
Cooling	Forced air by external fan
Weight	26 lb (12 kg)
Controls	System On/Off (rotary switch) Mw Power Adjust (10-turn Dial)
LED Indicators	System On (Green) HV Enabled (Green) Interlock Status (Red) Power Level (Amber)

* When used with GA400x series magnetron head



GERLING
GERLING APPLIED
ENGINEERING, INC.

© 2005-2007 Gerling Applied Engineering, Inc.
PO Box 580816 • Modesto, CA 95358 • USA
Phone: +1-209-527-8960 • Fax: +1-209-527-5385
E-mail: sales@2450MHz.com • Web: www.2450MHz.com

All dimensions are in inches [millimeters].

Updated 13AUG07

1.2kW Magnetron Head, WR284

GERLING

Model GA4001A

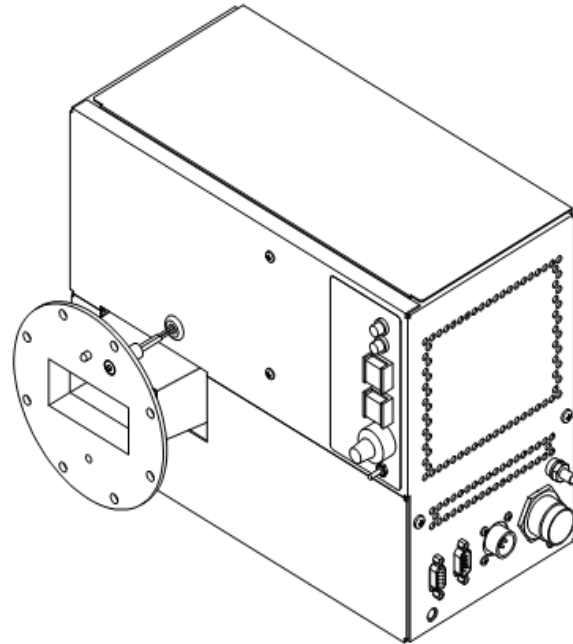
The GA4001A Magnetron Head is specially designed for use with the GA4104A Switch Mode Power Supply. Together with the line power and control cable set provided with the GA4104A, the system makes a complete microwave power generation ideal for laboratory or production system applications.

All controls necessary for local operation of the GA4104A power supply are provided in the GA4001A. Microwave output power can be adjusted at either unit or remotely via a fully functional remote control interface.

Serviceability of the GA4001A was a primary consideration in its design. Removal and replacement of the internal magnetron can be done in less than ten minutes using standard tools. The GA4001A utilizes a standard air-cooled magnetron that is readily available from multiple distributors.

A powder-coated steel enclosure provides rugged durability while multiple safety interlocks meet compliance requirements. Convenient mounting holes and brackets facilitate bench-top use or integration into process systems. The simplicity of the GA4001A also facilitates integration with almost any type of custom designed magnetron power supply. Optional features include alternate flange configurations, arc detection and custom (private) labeling and colors.

Model GA4001A features the popular WR284 Q-D (quick-disconnect) round flange that uses a convenient single screw clamp (GAE model GA8410) for waveguide connections.



General Specifications:

Output Power (max)	1.2kW
Magnetron	2M137-IL
Output Waveguide	WR284
Output Flange	UG584/U
Frequency	2450 MHz +/- 30 MHz
Cooling	Forced air by internal fan
Controls	Mw Start (pushbutton) Mw Stop (pushbutton) Mw Power Adjust (10-turn Dial) HV On (Red LED) Power Adjust Selector (toggle switch)
Interlocks	Waveguide flange; Access cover; Magnetron over-temperature

Mating Connectors (supplied):

High Voltage	Amp # 863022-1
Fan & Filament Power	Shell: AMP # 206060-1 Contact: AMP # 66105-4
Power Supply Control	Shell: AMP # 211399-1 Contact: AMP # 66105-4
Remote Control	Shell: AMP # 211400-1 Contact: AMP # 66103-4

Options:

- CPR284 or WR340 output flange
- Labeling/colors
- Custom cable sets



GERLING APPLIED
ENGINEERING, INC.

© 2006 Gerling Applied Engineering, Inc.
PO Box 580816 • Modesto, CA 95358 • USA
Phone: +1-209-527-8960 • Fax: +1-209-527-5385
E-mail: sales@2450MHz.com • Web: www.2450MHz.com

All dimensions are in inches [millimeters].

Updated 20JAN06

3-Port Circulator, WR284

GERLING

Model GA1105B

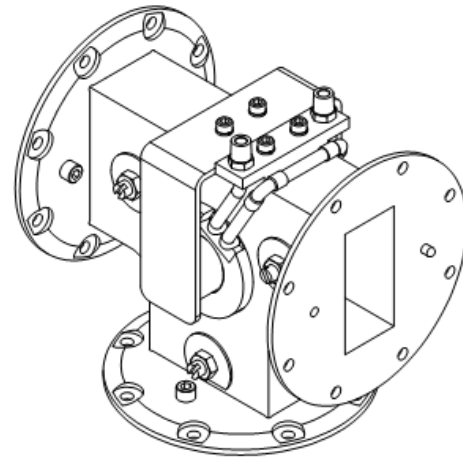
The model GA1105B 3-port circulator is designed for high power industrial heating applications requiring high reliability and rugged construction. These circulators are most often used with dummy loads in an isolator configuration for magnetron protection, but they are also useful in applications where the microwave power is to be diverted in different directions.

Construction of the GA1105B is all dip brazed aluminum waveguide. Corrosion due to harsh cooling water supplies is minimized using all copper water lines and brass fittings.

Model GA1105B features the popular WR284 Q-D (quick-disconnect) round flange that uses the convenient single screw clamp (model GA8410) for waveguide connections.

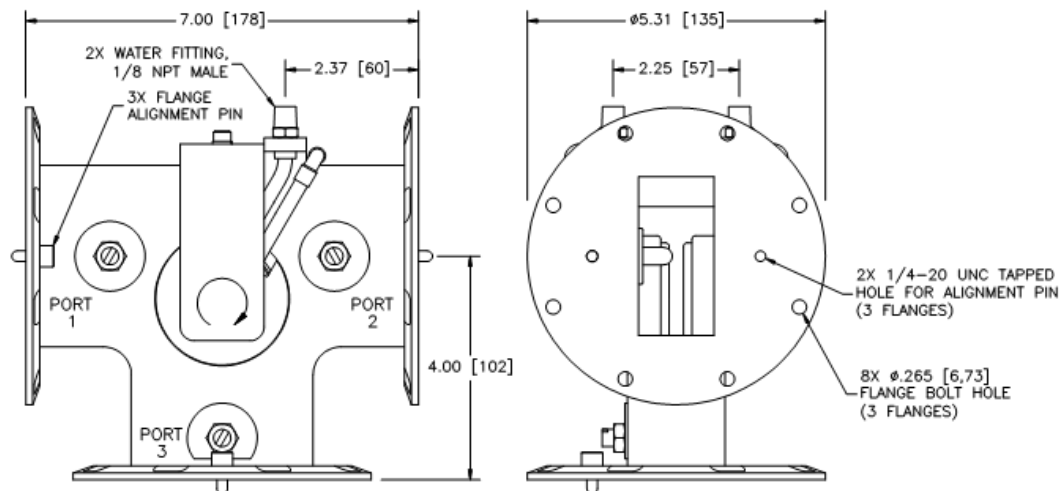
General Specifications:

Frequency	2450 MHz nominal
Input Power	3 kW continuous max. (fwd and rev)
Waveguide	WR284 (RG75/U)
Input Flange	Q-D Round (UG584/U compatible)
Input VSWR	1.1 max. (Port 1)
Insertion Loss	0.15 dB max. (Port 1 to Port 2)
Isolation	20 dB min. (Port 2 to Port 1)
Water Connections	1/8 NPT Male
Water Flow	0.5 gpm min., 70 psi max. inlet pressure, 50°C max. inlet temp (dew point minimum inlet temp)
Construction	Dip brazed aluminum, brass water connections
Finish	Clear chemical film, black paint



Options:

- Flange interlock switch (any flange)
- Water connection fittings (various types available)
- Port 3 coupler probe



GERLING
GERLING APPLIED
ENGINEERING, INC.

All dimensions are in inches [millimeters].

© 2003-2006 Gerling Applied Engineering, Inc.
PO Box 580816 • Modesto, CA 95358 • USA
Phone: +1-209-527-8960 • Fax: +1-209-527-5385
E-mail: sales@2450MHz.com • Web: www.2450MHz.com

Updated 19JUN07

High Power Dummy Load, WR284

GERLING

Model GA1201
Model GA1204

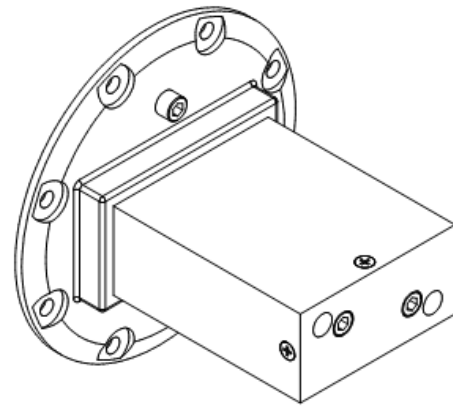
GAE's popular line of high power and compact dummy loads have the highest ratio of power capacity to size of any commercially available load. These loads are most often used with circulators in an isolator configuration, but they are also useful as phantom loads for testing and calibration as well as traveling wave and variable Q applicators.

