

**INGENIERÍA CONCEPTUAL DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN  
MATERIAL VÍA MICROONDAS (2450 MHZ)**



**AUTORES**

**ERICK MIGUEL BARRIOS MONTES**

**DINELLY PAOLA BARRIOS TAIBEL**

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

**BUCARAMANGA**

**2009**

**INGENIERÍA CONCEPTUAL DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN  
MATERIAL VÍA MICROONDAS (2450 MHZ)**

**AUTORES**

**ERICK MIGUEL BARRIOS MONTES**

**DINELLY PAOLA BARRIOS TAIBEL**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Electrónico**

**Director**

**RODRIGO CORREA Ph.D.**

**Codirector**

**IVAN AMAYA CONTRERAS Ing.**

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

**BUCARAMANGA**

**2009**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

El profesor Rodrigo Correa, por su apoyo constante y su colaboración para sacar adelante esta investigación.

A la Universidad Industrial de Santander, a la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones y a cada uno de sus profesores por la contribución a nuestro crecimiento personal y profesional.

Y finalmente a todos nuestros compañeros que de una u otra manera sirvieron de ayuda e inspiración para culminar esta etapa de nuestra vida.

## CONTENIDO

|   | Pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN  | 1    |
| 1. FUNDAMENTOS DE LAS MICROONDAS                              | 4    |
| 1.1 MICROONDAS  | 4    |
| 1.1.1 Características de las Microondas                       | 5    |
| 1.1.1.1 Penetración de la Radiación                           | 5    |
| 1.1.1.2 Incremento en la Velocidad de Calentamiento           | 5    |
| 1.1.1.3 Calentamiento Selectivo del Material.                 | 6    |
| 1.1.1.4 Eficiencia de la Energía en el Proceso                | 6    |
| 1.1.1.5 Ahorros en el Procesamiento                           | 6    |
| 1.1.1.6 Auto-limitación de las reacciones                     | 7    |
| 1.2 PROCESAMIENTO DE MATERIALES MEDIANTE MICROONDAS           | 7    |
| 1.2.1 Permitividad Compleja                                   | 7    |
| 1.2.2 Coeficientes de Reflexión y de Transmisión              | 8    |
| 1.2.3 Vector Poynting   | 8    |
| 1.3 INTERACCIÓN DE LOS MATERIALES CON LAS MICROONDAS          | 11   |
| 1.3.1 Profundidad de penetración                              | 13   |
| 1.3.2 Polarizaciones Atómicas e Iónicas                       | 15   |
| 1.3.2.1 Polarización  | 15   |
| 1.3.3 Calentamiento por microondas en materiales dieléctricos | 16   |
| 1.3.4 Fuga Térmica  | 17   |
| 2. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LAS MICROONDAS                | 19   |
| 2.1 CALENTAMIENTO PARA EL VULCANIZADO DEL CAUCHO              | 20   |

|  |    |
|--|----|
| 2.2 ESTUDIO DE UNA REACCIÓN CATALÍTICA EN PRESENCIA DE MICROONDAS                                | 21 |
| 2.2.1 Instalación del equipo microondas vs el equipo clásico                                     | 22 |
| 2.2.2 Resultados del estudio   | 23 |
| 2.3 PRODUCCIÓN DE CARBURO DE SILICIO UTILIZANDO MICROONDAS COMO FUENTE DE ENERGÍA.               | 23 |
| 2.4 COMERCIALIZACIÓN DE EQUIPOS DE CALENTAMIENTO POR MICROONDAS                                  | 24 |
| 3. PROPUESTA DE APLICACIÓN Y SUS COMPONENTES   | 30 |
| 3.1 METODOLOGÍA GENERAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN POR MICROONDAS       | 30 |
| 3.2. CRITERIOS DE APLICACIÓN   | 33 |
| 3.2.1 CONSIDERACIONES TÉCNICAS   | 33 |
| 3.2.1.1 Características del Material   | 33 |
| 3.2.1.2 Frecuencias  | 34 |
| 3.2.1.3 Potencia   | 34 |
| 3.2.2. AHORRO EN EL PROCESAMIENTO CON MICROONDAS   | 35 |
| 3.2.2.1 Costos de Operación  | 36 |
| 3.2.2.2 Costos del Equipo  | 37 |
| 3.2.2.3 Eficiencia de la Energía   | 37 |
| 3.2.2.4 Ahorros Por el Cambio en el Procedimiento  | 38 |
| 3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA DE MICROONDAS PARA PROCESAMIENTO DE MATERIALES | 39 |
| 3.3.1. GENERADOR   | 40 |
| 3.3.1.1 Magnetron  | 43 |

|   |    |
|---|----|
| 3.3.1.1.1 Funcionamiento                                  | 44 |
| 3.3.1.2 Klistrón  | 45 |
| 3.3.1.2.1 Funcionamiento                                  | 46 |
| 3.3.1.3 Gyrotrón  | 49 |
| 3.3.1.4. Dispositivos de Estado Sólido                    | 50 |
| 3.3.1.4.1 Diodo Gunn                                      | 50 |
| 3.3.1.4.2 Diodos de Efecto Avalancha                      | 51 |
| 3.3.1.4.3 Transistores Bipolares                          | 51 |
| 3.3.1.4.4 Transistores de Efecto Campo                    | 53 |
| 3.3.2 GUÍAS DE ONDA                                       | 53 |
| 3.3.2.1 Ventajas  | 54 |
| 3.3.2.2 Desventajas                                       | 54 |
| 3.3.2.3 Tipos de Guías de Onda                            | 55 |
| 3.3.2.4 Modos de Guías de Onda                            | 56 |
| 3.3.2.5 Impedancia de una Guía de Onda                    | 57 |
| 3.3.2.6 Guía de Onda Rectangular                          | 57 |
| 3.3.2.6.1 Características de Una Guía de Onda Rectangular | 59 |
| 3.3.2.6.2 Atenuación                                      | 60 |
| 3.3.2.7 Guía de Onda Circular                             | 62 |
| 3.3.2.7.1 Modo TE   | 62 |
| 3.3.2.7.2 Modo  | 64 |
| 3.3.3 ACOPLADORES DIRECCIONALES                           | 64 |
| 3.3.3.1 Parámetros Básicos de Un Acoplador Direccional.   | 65 |
| 3.3.3.1.1 Acoplamiento C                                  | 66 |

|  |    |
|--|----|
| 3.3.3.1.2 Frecuencia de Trabajo  | 66 |
| 3.3.3.1.3 Directividad   | 66 |
| 3.3.3.1.4 Pérdidas   | 66 |
| 3.3.3.1.5 Coeficiente de Reflexión ( $\rho$ )  | 67 |
| 3.3.3.1.6 Relación de Ondas Estacionarias de Tensión (VSWR – Voltaje Standing Wave Ratio). | 67 |
| 3.3.3.1.7 Potencia Incidente   | 68 |
| 3.3.3.1.8 Híbridos   | 68 |
| 3.3.4 CIRCULADOR   | 68 |
| 3.3.4.1 Directividad   | 69 |
| 3.3.4.2 Pérdidas de Inserción  | 69 |
| 3.3.5 CAVIDAD  | 70 |
| 3.3.6 SISTEMA DE MONITOREO   | 71 |
| 3.4 SELECCIÓN DEL PROCESO  | 75 |
| 3.4.1 CALENTAMIENTO HIBRIDO  | 75 |
| 3.4.2 CALENTAMIENTO TOTAL CON MICROONDAS   | 75 |
| 3.4.3 Propuesta cavidad no rectangular   | 77 |
| 3.4.4 Propuesta de Aplicación en guía de onda  | 77 |
| 3.4.5 Propuesta Pared móvil  | 78 |
| 3.4.6 Aplicación en la guía de ondas con banda transportadora                              | 78 |
| 3.4.7 PRODUCCIÓN DE ACIDO SULFÚRICO  | 83 |
| 3.4.7.1 DEFINICIÓN   | 83 |
| 3.4.7.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS   | 83 |
| 3.4.7.3 USOS DEL ACIDO SULFÚRICO   | 85 |
| 3.4.7.4 PROCESOS DE OBTENCIÓN  | 86 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.4.7.4.1 Proceso de Contacto   | 86  |
| 3.4.7.5 So <sub>2</sub> a partir de Materiales Piríticos                                | 87  |
| 3.4.7.6 PROPUESTA PARA LA PRODUCCIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO VÍA MICROONDAS.                 | 91  |
| 3.5 ESTUDIO DE SEGURIDAD  | 95  |
| 3.5.1 Riesgos Asociados a Equipos de Microondas   | 95  |
| 3.5.2. Regulación Para las Normas de Seguridad  | 96  |
| 3.5.2.1 Exposición Electromagnética   | 96  |
| 3.5.3. Equipo de Diseño Por Seguridad   | 97  |
| 3.5.3.1 Supresión de Fugas de Microondas  | 97  |
| 3.5.3.2 Dispositivo de Interrupción Por Seguridad                                       | 98  |
| 3.5.3.3 Etiquetas de Advertencia e Indicadores Visuales                                 | 98  |
| 3.5.4 Recomendaciones Para la Operación de Equipos                                      | 99  |
| 4. COTIZACIÓN DEL EQUIPO ADECUADO PARA EL PROCESAMIENTO DE MATERIALES USANDO MICROONDAS | 101 |
| 4.2. SIMULACIÓN CON LA GUÍA DE ONDA   | 107 |
| 4.2.1 Construcción de Una Guía de Ondas.  | 108 |
| 4.2.2 Material Dentro de la Guía de Ondas   | 113 |
| CONCLUSIONES  | 114 |
| RECOMENDACIONES   | 116 |
| BIBLIOGRAFÍA  | 117 |
| ANEXOS  | 120 |

## LISTA DE TABLAS

|   | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Profundidades de Penetración de Microondas (de 2.45 GHz) En Algunos Materiales | 14   |
| Tabla 2. Fabricantes de Equipos Microondas  | 25   |
| Tabla 3. Ahorros Tiempo / Cambios Productividad   | 38   |
| Tabla 4. Descripción del sensor de temperatura.   | 72   |
| Tabla 5. Especificaciones de la “ <i>Microwave Workstation</i> ”.                       | 74   |
| Tabla 6. Proveedores y productores de ácido sulfúrico en Colombia                       | 93   |
| Tabla 7. Cálculo del Factor Q y Pérdidas  | 113  |

## LISTA DE FIGURAS

|  | <b>pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 1. Vector de Poynting   | 9           |
| Figura 2. Onda Eléctrica y Magnéticas. Ubicadas en el Eje de Coordenadas X, Y, y Z. En Un Instante de Tiempo.                          | 10          |
| Figura 3. Línea de vulcanizado con microondas.   | 20          |
| Figura 4. Equipo de microondas con frecuencia de 2.45GHz.  | 21          |
| Figura 5. Descripción del equipo para la catalización en presencia de microondas   | 22          |
| Figura 6. El Sistema de Microonda Autoonda   | 25          |
| Figura 7. Horno Microondas Asistido Por (izquierda) Fogón Híbrido de Rodillo de Microondas (Derecha) de Takasago Industry Co. en Japón | 28          |
| Figura 8. Horno Híbrido de Microondas y Gas (Izquierda) y Horno Puro Continuo de Microondas (Derecha) de Mino Yogyo Co. en Japón       | 29          |
| Figura 9. Metodología general para la implementación de un proceso de fabricación por microondas                                       | 32          |
| Figura 10. Diagrama de Bloques del equipo de procesamiento.  | 40          |
| Figura 11. Sistema de Microondas para el Procesamiento de Materiales   | 42          |
| Figura 12. Klistrón de Dos Cavidades   | 48          |
| Figura 13. Klistrón Réflex   | 49          |
| Figura 14. Configuración Transistor de Efecto Campo  | 53          |
| Figura 15. Tipos de Guías de Ondas   | 55          |
| Figura 16. Acoplador Direccional   | 65          |
| Figura 17. Circulador  | 69          |
| Figura 18. Sensor de fibra óptica para medir temperatura.  | 71          |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 19. <i>Microwave Workstation</i>   | 73  |
| Figura 20. Esquema de cavidad no rectangular  | 79  |
| Figura 21. Esquema guía de onda como cavidad  | 80  |
| Figura 22. Esquema Pared móvil  | 81  |
| Figura 23. Esquema Aplicación en guía de onda con banda transportadora  | 82  |
| Figura 24. Proceso de Contacto  | 89  |
| Figura 25. Proceso de Cámaras de Plomo  | 90  |
| Figura 26. Propuesta para la fabricación de ácido sulfúrico vía microondas                                    | 92  |
| Figura 27. Máximo Recomendado de Exposición Permisible (MPE) en Ambientes Controlados por la Norma C95.1-1999 | 97  |
| Figura 28. Cotizacion del equipo para el procesamiento de materiales con microondas                           | 103 |
| Figura 29. Planos del equipo necesario para el procesamiento de materiales con microondas                     | 104 |
| Figura 30. Plano del Equipo Propuesto para Propósito General  | 105 |
| Figura 31. P&I del diagrama del proceso de fabricación de ácido sulfúrico vía microondas.                     | 106 |
| Figura 32. Dimensiones Externas e Internas de Una Guía de Onda Rectangular                                    | 108 |
| Figura 33. Activación de Objetos Básicos  | 109 |
| Figura 34. Aplicación de Dimensiones del Material dentro de la guía.  | 109 |
| Figura 35. Guía de onda finalizada.   | 110 |
| Figura 36. Propagación del Campo Eléctrico del Modo TE <sub>10</sub> .  | 110 |
| Figura 37. Propagación del Campo Magnético  | 111 |

Figura 38. Diferentes Modelos Geométricos Con su Respectiva Distribución de Temperatura

## LISTA DE ANEXOS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| ANEXO A. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO EN LA SIMULACIÓN             | 121         |
| ANEXO B. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS                        | 124         |
| ANEXO C. PLANOS: COMPONENTES ELECTRÓNICOS PARA EL PROCESO CON MICROONDAS | 133         |

## **OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Plantear una metodología experimental general que permita identificar los componentes necesarios para la implementación de un proceso de fabricación de un material a nivel de laboratorio utilizando microondas.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Seleccionar un proceso de fabricación que pueda ser usado como piloto.
- Proponer los componentes necesarios para su fabricación vía microondas (2.45 GHz).
- Realizar los P&I (diagramas de procesos e instrumentación) correspondientes al producto seleccionado.
-

## RESUMEN

**TITULO: INGENIERÍA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN MATERIAL VÍA MICROONDAS (2450 MGz)<sup>\*</sup>.**

**AUTORES: ERICK MIGUEL BARRIOS MONTES Y DINELLY PAOLA BARRIOS TAIBEL<sup>\*\*</sup>**

### **PALABRAS CLAVES**

Materiales, Metodología, Microondas, Procesamiento.

### **CONTENIDO**

El uso de las microondas en procesamiento de materiales a nivel industrial brinda una herramienta alternativa para procesar varios tipos de materiales bajo un amplio rango de condiciones. Esta tecnología provee ventajas económicas debidas al ahorro de energía, espacio y tiempo de proceso, además de reducir el impacto ambiental.

El propósito de este libro es el de diseñar una metodología que brinde la información necesaria para el entendimiento básico de la tecnología de procesamiento con microondas y de sus limitaciones y fortalezas, con el fin de asistir al grupo de trabajo en toma de decisiones para usar las microondas como fuente de energía; al mismo tiempo sirve como una guía para implementar el proceso a nivel de laboratorio. Se presentan cuatro propuestas para fabricar materiales en el laboratorio o planta piloto, y una de estas se adecua para producir ácido sulfúrico. Así mismo se presentan ejemplos de aplicaciones exitosas para ayudar a entender las condiciones necesarias para lograr una aplicación satisfactoria. Finalmente se presentan las cotizaciones de los equipos propuestos y se recomienda la formación de un grupo interdisciplinario para desarrollar de forma adecuada los procedimientos y procesos con microondas.

Como conclusión, los resultados de la metodología diseñada fueron altamente satisfactorios, no solo porque demuestran que es un procesamiento económica y técnicamente viable, sino porque aporta una nueva opción y queda abierta una ventana de investigación que permite la interacción de diferentes disciplinas que al combinar sus conocimientos garantice el éxito de la aplicación.

---

\* Tesis de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Rodrigo Correa PH.D. Codirector: Ingeniero Ivan Amaya

## ABSTRACT

**TITLE: CONCEPTUAL ENGINEERING OF THE MANUFACTURING PROCESS OF A MATERIAL USING MICROWAVES. (2450 MGz)<sup>\*</sup>.**

**AUTHORS: ERICK MIGUEL BARRIOS MONTES Y DINELLY PAOLA BARRIOS TAIBEL<sup>\*\*</sup>.**

### KEY WORDS

Materials, Methodology, Microwave, Processing.

### CONTENT

The use of microwaves in industrial materials processing can provide an alternative tool to process many types of materials under a wide range of conditions. This technology provides economic advantages through the saving of energy, space and time of process, beside it reduces the environmental impact.

The purpose of this report is to design a methodology that provide the information needed for a basic understanding of microwave processing technology and of the strengths and limitations of microwave processing in order to assist materials processors in making wise decisions in using microwaves as energy source, and at the same time it serves as a guide for implementing a laboratory-scale process. Four suggestions are presented to manufacture materials at the laboratory or pilot plant, and one of them it is matched to produce sulfuric acid. In addition, examples of successful applications will be presented to help create an understanding of the conditions necessary for success. Finally, the quotations of the equipment proposed are presented and it is recommended the formation of an interdisciplinary group to properly develop microwave processes and procedures.

As a conclusion, the results of the methodology designed were highly satisfactory, because they not only demonstrated that the microwaves processing is financially and technically viable but also present a new option and a window keeps opened to research that allows the interaction between several disciples that where they put together their knowledge guarantee a successful application

---

<sup>\*</sup> Undergraduate Project

<sup>\*\*</sup> Physiomechanical Engineering Faculty. Engineering School. Director: PH.D. Rodrigo Correa. Codirector: Engineer Ivan Amaya

## INTRODUCCIÓN

La ingeniería conceptual se define como “una de las etapas, fases o partes que conforman un proyecto de ingeniería.”<sup>1</sup> En esta se fijan los objetivos que permiten evaluar la viabilidad técnica y económica de un proyecto y sirve para marcar los lineamientos para el desarrollo de la ingeniería básica y de detalle.

A través de este trabajo se pretenden establecer las bases para la implementación de un proceso de fabricación que utiliza las microondas como fuente de energía.

El procesamiento de materiales con microonda es una tecnología que proporciona nuevos adelantos en la mejora de las propiedades físicas de los materiales, brinda una nueva alternativa para la fabricación de aquellos que son difíciles de procesar por medios convencionales, reduce el impacto ambiental, ofreciendo ventajas económicas debidas al ahorro de energía, espacio y tiempo y además permite producir nuevos productos.

El objetivo de este documento es:

- Presentar al lector de una manera breve el procesamiento de materiales usando microondas. Se describirán las interacciones con el campo electromagnético, y el equipo básico requerido para implementar este tipo de calentamiento. Se mostraran ejemplos de usos exitosos, así como una evaluación de las condiciones o parámetros necesarios para el desarrollo adecuado de esta tecnología.
- Proporcionar una descripción de los adelantos más recientes en el procesamiento con microondas como una tecnología industrial.

---

<sup>1</sup> <http://winred.com/negocios/ingenieria-conceptual-basica-y-de-detalle/gmx-niv114-con15657.htm>.

- Plantear diferentes propuestas de aplicación, para que sean usadas a nivel de laboratorio.

Debe dejarse claro que los usuarios potenciales necesitan tomarse el tiempo para informarse sobre las microondas y su interacción con materiales antes de emprender un programa de uso de esta tecnología. La expectativa del equipo de trabajo de este libro es promover la aplicación exitosa del procesamiento con microondas a problemas reales.

El libro se encuentra organizado de la siguiente manera, inicia con una breve descripción de los fundamentos de las microondas y sus características principales que la hacen atractiva para su uso en el procesamiento de materiales, explica también la forma en que los materiales interactúan con el campo y los parámetros esenciales que hay que tener en cuenta para diseñar un proceso de producción satisfactorio. En el segundo capítulo se presentan aplicaciones exitosas en la manipulación de materiales con microondas, y se brinda información sobre las empresas que actualmente comercian estos equipos. En el tercer capítulo se muestra la metodología propuesta para abordar la implementación de este tipo de calentamiento, examinando primero los criterios a tener en cuenta en el momento de evaluar si un proceso debe o no ser manejado con microondas, resaltando sus beneficios en costos y ahorro de energía, además de las especificaciones de seguridad necesarias para su implementación, se describe el equipo básico utilizado para la fabricación y manejo de materiales con microondas, explicando su funcionamiento y los aspectos importantes para su selección. Siguiendo en el capítulo número cuatro, donde se propone un equipo para ser utilizado como planta piloto, añadiendo su costo y las empresas que los fabrican. Se finaliza con las conclusiones, recomendaciones y anexos.

Es necesario resaltar la importancia de los Ingenieros Electrónicos en el desarrollo de un proceso de esta índole, puesto que son ellos los encargados de la selección, diseño e implementación del equipo, al ser una técnica que incluye

componentes electrónicos y sistemas de control que requieren la unión del conocimiento en teoría electromagnética, materiales, diseño y control electrónico y digital. De igual forma, se requiere conformar un equipo multidisciplinario que desarrolle las diferentes etapas del proceso.

## 1. FUNDAMENTOS DE LAS MICROONDAS

La fabricación de un material vía microondas, es una tecnología que proporciona una nueva herramienta para procesar materiales; presentando ventajas que la convierten en un método eficiente en comparación a los medios convencionales, además que permite mejorar las características de materiales existentes.

### 1.1 MICROONDAS

Las microondas son ondas electromagnéticas ubicadas en la banda de frecuencia de 300 MHz a 300 GHz. Se puede expresar esta definición en términos de longitudes de onda. Teniendo en cuenta que la velocidad de propagación de un medio homogéneo caracterizado por sus constantes  $\epsilon$  y  $\mu$  tiene un valor de:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} [1]$$

para el vacío, dicha velocidad es igual a:

$$v_0 = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} [2]$$

la longitud de onda en este medio, asociada a una frecuencia  $f$  será:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} [3]$$

de forma que la banda de longitudes de onda de microondas tomará valores desde 1 metro hasta 1 milímetro. En los procesos industriales, generalmente las microondas se trabajan en frecuencias establecidas como: 915 MHz, 2.45 MHz,

5.8 GHz y 24.124 GHz, debido a que los generadores de ondas a estas frecuencias son los mayor facilidad de acceso en el mercado.

**1.1.1 Características de las Microondas.** El proceso de producción vía microonda es complejo, multidisciplinario e implica el diseño del equipo, además del conocimiento de las propiedades del material, donde constantemente se presentan cambios notorios con la temperatura. Estas características solas o en combinación, representan oportunidades y beneficios, que no se encuentran disponibles en los métodos convencionales de calentamiento, y a su vez introducen problemas y desafíos que deben ser resueltos.

**1.1.1.1 Penetración de la Radiación.** Las microondas presentan diversos comportamientos dependiendo de la frecuencia de operación y del material expuesto al campo electromagnético. El nivel de penetración es inversamente proporcional a la frecuencia y depende también de diversos factores, incluyendo la longitud de onda de la radiación y de las propiedades dieléctricas (y magnéticas) del material; es decir, entre mayor sea la frecuencia de operación menor será la penetración en el material. Uno de los principales rasgos es el calentamiento volumétrico que se genera en el material, provocando un mayor incremento de temperatura en el interior que en la superficie y aumentando la calidad y rendimiento del producto final al evitar su degradación y eliminar gases y grumos.

**1.1.1.2 Incremento en la Velocidad de Calentamiento.** El mecanismo de calentamiento más conocido para un material expuesto a un campo de microondas es la polarización, que consiste en la modificación de la distribución de las cargas eléctricas, cuando el campo eléctrico se aplica al material de forma alterna y la distribución de las cargas se retrasa con respecto a este, la energía

transferida se transforma en calor, ocurriendo en instantes de tiempo considerablemente menores comparados con los métodos convencionales de transferencia térmica; lo que ocasiona una reducción significativa en el tiempo de procesamiento. Este incremento en las pérdidas dieléctricas puede conducir a un calentamiento desigual y llevar a la fuga térmica, este fenómeno puede ser aprovechado para permitir el procesamiento de materiales cerámicos con bajas pérdidas.

**1.1.1.3 Calentamiento Selectivo del Material.** Debido a las variantes propiedades de los materiales, su capacidad para absorber energía electromagnética varía. En materiales compuestos por varios elementos, se pueden utilizar dichas propiedades para calentar ciertas porciones del elemento, seleccionando una frecuencia y potencia específica para este fin. El calentamiento híbrido con microondas es un ejemplo en donde el calentamiento selectivo ha sido usado con gran ventaja.

**1.1.1.4 Eficiencia de la Energía en el Proceso.** Se puede maniobrar el proceso de tal manera que la eficiencia en la energía aumente, manipulando parámetros del sistema como: longitudes de guías de onda, dimensiones de la cavidad, etc.

**1.1.1.5 Ahorros en el Procesamiento.** Las investigaciones realizadas muestran que la utilización de ondas electromagnéticas para el procesamiento de materiales, conlleva a una reducción considerable de costos y tiempo, además de una contribución al medio ambiente, convirtiéndose indiscutiblemente en una gran ventaja en comparación con los métodos convencionales.

**1.1.1.6 Auto-limitación de las reacciones.** En varios casos, el calentamiento con microondas cesara una vez la fuente de absorción diferencial como el agua haya sido removida o alterada durante el cambio de fase. La absorción auto limitada puede ocurrir también cuando dos materiales con diferentes características de acople son irradiados simultáneamente.

## **1.2 PROCESAMIENTO DE MATERIALES MEDIANTE MICROONDAS**

Para explicar el calentamiento de los materiales mediante microondas, debemos relacionar la forma cómo el campo eléctrico y la materia interactúan. Según las características del material, al ser aplicado un campo varios fenómenos pueden tener lugar, entre los que se encuentran: polarización, rotación dipolar, calentamiento resistivo, calentamiento electromagnético y calentamiento dieléctrico. Para explicar los fenómenos mencionados anteriormente se deben tener en cuenta algunos conceptos de teoría electromagnética.

Al ser aplicado un campo eléctrico la propagación de las microondas depende del material sobre el que incida y las propiedades magnéticas del medio, para caracterizar un medio específico se utilizan dos conceptos claves la permitividad compleja  $\epsilon$  y la permeabilidad compleja  $\mu$ .

**1.2.1 Permitividad Compleja.** La ecuación [4] muestra la equivalencia de la permitividad compleja, donde la parte real de esta ecuación es conocida como la constante dieléctrica, y se define como la capacidad de un medio para almacenar energía electrostática; entre sus efectos importantes se encuentra la capacidad de cambiar la velocidad de propagación de una onda plana cuando entra en la materia. La componente imaginaria se conoce como el factor de pérdidas

dieléctricas, y es la manera de cuantificar la disipación de potencia en un capacitor cuando éste se llena con un dieléctrico.

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$$

$$\mu = \mu' - i\mu'' \quad (4)$$

El factor de pérdidas controla la potencia que puede ser disipada en el material. Si  $\varepsilon'' < 10^{-2}$  se dice que el material es de bajas pérdidas y logra un acoplamiento pobre con las microondas, para lograr calentar estos materiales se necesita aplicar un fuerte campo eléctrico. Para los materiales con  $\varepsilon'' > 5$ , la profundidad de penetración puede ser muy pequeña, y si el objeto que se calienta es más grande que esta distancia, es bastante probable que se dé como resultado un calentamiento no uniforme.

De igual forma la componente real e imaginaria de la permeabilidad compleja son: la permeabilidad, definida como la medida de la superioridad de un material comparado con el vacío, para servir como trayectoria para líneas de fuerza magnética y el factor de pérdidas magnéticas respectivamente.

**1.2.2 Coeficientes de Reflexión y de Transmisión.** Al trabajar con medios que poseen discontinuidades, debemos tener en cuenta dos conceptos claves: el coeficiente de reflexión que relaciona la amplitud de la onda incidente con la amplitud de la onda reflejada, y el coeficiente de transmisión que describe la intensidad de la onda transmitida respecto a la onda incidente.

**1.2.3 Vector Poynting.** Para estudiar el comportamiento real de un sistema de calentamiento por microondas es significativo analizar las pérdidas de potencia existentes durante la propagación de las ondas en todo el proceso de calentamiento. El teorema de Poynting permite relacionar de manera cuantitativa

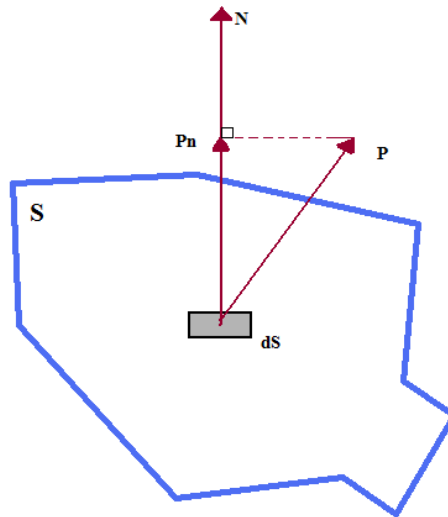
la energía que se propaga en una onda electromagnética, siendo la energía que pasa en la unidad de tiempo a través de la unidad de superficie.

Una forma práctica de analizar el teorema de Poynting es mediante del vector de Poynting. Se considera a continuación un elemento  $dS$  de una superficie  $S$  (Ver Figura 1),  $N$  es la normal a  $dS$ ,  $P$  es el vector de Poynting,  $P_n$  es el componente de  $P$  normal a la superficie, entonces  $P_n \cdot dS$  es la cantidad de energía que pasa a través del diferencial de superficie en un segundo; para calcular la energía que atraviesa la superficie total, se deduce por la ley de la conservación de la energía, la cantidad de energía que atraviesa esta superficie en la unidad de tiempo debe ser igual a la rapidez de reducción de la energía  $U$ . (Ver Ecuación 5)

$$\int_S P_n \cdot dS = - \frac{dU}{dt} \quad (5)$$

siendo  $S$  una superficie cerrada.

**Figura 1.** Vector de Poynting



**Fuente:** Autores del Proyecto.

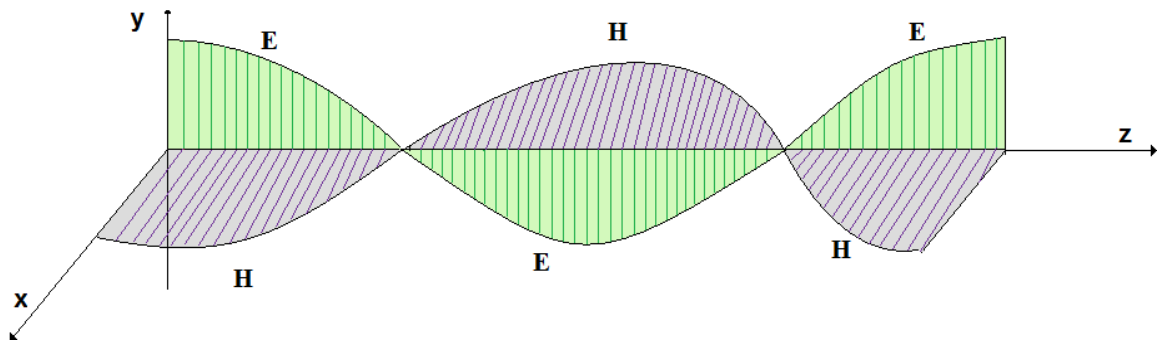
La cantidad total de energía electromagnética contenida en un volumen  $V$ , limitada por la superficie  $S$  es entonces:

$$U = \int_V \frac{1}{2}(\epsilon E^2 + \mu H^2) dV \quad (6)$$

sustituyendo en la Ecuación anterior (6):

$$\int_{\substack{\text{superficie} \\ \text{cerrada}}} P_n dS = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \int_V (\epsilon E^2 + \mu H^2) dV \quad (7)$$

**Figura 2.** Onda Eléctrica y Magnéticas. Ubicadas en el Eje de Coordenadas X, Y, y Z. En Un Instante de Tiempo.



**Fuente:** Autores del Proyecto.

En este caso, se considera solamente las componentes  $E_y, H_z$  de las ondas planas, integrando la Ecuación (7), el flujo de energía está dado por:

$$P_x = E_y H_z \quad (8)$$

en general, el vector de Poynting está definido como el producto cruz de E y H. La dirección del vector Poynting indica la dirección del flujo de potencia instantáneo en el punto, y es perpendicular a ambos vectores E y H.

### 1.3 INTERACCIÓN DE LOS MATERIALES CON LAS MICROONDAS

La explicación resumida del calentamiento por microondas consiste en que, los materiales se calientan por fricción interna cuando los mecanismos de pérdida dieléctricos y magnéticos responden en un campo de microondas. Se puede pensar que debería haber una frecuencia óptima para maximizar la fricción para cada mecanismo, pero esta frecuencia cambia con la temperatura debido a que ciertos movimientos se hacen más fáciles cuando el material se calienta, produciendo menos fricción en algunos casos y más fricción en otros.

En el calentamiento convencional, todo el calor debe ser transferido de la superficie externa del material hacia el interior. El calentamiento por microondas ofrece una ventaja importante al ser capaz de colocar la energía directamente en el volumen del objeto; esto requiere que se encuentren ciertas condiciones donde las microondas penetren el material para causar calentamiento volumétrico.

En los conductores, los electrones se mueven libremente en respuesta al campo eléctrico y a la corriente, el flujo de electrones calentará el material a través del calentamiento resistivo; sin embargo, en los conductores metálicos las microondas pueden ser reflejadas y no ser calentados de forma efectiva; en los aislantes los electrones no fluyen libremente, pero la reorientación electrónica, las distorsiones inducidas o los dipolos permanentes pueden lograr el calentamiento.

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

- **Reflejantes:** en este tipo de materiales no existe la penetración, se caracterizan porque la onda incidente produce que el material adquiera una velocidad de vibración radiando energía en la cara opuesta.

- **Absorbentes:** la radiación se absorbe de forma parcial o total, logrando fácilmente calentarlo. En estos materiales parte de la onda incidente se disipa al atravesarlo
- **Transparentes:** la radiación penetra totalmente.

El efecto principal de la interacción con microondas es el calentamiento de los materiales; el proceso de conversión de la energía de microondas en calor implica la relación entre el campo magnético y la conductividad o las propiedades dieléctricas del material, como se plantea en el texto **Microwave Processing of Materials**<sup>2</sup> este tipo de interacción puede ser representada por tres procesos:

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

Para visualizar estos procesos, tenemos en cuenta el concepto de tangente de perdidas, mostrado en la ecuación (9).

$$\tan\delta = \frac{(\sigma_e + \sigma_i) / \omega \epsilon_0 \epsilon''}{\epsilon'} \quad (9)$$

La cantidad  $\tan \delta$  se conoce como la tangente de pérdidas y es el parámetro más importante en el procesamiento de materiales, debido a que es un indicador de la habilidad del material para convertir la energía absorbida en calor. El ángulo de fase,  $\delta$ , se relaciona con el desfase temporal que se encuentra envuelto en la polarización. El acople óptimo entre la energía de microondas y el material se logra al conseguir una combinación que permita una penetración adecuada y elevadas pérdidas; para esto se requiere de una  $\tan \delta$  y  $\epsilon''$  máximas.

---

<sup>2</sup> Microwave Processing of Materials. Commission on Engineering and Technical Systems. National Research Council.

El promedio de energía eléctrica almacenada por unidad de volumen es:

$$W_{prom} = 1/2 \epsilon_0 \epsilon' E^2 \text{ (J/m}^3\text{)} \quad (10)$$

se puede estimar la disipación de la potencia volumétrica a través de la siguiente expresión

$$P_{prom} = 1/2 \omega \epsilon_0 \epsilon'' \int (E^* \cdot E) dV \quad (11)$$

donde  $P_{prom}$  es la potencia promedio,  $\omega$  es la frecuencia de radiación,  $\epsilon_0$  la permitividad del espacio libre,  $E$  el campo eléctrico y  $E^*$  la conjugada del campo eléctrico. En esta ecuación se puede ver que grandes cantidades de campo son requeridas a bajas frecuencias para obtener la misma densidad de potencia.

En el material, la absorción depende de la intensidad del campo eléctrico, frecuencia, factor de pérdidas y permitividad. Si el material tiene pérdidas con un valor considerable (valores altos  $\tan \delta$  y  $\epsilon''$ ) se calentara de forma más efectiva que uno con pérdidas bajas (valores bajos de  $\tan \delta$  y  $\epsilon''$ ).

**1.3.1 Profundidad de penetración.** La conducción electrónica puede formar parte fundamental en el calentamiento de los metales o los semiconductores. Los materiales que tienen una conductividad moderada, se calientan de forma más efectiva que aquellos aislantes o materiales altamente conductivos. Los aislantes con bajas perdidas, son difíciles de calentar a temperatura ambiente, incluso cuando la penetración de las microondas es bastante significativa.

Si la conductividad del material es muy grande, el campo se atenuará rápidamente hacia el interior de la muestra debido al efecto piel; en el momento en que un gran flujo de corriente incide en la muestra debido a una alta conductividad, una combinación del campo magnético con la corriente produce una fuerza que empuja a los electrones de conducción hacia el exterior dentro de

una franja estrecha ubicada de forma adyacente a la frontera. La extensión de este flujo es llamada profundidad de penetración,  $d_s$ . Esta se define como la distancia dentro de la muestra a la cual la fuerza del campo eléctrico se reduce a  $1/e$ .

$$d_s = \frac{1}{(\frac{1}{2}\mu_0\mu'\sigma)^{1/2}} \text{ (m)} \quad (12)$$

La distancia de penetración es un parámetro importante debido a que brinda una indicación de la distribución de calor dentro del material; los rangos de la profundidad de penetración varían desde los micrómetros a unos pocos metros. La Tabla 1 muestra algunas profundidades de penetración calculadas a partir de las propiedades dieléctricas.

Cabe anotar que el valor de  $d_s$  no indica que no existe calentamiento a una profundidad superior a la profundidad de penetración.

**Tabla 1.** Profundidades de Penetración de Microondas (de 2.45 GHz) En Algunos Materiales

| Material      | Temperatura, °C | Profundidad de Penetración, cm |
|---------------|-----------------|--------------------------------|
| Agua          | 25              | 1.5                            |
| Agua          | 95              | 5.7                            |
| Hielo         | 12              | 1,00                           |
| Madera        | 25              | 3-350                          |
| Cristal hueco | 25              | 35                             |
| Porcelana     | 25              | 56                             |
| Resina Epoxi  | 25              | 4,100                          |
| Teflón        | 25              | 9,200                          |

| Material  | Temperatura, °C | Profundidad de Penetración, cm |
|---|-----------------|--------------------------------|
| Cristal de cuarzo   | 25              | 1,600                          |
| <p><b>Nota:</b> profundidades de penetración muy altas ocurren cuando el material no se acopla o se calienta bien en el campo de microondas. El acoplamiento a menudo aumenta con la temperatura lo que causa una disminución en la profundidad de penetración.</p> |                 |                                |

**Fuente:** Advancements in Microwave Heating Technology. Ed Kubel. Industrial Heating.

**1.3.2 Polarizaciones Atómicas e Iónicas.** Bajo un campo eléctrico  $E$ , la nube de electrones en un átomo puede ser desplazada en relación con el núcleo, dejando una carga descompensada  $-q$  en un lado del átomo y una carga  $+q$  al otro lado. Las cargas descompensadas producen un momento dipolar eléctrico y la suma de esos dipolos por unidad de volumen se denomina polarización,  $P$ .

**1.3.2.1 Polarización.** Consiste en la modificación de la distribución de las cargas eléctricas en un material; es decir, cuando a un material se le aplica un campo se origina un cambio en la orientación de la carga de las partículas, lo cual induce dipolos que responden a este; existen diferentes formas de polarización: la polarización electrónica producida al cambiar la distribución de la nube electrónica en el átomo, y la polarización iónica que consiste en el cambio de interacción causado por el desplazamiento de los iones.

Debido a que las polarizaciones atómica e iónica se encuentran activas para frecuencias ópticas e infrarrojas. Estas actúan tan rápido que la red de polarización observada bajo un campo eléctrico a la frecuencia de microondas está en fase con el campo. Como resultado ambos  $P''$  y  $\epsilon''$  son cero, y por lo que no aportan a la absorción de las microondas.

**1.3.3 Calentamiento por microondas en materiales dieléctricos.** En la conducción electrónica al moverse las partículas de carga una corriente es inducida. Esta situación es un poco diferente en materiales dieléctricos.

Los dipolos eléctricos juegan un papel importante en las propiedades del material; el mecanismo de polarización que causa absorción de microondas implica rotación y orientación de los dipolos. Hay tres maneras de que esto puede suceder en un sólido:

- El átomo puede tener la forma de una “nube de electrones” rodeando el núcleo distorsionado por el campo eléctrico. Los átomos con muchos electrones (alto número atómico) son fácilmente distorsionados y son considerados más “polarizables”.
- Las moléculas con un dipolo eléctrico permanente pueden tener el dipolo alineado en respuesta al campo eléctrico.
- Las moléculas, con o sin dipolo permanente, pueden tener cadenas distorsionadas en respuesta a un campo eléctrico.

En ausencia de un campo eléctrico, los dipolos son orientados al azar y la red de polarización es cero (0). En un campo estático los dipolos se alinean con el campo y la polarización es maximizada; estos dipolos pueden rotar, pero lo hacen en contra de la fuerza de fricción. Como la frecuencia del campo eléctrico aumenta, la rotación de los dipolos se detiene y la red de polarización en el material ya no se encuentra en fase con el campo eléctrico.

El tiempo de relajación,  $\tau$ , es el intervalo de tiempo que caracteriza la restauración de un sistema alterado. El comportamiento de  $\tau$  determina la frecuencia y la dependencia de la temperatura de  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$ . La única característica de este modelo es que el efecto de la polarización en ambos disminuye en conjunto sobre la frecuencia de microondas.

Al momento de mencionar el fenómeno de calentamiento en los dieléctricos, se debe hacer referencia a los factores de despolarización, para definirlos tenemos en cuenta que si la polarización  $P$  es constante, el campo total es igual a  $E = E_{Ext} + E_d$  la suma del campo debido a las cargas del exterior,  $E_{Ext}$ , y el campo debido a la densidad superficial inducida en la superficie externa del dieléctrico,  $E_d$ . Este, siempre se opone al campo externo y por eso recibe el nombre de campo de despolarización; debido a este último la red de campo en el interior de la muestra se reduce, mientras que el campo fuera de esta sigue siendo el mismo. El cálculo en este caso supone un factor de despolarización,  $N$ , y depende únicamente de la geometría.

Cuando  $N\epsilon'$  es grande, el campo eléctrico dentro del material puede ser reducido a cero, por lo cual la muestra se encuentra completamente protegida de los efectos de las microondas. Para evitar esto, la carga superficial debe ser disminuida.

**1.3.4 Fuga Térmica.** Muchos materiales exhiben un incremento en  $\epsilon''$  mientras aumenta la temperatura; una consecuencia importante de esto es la aparición de zonas de calor localizadas. El desarrollo de estos puntos calientes es denominado generalmente fuga térmica (calentamiento acelerado inestable). La fuga térmica se refiere a una situación en la cual un incremento en la temperatura ocasiona un cambio en las condiciones de manera que esto lleva a un aumento mucho mayor en la temperatura lo que conduce a un resultado destructivo.

Esta condición se produce cuando la disipación de energía en un volumen pequeño ubicado dentro una pieza de trabajo supera la tasa de transmisión con su entorno, de modo que la razón de aumento de la entalpía<sup>\*3</sup> es mayor que la de sus

---

\* La Entalpía es la cantidad de energía de un sistema termodinámico que éste puede intercambiar con su entorno.

vecinos; por lo cual la temperatura aumenta a un ritmo más rápido que en los alrededores, hasta que ocurre la descomposición del material.

El calentamiento por microondas estable depende de la tasa de absorción de la energía y de la habilidad de la muestra de disipar el calor resultante, por lo cual basándonos en el concepto dado anteriormente, si la dependencia de la temperatura de la absorción de energía es menor que la dependencia de la temperatura de la disipación de calor en la superficie de la muestra (más el sistema de instalación), se debe presentar calentamiento estable. El rápido aumento en el factor de pérdida dieléctrico con la temperatura es el principal problema en la fuga térmica, acompañado de la no uniformidad de la temperatura.

Al analizar el significado anterior, se podría considerar que el proceso no puede ser controlado; sin embargo esta misma propiedad (gran  $d\varepsilon''/dT$ ) es la que permite el calentamiento con microondas de muchos materiales que son pobres absorbentes a temperatura ambiente; esto siempre y cuando la muestra completa sea calentada de manera uniforme por una fuente externa y el campo interno sea completamente constante.

---

<sup>3</sup> CHICA LLANES, Luis Alfonso. Entalpia. En: Monografías.com [Publicado en]: Marzo 4 de 2004. [Disponible en]: <http://www.monografias.com/trabajos17/calorimetria/calorimetria.shtml> [Consultado en]: Agosto 2 de 2009.

## 2. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LAS MICROONDAS

La técnica de calentamiento con microondas se ha establecido satisfactoriamente en numerosas industrias y el número de procesos industriales en el cual este tipo de calentamiento ha sido aplicado de forma exitosa aumenta diariamente. Entre estos se encuentran:

- El procesado de alimentos,
- La química analítica, y
- El calentamiento y vulcanización del caucho.

Es importante resaltar los adelantos en el diseño de equipos y procesos que han venido desarrollando varios países a nivel mundial los cuales han conformado equipos de trabajo multidisciplinarios, en donde se destaca la participación de ingenieros electricistas y electrónicos, encargados de varios aspectos que deben ser abordados en el momento de implementar este proceso, ya que son los responsables del desarrollo, fabricación, instalación y mantenimiento de los equipos utilizados.

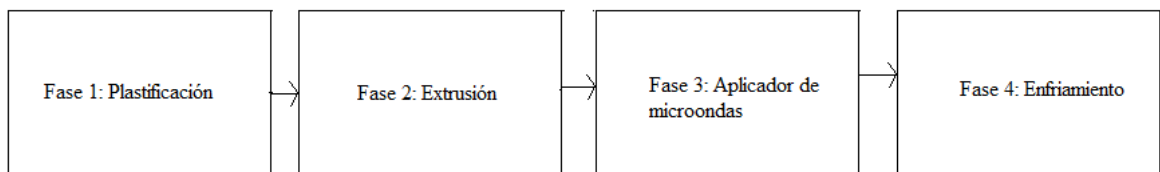
Para demostrar la efectividad de esta tecnología se muestran ejemplos de aplicaciones a nivel de laboratorio e industrial donde se ha comprobado que el procesamiento con microondas es una opción válida que presenta mejoras frente a los procesos convencionales. Entre las aplicaciones a mostrar se encuentran el vulcanizado del caucho, reacciones catalíticas en presencia de microondas y la producción de carburo de silicio, estas dos últimas a nivel de laboratorio.

## 2.1 CALENTAMIENTO PARA EL VULCANIZADO DEL CAUCHO<sup>4</sup>

La vulcanización es un método en donde el caucho natural es mezclado con azufre y calentado a temperaturas del orden de 200°C o más. Convirtiéndose en un proceso irreversible en el cual el caucho deja de comportarse como un material termoplástico, adquiriendo características de un material termorígido (no se derrite con el calor), esto con el fin de mejorar sus propiedades, puesto que se convierte en un caucho duro, mas durable y adquiere resistencia al choque. Las industrias en la actualidad utilizan el calentamiento por microondas para el proceso de vulcanización, principal mente porque existen ventajas considerables como reducción del consumo energético de hasta del 30% aproximadamente, acompañado con un caucho de mejor calidad comparado con métodos convencionales. [AST95].

A continuación, se muestra un diagrama en donde se evidencian las etapas de un proceso de vulcanización (véase Figura3).

**Figura 3.** Línea de vulcanizado con microondas.



**Fuente:** Autores del Proyecto.

**Fase 1:** La plastificación se realiza para ablandar el caucho, en un rango de temperatura de 75°C a 110°C.

**Fase 2:** En esta etapa se realiza una extrusión, en donde el objetivo es darle la forma o la figura deseada al caucho antes que entre al aplicador de microondas.

---

<sup>4</sup> Astigarra Julio. Hornos de Alta Frecuencia y Microondas: Teoría, Calculo y Aplicaciones. McGraw Hill.1995.

**Fase 3:** Aquí es donde ocurre el calentamiento principal, el cual se realiza a la temperatura deseada, en un tiempo relativamente corto.

**Fase 4:** Es la última etapa y es donde se da el proceso de enfriamiento a una temperatura de 80°C, antes de darle la forma final.

En la Figura 4. Se muestra un equipo de microondas industrial de la empresa ITAIGUM para la producción de perfiles y tubos de caucho, cuya frecuencia de operación es de 2.45Ghz.

**Figura 4.** Equipo de microondas con frecuencia de 2.45GHz.



**Fuente:** ITAIGUM. Continuous Vulcanisation System. Barcelona Spain. [Consulta: Agosto 20 de 2009]. Disponible en <http://www.itaigum.com>.

## 2.2 ESTUDIO DE UNA REACCIÓN CATALÍTICA EN PRESENCIA DE MICROONDAS<sup>5</sup>

La oxidación catalítica del etileno es estudiada dentro de un reactor homogéneo, lleno de partículas de Alúmina de 3 mm de diámetro promedio e impregnadas de

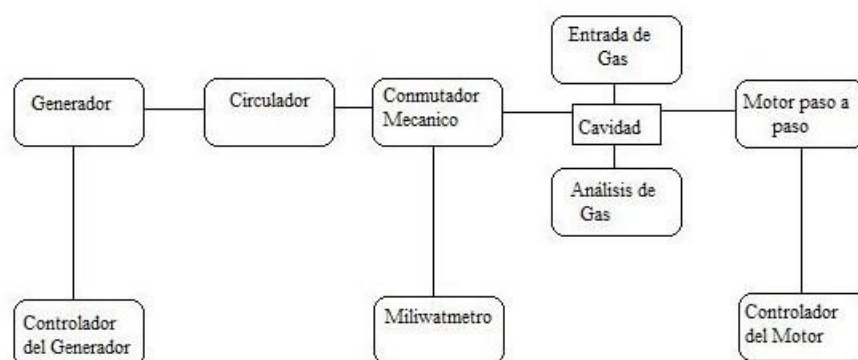
---

<sup>5</sup> Etude d'une réaction catalytique en présence d'un rayonnement microonde. The Chemical Engineering Journal. Elsevier Sequoia.

platino. La reacción tiene lugar en un horno isotérmico o dentro de una cavidad que permita el calentamiento del reactor por absorción de rayos de microondas. En este estudio se toman las mismas condiciones de operación que son utilizadas en el procesamiento convencional, pero la temperatura de la reacción es obtenida por la absorción de la energía electromagnética dada y la energía térmica. Para describir el montaje experimental se analizan la instalación del equipo de microondas y las condiciones de trabajo.

**2.2.1 Instalación del equipo microondas vs el equipo clásico.** El esquema mostrado en la figura 5 describe en detalle el sistema con el que se irradian los rayos de microondas, el reactor donde se llevara a cabo la reacción química está formado por un tubo de silicio, que atraviesa la cavidad resonante por el centro. El eje del reactor esta paralelo a un lado de la guía de onda y por consiguiente esta paralelo al campo eléctrico. La cama catalítica esta soportada por una pastilla de silicio, y su altura es igual a la de la guía de ondas.

**Figura 5.** Descripción del equipo para la catalización en presencia de microondas



**Fuente:** Autores del Proyecto. Basados en Réaction catalytique en présence d'e un rayonnement microonde. 1992.

El sistema convencional de calentamiento para esta aplicación está formado por un reactor en acero inoxidable, con las mismas dimensiones que el reactor utilizado para el procesado con microondas, este se encuentra ubicado dentro de un horno equipado con un regulador de temperatura, un ventilador interior y una termocupla de cromo y alúmina encargada de medir la temperatura del horno a cada instante. La experiencia se efectúa a cuatro temperaturas 105° C, 115° C, 125° C y 135°C y para cinco salidas gaseosas medidas a la temperatura ambiente y a la presión atmosférica, 0,5 1h<sup>-1</sup>, 1 1h<sup>-1</sup>, 1,35 1h<sup>-1</sup>, 3 1h<sup>-1</sup>, y 4,35 1h<sup>-1</sup>. La salida gaseosa proviene de una botella de gas comprimido donde el contenido de etileno en el aire es de 2,5% en volumen.