As with all GAE dummy loads, models GA1201 and GA1204 use water as the absorptive medium in a polyethylene insert to provide excellent performance and long life at up to 3kW continuous input power. The naval brass water connections minimize corrosion from harsh water supplies to further enhance reliability and life.

Model GA1204 features the popular WR284 Q-D (quick-disconnect) round flange that uses a single screw clamp for waveguide connections.

General Specifications:

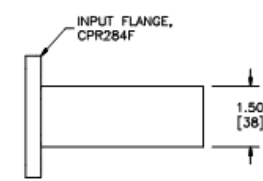
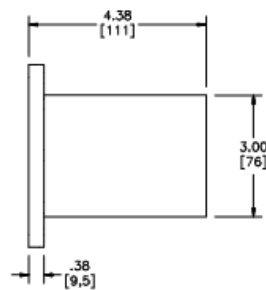
Frequency	2450 MHz nominal
Input Power	3 kW continuous max.
Waveguide	WR284 (RG75/U)
Input Flange	GA1201: CPR (UG1725/U) GA1204: Q-D Round (UG584/U)
Return Loss	20 dB min. @ 2450 MHz
Water Connections	1/8 NPT Female
Water Flow	1.0 gpm nominal, 70 psi max. inlet pressure
Construction	Dip brazed aluminum, brass water connections
Finish	Clear chemical film, black paint



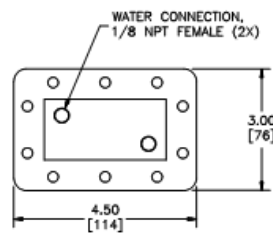
Model GA1204

Options:

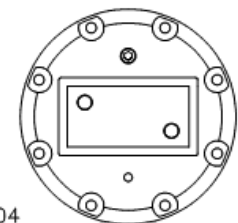
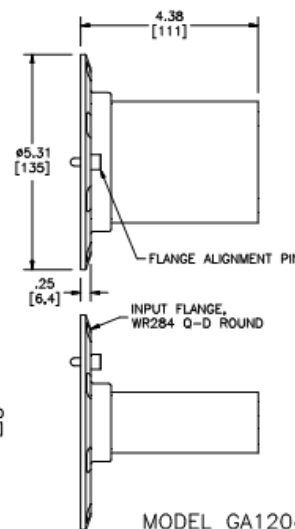
- Heli-Coils or studs on flange (any combination)
- Flange interlock switch
- Water connection fittings (various types available)



MODEL GA1201



MODEL GA1204



GERLING APPLIED ENGINEERING, INC.

© 2007 Gerling Applied Engineering, Inc.
PO Box 580816 • Modesto, CA 95358 • USA
Phone: +1-209-527-8960 • Fax: +1-209-527-5385
E-mail: sales@2450MHz.com • Web: www.2450MHz.com

All dimensions are in inches [millimeters].

Updated 19APR07

Dummy Load w/Power Reflector, WR284

GERLING

Model GA1213
Model GA1214

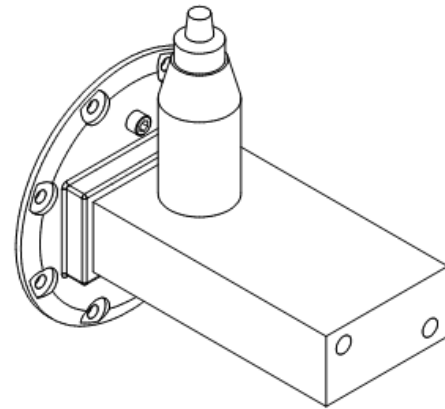
GAE has combined its compact dummy load with a precision power reflecting stub into a single waveguide component to provide variable return loss load for high power heating applications. This unique component is intended for situations requiring controlled variability of VSWR or variable power delivery using fixed output microwave generators.

Both models GA1213 and GA1214 use water as the absorptive medium in a polyethylene insert and naval brass water connections. A precision drive mechanism and locking multi-turn dial provide highly accurate and repeatable adjustment of the reflection.

Model GA1204 features the popular WR284 Q-D (quick-disconnect) round flange that uses a single screw clamp for waveguide connections.

General Specifications:

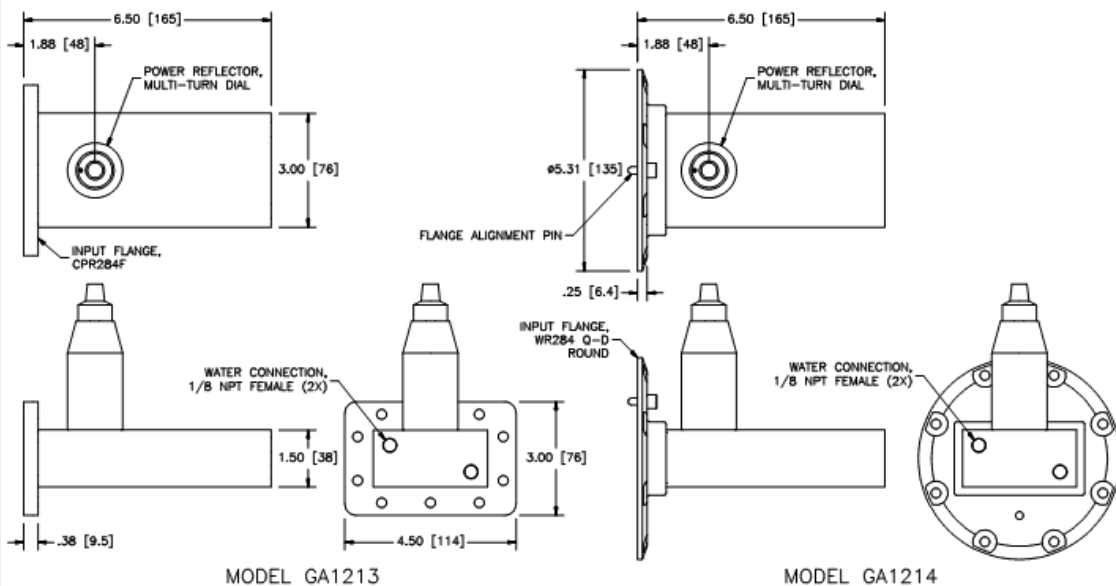
Frequency	2450 MHz nominal
Input Power	3 kW continuous max.
Waveguide	WR284 (RG75/U)
Input Flange	GA1213: CPR (UG1725/U) GA1214: Q-D Round (UG584/U)
Return Loss	6 to 23 dB
Water Connections	1/8 NPT Female
Water Flow	0.5 gpm min. at full input power, 70 psi max., 50°C max.
Finish	Clear chemical film, black paint



Model GA1214

Options:

- Heli-Coils or studs on flange (any combination)
- Flange interlock switch
- Water connection fittings (various types available)



GERLING
GERLING APPLIED
ENGINEERING, INC.

© 2003 Gerling Applied Engineering, Inc.
 PO Box 580816 • Modesto, CA 95358 • USA
 Phone: +1-209-527-8960 • Fax: +1-209-527-5385
 E-mail: sales@2450MHz.com • Web: www.2450MHz.com

All dimensions are in inches [millimeters].

Updated 05JUN01

Dual Power Monitor, WR284

GERLING

Model GA3004

The model GA3004 Dual Power Monitors provide a low cost and convenient means to measure the level of microwave power flowing in both directions in WR284 waveguide. Microwave power is displayed by large analog meters enclosed in an attractive case suitable for both laboratory and industrial applications.

The heart of the GA3004 is the model GA3104 Dual Directional Coupler, part of the compact, high performance WaveProbe™ family of waveguide couplers. Crystal detectors convert the coupler output RF signals to DC voltages which are delivered to the analog meters via RG-58/U coaxial cables.

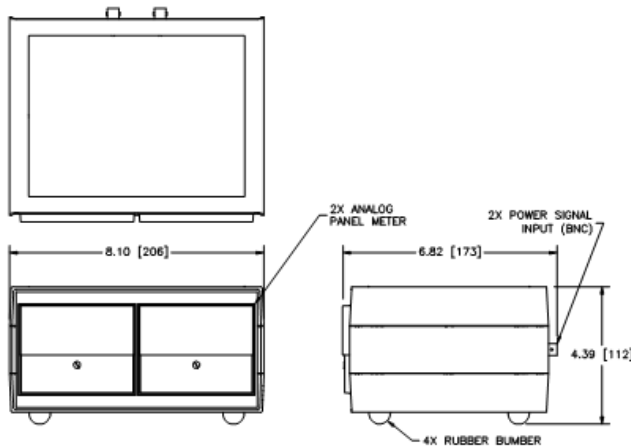
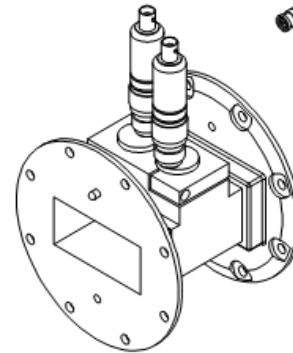
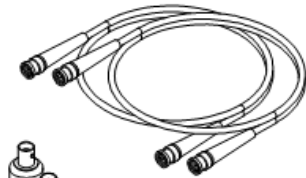
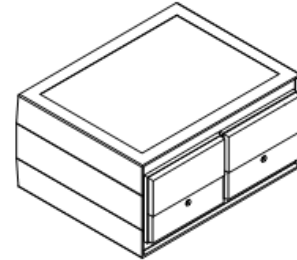
The waveguide coupler features the popular Q-D (quick-disconnect) round flange that uses a single screw clamp (Model GA8410) for waveguide connections.

Specifications:

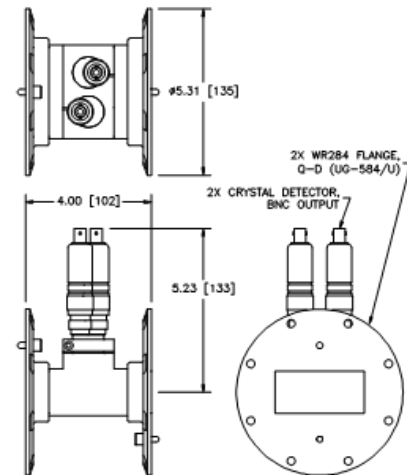
Waveguide	WR284
Flange	Q-D Round (UG584/U)
Frequency	2450 MHz +/- 50 MHz
Power (continuous)	6 kW maximum
Meter Scale (both)	GA3004-1A: 1.2 kW; GA3004-2A: 1.8 kW GA3004-3A: 3 kW; GA3004-4A: 700 W GA3004-6: 6 kW
Accuracy	+/- 5% of full scale @ 25°C
Coupler Directivity	25 dB minimum
Cables	RG-58/U, BNC male connectors, 6' long

Options:

- Alternate meter scales
- Alternate flange-flange length (4" minimum)
- Flange interlock switches



DUAL METER CASE



DUAL DIRECTIONAL WAVEGUIDE COUPLER

GERLING APPLIED ENGINEERING, INC.

© 2004-2009 Gerling Applied Engineering, Inc.
PO Box 580816 • Modesto, CA 95358 • USA
Phone: +1-209-527-8960 • Fax: +1-209-527-5385
E-mail: sales@2450MHz.com • Web: www.2450MHz.com

All dimensions are in inches [millimeters].

Updated 22OCT09

Precision 3-Stub Tuner, WR284

GERLING

Model GA1009

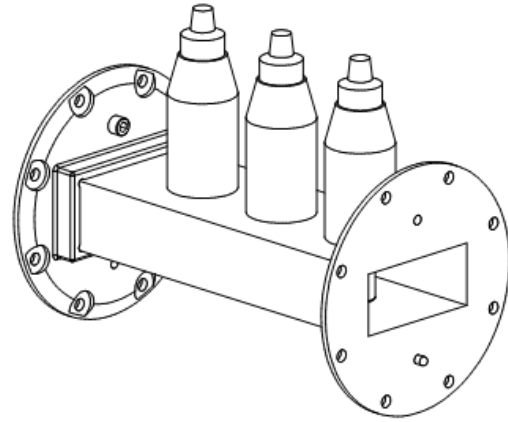
GAE's family of Precision 3-Stub Tuners are designed for load impedance matching in high power microwave heating systems. Their simple yet rugged design makes these tuners ideal for a variety of laboratory, production and OEM applications.

The stubs are spaced at $1/4$ guide wavelength intervals and offset $1/16$ guide wavelength from center. This configuration is capable of tuning a broader range of impedances than standard tuners having no offset.

A precision drive mechanism and locking multi-turn dial are provided on each tuning stub enabling highly accurate and repeatable tuning. The stub housings are designed with $1/4$ -wave reactive chokes allowing use in high "Q" applications. Model GA1009 also features the popular WR284 Q-D (quick-disconnect) round flange that uses the convenient single screw clamp (model GA8410) for waveguide connections.

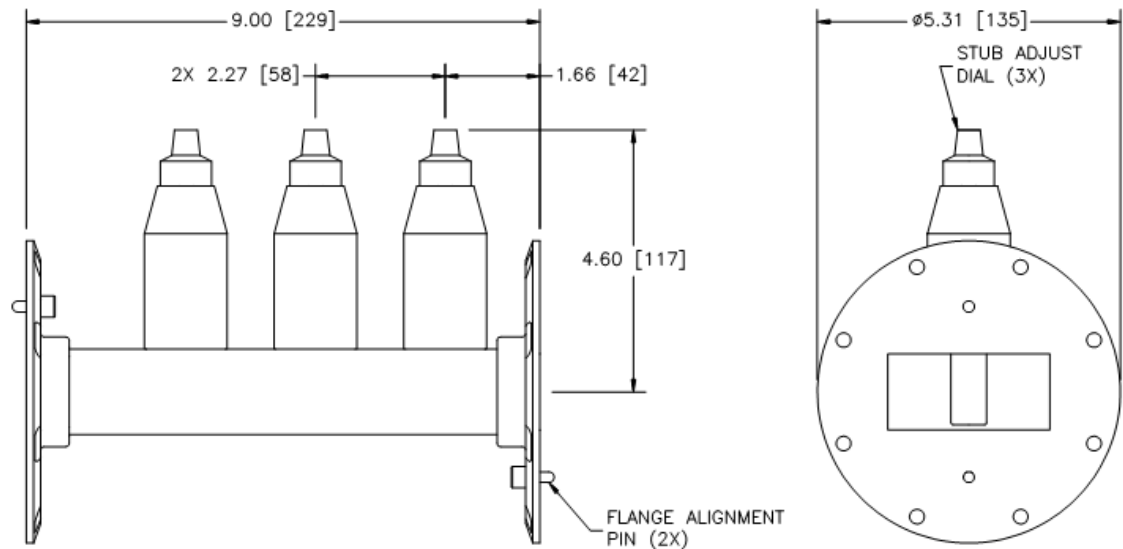
General Specifications:

Waveguide	WR284
Flange	UG584/U
Frequency	2450 MHz +/- 50 MHz
Power (continuous)	3 kW
Impedance Matching	3 stubs with $1/4$ -wave chokes on $1/4$ -wave wavelength spacing
Construction	Aluminum waveguide and stubs
Finish	Chemical conversion coating; textured black paint



Options:

- Flange interlock switches
- Water cooling



GERLING
GERLING APPLIED
ENGINEERING, INC.

© 2005-2007 Gerling Applied Engineering, Inc.
PO Box 580816 • Modesto, CA 95358 • USA
Phone: +1-209-527-8960 • Fax: +1-209-527-5385
E-mail: sales@2450MHz.com • Web: www.2450MHz.com

All dimensions are in inches [millimeters].

Updated 09AUG07

Universal Waveguide Applicator, WR284

GERLING

Model GA6002A

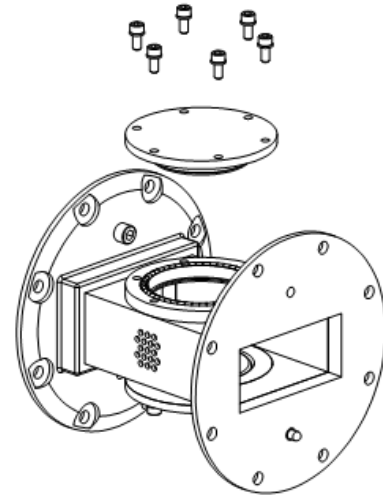
GAE has designed the Universal Waveguide Applicator (UWA) as a cost-effective means to fulfill the needs of a wide variety of laboratory heating requirements. The standardized waveguide chamber of the UWA can be used with standard or custom adapters (ordered separately) specially designed for heating specific materials. Typical applications include test tube samples, slabs, rods, fluids and plasmas.

The basic design of the UWA is that of a typical broadwall type waveguide applicator. Microwave energy propagates in the TE₁₀ mode which orients the electric field perpendicular to the adapter ports. The e-field varies symmetrically in a sinusoidal manner from a maximum at the center to zero at the side walls. Thus, heating is relatively uniform with respect to sample height but can vary for large widths.

The UWA can be used with a Dummy Load (model GA1204) for traveling wave heating applications or a Sliding Short Circuit (model GA1205) for resonant chamber heating. Depending on the application, typical configurations might also include directional couplers for power measurement (model GA3103 or GA3104) and tuners for impedance matching (model GA1009).

The model GA6002A has two ports on opposite walls. Blank adapters are provided for each port and can be modified by the customer for specific applications. Standard adapters for various applications are also available. Contact GAE for more information on the UWA and standard adapters or design assistance on custom adapters.

To facilitate monitoring during heating, the UWA features perforations on one side of the waveguide for viewing and a threaded boss on the other side for mounting an IR sensor or camera. Both models also feature the popular WR284 Q-D (quick-disconnect) round flange that uses the convenient single screw clamp (model GA8410) for waveguide connections.