**2.2.2 Resultados del estudio.** El objetivo de este estudio era comparar el desarrollo de las reacciones catalíticas bajo el calentamiento con microondas y por calentamiento convencional. Para las cuatro salidas estudiadas y para una misma temperatura de funcionamiento de catalizador, la tasa de conversión bajo el calentamiento con microondas es superior a la obtenida por calentamiento clásico, por lo cual la idea de implementar este proceso se hace atractiva, pudiendo obtener la misma tasa de conversión con una temperatura 8 °C inferior a su análogo clásico.

### **2.3 PRODUCCIÓN DE CARBURO DE SILICIO UTILIZANDO MICROONDAS COMO FUENTE DE ENERGÍA<sup>6</sup>.**

Otro de los adelantos importantes en el campo de procesamiento con microondas es la producción de carburo de silicio. En la tierra no existen grandes depósitos de

---

<sup>6</sup> Aguilar J, Rodríguez J. Producción de Carburo de Silicio Utilizando Microondas Como Fuente de Energía. XXII Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales. Instituto Tecnológico de Saltillo. Noviembre, 2000.

carburo de silicio, y es por ello que se busca sinterizarlo a partir de otros materiales. Para ello, se utiliza una cavidad multimodal en donde se coloca una mezcla de grafito y óxido de silicio. Para suministrar la energía se utiliza un magnetrón que opera a 2.45GHz con una potencia de 2000 Watts. Un gran porcentaje de su producción se basa en la reducción carbotérmica de óxido de silicio de alta pureza, para lo que se usa carbón libre de cenizas y antracita, en un horno de arco eléctrico. Pruebas experimentales demostraron que los reactivos son buenos absorbentes de microondas aun a bajas temperaturas, se tomaron las medidas usando pirometría óptica a través de una malla que se ubico en el frente de la cavidad y que permitía observar la muestra sin peligro de fugas. La muestra se ubico en el sitio en donde el campo era máximo. Al realizar numerosos experimentos se llego a la conclusión de que se había formado carburo de silicio. Confirmándose que el carburo de silicio puede ser fabricado utilizando microondas como fuente de energía, además se comprueba la eficiencia en cuanto al suministro de energía al sistema.

Como se puede visualizar en el ejemplo anterior, la implementación de esta tecnología brinda una alternativa amigable con el medio ambiente al consumir menos energía y al no generar contaminantes.

## **2.4 COMERCIALIZACIÓN DE EQUIPOS DE CALENTAMIENTO POR MICROONDAS**

Existen compañías que se especializan en este campo y construyen sistemas de calentamiento basándose en las especificaciones brindadas por los clientes. Algunas, incluso colaboran en el diseño de las etapas del proceso. En la Tabla 2, se muestra una lista con algunas de las empresas fabricantes de equipos.

Entre las empresas involucradas, se encuentran tanto Dennis Tool como la Corporación Dana, quienes encontraron la necesidad de desarrollar sistemas con microondas para alcanzar sus objetivos de mejorar piezas y productividad. El CPI (Communications and Power Industries, Palo Alto, Calif.; [www.cpii.com](http://www.cpii.com)), antes parte de Varian, se unió a la investigación y lanzamiento de nuevos equipos entre los que se encuentra la fabricación de la *Autoonda*, un sistema que usa el elevado poder de los magnetrones, un sistema de transmisión de gas, y una estación de trabajo con Labview (Ver Figura 6) la *Autoonda* puede ser encajada con un magnetrón, klistrón (18 GHz) o gyrotron (28 GHz).

**Figura 6.** El Sistema de Microonda Autoonda



**Fuente:** Advancements in Microwave Heating Technology. Ed Kubel. Industrial Heating.

**Tabla 2.** Fabricantes de Equipos Microondas

| <b>Fabricantes de Hornos Microondas</b> | <b>Especialidad</b>                                      | <b>Dirección Web</b>   |
|---|--|--|
| Advanced Manufacturing Technology       | Consultores Industriales de calentamiento con microondas | <a href="http://www.amtmicrowave.com">www.amtmicrowave.com</a> |
| CEM Corporation                         | Sistemas de digestión microondas                         | <a href="http://www.cem.com">www.cem.com</a>                   |
| CM Furnaces                             | Hornos híbridos microondas + eléctrica                   | <a href="http://www.cmfurnaces.com">www.cmfurnaces.com</a>     |

| <b>Fabricantes de Hornos Microondas</b> | <b>Especialidad</b>   | <b>Dirección Web</b>   |
|---|---|--|
| Cober-Muegge                            | Vulcanización microondas, equipo  | <a href="http://www.cobermuegge.com">www.cobermuegge.com</a>                                   |
| Communications and Power Industries     | Sistemas de calentamiento por microondas y equipo                             | <a href="http://www.cpii.com">www.cpii.com</a>   |
| C-Tech Innovations / Ceralink           | Diseño y construcción de hornos microondas híbridos y otros hornos microondas | <a href="http://www.ceralink.com">www.ceralink.com</a>   |
| Dennis Tool                             | Horno microondas de sinterización continua                                    |  |
| Ferrite Components, Inc.                | Sistemas microondas para templar y cocinar                                    | <a href="http://www.ferriteinc.com">www.ferriteinc.com</a>                                     |
| Gerling Applied Engineering             | Sistemas y equipos microondas   | <a href="http://www.2450mhz.com">www.2450mhz.com</a>   |
| Harper International                    | Calcinador microondas rotatorio   | <a href="http://www.harperintl.com">www.harperintl.com</a>                                     |
| Harrop Industries                       | Hornos híbridos microondas gas  | <a href="http://www.harropusa.com">www.harropusa.com</a>                                       |
| Industrial Microwave Systems, Inc. (US) | Sistemas microondas continuos planares, cilíndricos                           | <a href="http://www.industrialmicrowave.com">www.industrialmicrowave.com</a>                   |
| Industrial Microwave Systems, Inc. (UK) | Hornos y equipos microondas continuos   | <a href="http://www.industrial-microwave-systems.com">www.industrial-microwave-systems.com</a> |
| Linn High Therm GmbH                    | Hornos microondas de frecuencia dual  | <a href="http://www.linn.de">www.linn.de</a>   |
| Manitou Systems Inc.                    | Sistemas microondas y de RF plasma  | <a href="http://www.manitousys.com">www.manitousys.com</a>                                     |
| Microdry Corp.                          | Sistemas Industriales de microondas   | <a href="http://www.microdry.com">www.microdry.com</a>   |
| Milestone S.R.L.                        | Sistemas de digestión y análisis microondas                                   | <a href="http://www.milestonesci.com">www.milestonesci.com</a>                                 |
| Mino Yogyo Co. Ltd.                     | Hornos microondas híbridos  | <a href="http://www.mino-ceramic.co.jp">www.mino-ceramic.co.jp</a>                             |

| <b>Fabricantes de Hornos Microondas</b> | <b>Especialidad</b>                                   | <b>Dirección Web</b>   |
|---|---|--|
| O-I-Corporation                         | Sistemas de digestión microondas                      | <a href="http://www.oico.com">www.oico.com</a>                             |
| Panasonic                               | Horno microondas de cerámica                          |  |
| Personal Chemistry                      | Sistema microondas de síntesis orgánica, bioquímica   | <a href="http://www.personalchemistry.com">www.personalchemistry.com</a>   |
| PSC                                     | Sistemas de calentamiento por RF y equipos microondas | <a href="http://www.pscrheat.com">www.pscrheat.com</a>                     |
| Puschner-Microwave Power Systems        | Hornos microondas, secadores                          | <a href="http://www.pueschner.com">www.pueschner.com</a>                   |
| Radatherm Pty Ltd.                      | Hornos microondas de sinterización                    | <a href="http://www.radatherm.com.au">www.radatherm.com.au</a>             |
| Research Microwave Systems, LLC         | Laboratorio de sistemas de microondas, accesorios     | <a href="http://www.thermwave.com">www.thermwave.com</a>                   |
| SAIREM                                  | Equipos de microondas para todas las frecuencias.     | <a href="http://www.sairem.com/">http://www.sairem.com/</a>                |
| Takasago Industry Co                    | Hornada de microondas y horno microondas elevador     | <a href="http://www.takasago-inc.co.jp">www.takasago-inc.co.jp</a>         |
| Thermex-Thermatron, Inc.                | Alto poder, alta frecuencia microonda y calentadores  | <a href="http://www.thermex-thermatron.com">www.thermex-thermatron.com</a> |

**Fuente:** Advancements in Microwave Heating Technology. Ed Kubel. Industrial Heating.

Entre las aplicaciones de la *Autoonda*, se incluyen:

- La sinterización de metales y cerámicas,
- Doblado y fusión de vidrio,
- Soldadura,
- Reacciones químicas,

- Calcinación y
- Muchos otros proyectos incluyendo la fabricación de nanocerámica.

En el continente Europeo, se destaca en trabajo de dos empresas líderes como son Linn High Therm GmbH (Eschenfelden) una empresa alemana que fabrica equipos de calentamiento por microondas tanto de laboratorio como industriales incluyendo sistemas de altas temperaturas, y SAIREM, empresa francesa que se especializa en el desarrollo de equipos integrados para procesos bajo ciertas especificaciones, además de ofrecer los instrumentos por separado.

Actualmente, el continente asiático lleva gran ventaja en la comercialización de hornos microondas, en Japón, Takasago Industry Co. Ltd. (Tokio City, Japan), y, Mino Yogyo Co. Ltd. (Mizunami, Japón), uno de los competidores de Takasago, son empresas pioneras en este campo. En las Figuras 7 y 8, se muestran los hornos que ofrecen al mercado.

**Figura 7.** Horno Microondas Asistido Por (izquierda) Fogón Híbrido de Rodillo de Microondas (Derecha) de Takasago Industry Co. en Japón



**Fuente:** Advancements in Microwave Heating Technology. Ed Kubel. Industrial Heating.

**Figura 8.** Horno Híbrido de Microondas y Gas (Izquierda) y Horno Puro Continuo de Microondas (Derecha) de Mino Yogyo Co. en Japón



**Fuente:** Advancements in Microwave Heating Technology. Ed Kubel. Industrial Heating.

En las Universidades, también, han sido instalados laboratorios para la investigación en esta nueva tecnología siendo ejemplo de ello un grupo de la Universidad de Florida, los cuales en el 2001, guiados por el Doctor David Clark y el miembro de la Facultad de Investigación Diane Folz construyeron la Instalación de Investigación de Procesos por Microondas en el Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería del Instituto Politécnico de Virginia (Backsburg, Va.; [www.vt.edu](http://www.vt.edu)). El laboratorio está equipado para realizar investigación usando energía de microondas en los límites de 2-18 GHz con niveles de poder de 200 W a 6.4 Kws. Su investigación actual de microondas se centra en la remediación de desechos y el reciclaje, la síntesis de nanomaterial, la formación de cerámica de vidrio, esterilización, y tecnologías de tratamiento médico.

Se pueden numerar cientos de investigaciones y patentes actuales, las cuales tienen como centro las microondas usadas como fuente de energía, demostrando que esta es una técnica eficiente y ecológicamente amigable, lo que impulsa a seguir trabajando en su avance y mejora continua. Uno de los objetivos de este trabajo es promover la investigación y la implementación de este tipo de procesamiento a nivel de laboratorio, siendo fundamental que en la universidad se tome conciencia de lo importante que es adentrar en el desarrollo de grupos interdisciplinarios que se dediquen a trabajar en la ejecución de estos procesos con microondas.

### **3. PROPUESTA DE APLICACIÓN Y SUS COMPONENTES**

Al iniciar el proceso de fabricación de un material con microondas es importante plantear una metodología que describa paso a paso las etapas principales, entre las cuales se encuentran la evaluación del material para validar si es viable el proceso, la elección y descripción del equipo a utilizar y la propuesta de un plano donde se muestre la interconexión de los equipos y sus especificaciones técnicas.

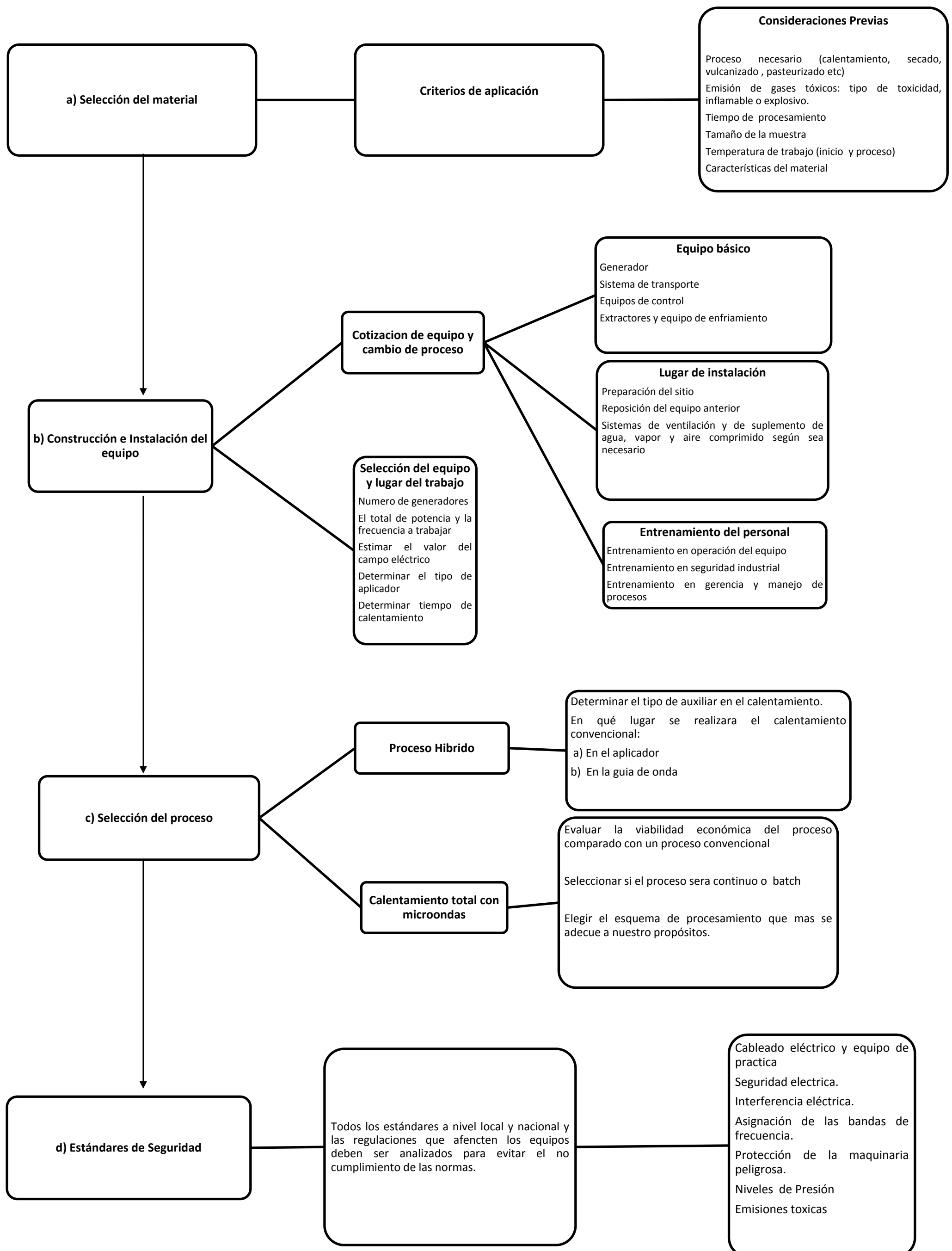
#### **3.1 METODOLOGÍA GENERAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN POR MICROONDAS**

La manera más fácil de visualizar esta metodología es a través de un diagrama de bloques (véase figura 9), el cual describe las etapas básicas que la componen. Este diagrama se divide en cuatro (4) partes principales: a) la selección del material como primer paso, donde se profundiza la aplicación de los criterios necesarios para evaluar la viabilidad del proceso teniendo en cuenta aspectos que deban ser abordados de forma previa. Cada criterio a verificar se encuentra explicado en la sección 3.2. b) Como siguiente etapa se encuentra la cotización, elección de los equipos y lugar de trabajo, donde se describen los equipos a utilizar y se sugiere el cálculo de la inversión para cambiar el tipo de proceso. Luego se realiza la selección e implementación del sistema, para lo cual se deben tener en cuenta los costos implicados. La descripción de los elementos básicos se encuentra en la sección 3.3 de este capítulo. c) Se continúa con la selección del proceso (híbrido o calentamiento único con microondas). Esta etapa es de gran importancia debido a que se elige el tipo de calentamiento a utilizar y el esquema válido para llevar a cabo el montaje a nivel de laboratorio. En la sección 3.4 se proponen cuatro (4) sistemas y se explican sus ventajas y desventajas. d) Como

parte final de esta metodología se plantea una revisión de los estándares de seguridad. Esto con el fin de asegurar que las instalaciones cumplan con las normas y reglamentaciones planteadas por los estamentos de vigilancia y control. En la sección 3.5 se profundiza y exponen los aspectos a tener en cuenta para cumplir con los lineamientos de seguridad.

De esta forma se pueden resumir los pasos principales que se deben llevar a cabo para analizar la viabilidad del proyecto. En caso de ser favorable, el estudio muestra si se puede implementar un cambio pequeño o si es necesario reformular todo el proceso.

Figura 9. Metodología general para la implementación de un proceso de fabricación por microondas



Fuente: Autores del Proyecto. Basados en Jonhs AT, Warne DF. Engineering's Handbook of Industrial Microwave Heating.

## **3.2. CRITERIOS DE APLICACIÓN**

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

El éxito de esta técnica radica en aprovechar el conocimiento del equipo para determinar si la implementación del proceso es o no viable. A continuación se presenta una serie de consideraciones que pueden ser utilizadas para este propósito.

### **3.2.1 CONSIDERACIONES TÉCNICAS**

Para cada aplicación potencial debe hacerse una evaluación cuidadosa para determinar si el calentamiento con microondas es la mejor alternativa. Las siguientes consideraciones guían los procesos de evaluación.

**3.2.1.1 Características del Material.** La habilidad del material para calentarse bajo la exposición a la energía de microondas está determinada por una propiedad denominada factor de pérdida.

Materiales con factor de pérdida entre 0.01 y 1 generalmente se calientan de forma adecuada en presencia de microondas. Estos valores deben ser vistos como una guía solamente, debido a que el factor de pérdidas es dependiente de la temperatura, frecuencia y la humedad del contenido.

La habilidad de otros materiales como los polímeros y cerámicos para absorber la energía de microondas puede ser aumentada usando dieléctricos sensibilizadores. La sensibilidad del material para calentarse rápidamente también debe ser considerada. La tasa a la cual el material puede ser calentado sin ningún daño, limita la velocidad a la cual la energía de microondas puede ser aplicada.

Los materiales que deben ser calentados lentamente para mantener su integridad, funcionan mejor con una combinación microondas / calentamiento convencional.

**3.2.1.2 Frecuencias.** La FCC le asignó a la industria la frecuencia de microondas en un rango de 915 y 2450 MHz. La mayoría de aplicaciones utiliza 2450 MHz porque las unidades de microondas son menores y fáciles de trabajar y el desarrollo en los generadores es más avanzado.

Sin embargo, una frecuencia de 915 MHz es más económica para las aplicaciones que requieren más de 60 Kw de potencia, y permite una penetración más profunda dentro del material. Si se hace una comparación se llega a la conclusión que cada una tiene sus ventajas y desventajas.

**3.2.1.3 Potencia.** La cantidad de potencia para generar las microondas es la encargada de establecer la tasa de calentamiento. Los requerimientos de nivel de potencia son calculados basados en las propiedades del material a calentar para un rendimiento particular y la temperatura inicial y final.

Adicionalmente, se implementa una prueba de equipos para confirmar este valor y para determinar la eficiencia. Las temperaturas del material son ajustadas por el control preciso de la potencia y la velocidad *belt*.

### 3.2.2. AHORRO EN EL PROCESAMIENTO CON MICROONDAS

Cuando se estudia la viabilidad económica de implantar un proceso con este tipo de tecnología se debe tener en cuenta no solo la mejora desde el punto de vista productivo, sino también el costo que puede tener la implementación y operación del equipo.

La viabilidad económica es una función de las variables locales en los costos de la energía, las leyes ambientales y los costos de mano de obra, balanceado con las propiedades de los materiales terminados, las mejoras en el rendimiento o en la productividad y el mercado para los productos.

El rendimiento de las características intrínsecas del calentamiento con microondas ha sugerido algunos rasgos de los procesos que los hacen atractivo para las microondas.

- El tamaño del material debe ser grande:
- **El costo del producto final debe ser alto:** al evaluar el costo del producto se justifica si se debe o no realizar una inversión para cambiar el proceso.
- **Las Mejoras en las propiedades obtenidas por el procesamiento con microondas son significativas:** el incremento en la calidad del producto final es una característica importante a la hora de seleccionar las microondas como fuente de energía para nuestro proceso.
- **El espacio de trabajo de la planta es limitado:** el equipo para calentamiento con microondas ocupa del 20 al 35% del espacio ocupado por las unidades de calentamiento convencional.
- **La electricidad es económica:** el costo de la energía eléctrica es inferior si se consideran las ventajas brindadas por este tipo de calentamiento.

- **Capacidad de ser Automatizables:** el calentamiento con microondas es un proceso electrónico por lo cual puede ser fácilmente integrado, y permite automatizar su funcionamiento.
- **Combinación con métodos convencionales:** la energía de microondas puede ser añadida antes, después o durante el calentamiento convencional o a las unidades de secado para disminuir el tiempo de procesamiento en aproximadamente 75%.

Las consideraciones a tomar en cuenta para analizar los costos incluyen:

- Costo del equipo, incluyendo una comparación con el equipo convencional.
- Costos de operación (energía, mantenimiento, reemplazo).
- La energía requerida por cada parte (energía y eficiencia) y costo de la energía.
- Supresión y adición de etapas de esquema convencional de procesamiento.
- Ahorros en tiempo y espacio y cambios en el rendimiento sobre el proceso convencional.

**3.2.2.1 Costos de Operación.** Los costos de operación incluyen el costo de la energía, el costo absoluto como el real por parte que están basados en la eficiencia, el tamaño y número de las partes y el costo de mantenimiento, reparación y reemplazo.

Los costos de energía para las microondas son comparables a aquellos métodos de calentamiento convencional pero pueden ofrecer ahorros en otras áreas de producción, tales como: el aumento en la velocidad de producción, o la reducción de inventario.

Los costos de mantenimiento y de mano de obra también son aproximadamente equivalentes a los de los métodos convencionales. En el capítulo 4. Se puede observar los costos de los sistemas.

**3.2.2.2 Costos del Equipo.** El equipo usado para el procesamiento de materiales es generalmente diseñado y optimizado basado en necesidades de aplicación específicas. El costo del equipo depende del tamaño, potencia, frecuencia, diseño del aplicador, sistema de control de gas, los periféricos, el fabricante, y el tamaño del mercado para ese equipo. Debido a esas diferencias, el costo varía dependiendo de la aplicación.

En consecuencia a las diferencias en la configuración y el esquema de procesos entre las microondas y los sistemas convencionales, es muy difícil realizar una comparación entre el costo de los equipos en una manera significativa.

**3.2.2.3 Eficiencia de la Energía.** Al analizar los costos de la energía para el procesamiento con microondas, es importante considerar como es utilizada la energía en estas operaciones. La potencia de entrada es generada por el magnetrón; sin embargo, la potencia absorbida por los componentes depende de las características de acoplamiento de este, del número y de la disposición de los mismos en la cavidad y el diseño de ésta. Cierta cantidad de potencia es reflejada; la energía absorbida es la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia reflejada.

Es evidente por lo tanto, que los avances en la eficiencia del acoplamiento del material de carga y de la disposición del aislamiento y de los componentes tienen efectos significativos en la eficiencia de la energía. En las aplicaciones comerciales típicas los procesos con microondas tienen eficiencias totales del 50 hasta 70%.

Los ahorros en la energía derivados del uso de las microondas deben ser considerados con base en el costo de la energía para el proceso completo. Los sistemas híbridos que combinan calentamiento convencional y de microondas son benéficos para muchas aplicaciones.

**3.2.2.4 Ahorros Por el Cambio en el Procedimiento.** El gran potencial del procesamiento con microondas esta en el aumento de la productividad y la consecuente disminución en la mano de obra, y en costo del espacio.

En la tabla 3 se muestra un resumen de los ahorros en tiempo e incrementos en la productividad obtenidos por el procesamiento con microondas.

Los ahorros adicionales a menudo se citan en la reducción del espacio de la planta, cantidad de equipos, e inventario, así como ahorros en mano de obra

**Tabla 3.** Ahorros Tiempo / Cambios Productividad

| <b>Material</b>         | <b>Proceso</b>   | <b>Ahorro en el tiempo</b> | <b>Aumento en la productividad</b>             | <b>Organización</b>       |
|-------------------------|------------------|----------------------------|--|---------------------------|
| Alúmina Alta            | Secado           | 50%                        | Aumento del rendimiento. Mejora de propiedades | Special Metals Corp.      |
| Cerámicos               | Secado (híbrido) | 97 %                       |  | Industrial Ceramics, Ltd. |
| Carburo de Boro         | Sinterizado      | > 90 %                     | Los Álamos                                     |                           |
| Adhesivos estructurales | Curado           | 66%                        | 66% reducción de costo                         | Mobay                     |
| Barniz                  | Curado           | <70%                       |  | Schenectady Chemicals     |

**Fuente:** Autores del Proyecto. Basados en SHEPPARD. 1988.

Por último, se puede mencionar que los beneficios económicos del procesamiento con microondas son difíciles de definir de manera general. La decisión de usar este tipo de proceso para cualquier aplicación debe estar basada en el análisis específico; entre los factores importantes se incluyen:

- La facilidad de localización del proceso;
- Los requerimientos del producto,
- Las posibles mejoras en las propiedades,
- Las fuentes alternativas de energía,
- Disponibilidad del capital, y
- El balance entre los costos de la energía, costos de mano de obra, costos de equipos y el valor añadido al producto.