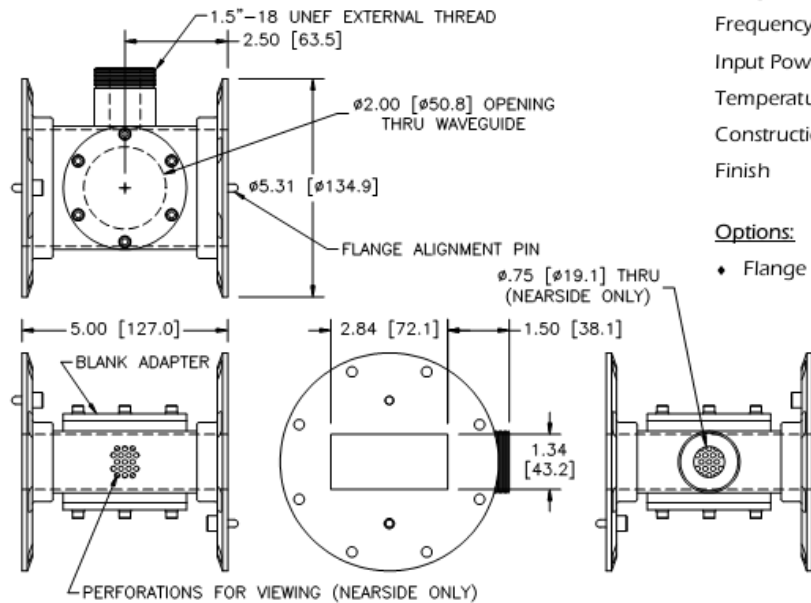


General Specifications:

Waveguide	WR284
Flanges	UG-584/U with Q-D taper
Frequency	2450 MHz nominal
Input Power	3 kW continuous max.
Temperature	300°F (150°C) max.
Construction	Aluminum
Finish	Chemical conversion coating

Options:

- ◆ Flange interlock switches



GERLING
GERLING APPLIED
ENGINEERING, INC.

All dimensions are in inches [millimeters].

© 2003-2008 Gerling Applied Engineering, Inc.
PO Box 580816 • Modesto, CA 95358 • USA
Phone: +1-209-527-8960 • Fax: +1-209-527-5385
E-mail: sales@5800MHz.com • Web: www.5800MHz.com

Updated 16MAY08

3-Port Circulator, CPR284

GERLING

Model GA1112

The model GA1112 is a waveguide 3-port circulator designed for high power industrial heating applications requiring high reliability and rugged construction. These circulators are most often used with dummy loads in an isolator configuration for magnetron protection, but they are also useful for other purposes in conjunction with devices such as phase shifters and variable attenuators.

Construction of the GA1112 is all aluminum waveguide. Corrosion due to harsh cooling water supplies is minimized using all copper water lines and brass fittings.

General Specifications:

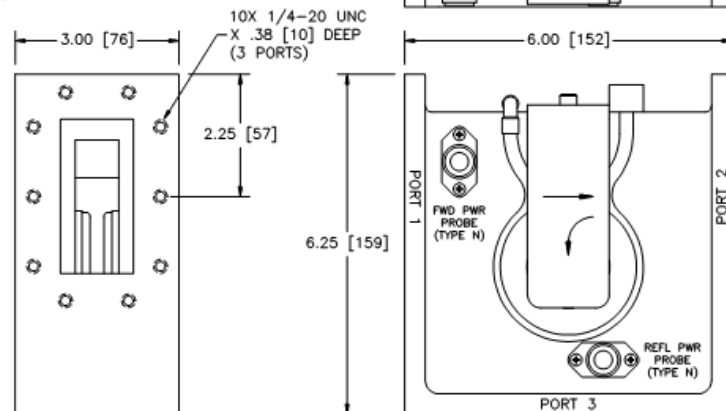
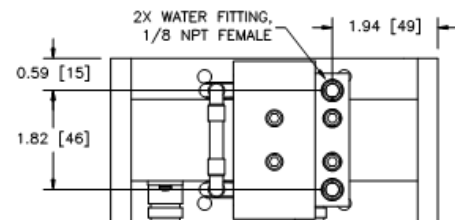
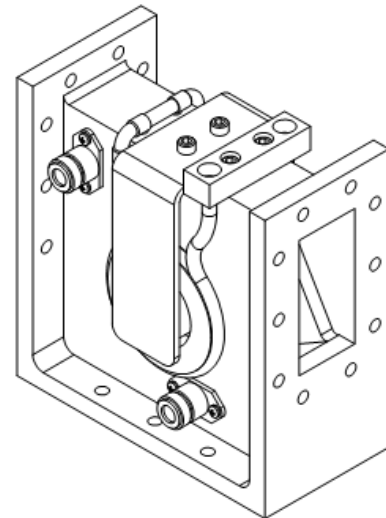
Frequency	2450 MHz nominal
Input Power	3 kW continuous max. (fwd and rev)
Waveguide	WR284 (RG75/U)
Flanges	CPR284 (UG1725/U) with 1/4-20 UNC tapped holes
Input VSWR	1.1 max. (Port 1)
Insertion Loss	0.15 dB max. (Port 1 to Port 2)
Isolation	20 dB min. (Port 2 to Port 1)
Coupler Probes	Type N female (optional)
Coupler Calibration	Forward: 60 +/- 1 dB Reflected: 50 +/- 1 dB
Water Connections	1/8 NPT female threads
Water Flow	0.5 gpm min., 70 psi max. inlet pressure, 50°C max. inlet temp
Construction	Dip brazed aluminum, brass water connections
Finish	Clear chemical film

Options:

- Flange interlock switches (any flange)
- Flange mounting studs
- Coupler probes (see table below)

Accessories:

- GA3208/9 Power Meter Set
- GA3301 Coupler Power Interface



MODEL NUMBER TABLE	
MODEL NO.	DESCRIPTION
GA1112	WITHOUT COUPLER PROBES
GA1112-1	WITH REFL POWER PROBE ONLY
GA1112-2	WITH FWD & REFL POWER PROBES
GA1112-3	WITH FWD POWER PROBE ONLY

GERLING
GERLING APPLIED
ENGINEERING, INC.

All dimensions are in inches [millimeters].

© 2007-2010 Gerling Applied Engineering, Inc.
PO Box 580816 • Modesto, CA 95358 • USA
Phone: +1-209-527-8960 • Fax: +1-209-527-5385
E-mail: sales@2450MHz.com • Web: www.2450MHz.com

Updated 30JUL10

Precision Sliding Short Circuit, WR284

GERLING

Model GA1205B
Model GA1215A

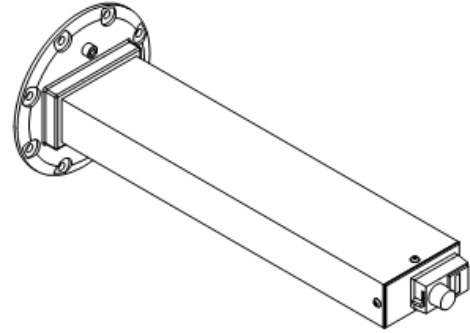
GAE's family of Precision Sliding Short Circuits are designed for use in high power microwave networks to establish a standing wave in waveguide and adjust its relative phase angle continuously throughout a range more than 1/2-guide wavelength. Typical uses include waveguide applicators in which a standing wave must be accurately positioned to maximize the coupling of microwave power to the load being heating.

The sliding plunger utilizes a non-contacting cavity type 1/4-wave reactive choke design which allows adjustment under high power operation without high losses or arcing. High temperature, low loss polyimide "buttons" provide low friction surfaces for reduced wear. Positional accuracy is provided by a precision screw drive mechanism. Precise positioning is enabled by a multi-turn dial with a digital readout calibrated in tenths of a turns unit.

Model GA1205B features the popular WR284 Q-D (quick-disconnect) round flange that uses a single screw clamp for waveguide connections.

General Specifications:

Frequency	2450 MHz nominal
Power (continuous)	3 kW
Waveguide	WR284 (RG75/U)
Input Flange	GA1205B: Q-D Round (UG584/U) GA1215A: CPR (UG1725/U)
Plunger Travel	5.0 inches (12.7 cm)
Position Indicator	Multi-turn dial, locking, with digital readout
Readout Calibration	0.005 inches (0.013 cm) movement per unit on the digital readout
Backlash	0.010 inches (0.025 cm) max.
Return Loss	0.05 dB max @ 2450 MHz



Model GA1205B

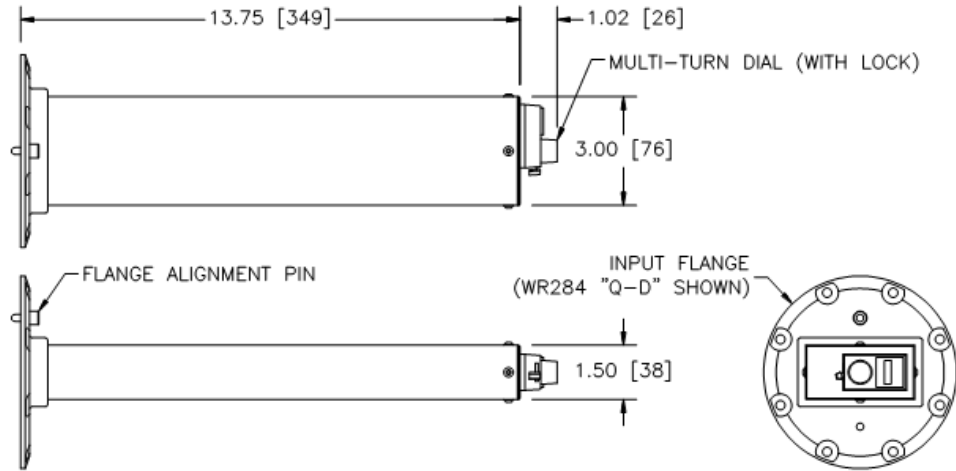
Construction	Waveguide: Aluminum Actuator Screw: Stainless steel Plunger: Brass and aluminum
--------------	---

Options:

- Flange interlock switches

Accessories:

- Flange Hardware Kit, Model GA8409 (please see GA8409 specification for selection)
- Flange Clamp, Quick-Release, Model GA8410 (used with model GA1205B only)



GERLING
GERLING APPLIED
ENGINEERING, INC.

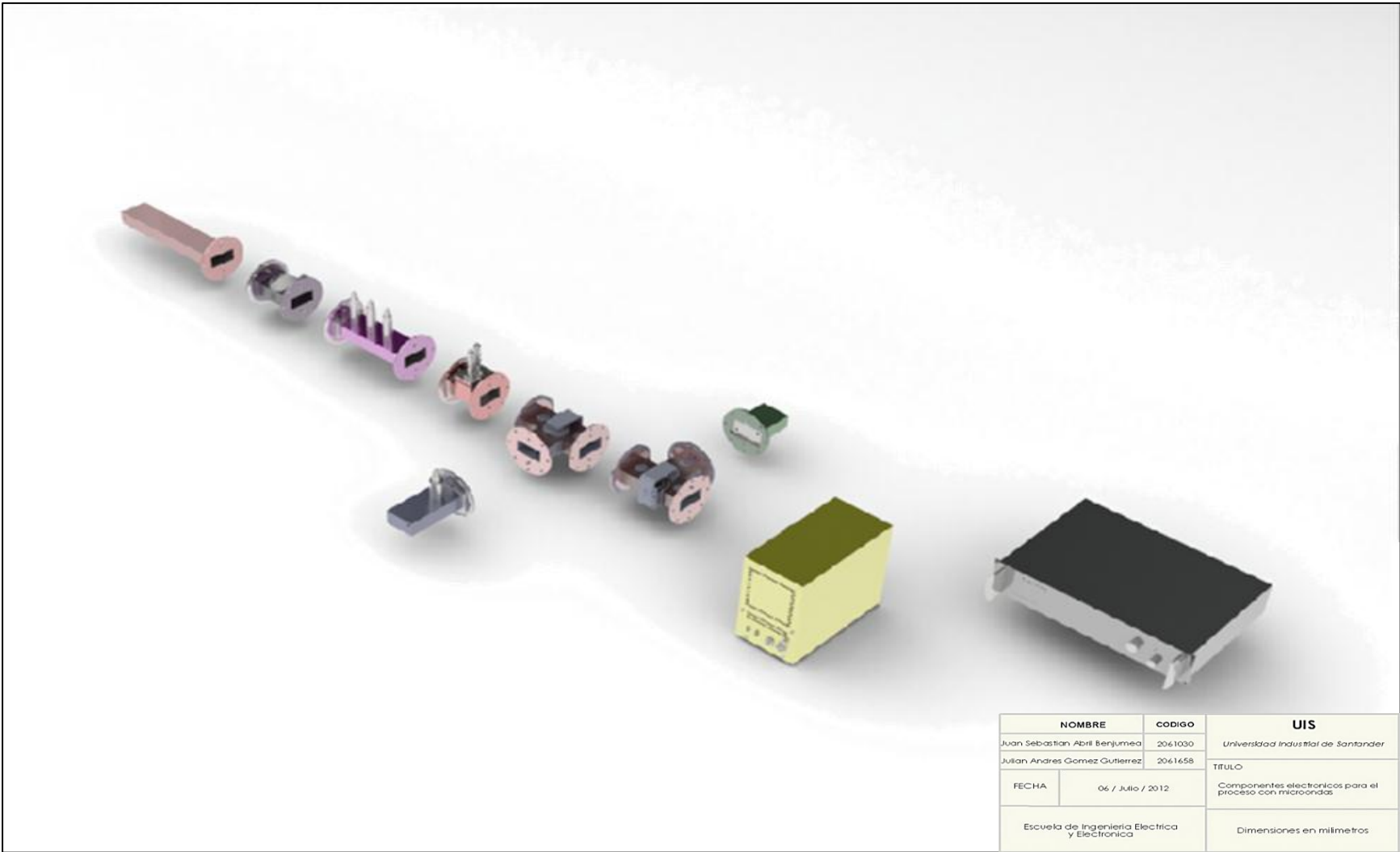
© 2007-2008 Gerling Applied Engineering, Inc.
PO Box 580816 • Modesto, CA 95358 • USA
Phone: +1-209-527-8960 • Fax: +1-209-527-5385
E-mail: sales@2450MHz.com • Web: www.2450MHz.com

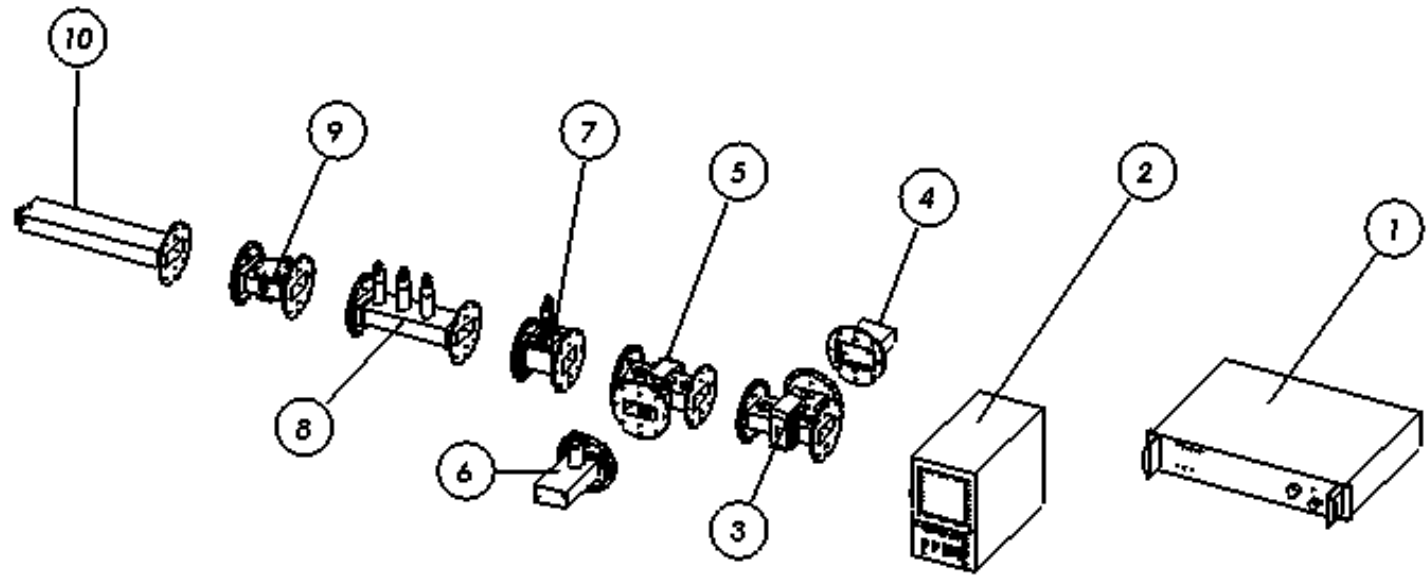
All dimensions are in inches [millimeters].

Updated 12DEC08

ANEXO B.

Componentes electrónicos de los sistemas de microondas





No.	NOMBRE	REF.
1	Fuente de Alimentación y Controles	GA 41 04A
2	Magnetron	GA 4001 A
3	Circulador 1	GA 11 05B
4	Carga de Agua	GA 1 204
5	Circulador 2 (Opcional)	GA 11 05B
6	Carga de Agua con Reflector de Potencia (Opcional)	GA 1 21 4
7	Monitor de Verificación de Potencia Entregada y Reflejada	GA 3004
8	Sintonizador Multicanales	GA 1 009
9	Aplicador	GA 6002
10	Terminación (Corto Circuito)	GA 1 205A

NOMBRE	CODIGO	UIS
Juan Sebastian Abril Benjumea	2061030	Universidad Industrial de Santander
Julian Andres Gomez Gutierrez	2061658	TITULO
FECHA	06 / Julio / 2012	Componentes electronicos para el proceso con microondas
Escuela de Ingenieria Electrica y Electronica		Dimensiones en milímetros

ANEXO C.

Construcción de cavidad
rectangular y guía de onda.