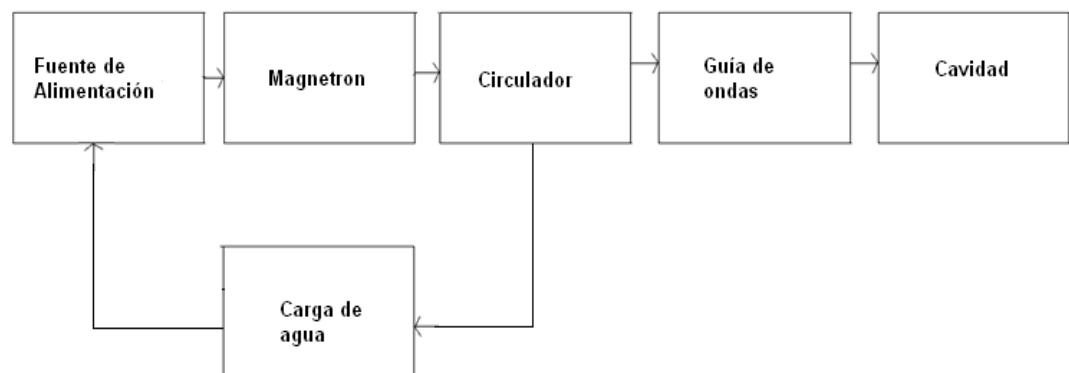
El calentamiento con microondas es más rápido, más eficiente para lograr el calentamiento de materiales no conductores; y su adaptabilidad para automatizarse y controlar electrónicamente, permite integrarlo fácilmente en operaciones de alta velocidad.

### **3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA DE MICROONDAS PARA PROCESAMIENTO DE MATERIALES**

Para utilizar las microondas en la fabricación de materiales, es necesario una serie de dispositivos y accesorios que van desde la generación hasta la conducción hacia la muestra que se desea calentar (véase figura 10).

Mientras que la descripción de los componentes básicos de este sistema de procesamiento, el generador, aplicador y los sistemas de control es bastante simple, la interacción de los materiales con el campo de microondas y los cambios en sus propiedades durante el procesamiento, hacen complejo el diseño y el desarrollo de los procesos con microondas. Se continúa con la explicación del funcionamiento de los equipos y las consideraciones a evaluar para su selección y diseño. (véase figura 11)

**Figura 10.** Diagrama de Bloques del equipo de procesamiento.



**Fuente:** Autores del Proyecto

### 3.3.1. GENERADOR

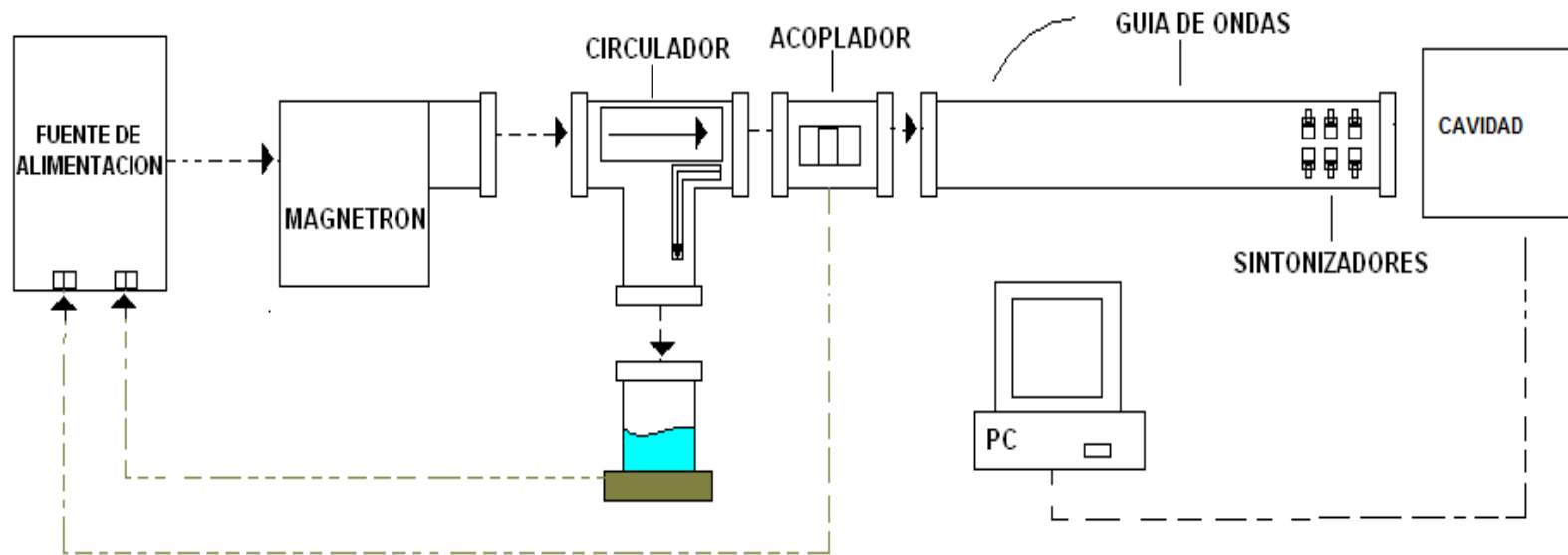
Es la parte principal del equipo, ya que ahí se transforma la corriente eléctrica en ondas electromagnéticas a la frecuencia deseada. Pueden ser de dos (2) tipos: dispositivos de estado sólido, o dispositivos basados en tubos de vacío.

Los dispositivos basados en tubos de vacío operan teniendo en cuenta el movimiento balístico de un electrón en el vacío bajo la influencia de campos eléctricos o magnéticos, entre los que se incluyen el magnetrón, el Klistrón, el TWT y el girotrón.

Los mayores avances en la generación de las microondas se dieron hacia el final de los años 30 con la invención y el rápido desarrollo del magnetrón, poco tiempo después en 1937 aparece el klistrón inventado por los Hermanos Varian.

En el momento de elegir el tipo de generador a usar se debe tener en cuenta la potencia, la frecuencia, la ganancia, el ruido, la fase y amplitud, el peso y el costo. Para el procesamiento de materiales los más usados son el magnetrón y el klistrón.

**Figura 11.** Sistema de Microondas para el Procesamiento de Materiales.



**Fuente:** Autores del Proyecto

**3.3.1.1 Magnetron.** Es la opción más económica; estos tubos se utilizan en los hornos convencionales que se encuentran en los hogares, trabajan con una potencia de 1 KW y frecuencias en el rango de 2-3 GHz.

El magnetron es un tubo electrónico tipo diodo, es clasificado de esta manera, debido a que no posee rejilla como un bulbo ordinario. Este tubo cilíndrico cuenta con un anillo de cavidad resonante, el cual actúa como ánodo, la cavidad en este caso es un espacio en el tubo, el cual se excita de manera que lo convierte en una fuente para las oscilaciones de la energía de las microondas.

Las configuraciones exteriores varían de acuerdo a la marca y el modelo; pero las estructuras internas son las mismas para todas las presentaciones. Básicamente se conforma de un emisor de electrones cilíndrico o cátodo, rodeado de una estructura cilíndrica o ánodo, los filamentos, antena y por último los imanes.

- **Ánodo:** es un cilindro hueco de hierro del que sobresalen un par de paletas hacia adentro.

Posee zonas abiertas entre las paletas que funcionan como cavidades resonantes, las cuales determinan la frecuencia de salida del tubo.

Funciona de modo que los segmentos alternos deben estar conectados para que sean de polaridad opuesta a la de los segmentos adyacentes, es decir, las cavidades están conectadas en paralelo con respecto a la salida.

El tamaño de las cavidades determina la frecuencia de resonancia y, por lo tanto, la frecuencia de emisión de las microondas. El ánodo se encuentra usualmente conectado al potencial de tierra.

- **Cátodo:** ubicado en el centro del magnetron y sostenido mediante las puntas grandes, rígidas, selladas y blindadas cuidadosamente dentro del tubo.

De gran importancia en la operación del magnetron; además de ser la fuente de los electrones, debe disipar una gran cantidad de calor resultante del bombardeo de esos ; previene el escape axial de los electrones del espacio de interacción.

El tamaño del cátodo debe ser mantenido dentro de límites establecidos, con el fin de que los electrones sean liberados al espacio de carga, en un punto donde las condiciones sean adecuadas para un funcionamiento eficiente.

Un radio muy pequeño ocasionaría inestabilidad, mientras que un radio muy grande daría como resultado una operación ineficiente.

El tamaño óptimo en la mayoría de los casos esta dado por:

$$\frac{r_c}{r_a} = \frac{(N-4)}{(N+4)} \quad (14)$$

en donde  $r_c$  y  $r_a$  son los radios del cátodo y ánodo respectivamente y N es el numero de resonantes.

En esta operación, el cátodo es mantenido a un potencial negativo.

- **Antena:** proyección o círculo conectado con el ánodo que se extiende dentro de una de las cavidades sintonizadas, se acopla a la guía de onda hacia la que transmite la energía de microondas.
- **Imanes:** producen el campo magnético, están montados alrededor del magnetrón, con el fin de que el campo sea paralelo con el eje del cátodo.

**3.3.1.1.1 Funcionamiento.** La operación del magnetrón se basa en el movimiento de electrones bajo la influencia combinada del campo eléctrico y magnético, debido a esto se conoce como dispositivo de “campo-cruzado”, a razón de que ambos campos son usados en esta operación, y son producidos en direcciones perpendiculares, por lo que se cruzan.

Este proceso obedece a dos (2) leyes:

- La fuerza ejercida por el campo eléctrico sobre un electrón, es proporcional a la fuerza del campo; los electrones tienden a moverse desde el punto de potencial negativo, hacia el potencial positivo.

- La fuerza ejercida sobre un electrón, por el campo magnético, es perpendicular tanto al campo en sí mismo y a la dirección del electrón. La dirección de la fuerza es tal que la trayectoria de los electrones en el ánodo es una curva, en lugar de una línea recta.

El proceso comienza al hacer circular una corriente eléctrica por el filamento metálico, la temperatura aumenta ocasionando una mayor actividad molecular en el cátodo y produciendo una nube de electrones a su alrededor, al filamento que se encuentra dentro del ánodo, se le aplica un potencial positivo de alto voltaje, aproximadamente 4000 V DC (4000 V es un promedio esto varía dependiendo de la marca y el modelo), lo que ocasiona una atracción de cargas negativas. Estas deberían viajar en forma radial, pero debido a la presencia de un campo magnético aplicado por los imanes permanentes, los electrones son obligados a viajar en espiral hasta alcanzar el polo positivo, al moverse de esta forma se genera una onda electromagnética que es perpendicular al desplazamiento de estos, y que es expulsada de la cavidad por un orificio. Para evitar que los imanes permanentes no se detengan al alcanzar la temperatura de Curie, los magnetrones que trabajan a nivel industrial se enfrían con agua, o gracias a un sistema de dispersión que consta de unas aspas metálicas que filtran las ondas electromagnéticas producidas.

Para muchos procesos de calentamiento y otras aplicaciones, el magnetrón es el dispositivo de elección, ya que presenta muchas ventajas en el tamaño, peso, eficiencia y costo. El magnetrón es el más eficiente de los generadores, con una eficiencia del 70-80%. Por lo tanto, el magnetrón sigue siendo usado en aplicaciones que requieran alta potencia y en las que una frecuencia precisa no sea importante.

**3.3.1.2 Klistrón.** Es un tubo vacío de electrones, que genera o amplifica microondas controlando la velocidad de los electrones, estos son acelerados

inicialmente a una gran velocidad por un potencial de varios cientos de volts, y entran a una pequeña laguna que forma parte de la cavidad resonante, donde actúa un campo de radiofrecuencia, el cual ocasiona un efecto “*bunched-up*”. La amplitud de modulación de los electrones en sus estados agrupados, induce una señal fuerte tal que la corriente pasa a través de la brecha del segundo resonador.

El klistrón tiene la ventaja de permitir amplificar coherentemente una señal de referencia, por lo que la salida puede ser controlada con exactitud en la frecuencia, amplitud y fase, muchos klistrones poseen una guía de onda para acoplar las microondas dentro y fuera del dispositivo; aunque también es común encontrar para bajas potencias y frecuencias klistrones que usan acoples coaxiales.

**3.3.1.2.1 Funcionamiento.** El klistrón amplifica las señales RF mediante la conversión de la energía cinética en un haz de electrones. El haz de electrones es producido por un cátodo y acelerado por los electrodos de alta tensión. Este haz es transmitido luego hacia la cavidad. La energía RF es alimentada dentro de la cavidad de entrada, a una frecuencia natural, para producir un voltaje que actúa sobre éste.

El campo eléctrico causa que los electrones se agrupen y, que al pasar por un campo opuesto, sean acelerados, para luego disminuir su velocidad, provocando que el haz continuo mencionado anteriormente forme ramas a la frecuencia de entrada. Para reforzar el proceso de agrupamiento, los klistrones pueden poseer cavidades adicionales; la corriente transportada por el haz de electrones, produce un campo magnético, el cual excita un voltaje a través del espacio entre las cavidades resonantes contiguas. En la cavidad de salida, la energía desarrollada se acopla, para que el haz de electrones gastado con una disminución de energía, se recoja en un colector.

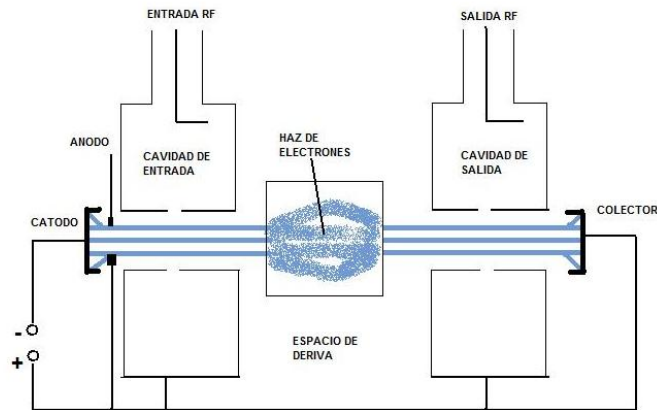
Se distinguen dos (2) tipos:

1. **Klistrón de dos cavidades:** como su nombre lo indica está compuesto por dos cavidades, en una se modula el haz de electrones por la señal de entrada, y en la segunda se extrae la señal amplificada.

A su vez, este tipo de klistrón se subdivide en:

- **Klistrón de dos cavidades amplificador:** el haz de electrones se inyecta en una cavidad resonante, y al ser acelerado por un potencial positivo se ve obligado a viajar dentro de un tubo cilíndrico en vía recta a través de un campo magnético, al pasar a través de la primera cavidad, la velocidad del haz de electrones es modulada por una señal RF débil, al agruparse los electrones ingresan a la segunda cámara, la cual induce ondas a la misma frecuencia de la señal de entrada. Esta señal es mucho más fuerte que la que se induce en la primera.
- **Klistrón de dos cavidades oscilador:** las dos (2) cámaras del klistrón pueden ser convertidas en un oscilador, al implementar un circuito de retroalimentación ubicado entre las cavidades de entrada y la salida, la ventaja de este klistrón es que tiene menos fuente de ruido. Genera más energía que el klistrón réflex; debido a que no es reflector, se necesita una fuente de alto voltaje para lograr que el tubo oscile; este voltaje debe ser ajustado, con el fin de que el haz de electrones se agrupen en la segunda cavidad, para generar la potencia de salida, al ajustar el voltaje, se varía la velocidad del haz de electrones y por lo tanto la frecuencia.

**Figura 12.** Klistrón de Dos Cavidades



**Fuente:** Autores del Proyecto. Basados en Virtual Valve Museum [Disponible en]: <http://www.tubecollector.org/klystron.htm>

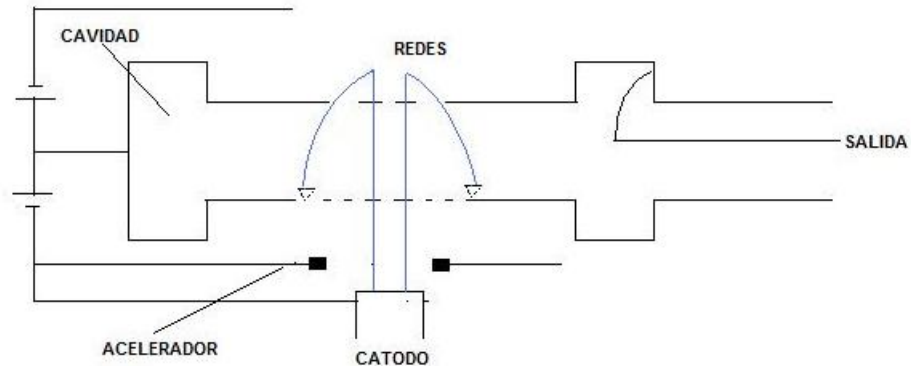
**2. Klistrón réflex:** está compuesto de una sola cavidad; el haz de electrones la atraviesa dos veces, primero los electrones son lanzados al extremo del tubo por un cañón; después de pasar por la cavidad resonante, son reflejados por un electrodo negativo, llamado reflector, para volver a pasar por la cavidad, en donde son recogidos. La velocidad del haz de electrones, es modulada al pasar por primera vez por la cavidad.

La agrupación de los electrones tiene lugar entre el reflector y la cámara, el voltaje en el reflector debe ser ajustado de modo que al agruparse, el máximo número de electrones vuelva a entrar en la cavidad resonante; garantizando una transferencia máxima de energía entre el haz de electrones y los osciladores RF.

El voltaje del reflector puede ser variado ligeramente desde su valor óptimo, lo cual ocasionaría una pérdida de potencia a la salida y una variación en la frecuencia. Este efecto es usado para controlar la frecuencia automáticamente.

Se ha logrado un 80% de efectividad, pero los valores comunes se encuentran en un rango de 50-60%.

**Figura 13.** Klistrón Réflex



**Fuente:** Autores del Proyecto. Basados en Virtual Valve Museum [Disponible en]: <http://www.tubecollector.org/klystron.htm>

**3.3.1.3 Gyrotrón.** Otro de los generadores de microondas es el Gyrotrón, está compuesto por un tubo de vacío de alta potencia, que emite ondas milimétricas, debidas a la agrupación de electrones ocasionada por movimiento de un ciclotrón, bajo un fuerte campo magnético. La gama de frecuencias de salida se encuentra entre unos 20 a 250 GHz y las potencias típicas de trabajo varían entre decenas de kilovatios a 1-2 megavatios. La frecuencia del Gyrotrón, es proporcional a la intensidad del campo magnético, porque la operación resulta del mecanismo denominado “*Ciclotrón Resonance Maser*”.

El uso de este tipo de dispositivos para el procesamiento de materiales no es común, debido a que su implementación representa un alto costo.

**3.3.1.4. Dispositivos de Estado Sólido.** Aparecen sobre los años 60, para reemplazar a los tubos como fuentes de microondas para potencias medias y bajas. El primer dispositivo desarrollado fue el diodo Gunn, el cual está basado en un fenómeno físico descubierto por JB Gunn. A partir de los años 70 se utilizaron los primeros transistores de microondas de unión bipolar, con sustrato de silicio (BJT). Posteriormente, los de efecto de campo (FET), con sustrato de GaAs (MOSFET). Esto gracias a la mejora en la tecnología fotolitográfica que permitió metalizaciones muy estrechas, que hicieron posible la sustitución parcial de guías de onda por circuitos impresos de microondas, como la línea microtira, *slot-line* o la línea coplanar.

**3.3.1.4.1 Diodo Gunn.** El diodo Gunn está basado en el descubrimiento de que materiales semiconductores como el Arseniuro de Galio, presentan un diagrama de bandas de energía, que se caracteriza por la presencia de valles en la banda de conducción que se encuentran próximos entre sí, y al aumentar la intensidad del campo, se produce una transferencia de electrones, al mínimo más fuerte de la banda (el valle de mayor energía); como la masa efectiva de los electrones es mayor en los niveles superiores, la movilidad es menor que en los niveles más bajos de energía; debido a que la conductividad depende de la movilidad electrónica existe un rango de intensidades para el cual se produce una transferencia de electrones desde un nivel bajo de energía a uno más alto, de manera que la movilidad promedio, y con ella la conductividad, decrecen cuando se aumenta la intensidad de campo. Este fenómeno se conoce como efecto Gunn, y a los dispositivos que lo producen como dispositivos de transferencia de electrones (TED). Estos dispositivos no se componen de uniones p-n sino que se constituyen de un solo bloque semiconductor (*bulk*).

Al visualizar una curva característica tensión-corriente, se encuentra que la región que presenta este efecto, exhibe una resistencia dinámica negativa, al poder

modelarse como una fuente de tensión controlada por corriente, son usados para diseñar amplificadores de microondas. El efecto Gunn, además, ocasiona oscilaciones autosostenidas, lo que permite su uso en el diseño de osciladores de microondas.

**3.3.1.4.2 Diodos de Efecto Avalancha.** En una unión  $p-n$  al aumentar la tensión de polarización inversa hasta un valor fijo, un portador se desplazará debido a la corriente de arrastre. Al moverse, los portadores pueden adquirir tal energía que al colisionar con un ion de la red impriman suficiente fuerza para romper un enlace covalente. De esta forma, cada nuevo portador produce portadores adicionales. El resultado es una corriente de saturación inversa elevada.

Los diodos de microondas basados en este efecto se conocen con los siguientes nombres:

- IMPATT (*IMPact ionization Avalanche Transit Time*).
- BARRITT (*BARRier Injection Transit Time*).
- TRAPATT (*TRApped Plasma Triggered Transit*).

**3.3.1.4.3 Transistores Bipolares.** El transistor bipolar consiste en dos (2) uniones  $p-n$  encapsuladas en el mismo sustrato. Existen dos (2) dispositivos duales, denominados  $n-p-n$  y  $p-n-p$ , al trabajar con microondas se prefieren los primeros, debido que los electrones tienen mayor movilidad electrónica.

La mayoría de transistores bipolares usados en microondas, son de forma plana y fabricados con silicio, del tipo  $n-p-n$ , desarrollados para suministrar un máximo de 40 vatios en el rango de 1 a 1.5 GHz

Al integrar un transistor de microondas en un amplificador, se suele partir de la medida de sus parámetros  $S$  a distintas frecuencias, con lo cual se puede sintetizar un modelo equivalente.

Existen dos (2) valores importantes que caracterizan el comportamiento de este tipo de transistores:

- $F_t$ : frecuencia de transición, que se define como la frecuencia a la que la ganancia de corriente con salida en cortocircuito se hace la unidad.
- $f_{max}$ : frecuencia máxima de oscilación, se define como la frecuencia en donde la máxima ganancia disponible del transistor es igual a 1.

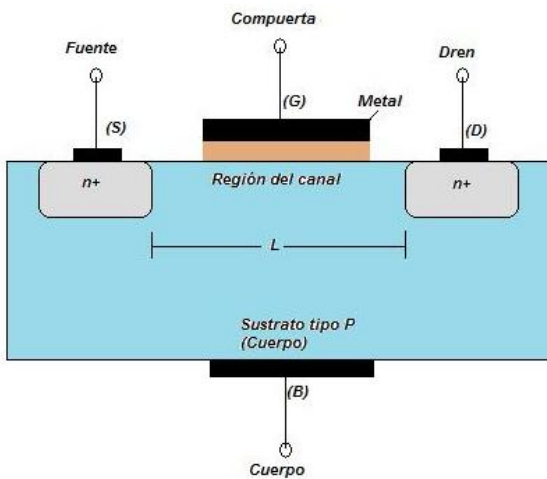
Las fuentes de ruido en este tipo de transistores son principalmente de dos (2) tipos: ruido térmico, y ruido de disparo (*shot*).

- **Ruido térmico:** es causado por la agitación térmica de los portadores en la resistencia del emisor, base y colector.
- **Ruido de disparo:** se presenta debido a la fluctuación de los portadores al atravesar las uniones semiconductoras.

Para la etapa de polarización se utilizan circuitos que permitan, independencia a los cambios de temperatura y a las variaciones de los parámetros del transistor, además que el circuito de polarización quede aislado de los circuitos de alta frecuencia, de tal manera que las señales de microondas no fluyan por el circuito de polarización. Lo anterior se logra incorporando realimentación DC en el circuito de polarización; e introduciendo elementos inductivos en serie con los componentes DC, que no dejan pasar las altas frecuencias, y elementos capacitivos en paralelo con los componentes DC, para que las corrientes de alta frecuencia se deriven por los elementos capacitivos y no afecten a las redes de polarización. Sobre los 4 GHz, la eficiencia de los transistores BJT de silicio se ve reducida significativamente.

**3.3.1.4.4 Transistores de Efecto Campo.** Los transistores de efecto de campo en microondas suelen hacerse con sustratos de GaAs, al tener mejor movilidad electrónica. La configuración típica es una unión metal-semiconductor (MOSFET), que reemplaza la unión puerta-canal. Este tipo de transistor es muy útil cuando se trabajan frecuencias mayores a 4 GHz; debido a la gran movilidad de los electrones, presentan una excelente respuesta en frecuencia y comportamiento ante el ruido. Las fuentes de ruido presente en los MOSFETS, son principalmente el ruido térmico y el ruido *flicker*; este último tiene una respuesta en frecuencia del tipo  $1/f$ , por lo que en microondas no suele afectar, aunque cobra importancia al trabajar en rangos de frecuencias entre 10-50 MHz, y por lo tanto pueden afectar el comportamiento de algunos osciladores.

**Figura 14.** Configuración Transistor de Efecto Campo



**Fuente:** Autores del Proyecto.

### 3.3.2 GUÍAS DE ONDA

Son estructuras compuestas de un solo conductor, de sección rectangular, circular o elíptica. Utilizadas para transmitir ondas electromagnéticas; la conducción de

energía no ocurre en las paredes de la guía de onda, sino a través del dieléctrico (generalmente aire) dentro de la guía de onda por medio de reflexión con la superficie. Operan a frecuencias mayores de 1 GHz, donde otros conductores como líneas de cables paralelas y coaxiales no son óptimos.

A continuación, se describen ventajas y desventajas de las guías de onda en comparación a otros conductores.

**3.3.2.1 Ventajas.** Dentro de las características encontradas en las guías de onda, que hacen preferible su utilización sobre las líneas de transmisión de dos (2) cables y coaxiales se encuentran las siguientes:

- La gran superficie de las guías de onda reducen las pérdidas por cobre ( $I^2 \times R$ ), lo contrario de las líneas de transmisión, las cuales poseen pequeñas superficies.
- En las guías de ondas se maneja mayor potencia con el mismo tamaño de los cables coaxiales, debido al blindaje que poseen se eliminan las pérdidas por radiación.
- Su construcción es más simple que un cable coaxial.
- El aire se encuentra generalmente contenido en su interior, lo cual significa que las pérdidas por dieléctrico son relativamente bajas, lo suficiente para ser despreciadas.

**3.3.2.2 Desventajas.** Además de las ventajas que poseen las guías de onda, también se deben realizar algunas consideraciones o pautas a tener en cuenta:

- Las guías de onda a pequeñas frecuencias son limitadas por que necesitan un gran tamaño, por ejemplo, el ancho de una guía de onda debe ser

aproximadamente la mitad de la longitud de onda en la frecuencia que se transporta la energía requerida, lo que las hace poco eficientes para trabajar a pequeñas frecuencias.

- Se presenta complejidad en el momento de la instalación y operación de estas estructuras.
- Se necesita acoplamientos especiales en sus articulaciones. Para reducir pérdidas, generalmente, la superficie interna de las guías está recubierta por oro o plata, aumentando así el costo de su implementación.

**3.3.2.3 Tipos de Guías de Onda.** Existen una gran variedad de guías de onda en el mercado, de sección rectangular, circular o elíptica.

La Figura 15, muestra varios tipos de guía de ondas existentes en la actualidad, listas para ser utilizadas en las distintas implementaciones.

**Figura 15.** Tipos de Guías de Ondas



**Fuente:** A-INFO. Focus on Antenna, Microwave/RF Components, Power Components, Microwave/RF Cable, Connectors and Waveguide Components.[Consulta: 9 de septiembre del 2009]. [En línea]. [Disponible en]: [www.ainfoinc.com](http://www.ainfoinc.com)

**3.3.2.4 Modos de Guías de Onda.** Los modos de propagación son las distintas configuraciones que utilizan las ondas electromagnéticas para viajar a lo largo de las guías de onda. Estos se describen dependiendo las direcciones de los campos magnéticos y eléctricos en relación a la onda de propagación.

La transmisión de microondas puede dividirse en tres (3) modos de operación, los cuales son: Transversal Electromagnético (TEM), en donde todos los campos son transversales, se realiza entre dos alambres paralelos, dos placas paralelas, o en un cable coaxial. Transversal Eléctrica (TE), en este caso la intensidad del campo eléctrico es perpendicular a la propagación de la onda, en otras palabras la componente axial del campo eléctrico es nula. (TM) Transversal Magnética, este es el caso contrario de la transversal eléctrica, aquí la componente axial del campo magnético es cero (0).

Los modos descritos anteriormente se obtienen al solucionar las siguientes ecuaciones:

$$E_x = -\frac{1}{k^2} \left( \gamma \frac{dE_z}{dx} + j\omega\mu \frac{dH_z}{dy} \right), E_y = -\frac{1}{k^2} \left( \gamma \frac{dE_z}{dy} - j\omega\mu \frac{dH_z}{dx} \right)$$

$$H_x = -\frac{1}{k^2} \left( \gamma \frac{dH_z}{dx} - j\omega\mu \frac{dE_z}{dy} \right), H_y = -\frac{1}{k^2} \left( \gamma \frac{dH_z}{dy} + j\omega\mu \frac{dE_z}{dx} \right) \quad (15)$$

donde:

$$k^2 = \gamma^2 + \omega^2 \epsilon\mu \quad (16)$$

siendo:

$\omega$  = Frecuencia en [rad/s]

$\gamma$  = Coeficiente de Propagación

Las soluciones son las siguientes:

**1)**  $E_z = 0$  y  $H_z = 0$ . Corresponde a la TEM.

2)  $E_z \neq 0$  y  $H_z = 0$ . Corresponde a la TM.

3)  $E_z = 0$  y  $H_z \neq 0$ . Corresponde a la TE.

**3.3.2.5 Impedancia de una Guía de Onda.** Está definida como el coeficiente de las componentes transversales. Además, depende del medio dentro de la guía, frecuencia en que se trabaja y la frecuencia de corte.

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (17)$$

**3.3.2.6 Guía de Onda Rectangular.** El tipo de guía de onda rectangular es un solo conductor que posee un medio dieléctrico en su interior, generalmente este medio es aire. A lo largo de su estructura solo se pueden propagar modos electromagnético de tipo transversal eléctrico ( $TE_{mn}$ ) y transversal magnético ( $TM_{mn}$ ), puesto que está conformado por un solo material conductor es imposible propagar el modo  $TEM_{mn}$ .

- **Modo  $TE_{mn}$  de una guía de onda rectangular:** como se mencionó anteriormente, el modo  $TE_{mn}$  indica que la intensidad del campo eléctrico que viaja en la misma dirección de propagación es cero  $E_z = 0$  y  $H_z \neq 0$  (tomando  $z$  como la dirección en que se propaga la onda). Los subíndices significan el número de medios ciclos de variación del campo a lo largo de las dimensiones de la guía de onda rectangular, en este caso  $m$  a lo largo de  $a$ , y  $n$  a lo largo de  $b$ . Entonces, cada modo transversal eléctrico puede ser determinado al escoger los valores de  $m$  y  $n$  de la siguiente Ecuación (extraídas de trabajo de grado).

$$\begin{aligned}
E_x(x, y) &= \frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\
E_y(x, y) &= -\frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\
H_x(x, y) &= \frac{j\beta}{h^2} \left(\frac{m\pi}{b}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\
H_y(x, y) &= \frac{j\beta}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z}
\end{aligned} \tag{18}$$

en el cual:

$$h = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}, \quad \beta = \sqrt{\omega^2\mu\varepsilon - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \tag{19}$$

tomando:

$$0 \leq x \leq a \text{ y } 0 \leq y \leq b.$$

- **Modo  $\text{TM}_{mn}$  de una guía de onda rectangular:** en este caso,  $E_z \neq 0$  y  $H_z = 0$ , lo que quiere decir que ahora la componente del campo magnético en la dirección de propagación de la onda es cero (0). Se rige por las mismas ecuaciones que en el modo  $\text{TE}_{mn}$ :

$$\begin{aligned}
E_x(x, y) &= \frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\
E_y(x, y) &= -\frac{j\omega\mu}{h^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\
H_x(x, y) &= \frac{j\beta}{h^2} \left(\frac{m\pi}{b}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\
H_y(x, y) &= \frac{j\beta}{h^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z}
\end{aligned} \tag{20}$$

- **Frecuencia de corte, longitud de onda de corte, velocidad de grupo y velocidad de fase:** la frecuencia de corte, se denomina como la mínima frecuencia a la cual la guía de onda puede transmitir en su modo principal de operación, dependiente de esta los modos superiores pueden ser atenuados. Está directamente relacionada con el tamaño de la guía de onda.

$$f_c = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \cdot c \quad (21)$$

donde,  $c$  es la velocidad de la luz.

Teniendo en cuenta que  $f_c = c/\lambda_c$  entonces la longitud de onda de corte está dada por:

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (22)$$

la velocidad de fase ( $v_f$ ) es la velocidad a la que la onda cambia de fase en la dirección paralela a la superficie del conductor:

$$V_f = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (23)$$

en el que  $f$  es la frecuencia a la que se transmite la energía.

La velocidad de grupo es la velocidad a la que se propaga toda la energía ( $v_g$ ) y su Ecuación es:

$$V_g = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} \quad (24)$$

**3.3.2.6.1 Características de Una Guía de Onda Rectangular.** El valor máximo de tensión en una guía de onda rectangular es el siguiente:

$$V = E_y = bE e^{-j\beta z} \quad [\text{V}] \quad (25)$$

la corriente longitudinal es igual a la integral del campo magnético a lo largo de la dimensión más larga.

$$I = \int_0^a H_x dx = \frac{2aE}{\pi k_z} e^{-j\beta z} \quad [\text{A}] \quad (26)$$

luego:

$$k_z = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda_0}{2a\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}\right)^2}} \quad (27)$$

siendo  $\eta$  la impedancia intrínseca  $\frac{E_y}{H_x}$ ,  $\lambda_0$  = longitud de onda en el espacio libre,  $\mu_r$  = permeabilidad relativa y  $\epsilon_r$  = constante dieléctrica.

La potencia se calcula integrando el Vector de Poynting a través de la sección transversal de la guía de onda:

$$W = \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a E_y H_x dy dx = \frac{ab}{4k_z} E^2 \quad [\text{W}] \quad (28)$$

**3.3.2.6.2 Atenuación.** Para implementar una determinada guía de onda es indispensable analizar la cantidad de energía disipada al viajar dentro de la guía. Para esto se calcula las pérdidas debidas a las paredes del conductor y las pérdidas debidas al material dieléctrico existente dentro de la guía; las pérdidas son producidas por que se trabaja con materiales reales, los cuales presentan discontinuidades u obstáculos; dicho esto se esperarán atenuaciones en la guía de onda.

Para hallar las pérdidas debidas a las paredes del conductor, se calcula la potencia disipada tanto en las paredes paralelas ( $W_1$ ) como en las paredes de arriba y abajo ( $W_2$ ).

$$|P| = R_c(1 + j)H_z H_z^* \quad (29)$$

así la potencia disipada por unidad de longitud es:

$$W_1 = R \int_0^b H_z H_z^* dy = \frac{R\pi E^2}{\eta^2 \beta^2 a^2} \quad (30)$$

en el cual  $H_z^*$  es el conjugado de  $H_z$ , y  $R$  es la resistencia intrínseca la cual se define por la siguiente Ecuación:

$$R = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \sqrt{\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1}{2\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2\right)}} \quad (31)$$

$$W_2 = R \int_0^a (H_x H_x^* + H_z H_z^*) dx = \frac{R\pi E^2}{2\eta^2} \quad (32)$$

entonces, la disipación total dentro de la guía de onda es:

$$W = W_1 + W_2 = \frac{RE^2}{\eta^2} \left( \frac{b\pi^2}{\beta^2 a^2} + \frac{a}{2} \right) \quad (33)$$

ahora la atenuación en la guía de onda hueca está dada por:

$$\alpha = \frac{R}{\eta \sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda_0}{2a\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}\right)^2}} \left( \frac{1}{b} + \frac{2\left(\frac{m\lambda_0}{2a\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}\right)^2}{a} \right) \text{ [nepers por metro]} \quad (34)$$

la atenuación debida a un dieléctrico dentro de la guía es:

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\tan \delta}{\sqrt{1 - \left( \frac{m\lambda_0}{2a\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \right)^2}} \text{ [nepers por metro]} \quad (35)$$

**3.3.2.7 Guía de Onda Circular.** Este tipo de estructura es utilizada principalmente para radares y microondas. Está constituida por un conductor de sección transversal circular como su nombre lo indica. Opera con modos de propagación tipo **TM** y **TE** al igual que en las guías de onda rectangulares. Para analizar este tipo de guía se trabaja con coordenadas cilíndricas, y funciones de Bessel con el fin de facilitar los cálculos.

$$E_\rho = -\frac{j}{k_c^2} \left( \beta \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{\omega\mu}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) e^{-j\beta z}$$

$$E_\phi = -\frac{j}{k_c^2} \left( \beta \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) e^{-j\beta z}$$

$$H_\rho = \frac{j}{k_c^2} \left( \frac{\omega\epsilon}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) e^{-j\beta z}$$

$$H_\phi = -\frac{j}{k_c^2} \left( \omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial \rho} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) e^{-j\beta z} \quad (36)$$

**3.3.2.7.1 Modo TE.** De igual forma como en las guías rectangulares  $E_z = 0$  y  $H_z \neq 0$ , entonces la respuesta para este tipo de modos es:

$$E_\phi(\rho, \phi, z) = \frac{j\omega\mu}{k_c} (A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)) J'_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \quad (37)$$

y  $J'_n(k_c \rho)$  es la derivada de  $J_n$ ,  $k_c$  es el número de onda de corte, entonces:

$$k_{cmn} = \frac{\rho'_{nm}}{a}, \quad \beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - \left( \frac{\rho'_{nm}}{a} \right)^2} \quad (38)$$

siendo  $\rho'_{nm}$  la  $n$ -ésimas raíces de las funciones de Bessel  $J'_n$ . A continuación, se muestran las raíces para varios modos de operación.

$$\begin{bmatrix} \rho'_{0,1} = 3.082 & \rho'_{0,2} = 7.016 \\ \rho'_{1,1} = 1.841 & \rho'_{1,2} = 5.332 \\ \rho'_{2,1} = 3.054 & \rho'_{2,2} = 6.706 \\ \rho'_{3,1} = 4.201 & \rho'_{3,2} = 8.013 \end{bmatrix}$$

La frecuencia de corte de una guía circular esta denotada por la siguiente Ecuación:

$$f_{cnm} = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{\rho'_{nm}}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (39)$$

basándose en las ecuaciones anteriores hallamos las siguientes definiciones:

$$\begin{aligned} E_\rho &= -\frac{j\omega\mu}{k_c^2\rho} (A\cos(n\phi) + B\sin(n\phi))J'_n(k_c\rho)e^{-j\beta z} \\ E_\phi &= \frac{j\omega\mu}{k_c} (A\sin(n\phi) + B\cos(n\phi))J'_n(k_c\rho)e^{-j\beta z} \\ H_\rho &= -\frac{j\beta}{k_c\rho} (A\sin(n\phi) + B\cos(n\phi))J'_n(k_c\rho)e^{-j\beta z} \\ H_\phi &= -\frac{j\beta n}{k_c^2\rho} (A\cos(n\phi) + B\sin(n\phi))J'_n(k_c\rho)e^{-j\beta z} \end{aligned} \quad (40)$$

- **Potencia y atenuación:** para hallar la potencia, se integra el vector de Poynting a través de la sección transversal circular de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} \Re \left\{ \int_{\rho=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} E \times H^* \cdot 2\rho d\phi d\rho \right\} \\ W &= \frac{\pi\omega\mu |A|^2 \Re(\beta)}{4k_c^4} \left( (\rho'_{1,1})^2 - 1 \right) J_1^2(k_c a) [W] \end{aligned} \quad (41)$$

donde A es la magnitud de la onda que se propaga.

Para el cálculo de la atenuación, se determina la energía disipada por las paredes. Esto se logra integrando los componentes del vector de Poynting a través de la guía.

$$P_c = \frac{R}{2} \int_{\phi=0}^{2\pi} |J_s|^2 a d\phi = \frac{\pi |A|^2 R a}{2} \left(1 + \frac{\beta^2}{k_c^4 a^2}\right) J_1^2(k_c a) [\text{W}] \quad (42)$$

- **Factor de calidad Q:** este factor está definido como  $2\pi$  veces la energía **W** sobre la pérdida total de potencia **P** sobre un periodo, esto es:

$$Q = \frac{2\pi W}{TP} = 2\pi f \frac{W}{P} \quad (43)$$

**3.3.2.7.2 Modo TM.** Aquí se realiza un procedimiento similar al modo anterior, obteniendo las siguientes ecuaciones, las cuales modelan el modo de propagación TM:

$$\begin{aligned} E_\rho &= -\frac{j\beta}{k_c} (A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)) J'_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \\ E_\phi &= -\frac{j\beta n}{k_c^2 \rho} (A \cos(n\phi) - B \sin(n\phi)) J_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \\ H_\rho &= -\frac{j\omega \epsilon n}{k_c^2 \rho} (A \cos(n\phi) - B \sin(n\phi)) J_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \\ H_\phi &= -\frac{j\omega \epsilon}{k_c} (A \sin(n\phi) + B \cos(n\phi)) J'_n(k_c \rho) e^{-j\beta z} \end{aligned} \quad (44)$$

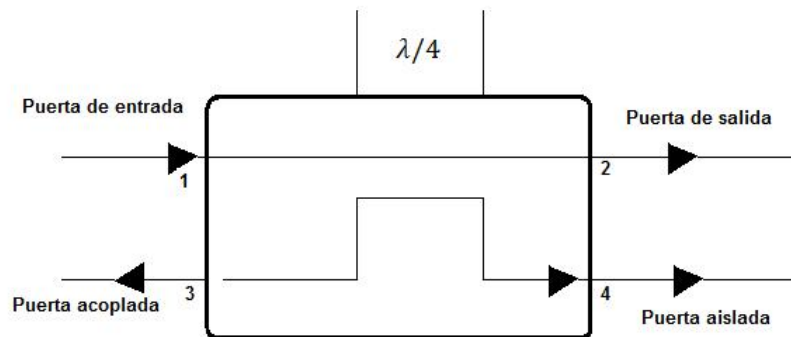
### 3.3.3 ACOPLADORES DIRECCIONALES

El acoplador direccional es un dispositivo pasivo de microondas, es decir que no necesita ningún tipo de energía para poder funcionar de manera correcta, de cuatro (4) puertas, definidas como:

- P1, puerta de entrada, por la cual se inyecta la señal de entrada.
- P2, puerta de salida, por donde aparece la señal de salida.
- P3, puerta acoplada, por donde se obtiene una muestra de la señal de entrada.
- P4, puerta aislada, que debe estar terminada por una carga que depende de la impedancia característica del componente.

Este elemento permite medir separadamente ondas positivas y negativas de manera directa.

**Figura 16.** Acoplador Direccional



**Fuente:** Autores del Proyecto. Basados en Power dividers and directional couplers. [Disponible en <https://ewhdbks.mugu.navy.mil/couplers.htm>].

**3.3.3.1 Parámetros Básicos de Un Acoplador Direccional.** Entre los parámetros que definen el comportamiento de este componente se encuentran:

**3.3.3.1.1 Acoplamiento C.** Por el cual se nombra al dispositivo, e interviene de forma importante al decidir la aplicación, se define como la relación entre la potencia que entra por P1 y la que aparece por P3, para una determinada frecuencia.

$$C \text{ (dB)} = -10 * \log (P1/P3) \quad (45)$$

El valor del acoplamiento, varía con la frecuencia aplicada a la puerta de entrada, de forma, que el acoplador direccional, solo será útil en una banda de frecuencias, que se define como frecuencia de trabajo.

**3.3.3.1.2 Frecuencia de Trabajo.** Al presentar limitaciones de uso en un margen amplio de frecuencias, el fabricante indica una banda de trabajo, garantizando que en esas frecuencias el acoplador cumple todos y cada uno de los parámetros que indica en su hoja de datos.

**3.3.3.1.3 Directividad.** Es la capacidad de transferir potencia, desde la puerta de entrada a la puerta acoplada y de rechazar, la potencia que pueda venir desde la puerta de salida, debido a reflexiones en ésta.

Para calcular este parámetro es necesario introducir el término de **aislamiento** (I dB), el cual se define como la potencia transferida desde la puerta de salida P2, a la puerta P3 cuando en las puertas P1 y P4 se encuentra una impedancia de carga igual a la impedancia característica.

$$|D| = I - C \text{ (dB)} \quad (46)$$

**3.3.3.1.4 Pérdidas.** Se consideran principalmente dos (2) tipos de pérdidas, las de inserción producidas entre P1-P2 y las de acoplo, que se producen en el camino

entre P1-P3. Existen otras dos (2) clases, las producidas por reflexión y las disipativas, las cuales son menos significativas que las dos primeras.

- **Pérdidas por Inserción:** producidas en el camino principal entre la entrada y salida del acoplador direccional P1-P2 y están relacionadas con el medio de transmisión que une las dos (2) puertas.
- **Pérdidas por Acoplamiento (dB):** producida en el acoplamiento de potencia, desde el camino principal, al acoplado P1-P3. Está relacionada, con la cantidad de potencia acoplada; cuanto más señal se transfiera a la puerta acoplada, mayores serán las pérdidas y viceversa.

**3.3.3.1.5 Coeficiente de Reflexión ( $\rho$ ).** El valor del coeficiente de reflexión, es la relación entre el valor de la onda reflejada y la onda incidente en el punto de reflexión.

$$\rho = \text{Valor de la onda reflejada} / \text{Valor de la onda incidente} \quad (47)$$

**3.3.3.1.6 Relación de Ondas Estacionarias de Tensión (VSWR – Voltaje Standing Wave Ratio).** Define el comportamiento de dos componentes cuando se conectan en el circuito.

$$\text{VSWR: } |V_{\text{max}}| / |V_{\text{min}}| \quad (48)$$

En donde,  $V_{\text{max}}$  se puede considerar como la suma de la onda incidente y la reflejada, mientras que  $V_{\text{min}}$ , sería la diferencia entre la onda incidente y la reflejada.

**3.3.3.1.7 Potencia Incidente.** Indica la potencia que se puede aplicar continuamente, al acoplador en la puerta de entrada, evitando que se dañe y conservando, todas las especificaciones indicadas en la hoja de datos.

**3.3.3.1.8 Híbridos.** A un acoplador direccional de 3 dB ( $C = 3$  dB) se le denomina circuito híbrido o híbrido.

### **3.3.4 CIRCULADOR**

Dispositivo de microondas diseñado con el fin de controlar la dirección del flujo de la señal, en un circuito de microondas; consta generalmente de tres puertos, a los que se puede acceder de manera que, cuando se alimenta uno de ellos con una señal, se transfiere solo al siguiente, es decir, toda la energía que incide por la puerta 1 se transmite a la puerta 2; la incidente por la puerta 2 pasa a la 3 y la incidente por la puerta 3, sale por la 1. La transmisión en sentido inverso no se produce.

Los circuladores se pueden dividir en dos (2) clases principalmente, guías de onda de cuatro puertos, basados en la rotación de ondas propagadas en un medio magnético de Faraday.

Y los de tres (3) puertos denominados comúnmente como “torniquetes” o “unión Y”, los cuales se fundamentan en la cancelación de la propagación de ondas sobre dos caminos diferentes, cerca de un material magnetizado.

**Figura 17.** Circulador



**Fuente:** Adler Instrumentos. Expertos en asesoramiento y suministro de instrumentación de medida y ensayo para instalaciones y laboratorios. [Consulta: 25 de julio del 2009]. [En línea] [Disponible en]: [www.adler-instrumentos.es/.../m\\_componentes.htm](http://www.adler-instrumentos.es/.../m_componentes.htm)

Entre los parámetros que caracterizan un circulador se encuentran:

**3.3.4.1 Directividad.** Es la relación entre la potencia que se tiene en la puerta 2 (Acoplada) y la de la puerta 3 (Aislada), cuando se alimenta por la puerta 1. Se expresa en decibelios (Db). Su valor típico es 20 dB.

**3.3.4.2 Pérdidas de Inserción.** Es la relación entre la potencia incidente y la potencia de salida. Se expresa en dB.

Aprovechando sus propiedades el circulador puede ser utilizado como un aislador, ya que una señal puede viajar en una sola dirección entre el resto de los puertos.

En el caso de procesamiento de materiales con microondas, el circulador desvía la onda hacia una cámara de agua, en donde se absorbe esta energía y se evita que se refleje y regrese por la guía de onda hacia la fuente, previniendo el daño de ésta.

### 3.3.5 CAVIDAD

Volumen encerrado por unas paredes, normalmente eléctricas. En algunos casos esta cavidad se puede interpretar como procedente de una guía de ondas que se ha cerrado con dos planos transversales.

Existen dos (2) tipos de cavidades, cavidad multimodal y de modo sencillo, entre los aspectos claves de la cavidad multimodal se encuentran:

- Las medidas del horno son determinadas por las dimensiones del producto.
- De eficiencia moderada a alta.
- El funcionamiento es menos sensible a la posición o geometría del producto.

Consideremos una guía de ondas que terminamos en cortocircuito. Si a una distancia de media longitud de onda (en la guía) colocamos otro, la cavidad así formada permite la existencia de una onda estacionaria, de aquellas frecuencias cuyas semilongitudes de onda sean múltiplos enteros de la longitud de la guía. En otras palabras: la estructura resuena a esas frecuencias, por lo que se llama cavidad resonante.

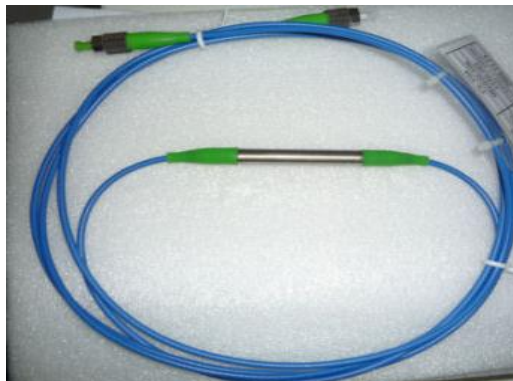
En realidad, esta estructura totalmente cerrada no tiene aplicación práctica y, además, tampoco contiene una onda estacionaria ya que no hay ningún generador. Pero, si se acopla la estructura a un generador, a través de un orificio se podrán excitar estas ondas.

Como la energía almacenada en la cavidad resonante depende de su volumen y las pérdidas, de su superficie, con cavidades resonantes cilíndricas se puede obtener valores de Q muy elevados.

### 3.3.6 SISTEMA DE MONITOREO

Con el objetivo de mantener controlado el proceso de calentamiento del material es necesario saber en cualquier momento sus principales condiciones, como por ejemplo la temperatura a la cual se encuentra la muestra, la temperatura que tiene el flujo de aire cuando ingresa y cuando sale de la cavidad, También es de gran importancia medir la potencia electromagnética que se le está siendo suministrada al material. Partiendo de lo antes mencionado, es necesario agregar al diagrama propuesto del proceso sensores, los cuales por definición son dispositivos encargados de medir las variables de instrumentación (magnitudes físicas o químicas), es decir, son transductores que toman las variables que se desean controlar y las transforman en magnitudes eléctricas para un mejor entendimiento. Para el esquema presentado anteriormente, se decidió utilizar tres sensores de temperatura y un sensor de potencia electromagnética. En la Figura 18 se muestra un sensor de fibra óptica para medir temperatura fabricado por la empresa *Welltech Instrument Company Limited*, es una compañía especializada en la fabricación de instrumentos. En la tabla 4 se muestra la descripción de este con su costo respectivo.