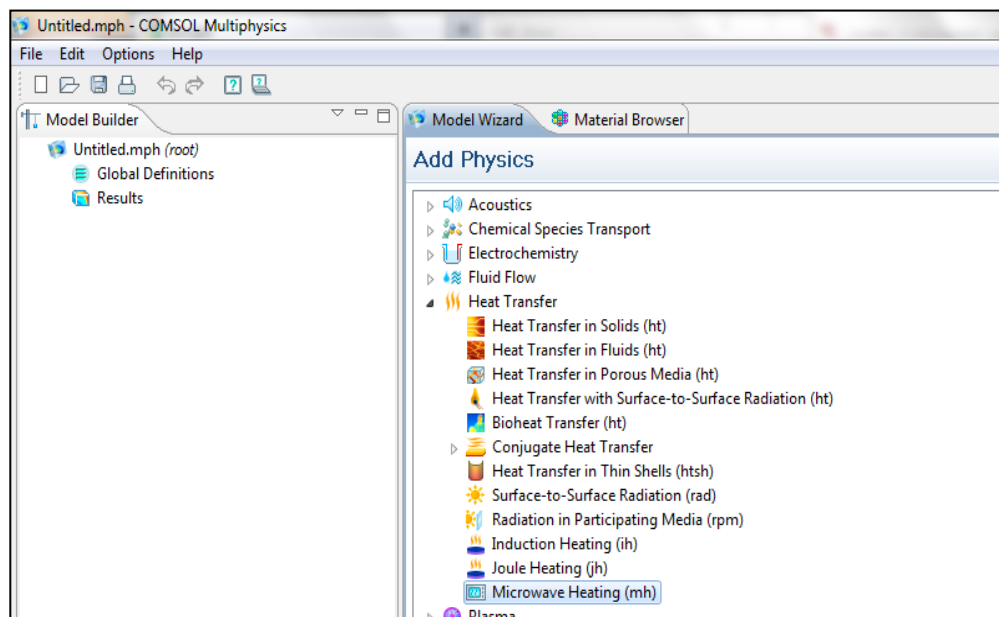
DISEÑO DE LA CAVIDAD

A).FASE PREVIA DE DISEÑO DE LA CAVIDAD

Antes de empezar a diseñar la cavidad es necesario elegir que tipo de aplicación física se va a emplear, en este caso sera *transferancia de calor empleando microondas*.

1. Para esto en el software se selecciona asi: *Heat Transfer>Microwave Heating (mh)*.
2. En segunda instancia se procede a seleccionar el tipo de análisis a realizar así. *Preset Studies>Frequency-Transient*.

Figura 38. Selección del tipo de aplicación

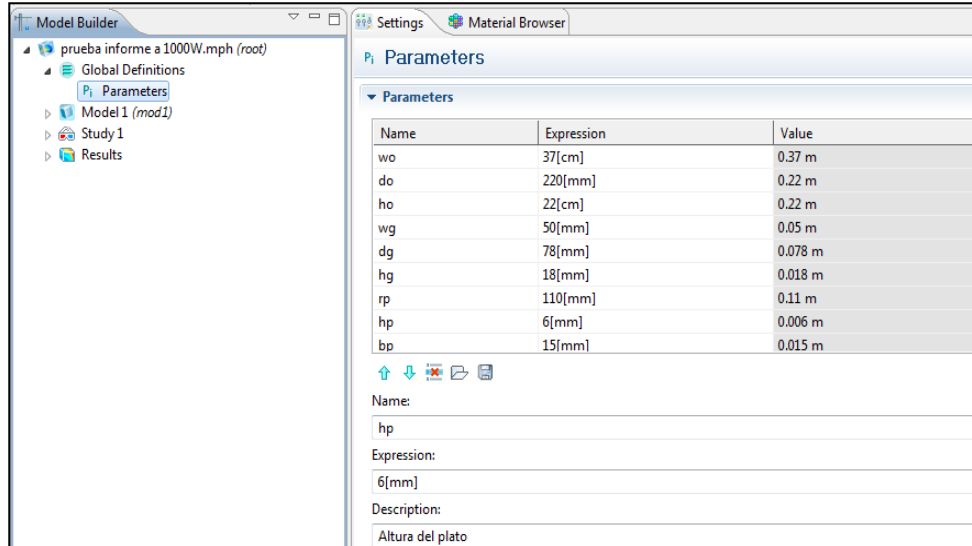


Una vez que elegido el tipo de análisis a realizar se procede a iniciar la construcción de la cavidad.

B).DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS GLOBALES.

1. En la ventana de construcción de modelo se elige *Global Definitions* con el fin de seleccionar los parámetros de diseño, como se puede ver en la **Figura 39**

Figura 39. Asignación de parámetros globales.



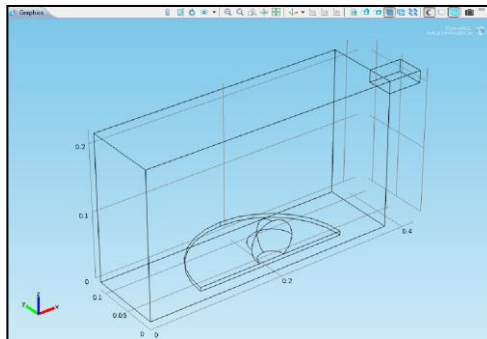
C. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Una vez definidos los parámetros se procede a realizar la construcción de la cavidad y los elementos que la componen.

1. En la ventana de construcción del modelo se da clic derecho en *Model 1*>*Geometry 1* y se elige *block*. Posteriormente a esto asignan las dimensiones a la cavidad teniendo en cuenta los parámetros definidos en el inicio.
2. De igual manera para crear las otras piezas se hace lo mismo que en el paso anterior. Los elementos pueden variar desde un bloque rectangular hasta una esfera o cilindro.

En la **Figura 40** se muestra como resultado de la construcción de la cavidad, el puerto de entrada, material a irradiar y el plato sobre el que el material se apoyara.

Figura 40. Construcción de la cavidad.

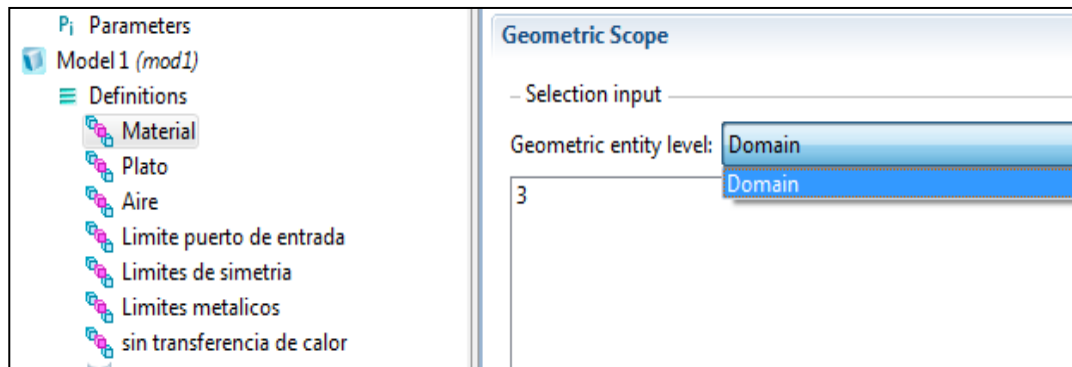


D). DEFINIR DOMINIOS Y LIMITES

Para poder identificar a futuro más fácil los componentes (dominios) y límites de este pequeño sistema es necesario definir uno a uno.

1. En la ventana de construcción del modelo, se da clic derecho en *Model 1>Definitions* y se elige *selection*.
2. Con clic derecho en *Selection 1* se elige *Rename*.
3. En la caja de texto que aparecerá se cambia el nombre por “*Material*” y se acepta.
4. Seleccione solamente el dominio 3 (ver Figura 41).
5. Repetir los pasos del 1 al 4 tres veces más, para seleccionar el plato donde va ubicado el material, las cavidades que contendrán aire y también aquellas partes del sistema donde no habrá transferencia de calor. Hay que resaltar que el paso cinco se realiza con el objetivo de clasificar los componentes de este sistema.
6. Si se quiere seleccionar una cara o vista de un componente como en el caso el puerto de entrada de las microondas, se repiten los pasos del 1 al 3 cambiando el nombre *por limite del puerto* (donde las microondas van a incidir), después de esto en la ventana de ajustes se busca la sección llamada *Geometric Scope*, de ahí en la lista de *Geometric entity level* se escoge *boudary* y se selecciona el limite numero 23.
7. Se repite el paso 6 dos veces más para seleccionar los limites que van a comprender los “*límites metálicos*” y los “*límites de simetría*”.

Figura 41. Selección de dominios (domain) y limites (boundaries).



E). Materiales

En esta etapa se procede a definir la composición y características de los componentes del sistema. Para esto es necesario realizar los siguientes pasos. Para este apartado hay dos opciones: se puede seleccionar el material directamente de las librerías del programa o se puede crear uno nuevo pero el usuario tendrá que asignar las características de este.

1. En la ventana de construcción del modelo se da clic derecho y se selecciona *Model 1>Materials* y se elige abrir buscador de materiales.
2. Posteriormente en la ventana de materiales se ubica la sección de materiales y se selecciona *Built-In>Aire*.
3. Dando clic derecho se selecciona *add material to model*.
4. En la ventana de construcción del modelo se selecciona *Aire* y en los ajustes se ubica el *Geometric Scope*, y de la lista de selección creada en el literal D se escoge *Aire*, esto quiere decir que tanto la cavidad como el puerto de entrada van a estar constituidos de aire. Este es un caso en el que el material se selecciona de la librería del programa.
5. Se repiten los primeros 4 pasos una vez más en este caso eligiendo como material el cobre que representa límites metálicos creados en el literal D.
6. Si se desea crear un material nuevo hay que ubicarse en la ventana de construcción y dar clic derecho en *Materials* y se elige la opción *Material a* la cual se le podrá cambiar el nombre para poder identificarlo fácilmente, en

este caso se llamara “*material*”, que representa el elemento que será irradiado por microondas.