**Figura 18.** Sensor de fibra óptica para medir temperatura.



**Fuente:** FISO Technologies Inc. Fiber optic sensor, measure pressure, temperature sensor manufacturer. [Consulta: 3 de septiembre del 2009]. [en línea]. [Disponible en <http://www.fiso.com/index.php?modu.le=CMS&id=22>]

**Tabla 4.** Descripción del sensor de temperatura.

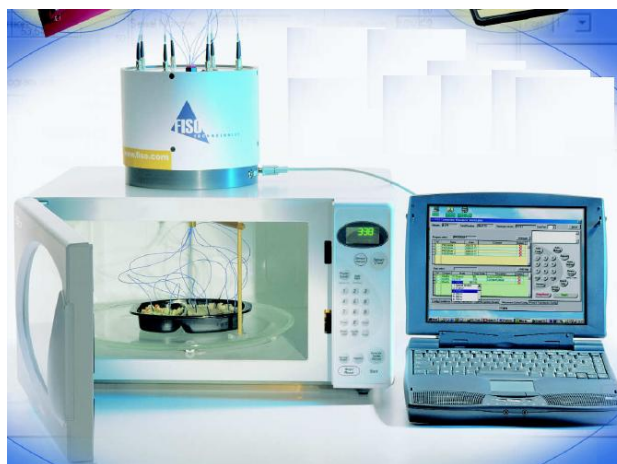
| Artículo | Cantidad | Descripción  | Costo de la<br>unidad<br><br>USD |
|----------|----------|--|----------------------------------|
| 1        | 1pc      | <p><b>Bare FBG Sensores</b></p> <p>Modelo: FBG-Bare</p> <p>Centro de longitud de onda: cualquier longitud de onda entre 1510 a 1590nm</p> <p>Rejas duración: 3 mm</p> <p>Tipo de FBG: apodizada</p> <p>Rango de tensión: + /-3000µε</p> <p>Reflexión Spectrum: &lt;0,3 nm a 3dB</p> <p>Reflectividad:&gt; 90%</p> <p>SLSR:&gt; 15dB</p> <p>Revestimiento: ninguno</p> <p><b>Opción:</b></p> <p>Con recubrimiento de acrilato (para la temperatura: -20 a 85 grado C)</p> <p>Con recubrimiento de poliimida (para la temperatura: -40 a 300 degC)</p> | 54.00                            |
|          |          |  | <i>Añadir</i>                    |

|   |     |                               |              |
|---|-----|-------------------------------|--------------|
| 2 | 1pc | Nota: xxxx = longitud de onda | 20.00        |
| 3 | 1pc |                               | Añadir 30.00 |

**Fuente:** Autores del Proyecto adaptado de [www.fbg.com.cn](http://www.fbg.com.cn).

Por otra parte la empresa [Mesurex Industrial](#) ofrece sensores de medición industrial y herramientas como “*Microwave Workstation*”, la cual es utilizada para los proyectos de investigación que involucren microondas. Está diseñada para medir la temperatura y presión dentro de un horno microondas. Utiliza tecnología de fibra óptica que permite una completa tolerancia a dichas señales. Se controla directamente desde un PC e incluye el software correspondiente. Además permite controlar el nivel de potencia, tiempo de exposición de la muestra al campo electromagnético y otros parámetros. La tabla 5 muestra las especificaciones de esta herramienta.

**Figura 19.** *Microwave Workstation*



**Fuente:** FISO Technologies Inc. Fiber optic sensor, measure pressure, temperature sensor manufacturer. [Consulta: 3 de septiembre del 2009]. [En línea]. [Disponible en <http://www.fiso.com/index.php?modu.le=CMS&id=22>]

**Tabla 5.** Especificaciones de la “*Microwave Workstation*”.

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| <b>1. SISTEMA OPTICO</b>          |  |
| Número de canales                 | 8 a 16 canales   |
| Precisión (sensores)              | Temperatura: +/- 1 °C  |
| Resolución (sensores)             | Temperatura: 0.1 °C  |
| Rango                             | Temperatura: -40 a 250 °C (disponible a altas temperaturas)<br>Presión: 0-5 PSI o 0-100PSI   |
| Modo de operación                 | A través de control remoto RS-232C   |
| Peso                              | 2.8Kg  |
| Material de la caja               | PVC  |
| Dimensiones de la caja            | 220mm de diámetro X 180mm de altura  |
| Requisito de la fuente            | 10 a 14V (5W); incluido adaptador de AC/DC   |
| <b>2. GENERADOR DE MICROONDAS</b> |  |
| Potencia                          | 0 a 1100Watts  |
| Ciclo de trabajo                  | 10 a 100%  |
| Enlace de comunicación            | RS-232C (puerto de enlace de comunicación)   |
| Funciones controladas             | Nivel de potencia (500 a 1100 Watts)<br>Ciclo de trabajo 10 a 100%<br>Tiempo   |
| Frecuencia de operación           | <b>2450 MHz</b>  |
| <b>3. REQUISITOS DEL EQUIPO</b>   | Requisitos mínimos<br>Microsoft Windows 95/98<br>Monitor con resolución de 800x600<br>Mínimo 32 Megabytes de RAM<br>20MB de espacio en el disco duro |

**Fuente:** Autores del Proyecto. Basados en FISO Technologies Inc. Fiber optic sensor, measure pressure, temperature sensor manufacturer.

### **3.4 SELECCIÓN DEL PROCESO**

Entre las opciones a considerar en el momento de seleccionar un proceso de calentamiento con microondas, se encuentran la implementación de un proceso híbrido o de calentamiento total por microondas.

#### **3.4.1 CALENTAMIENTO HÍBRIDO**

El calentamiento híbrido se define como el método de procesamiento en donde se aplican dos fuentes de energía, las microondas junto con otro auxiliar, entre las opciones se destacan: el aire caliente, el vapor e infrarrojos. Esta opción debe ser considerada cuando trabajamos con materiales que presentan dificultades al ser calentados a temperatura ambiente, pero poseen conductividad eléctrica o factores de pérdidas dieléctricas que aumentan su magnitud rápidamente al mismo tiempo que aumenta la temperatura. Así estos materiales pueden absorber las microondas si son precalentados a la temperatura deseada usando otra fuente de calor.

#### **3.4.2 CALENTAMIENTO TOTAL CON MICROONDAS**

Para este tipo de procesamiento se utilizan solo las microondas como fuente de energía, el calentamiento volumétrico puede ser continuo o por lotes; en un

proceso por lotes, una carga con masa fija es ubicada dentro de un horno y se le inyecta una cantidad predeterminada de energía como indica la ecuación (49).

$$E = \int_0^T p dt \quad (48)$$

donde E= energía total inyectada dentro de la carga, P= potencia total aplicada a la carga, la cual puede variar con el tiempo, T= tiempo de proceso. Este tipo de transformación se utiliza generalmente para producir una cantidad relativamente baja a intermedia de producto por año (unos kilos de millones de libras).

En un proceso continuo la carga es alimentada a través de una cámara de microondas, con una potencia constante mientras la muestra es transportada por un flujo de valor fijo.

En el momento de determinar el tipo de proceso a elegir debemos tener en cuenta ciertos factores:

- Facilidad de controlar los parámetros de la carga, por ejemplo: peso, temperatura de inicio, etc.
- Disponibilidad de espacio para el equipo y los materiales, las plantas para procesamiento continuo normalmente ocupan espacio a lo largo del plano, mientras que los sistemas por lote tienen un diseño cuadrado, con el lugar asignado cerca del sitio de almacenamiento.
- Tipo de carga, por ejemplo: los bloques elementos discretos, líquidos, o partículas en contenedores, son las indicadas para procesos por lote, 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.

Como resultado de los objetivos propuestos en este libro se presentan 4 propuestas para la implementación del calentamiento con microondas para la fabricación de ácido sulfúrico, o que bien podrían ser aplicadas para otro material. Cada esquema está conformado por los instrumentos que hacen parte del equipo básico, y se le modificó la cavidad en donde será procesado el material, para que se pueda escoger la que mejor se adapte a las condiciones y especificaciones del cliente.

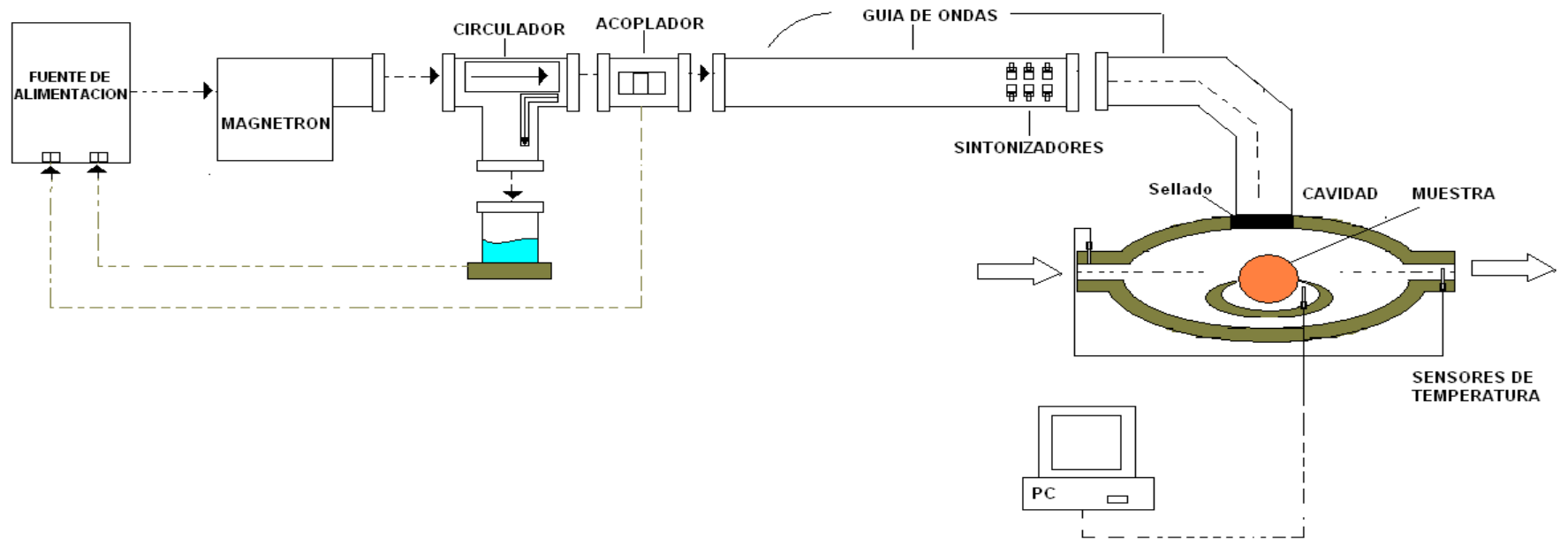
**3.4.3 Propuesta cavidad no rectangular.** En el esquema de la figura 20 planteamos la necesidad de diseñar una cavidad que evite eventuales almacenamientos de aire caliente en sus esquinas y que logre la mejor transferencia de este fluido a través del aplicador, es por esto que se propone una cavidad ovalada, la cual estará monitoreada por sensores que medirán la temperatura con que entra el fluido, así mismo la temperatura en que se encuentra la muestra, y por último la temperatura a la cual sale el fluido del lugar de aplicación de las microondas. Esta propuesta es para trabajar a nivel de laboratorio e industrial.

**3.4.4 Propuesta de Aplicación en guía de onda.** La propuesta presentada a continuación es muy útil para trabajar a nivel laboratorio, como se puede observar en la figura 21 se utiliza a la misma guía de ondas como aplicador para la muestra, esta propuesta se convierte en una alternativa muy útil para ensayos en laboratorios ya que no se utiliza una cavidad como tal, disminuyendo el número de equipos en el sistema necesario para el procesamiento del material, convirtiendo el sistema en un proceso más fácil para ser estudiado y así mismo conllevando a una reducción en costos.

**3.4.5 Propuesta Pared móvil.** En este esquema mostrado en la figura 22 el lugar de aplicación es una cavidad que está compuesta por una pared móvil, con el objetivo de variar el área y lograr con esto un cambio controlado del campo eléctrico y la temperatura a la cual estará la muestra. Entonces se hace necesario sensores tanto de temperatura como de campo eléctrico para ir controlando las dimensiones de la cavidad, el proceso se implementaría a nivel de laboratorio.

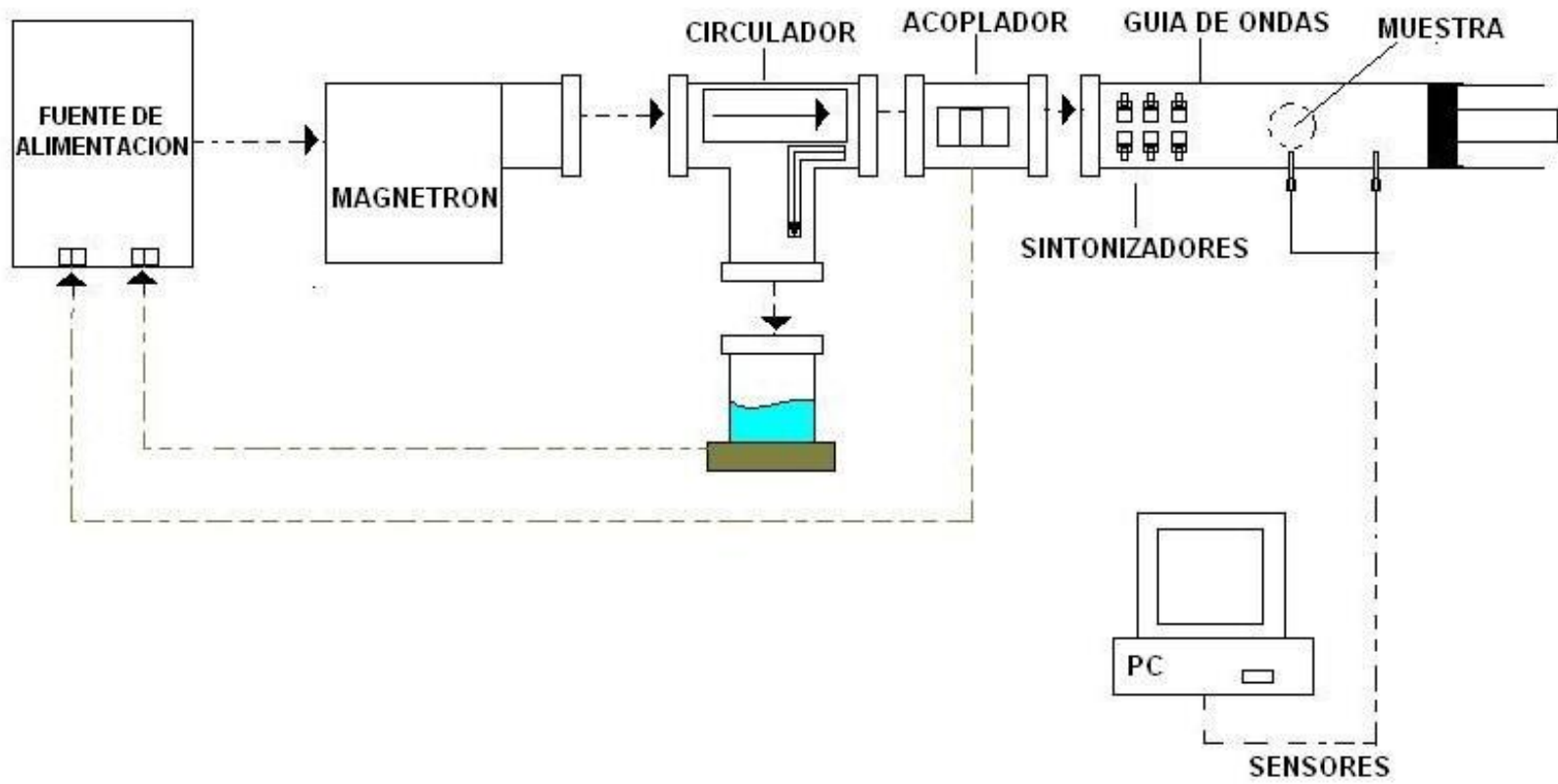
**3.4.6 Aplicación en la guía de ondas con banda transportadora.** En este caso se presenta un diseño que puede ser utilizado a nivel preindustrial. Como se puede observar en la figura 23 el lugar donde se aplican las microondas al material está compuesto por una banda transportadora, de este diseño se infiere que es posible ir variando las muestras con mayor eficiencia, presentando una importante ventaja en comparación a los otros esquemas antes expuestos, además se convierte esta propuesta en una excelente alternativa para su posible implementación, por la necesidad de trabajar en un proceso óptimo el cual represente el menor tiempo de procesamiento acompañado con la mayor producción posible por medio de este método.

**Figura 20.** Esquema de cavidad no rectangular



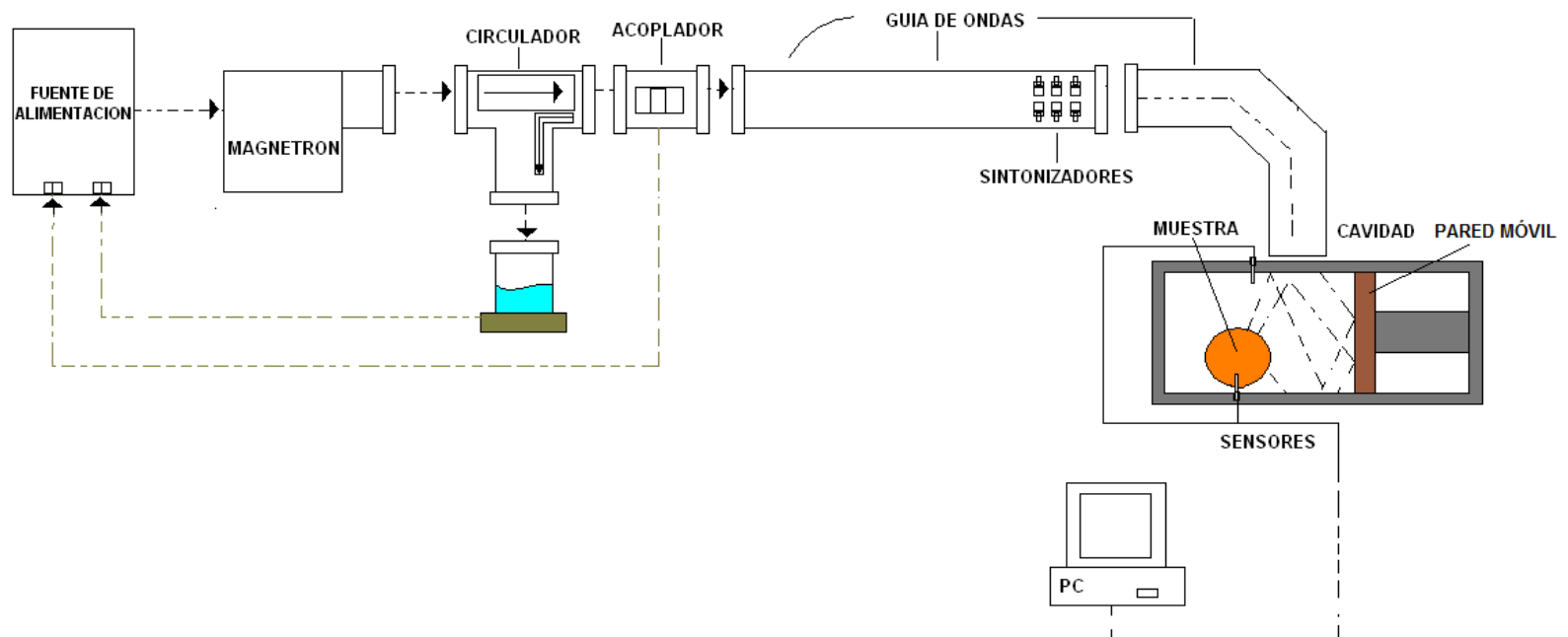
**Fuente:** Autores del Proyecto.

**Figura 21.** Esquema guía de onda como cavidad



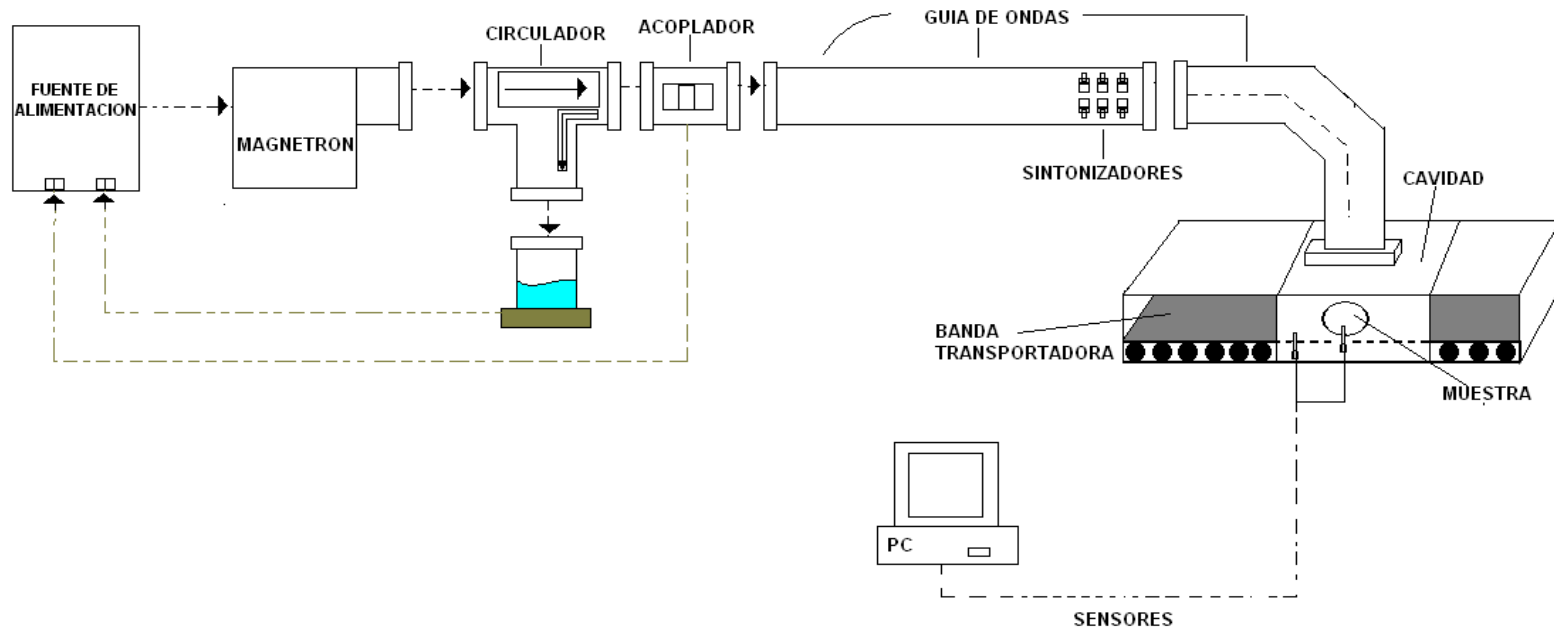
**Fuente:** Autores del Proyecto.

**Figura 22.** Esquema Pared móvil



**Fuente:** Autores del Proyecto.

**Figura 23.** Esquema Aplicación en guía de onda con banda transportadora



**Fuente:** Autores del Proyecto

### 3.4.7 PRODUCCIÓN DE ACIDO SULFÚRICO

Como se ha mencionado en el transcurso de todo el texto, este proyecto se enfoca hacia la producción de ácido sulfúrico vía microondas. Esto por distintas razones y cada una de ellas de vital importancia, el ácido sulfúrico es un producto primordial para las industrias. De los más fabricados y comercializados a nivel mundial, principalmente por su bajo costo y sus múltiples aplicaciones. La producción de ácido sulfúrico representa un importante índice de desarrollo y actividad industrial de un país, además el hecho de que en la investigación realizada para este proyecto no se encontró que este material haya sido producido por este método. Se asegura entonces que este trabajo puede ser usado como piloto para la producción de este material. Se describe a continuación el ácido sulfúrico, con su respectiva definición, propiedades, usos de este material, y como es obtenido en la actualidad.

#### 3.4.7.1 DEFINICIÓN

De fórmula  $H_2SO_4$  (óleum:  $H_2SO_4$  con  $SO_3$  en solución), a temperatura ambiente es un líquido corrosivo, es más pesado que el agua e incoloro (a temperatura y presión ambiente).

#### 3.4.7.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

- **Corrosividad:** es un líquido altamente corrosivo, particularmente en concentraciones bajo 77,67%, corroe los metales, con excepción del oro, iridio y rodio, dando lugar al desprendimiento de hidrógeno.

- **Reactividad:** El ácido sulfúrico concentrado es fuerte agente oxidante, y puede provocar inicio de explosión al entrar en contacto con materia orgánica y compuestos tales como nitratos, carburos, cloratos, etc. También reacciona de forma exotérmica con el agua; produce deshidratación de los compuestos orgánicos y puede llegar a carbonizarlos.

A continuación se muestran los datos físicos del ácido sulfúrico.

- 1) Concentración mayor: 98,5% a una temperatura de 15,5 °C:
- 2) Punto de ebullición: 338 °C ó 640 °F
- 3) Densidad a 20 °C: 1,84 g/cm.
- 4) Punto de fusión: -40 °C para una concentración de 65,13%.
- 5) Solubilidad: Soluble en agua, pero reacciona violentamente al mezclarse con ella, generando calor. Con otros solventes no hay mezcla: no hay reacción.
- 6) Temperatura de descomposición: 340 °C.
- 7) Presión de vapor a 20 °C: < 0,001 bar.

El Ácido Sulfúrico es un ácido fuerte, es decir, en disolución acuosa se disocia fácilmente en iones de hidrogeno ( $H^+$ ) e iones sulfato ( $SO_4^{2-}$ ). Sus disoluciones diluidas muestran todas las características de los ácidos: tienen sabor amargo, conducen la electricidad, neutralizan los álcalis y corroen los metales activos desprendiéndose gas hidrógeno. A partir del ácido sulfúrico se pueden preparar sales que contienen el grupo sulfato  $SO_4$ , y sales ácidas que contienen el grupo hidrógeno sulfato,  $HSO_4$ .

### 3.4.7.3 USOS DEL ACIDO SULFÚRICO

El Ácido Sulfúrico concentrado, llamado antiguamente aceite de vitriolo, es un importante agente desecante. Actúa tan vigorosamente en este aspecto que extrae el agua, y por lo tanto carboniza, la madera, el algodón, el azúcar y el papel. Debido a estas propiedades desecantes, se usa para fabricar éter, nitroglicerina y tintes. Cuando se calienta, el ácido sulfúrico concentrado se comporta como un agente oxidante capaz, por ejemplo, de disolver metales tan poco reactivos como el cobre, el mercurio y el plomo, produciendo el sulfato del metal, dióxido de azufre y agua. Sus principales usos son los siguientes:

- Producción de superfosfato de calcio (fertilizantes).
- **Potabilización de agua:** para producir sulfato de aluminio a partir de bauxita.
- **Detergentes:** en la sulfonación de dodecil-benceno, que es la materia prima básica para la mayoría de los detergentes utilizados en el hogar y la industria. También para esto se utiliza óleum 22%.
- **Fábricas de Papel:** en el proceso de producción de la pulpa de papel, e indirectamente en el uso de sulfato de aluminio. Este también se utiliza en la depuración de aguas residuales y en la potabilización.
- **Agro-Fito Sanitario:** en la producción de sulfato de cobre.
- **Refinación de Petróleo:** para las calderas y procesos químicos.
- **Generación térmica de energía:** para el tratamiento de las calderas.
- **Metalurgia:** para el decapado de metales.
- Producción de ácido para baterías eléctricas.

- **Producción de sulfato de aluminio:** se le utiliza en reacción con hidróxido de aluminio. El sulfato de aluminio producido se utiliza principalmente en potabilización de aguas, curtiembres, producción de papel y sales de aluminio.
- **Producción de sulfato de cromo:** se le utiliza en reacción con dicromato de potasio y un agente reductor. El sulfato de cromo se utiliza principalmente para el curtido de cueros (curtido al cromo).
- Fabricación de productos orgánicos, pinturas, pigmentos y rayón.
- **Explosivos:** por su gran capacidad de reacción.

#### 3.4.7.4 PROCESOS DE OBTENCIÓN

En la elaboración de ácido sulfúrico se utilizaban dos métodos: el proceso de cámaras de plomo y el de contacto. Actualmente solo el proceso de contacto es el desarrollado por las industrias a nivel mundial, debido a que el de cámaras de plomo solo puede producir el ácido hasta una concentración del 78%. En esta investigación se explicará únicamente el proceso de contacto.

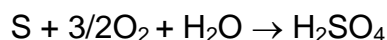
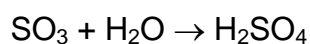
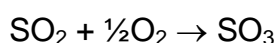
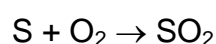
**3.4.7.4.1 Proceso de Contacto.** Este proceso consta de tres (3) etapas:

1. Depuración de gases de entrada,
  2. Reacción catalítica y
  3. Absorción de  $\text{SO}_3$ .
- **Depuración de gases de entrada:** se hace necesario eliminar las impurezas como el polvo, la humedad,  $\text{As}_2\text{O}_3$ , y Haluros con que llega el

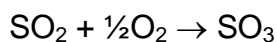
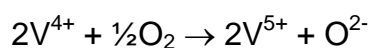
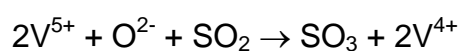
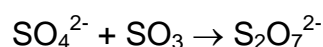
SO<sub>2</sub> producto de la tostación de materiales piríticos o combustión del azufre.

- **Reacción catalítica:** El SO<sub>2</sub> reacciona con el oxígeno para formar Anhídrido Sulfúrico (SO<sub>3</sub>). Esta reacción es exotérmica, la temperatura de entrada del gas debe mantenerse en el nivel correcto con el fin de conseguir la conversión requerida. Se utiliza el Pentóxido de Vanadio (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) como catalizador.

- **Reacciones químicas:**



- **Reacciones catalíticas:**

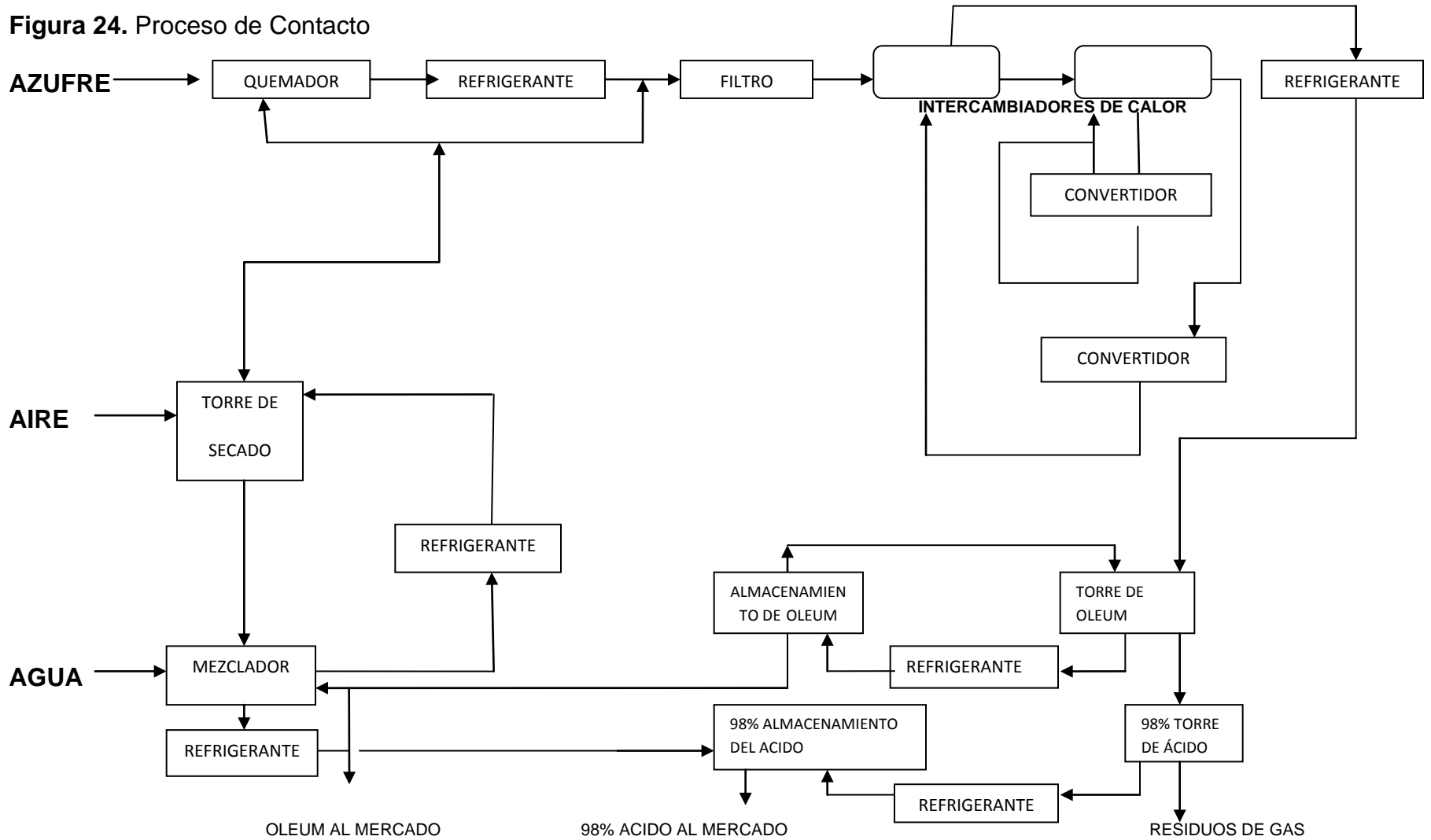


- **Absorción del SO<sub>3</sub>:** el gas SO<sub>3</sub> no se combinará directamente con agua, sino que debe combinarse indirectamente mediante absorción en Ácido Sulfúrico de 98%, y luego este puede disolverse en agua para obtener más ácido sulfúrico concentrado.

**3.4.7.5 SO<sub>2</sub> a partir de Materiales Piríticos.** Para la producción de ácido sulfúrico la principal materia prima es el SO<sub>2</sub>, el cual es obtenido principalmente al quemar minerales piríticos. Los piríticos más utilizados para la obtención de SO<sub>2</sub> son:

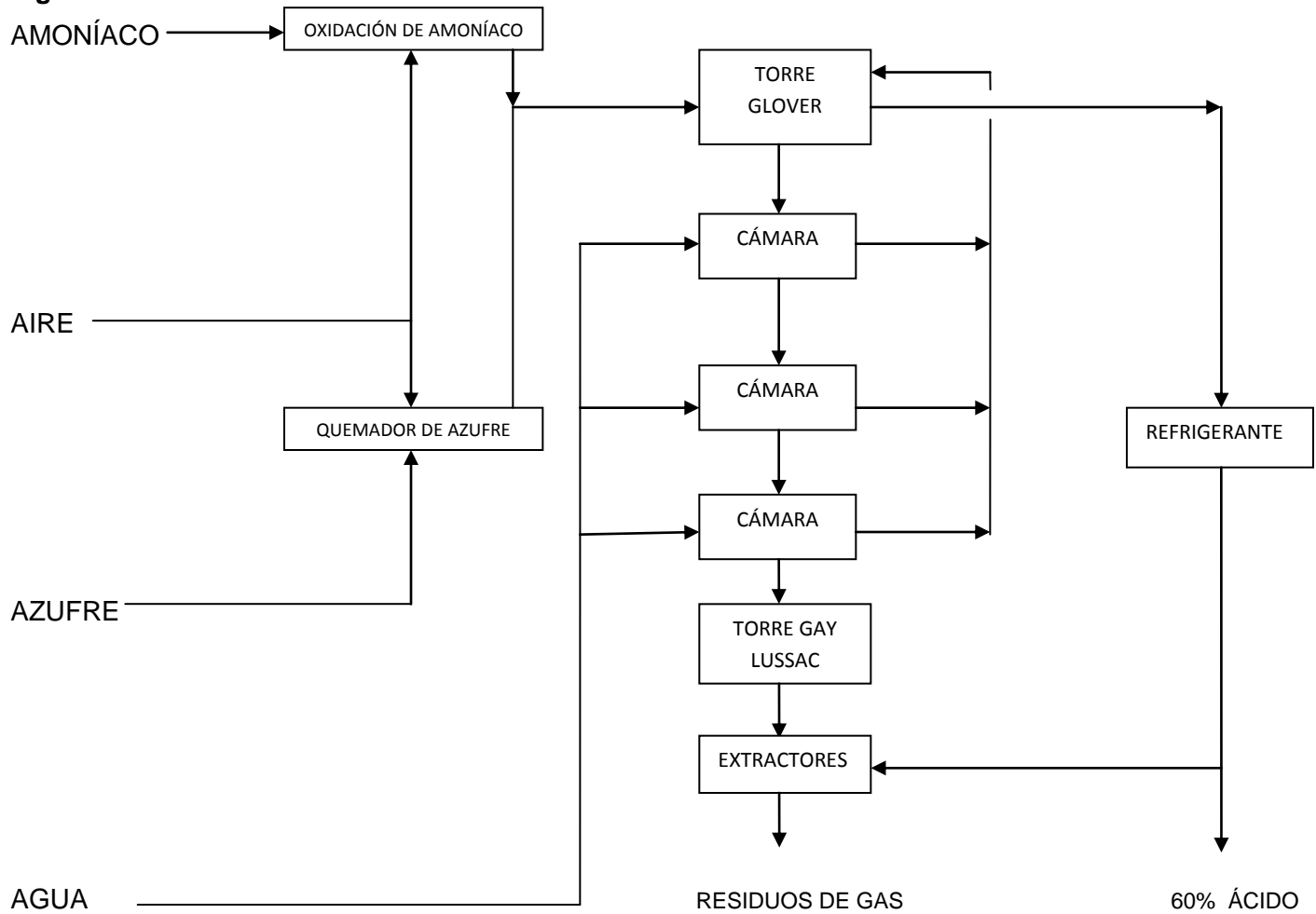
- $\text{FeS}_2$  Pirita
- $\text{ZnS}$  Esfalerita o blenda
- $\text{CuFeS}_2$  Calcopirita
- $\text{FeS}$  Pirrotita
- $\text{FeZnS}_2$  Esfalerita
- $\text{PbS}$  Galena
- $\text{HgS}$  Cinabrio
- $\text{Cu}_2\text{S}$  Calcosina
- $\text{CuS}$  Covellita
- $\text{Cu}_3\text{FeS}_3$  Bornita

**Figura 24. Proceso de Contacto**



**Fuente:** Autores del Proyecto. Basados en Raymond Riegel Emil. Chemical Process Machinery 2ª Ed. Reinhold Publishing Corporation. 1953.

**Figura 25.** Proceso de Cámaras de Plomo

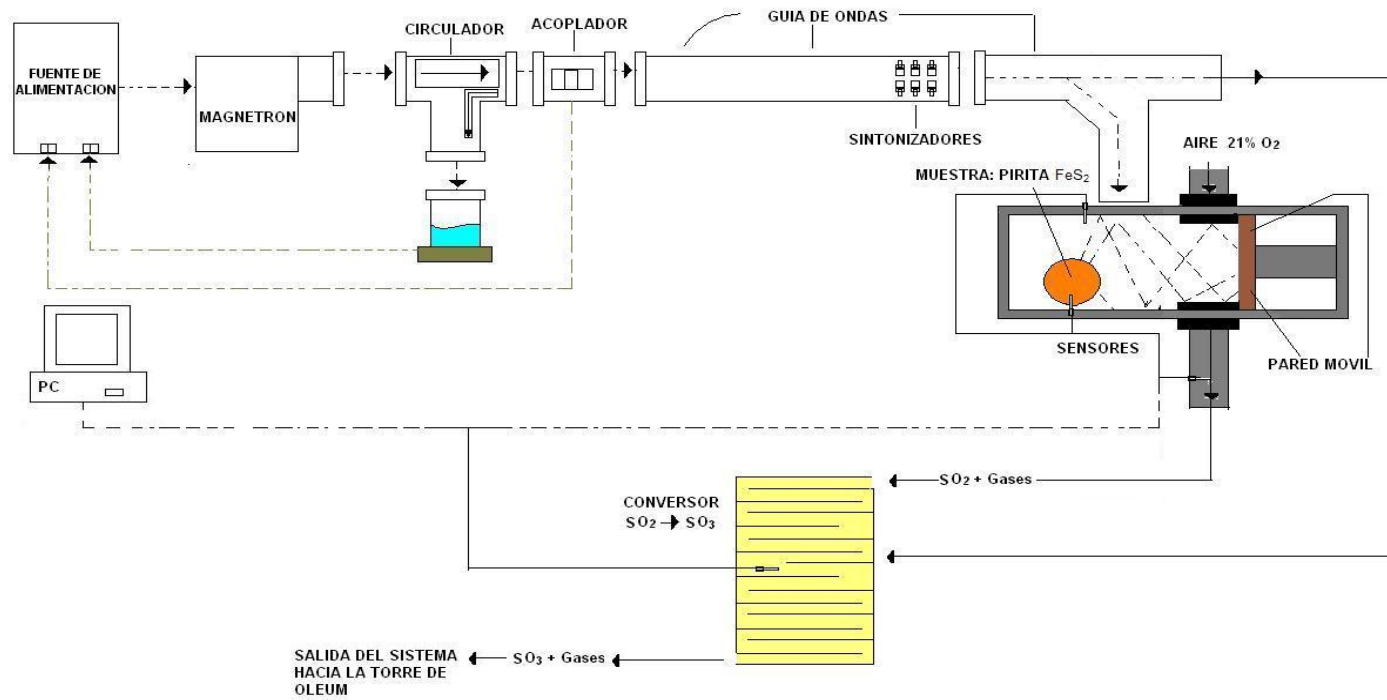


**Fuente:** Autores del Proyecto. Basados en Raymond Riegel Emil. Chemical Process Machinery 2ª Ed. Reinhold Publishing Corporation. 1953.

### **3.4.7.6 PROPUESTA PARA LA PRODUCCIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO VÍA MICROONDAS.**

Luego de comprender los métodos convencionales para la producción de ácido sulfúrico, se realiza en este documento una propuesta para la producción de este material vía microondas. Primero se analizan los cuatro esquemas propuestos desde la sección 3.4.3 hasta la sección 3.4.6 (ver figuras 20, 21, 22 y 23), luego se selecciona la propuesta que más convenga. En este caso escogimos el esquema de figura 22, el cual, en su cavidad, posee una pared móvil que permite controlar la temperatura a la cual se quemará la muestra. Basados en la investigación realizada, se puede concluir que la  $\text{FeS}_2$  Pirita reacciona de manera eficiente en presencia de otra sustancia cuando es aplicado un campo de microondas. Además, se escoge el método de contacto mostrado en la figura 24. En la figura 26 se presenta la propuesta para fabricar ácido sulfúrico. En este caso, se realiza el quemado de la pirita en la cavidad donde ingresa aire y sale una mezcla de  $\text{SO}_2$  más gases. Dicha mezcla se hace pasar por un conversor de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  (también calentado vía microondas). Por lo tanto, se obtiene  $\text{SO}_3$  más gases, que posteriormente se entregan a la torre de óleum mostrada en la figura 24, para que continúe el proceso.

**Figura 26.** Propuesta para la fabricación de ácido sulfúrico vía microondas



**Fuente:** Autores del proyecto.

La Tabla 6 muestra algunos proveedores y productores de ácido sulfúrico en Colombia, con información para contactarlos y valores en pesos de este producto, las industrias colombianas venden por toneladas a los distribuidores, que son los encargados de vender este material a nivel laboratorio y por Kilogramos a los consumidores.

**Tabla 6.** Proveedores y productores de ácido sulfúrico en Colombia

| <b>Empresa y Datos Para Contacto</b>   | <b>Distribuidora</b> | <b>Productora</b> | <b>Valor de 1 Kilo</b> | <b>Valor Por 10 Kilos</b> |
|--|----------------------|-------------------|------------------------|---------------------------|
| <p>Profinas S.A.</p> <p>Cra 40 N° 14-09 Acopi-Yumbo. Cali – Valle Del Cauca (Colombia)</p> <p>Tel. 6644320 / 6644967</p> <p>Fax .6647315 / 6653003</p>   | X                    | X                 | \$3500+ IVA            | \$35000 +IVA              |
| <p>Productos Químicos Panamericanos S.A. – P.Q.P.</p> <p>Medellín Oficina Principal: Calle 5A N° 39-93</p> <p>Tel. (4) 268 50 00</p> <p>Bogotá: Calle 95 No. 11 A 37 Tel. (1) 622 10 66</p> <p>Cali: Km 28 Vía Cali-Popayán.</p> <p>Tel (2) 590 17 17</p> <p>Barranquilla: Vía 40 Carretera Eternit Loma 3,</p> <p>Tel (5) 368 67 13</p> | Venta por Toneladas  | X                 |                        |                           |

|   |                        |   |        |         |
|---|------------------------|---|--------|---------|
| <p>Protokimica</p> <p>Oficina Principal: Carrera 52<br/>No 6 Sur 35 Pbx: 444 87 87.<br/>Medellín – Colombia</p>       | X                      |   | \$4000 | \$37147 |
| <p>Industrias Básicas de<br/>Caldas</p> <p>Carretera Panamericana Km<br/>18 Vía Medellín Manizales –<br/>Colombia</p> | X                      |   | \$3700 | \$37000 |
| <p>Monómeros Colombo<br/>Venezolanos</p> <p>Vía 40 Las Flores.<br/>Barranquilla – Colombia</p>                        | Venta por<br>Toneladas | X |        |         |

**Fuente:** Autores del Proyecto.

### 3.5 ESTUDIO DE SEGURIDAD

Con la creciente incorporación de los sistemas de calentamiento industrial a través de microondas debe ir ligado un estudio de riesgos que propenda por el bienestar de las personas que se encuentran en las proximidades del dispositivo. Se necesita una profunda comprensión de las cuestiones relativas al uso seguro de la tecnología de microondas para evitar imprevistos y consecuencias potencialmente peligrosas o costosas. A continuación, se muestran diferentes tipos de riesgo presentes al utilizar microondas.

**3.5.1 Riesgos Asociados a Equipos de Microondas.** Actualmente, existe una gran preocupación por la continua exposición del cuerpo humano a campos electromagnéticos. A pesar de la existencia de campos electromagnéticos emitidos por variadas fuentes, una buena proporción de esta preocupación se debe a la rápida proliferación de teléfonos celulares en todo el mundo.

En este proyecto es de particular interés estudiar las microondas, que son denominadas frecuencias "no ionizantes" puesto que los niveles de energía corresponden a una fracción muy pequeña de la que se requiere para ionizar el tejido celular y perturbar el ADN, a diferencia de los rayos X y gamma, que son capaces de ionizar los tejidos.

Se debe tener en cuenta el proceso de calentamiento del material, puesto que presenta un alto potencial de riesgo para la salud debido a su elevada temperatura. Sin embargo, gran parte de la preocupación pública se ha centrado en determinar si los efectos electromagnéticos representan un riesgo para la salud humana. La American Medical Association publicó que los marcapasos son

diseñados con blindajes para interferencias de frecuencias (RFI), lo cual indica que las microondas no son capaces de afectar estos dispositivos.

En la actualidad se han realizado investigaciones epidemiológicas para determinar si la exposición a campos electromagnéticos provoca algún tipo de cáncer. Las fuentes electromagnéticas comúnmente analizadas son: emisiones de radio, televisión, teléfonos celulares, y radares; mientras que los tipos de cáncer estudiados son: de cerebro, pulmones, testículos, y linfático. En la mayoría de los casos, la tasa de incidencia no muestra aumento significativo en el riesgo de exposición ocasional. Los resultados de dichas investigaciones no evidencian un vínculo entre la exposición a campos electromagnéticos de frecuencias de microondas y la incidencia de cáncer.

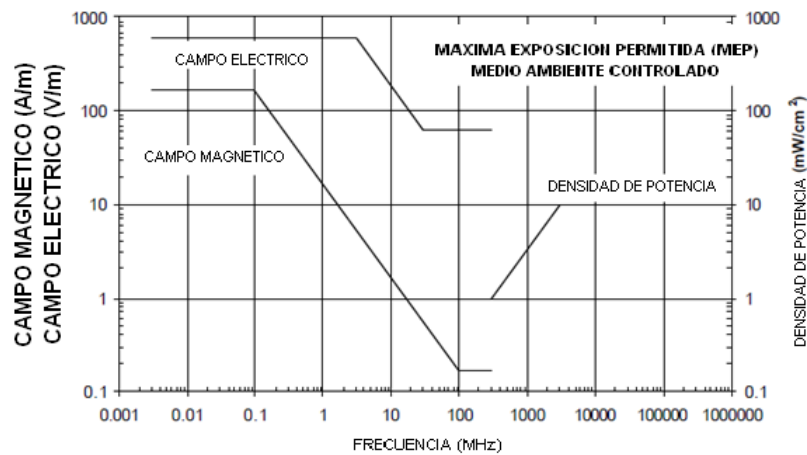
**3.5.2. Regulación Para las Normas de Seguridad.** En Estados Unidos, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) ha adoptado normas basadas en las recomendaciones desarrolladas por el Instituto Nacional Americano de Normas (ANSI) y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), como se define en el estándar IEEE C95.1.17. Dicho estándar define la Exposición Máxima Admisible (MPE) promedio durante un período de tiempo de seis minutos para "ambientes controlados".

**3.5.2.1 Exposición Electromagnética.** Un parámetro importante utilizado en el establecimiento de directrices para reducir el riesgo de lesiones debido a la exposición a campo electromagnético es "la Tasa Específica de Absorción" (SAR), que normalmente se expresa en unidades de Vatios por Kilogramo (W/Kg).

La Figura 27, muestra el máximo campo electromagnético al que puede ser expuesto una persona. Para el rango de frecuencias de 10 MHz a 100 GHz, la OSHA (seguridad ocupacional y administración de salud) ha establecido un

reglamento, donde se indica que la exposición de cualquier operario a estos equipos no exceda los 10 mW/cm<sup>2</sup> (medido a los 5 cm de la fuente de emisión) y un tiempo máximo de exposición 6 minutos durante un periodo. Esta organización además dicta las normas para el etiquetado de peligro en los equipos.

**Figura 27.** Máximo Recomendado de Exposición Permisible (MPE) en Ambientes Controlados por la Norma C95.1-1999



**Fuente:** Adaptado de: ANSI / IEEE. 1999.

**3.5.3. Equipo de Diseño Por Seguridad.** Para la fabricación de cualquier equipo es necesario cumplir con las normas de seguridad establecidas. A continuación se describen las características necesarias para diseñar un equipo de microondas que cumpla dichos estándares y garantice la fiabilidad y operación segura.

**3.5.3.1 Supresión de Fugas de Microondas.** Al generar energía de microondas de alta potencia, ésta debe ser contenida al máximo dentro del sistema de procesamiento. Esto, con el fin de evitar fugas y cumplir las normas de seguridad

y de interferencia. Sin embargo, por razones obvias, ningún sistema de procesamiento con microondas puede ser una caja completamente aislada, pues requiere por lo menos de un orificio de entrada y uno de salida de material.

Dependiendo del tamaño y geometría de las aberturas que sean requeridas, los medios para la supresión de la fugas de microondas pueden ser: reactivos o disipativos. En cualquiera de los casos, la energía de microondas se atenúa puesto que logra pasar a través de los orificios, los cuales deben ser diseñados con unos valores fijos de longitud para mantener la energía dentro de los niveles de seguridad permitidos por las normas.

**3.5.3.2 Dispositivo de Interrupción Por Seguridad.** Los dispositivos de interrupción son generalmente de tipo mecánico y/o componentes eléctricos o sub-sistemas que prohíben la operación o funcionamiento de otros componentes. En el caso de los sistemas de tratamiento de microondas, generalmente se utilizan para interrumpir el funcionamiento del generador de microondas, si se diera el caso que existiera una condición que puede causar exceso de emisiones de microondas. Un ejemplo de esto son las bridas de la guía de ondas, un lugar a menudo olvidado, donde se pueden presentar fugas involuntarias por descuido durante el mantenimiento de los equipos.

Muchos sistemas han sido diseñados para permitir fácil desconexión de una guía de ondas de componentes para el mantenimiento de rutina, algunos incluso sin el uso de herramientas. En tales casos, un dispositivo de desconexión es necesario para garantizar un correcto funcionamiento antes de volver a montar el sistema.

**3.5.3.3 Etiquetas de Advertencia e Indicadores Visuales.** Es un requisito por normativa que los dispositivos presenten etiquetas o indicadores visuales de

advertencia, que alerten al operador de un equipo si este posee elementos electromagnéticos, riesgo de radiación o si maneja altos voltajes.

Por lo anteriormente mencionado, debe entonces indicarse en las etiquetas o indicadores lo siguiente: la naturaleza del peligro, las posibles consecuencias de exposición al peligro, y las medidas necesarias para prevenir explosiones. Además, son necesarias las etiquetas en cavidades, puertas y otras aberturas para prevenir que objetos extraños interfieran con el funcionamiento normal del sistema. También, se requieren indicadores visuales que alerten que el equipo está en funcionamiento. Estos indicadores deben ser claramente visibles durante condiciones normales de funcionamiento o cuando el personal podría estar presente.