7. En la ventana de ajustes es posible introducir las propiedades del material en cuestión, en este caso se seleccionaron las siguientes propiedades del material a calentar que se pueden observar en la **Tabla 11**

Tabla 11. Propiedades del material contenido en la cavidad

Propiedad	Nombre	Valor	Unidad
Conductividad eléctrica	Sigma	0	$\frac{S}{m}$
Permitividad relativa	Epsilon _r	65-20j	1
Permeabilidad relativa	Mu	1	1
Conductividad térmica	K	0.55	$\frac{W}{m * K}$
Densidad	Rho	1050	$\frac{kg}{m^3}$
Capacidad calorífica a presión constante	Cp	3.64e3	$\frac{J}{kg * K}$

8. Se repite el paso 5 y 6 una vez más para determinar las propiedades del plato.

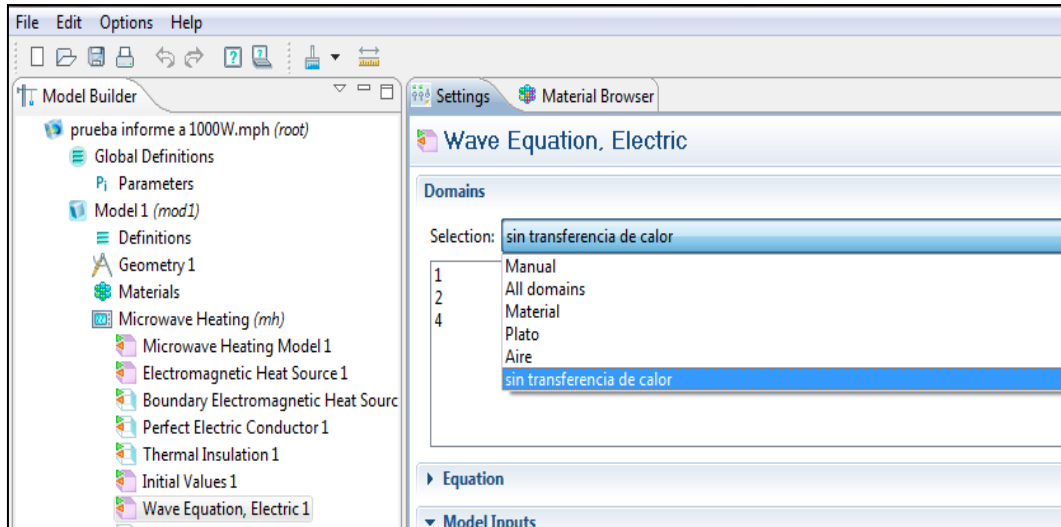
F).CALENTAMIENTO CON MICROONDAS

Ahora es el momento de la configuración física donde se asignara un modelo de ondas electromagnéticas para los dominios que no toman parte en el problema térmico.

1. En el ventana de construcción del modelo, se da clic derecho en *Model 1>Microwave Heating* y se elige *Electromagnetic Waves>Wave Equation, Electric* y de ahí se selecciona en dominios aquellos objetos donde no abra

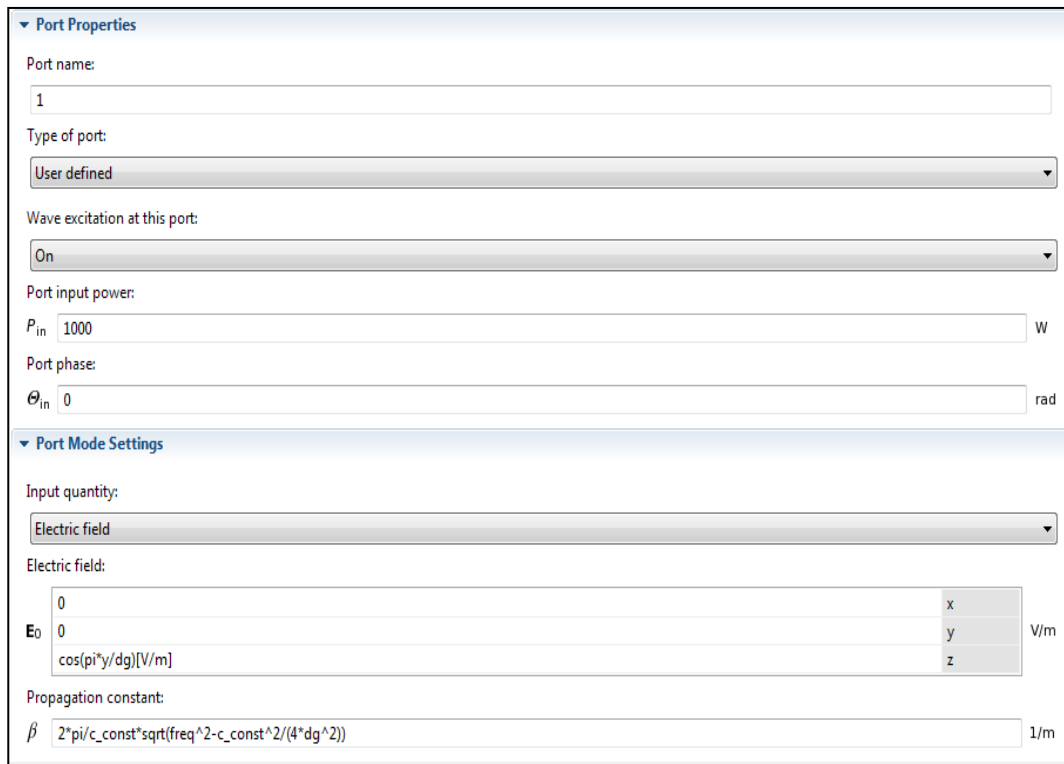
transferencia de calor, que para este caso sería la cavidad, el plato y el puerto por donde inciden las microondas (ver Figura 42)

Figura 42. Selección de materiales donde no hay transferencia de calor.



2. Ahora en la ventana del modelo se da clic derecho y se selecciona *Microwave Heating* y se elige la condición de frontera *Electromagnetic Waves>Port*. En esta sección se asignara para el puerto de entrada la potencia incidente, el vector de campo eléctrico y la constante de propagación. Como se ve en la Figura 43 respectivamente.
3. En la ventana del construcción se selecciona *Microwave Heating* y se elije *Electromagnetic Waves>Impedance Boundary Condition*, de la lista se elije los limites metálicos, con el objetivo de asignarle a estos una impedancia igual al del cobre.
4. Se repite el paso anterior solo que en esta etapa se selecciona *Electromagnetic Waves>Perfect Magnetic Conductor*, seleccionando de la lista que aparece los “límites de simetría”.

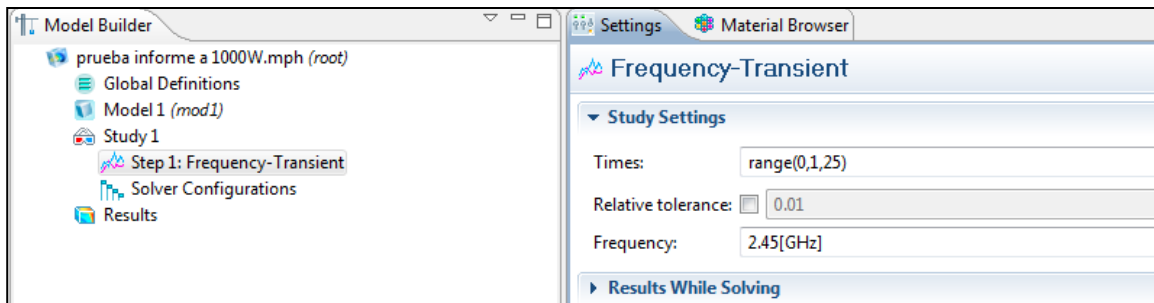
Figura 43. Asignación de propiedades del puerto de entrada



G).SIMULACIÓN Y RESULTADOS.

En esta etapa se selecciona el tiempo de simulación y la frecuencia de trabajo (en este caso 2.45Ghz). Para esto se da clic derecho en *Study 1>Step 1: Frequency-Transient*, se asigna el tiempo de simulación, frecuencia y se le da *compute* para que empiece la simulación (ver **Figura 44**).

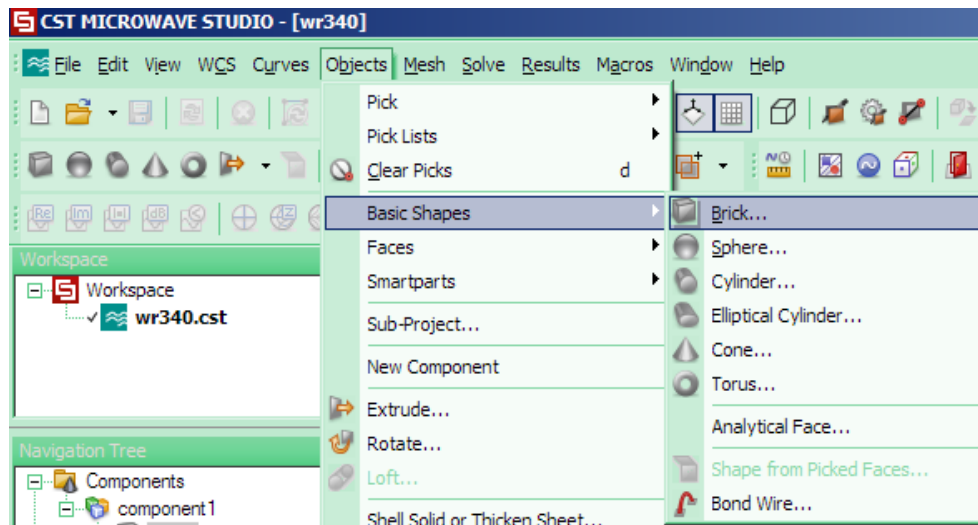
Figura 44. Asignación de parámetros de simulación



DISEÑO DE GUÍA DE ONDA COMO CAVIDAD

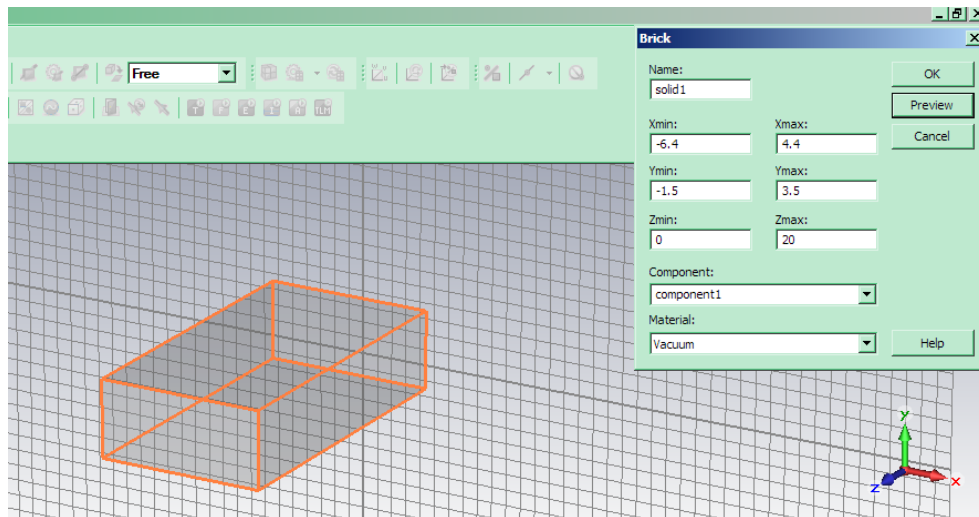
1. Para empezar a construir la guía de onda rectangular se selecciona en la barra de herramientas *Objects* → *Basics shapes* → *Brick* como se puede ver en la Figura 45.

Figura 45. Selección de la forma de la guía de onda.



2. Hacer doble clic en el plano del dibujo para seleccionar un punto de partida para la figura, enseguida se realiza un segundo punto en la esquina opuesta y se extiende a lo largo para forma una figura semejante a un cajón. Ver Figura 46.

Figura 46. Selección de dimensiones de la guía de onda.



Terminando el paso anterior se despliega un cuadro de diálogo mostrando las dimensiones en el sistema de coordenadas, y se aprovecha también para corregir las dimensiones, escoger el tipo de material ya sea vacío (vacuum), conductor eléctrico perfecto (PEC) o cargar otro material existente en la librería.

3. Luego se construye el material del interior siguiendo el paso 1, y utilizando el mismo valor de coordenada en Z y disminuyendo las coordenadas X e Y de acuerdo a las medidas presentadas en la **Tabla 8**. El material interno puede ser vacío u otro material (en este caso un semiconductor) o la unión de ambos. A parte también podemos modelar una pequeña esfera de material semiconductor dentro de la guía de onda como podemos ver en la Figura 47y Figura 48.
4. Para configurar la simulación de la guía de onda comenzamos asignando los puertos de entrada y de salida de las microondas, en la barra de herramientas con *select point, edge or face(s)*, escogemos las caras internas de la guía de onda con doble clic y a continuación en la barra de herramientas seleccionamos *Waveguide ports*, se abre un cuadro de escritura como muestra la Figura 49 y se da ok. Ahora escogemos la cara “Back” y de la misma forma asignamos el puerto 2.

Figura 47. Guía llena completamente por un dieléctrico.

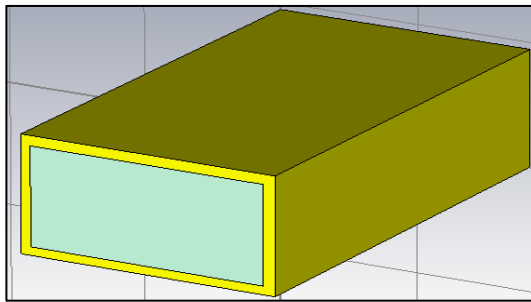


Figura 48. Guía con un dieléctrico esférico en su interior

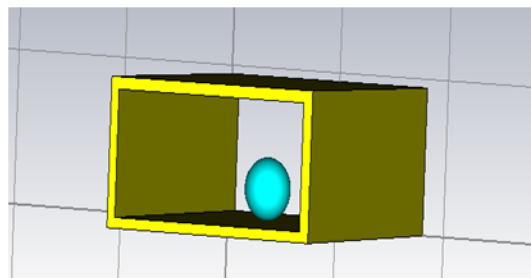
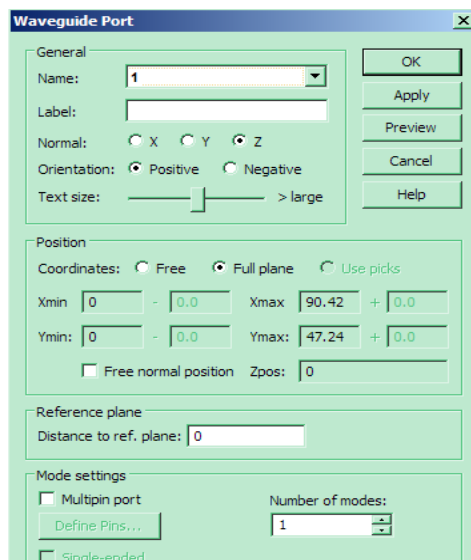
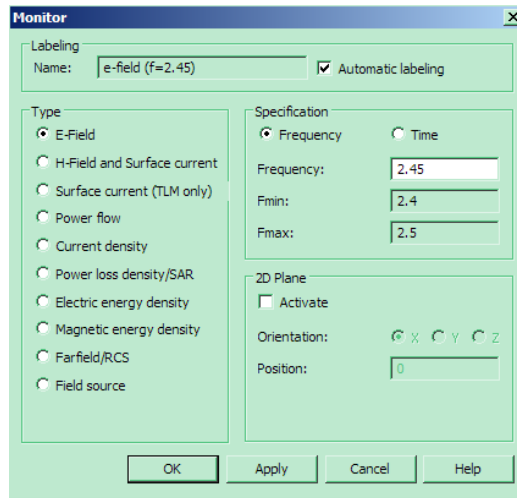


Figura 49. Asignación de puerto de entrada y salida



5. A continuación siguiendo la ruta *solve* → *field monitors* se despliega un cuadro como muestra la Figura 50.

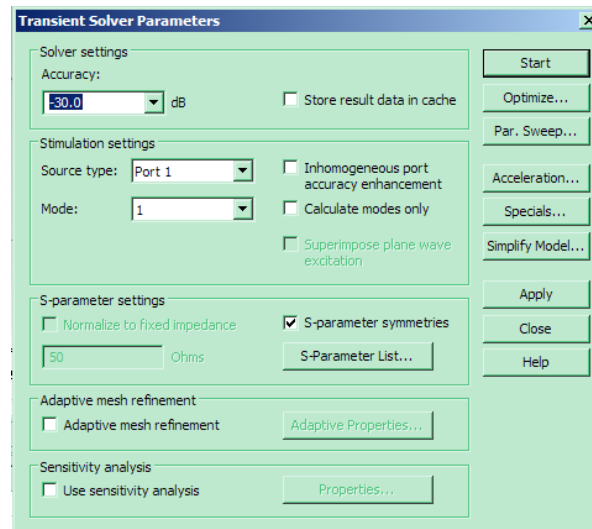
Figura 50. Designación de variables a simular



Se tiene la posibilidad de escoger la frecuencia microonda generalmente 2.45GHz y simular para visualizar el campo eléctrico y el campo magnético.

6. Se sigue a continuación la ruta *solve* → *transient solver* y se abre el cuadro de dialogo que se observa en la Figura 51

Figura 51. Selección de parámetros del análisis transitorio



Se deja una precisión por defecto de -30 dB y en *Stimulation settings* → *Source type* se asigna la entrada del puerto 1 y en *mode* se elige 1, para asignar el primer modo de propagación o modo fundamental.

Aquí también se selecciona el modulo *S-parameter symmetries* para que elabore los diagramas de bode de las relaciones de potencia para los puertos de entrada y de salida. Y a continuación se oprime *start* para comenzar el proceso de simulación.