**3.5.4 Recomendaciones Para la Operación de Equipos.** Es importante que a la hora de trabajar con sistemas de procesamiento de materiales vía microondas, se tengan en cuenta una serie de recomendaciones para la operación segura de los equipos.

- **Formación en materia de seguridad:** el tratamiento de primeros auxilios básicos y los procedimientos de rescate de emergencia deben ser una parte en el programa de formación en materia de seguridad.
- **Equipo de capacitación:** todo el personal que participa en la operación y/o mantenimiento de microondas industriales debe recibir una formación adecuada para ser consciente de los peligros asociados con sus respectivas tareas. Como mínimo, todos los manuales de usuario del producto y otra documentación proporcionada por el fabricante de equipos debe leerse y entenderse a fondo antes de intentar la operación o servicio.

- **Sistema de acompañamiento:** nunca se debe operar o realizar el mantenimiento de sistemas de microondas solo. Se recomienda que la persona esté acompañada.
- **Detección de fugas:** cada usuario de un sistema de calentamiento por microondas industriales debe tener a la mano un detector de fugas de microondas.

#### 4. COTIZACIÓN DEL EQUIPO ADECUADO PARA EL PROCESAMIENTO DE MATERIALES USANDO MICROONDAS

Como se mencionó anteriormente un sistema de microondas típico consiste de un generador para producir las microondas, una guía de onda para transportarlas, un aplicador (usualmente, una cavidad) para poder manipularlas para un propósito específico y un sistema de control que permite vigilar las variables de interés. (temperatura, potencia, sintonización, etc.).

El trabajo de los ingenieros electrónicos, consiste en seleccionar los elementos adecuados para poner en práctica este tipo de calentamiento. Los procesos a nivel de laboratorio manejan un rango de potencias entre 1000-3000 Watts, siendo este un parámetro a considerar en el momento de adquirir los instrumentos. Para todas las propuestas presentadas anteriormente se trabajó con un generador que consta de un magnetrón trabajando a una frecuencia de 2450 Hz y a una potencia de 2 KW. La guía de onda seleccionada es la WR340 y será cotizada de acuerdo a la longitud deseada por el comprador, el espesor de las paredes no debe ser menor de 1.5 mm, según lo que establecen los estándares internacionales<sup>7</sup> para esta frecuencia de trabajo. Las dimensiones internas deben ser 0.0864x0.432 m y  $\lambda_c = 0.1728$ . Entre los otros elementos a considerar se encuentran: el circulador que como se mencionó anteriormente protege al magnetrón 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 6 KW, se recomienda pero no es un requisito. Y para niveles por encima de 6 KW, se convierte en un requerimiento.

El acoplador direccional, es un dispositivo muy usado, como un detector apropiado y un instrumento para medir la potencia reflejada, este también puede ser utilizado para medir la potencia en ambas direcciones. Dependiendo del dispositivo escogido, hay que tener en cuenta que en algunos sistemas la fuente de poder o

---


<sup>7</sup>Jonhs AT, Warne DF. Engineering's Handbook of Industrial Microwave Heating.

el circulador vienen equipados con aparatos 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 figura 28 se presenta la cotización realizada para la instalación de un sistema, para manipular las microondas a nivel de laboratorio. El equipo está configurado para desarrollar este tipo de proceso de calentamiento, usando muestras pequeñas del material, que tiene como característica bajas perdidas dieléctricas. Está compuesto por los dispositivos mencionados anteriormente y se le agregaron otros instrumentos de medida como son: los sintonizadores y un monitor que indica el valor de la potencia reflejada y la potencia entregada, como cavidad se usa una guía de onda diseñada para acomodar una gran variedad de carga y adaptable para varios tipos de proceso.

Además, en la figura 29 se presentan los planos del equipo cotizado para examinar sus dimensiones y la forma en que se encuentra interconectado, en las figuras 30 y 31 se presentan los P&ID de los sistemas propuestos por los autores para un proceso general y para la fabricación de ácido sulfúrico usando microondas respectivamente.

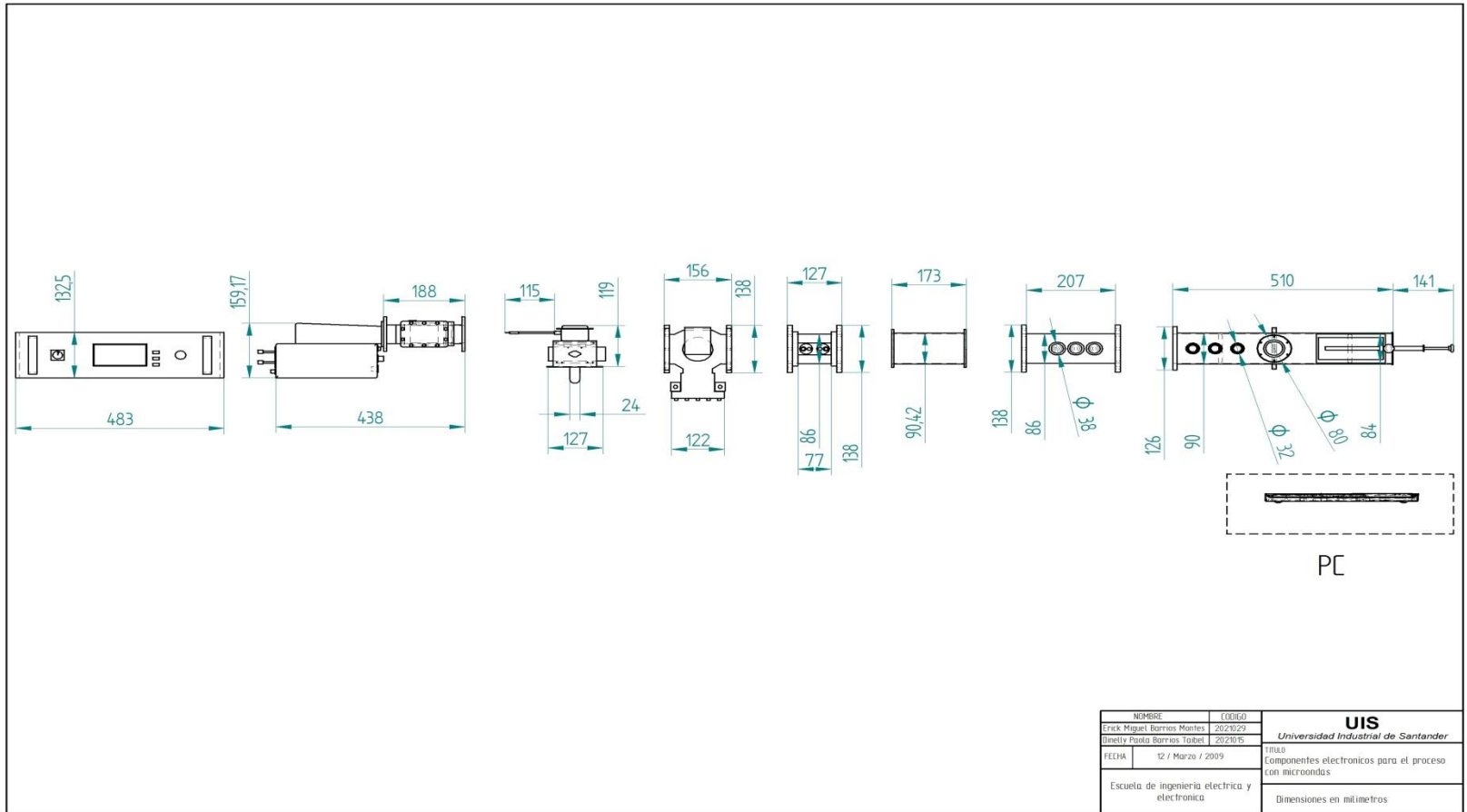
**Figura 28.** Cotizacion del equipo para el procesamiento de materiales con microondas

| <b>GERLING</b>  |     | <b>GERLING APPLIED ENGINEERING, INC.</b> |           | Please address purchase orders to:<br>GAE, Inc.<br>P.O. Box 580816<br>Modesto, CA 95358<br>Phone: 209-527-8960<br>Fax: 209-527-5385<br>Fed ID #: 77-0446517 |          | <b>QUOTATION</b>                      |   |                 |            |                |  |
|---|-----|--|-----------|---|----------|---------------------------------------|---|-----------------|------------|----------------|--|
| TO: Universidad Industrial de Santander<br>Cra 27 calle 9<br>Bucaramanga - Colombia<br>Phone: (57) (7) 8344000  |     |  |           |   |          | QUOTE NO: Q091022-1                   |   | DATE: 22-Oct-09 |            | BY: JF Gerling |  |
| PAYMENT TERMS: See notes  |     | INCOTERMS: EXW                           |           | SALESPERSON: JF Gerling   |          | CONTACT: Dinelly Paola Barrios Taibel |   | PHONE:          |            |                |  |
| ITEM  | QTY | UNIT                                     | GAE P/N   | REV.  | CUST P/N | REV.                                  | DESCRIPTION   | SHIP            | UNIT PRICE | EXT. PRICE     |  |
|   |     |  | 912817    |   |          |                                       | 1.2kW Laboratory Research System, WR340<br>Consists of the following items:   | 7-8 wks ARO     |            |                |  |
| 1   | 1   | ea.                                      | GA4310    |   |          |                                       | 1.2kW Lab Microwave Generator, WR340 (GA4015/GA4104A)   |                 | \$8,950.00 | \$8,950.00     |  |
| 2   | 1   | ea.                                      | GA1107-1R |   |          |                                       | 2-Port Isolator, WR340, Fwd/Refl Couplers (refurbished)   |                 | \$1,200.00 | \$1,200.00     |  |
| 3   | 1   | ea.                                      | GA3209-1A |   |          |                                       | Dual Power Meter Set, 1.2kW Scales  |                 | \$900.00   | \$900.00       |  |
| 4   | 1   | ea.                                      | GA1002    |   |          |                                       | Precision 3-Stub Tuner, WR340   |                 | \$1,350.00 | \$1,350.00     |  |
| 5   | 1   | ea.                                      | GA6004A   |   |          |                                       | Universal Waveguide Applicator, Dual Side, WR340  |                 | \$1,230.00 | \$1,230.00     |  |
| 6   | 2   | ea.                                      | GA8303-XX |   |          |                                       | Test Tube Adapter for GA6004 (-XX = 06 thru 25)   |                 | \$250.00   | \$500.00       |  |
| 7   | 2   | ea.                                      | GA8303-36 |   |          |                                       | Test Tube Adapter for GA6004, for 36 mm Test Tube)  |                 | \$320.00   | \$640.00       |  |
| 8   | 1   | ea.                                      | GA1206A   |   |          |                                       | Precision Sliding Short Circuit, WR340  |                 | \$1,690.00 | \$1,690.00     |  |
| 9   | 1   | ea.                                      | 912946    |   |          |                                       | Support Block Assembly, WR340   |                 | \$95.00    | \$95.00        |  |
| 10  | 1   | ea.                                      | 912948    |   |          |                                       | Flange Hardware Kit   |                 | \$50.00    | \$50.00        |  |
| 11  | 1   | ea.                                      | GA3202    |   |          |                                       | Microwave Leakage Detector, 2.45 GHz  | 4-5 wks ARO     | \$950.00   | \$950.00       |  |
| 12  | 1   | lot                                      | GA8297    |   |          |                                       | Estimated Shipping Charge for FedEx International Economy service to Bucaramanga, Colombia (does not include customs duties and taxes)  |                 | \$600.00   | \$600.00       |  |
| 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 and do not include shipping charges, taxes or duties. 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. 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. All orders for non-stock items are non-cancelable, non-returnable. Quotation is valid for sixty (60) days. |                 |            |                |  |
| BY:  (Authorized Sales Representative)   |     |  |           |   |          |                                       |   |                 |            |                |  |

Fuente: Gerling Applied Engineering, INC.

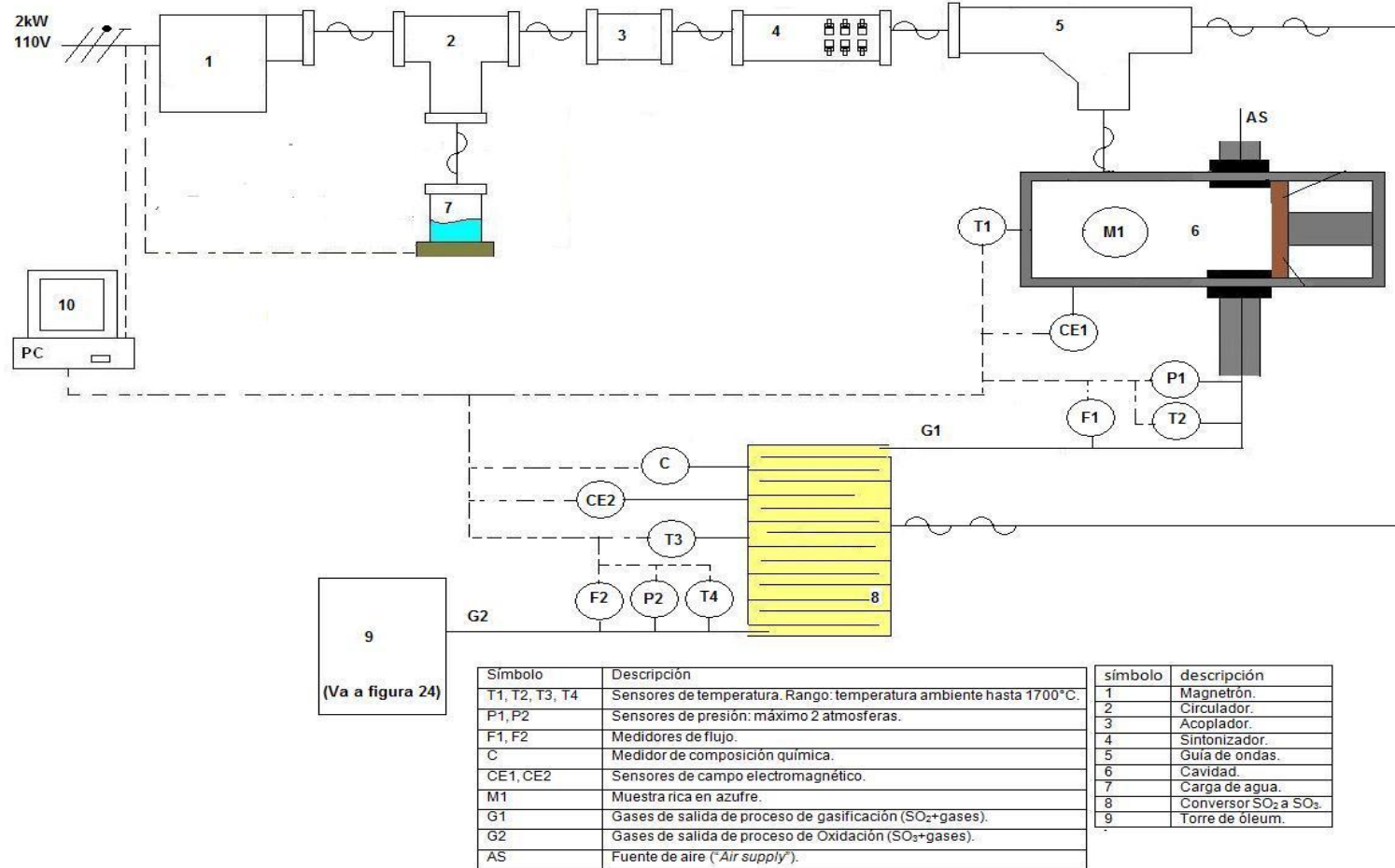


**Figura 30.** Plano del Equipo Propuesto para Propósito General



**Fuente:** Autores del Proyecto

**Figura 31.** P&I del diagrama del proceso de fabricación de ácido sulfúrico vía microondas.



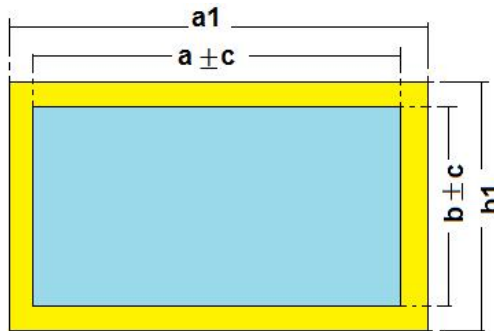
Fuente: Autores del Proyecto

## 4.2 SIMULACIÓN CON LA GUÍA DE ONDA

En esta etapa del proyecto se realiza la simulación de una guía de ondas, esto con el objetivo de diseñar un modelo de este equipo que hace parte de un sistema real y lograr fortalecer la comprensión de su comportamiento, además aprovechar dicha simulación para extraer nuevas estrategias para un mejor funcionamiento del proceso de calentamiento de un material. Para la simulación se utilizó el software CST STUDIO SUITE, el cual ofrece soluciones eficientes y rápidas para trabajar altas frecuencias como son las microondas (Ver Anexo A).

Para lograr una simulación cercana a la realidad, se decidió diseñar una guía de onda rectangular con especificaciones existentes en el mercado, donde se puede encontrar gran variedad de guías de ondas estándares para rangos de frecuencias establecidos. En la Figura 32 se describen las dimensiones de una guía de onda rectangular. Se escoge la guía de onda WR340 con las siguientes dimensiones: en la superficie exterior un ancho de  $a_1=90.42\text{mm}$ , altura  $b_1=47.24\text{mm}$ . En la superficie interior un ancho  $a=86.36\text{mm}$ , altura  $b=43.18\text{mm}$ . Estas dimensiones poseen una tolerancia  $c=.17\text{mm}$ . ( $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a$ ,  $b$ , y  $c$  se pueden identificar en la figura 32). En este proyecto se trabaja las microondas a una frecuencia de 2.45 GHz, debido a que es la más apropiada para el calentamiento de materiales, como se ha detallado anteriormente.

**Figura 32.** Dimensiones Externas e Internas de Una Guía de Onda Rectangular

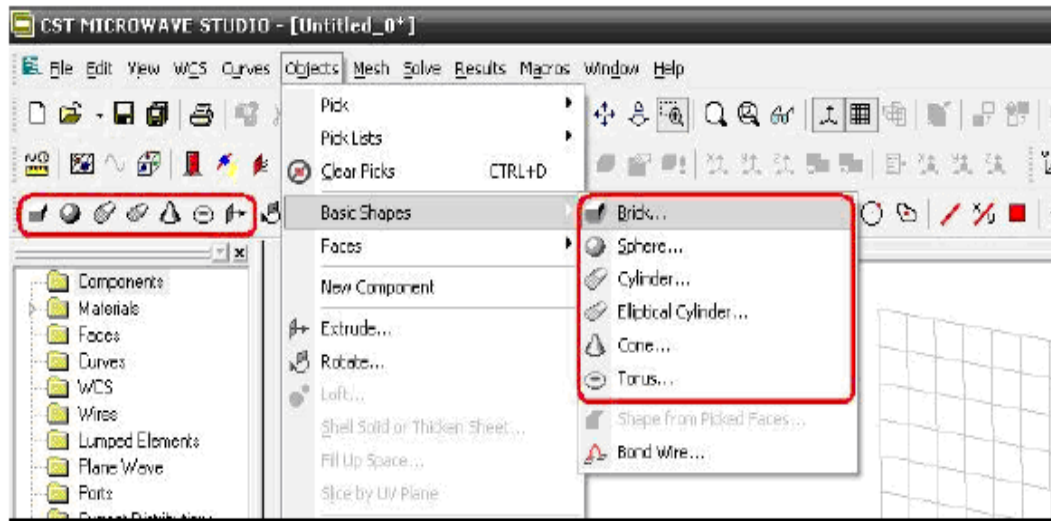


**Fuente:** Autores del Proyecto. Basados en : [www.ainfoinc.com](http://www.ainfoinc.com)

#### 4.2.1 Construcción de Una Guía de Ondas.

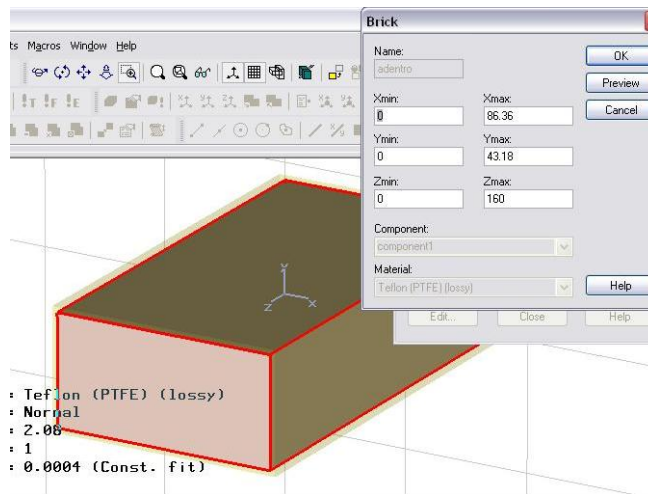
- Para empezar a construir la guía de onda rectangular se selecciona en la barra de herramientas el icono “*Brick*”, como se ve en la Figura 33.
- Hacer doble click en el plano del dibujo para seleccionar un punto de partida para la Figura, enseguida se realiza un segundo punto en la esquina opuesta y se extiende a lo largo para formar una figura semejante a un ladrillo. (Ver Figura 34)
- Terminado el paso anterior se despliega una caja de diálogos mostrando las dimensiones en el eje de coordenadas, se aprovecha esta caja de diálogos para corregir las dimensiones, escoger el tipo de material ya sea vacío (*vacuum*), PEC, cargar otro material existente en la librería o crear un nuevo material y agregar las características de dicho material. Se debe tener en cuenta que el material del interior de la guía es el vacío (*vacuum*).

**Figura 33.** Activación de Objetos Básicos



**Fuente:** [SOL08] Solano F. Diseño y Simulación de Guías de Onda Para el Calentamiento de Materiales Con Microondas. Universidad Industrial de Santander. División de Ciencias Físico Mecánicas. Departamento de Electricidad y Electrónica. Tesis de Grado. 2008.

**Figura 34.** Aplicación de Dimensiones del Material dentro de la guía.

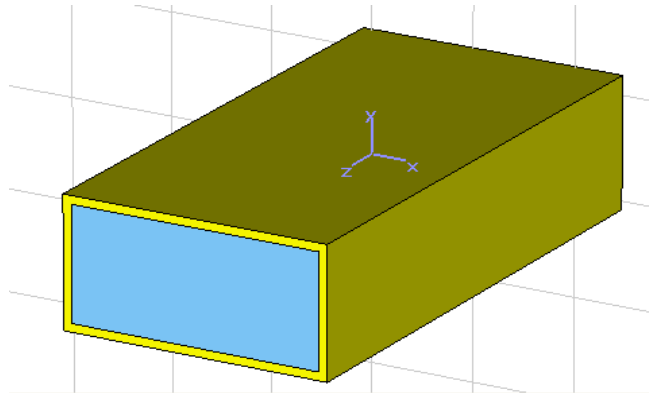


**Fuente:** Autores del Proyecto.

- Luego, se construye, con los mismos pasos anteriores, un material más grande, donde se puede utilizar el mismo valor en la coordenada Z y aumentando las coordenadas X e Y, para cumplir con los requisitos de las

dimensiones de la guía de onda WR340, de tal forma que se vea como en la Figura 35.

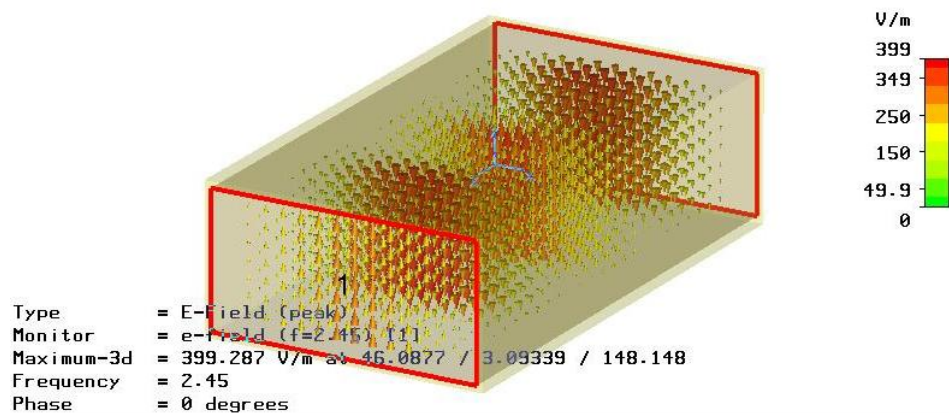
**Figura 35.** Guía de onda finalizada.



**Fuente:** Autores del Proyecto

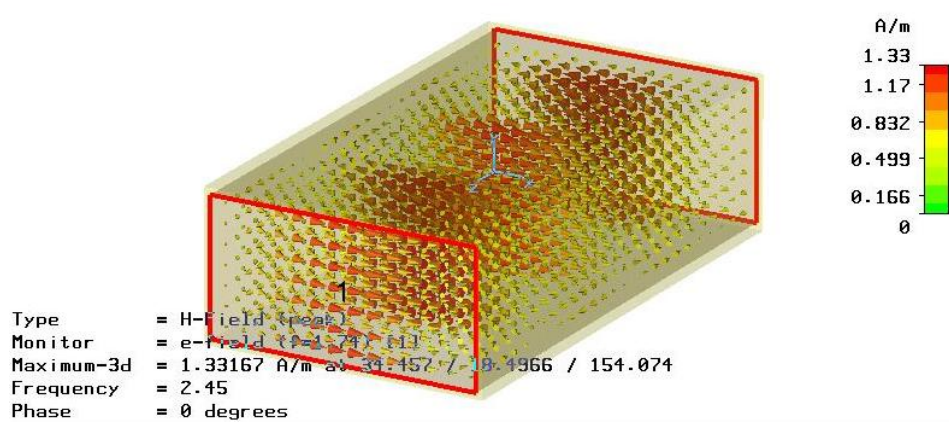
En las figuras 36 y 37, se puede observar y constatar lo descrito en la sección de guías de onda, además se aprecia claramente la diferencia de propagación del campo eléctrico con el campo magnético, donde es posible comparar en esta simulación los valores del campo eléctrico, el cual alcanza un máximo de 399.28 V/m y el campo magnético un máximo de 1.33A/m haciéndolo despreciable con respecto al primero del modo  $TE_{10}$ .

**Figura 36.** Propagación del Campo Eléctrico del Modo  $TE_{10}$ .



**Fuente:** Autores del Proyecto.

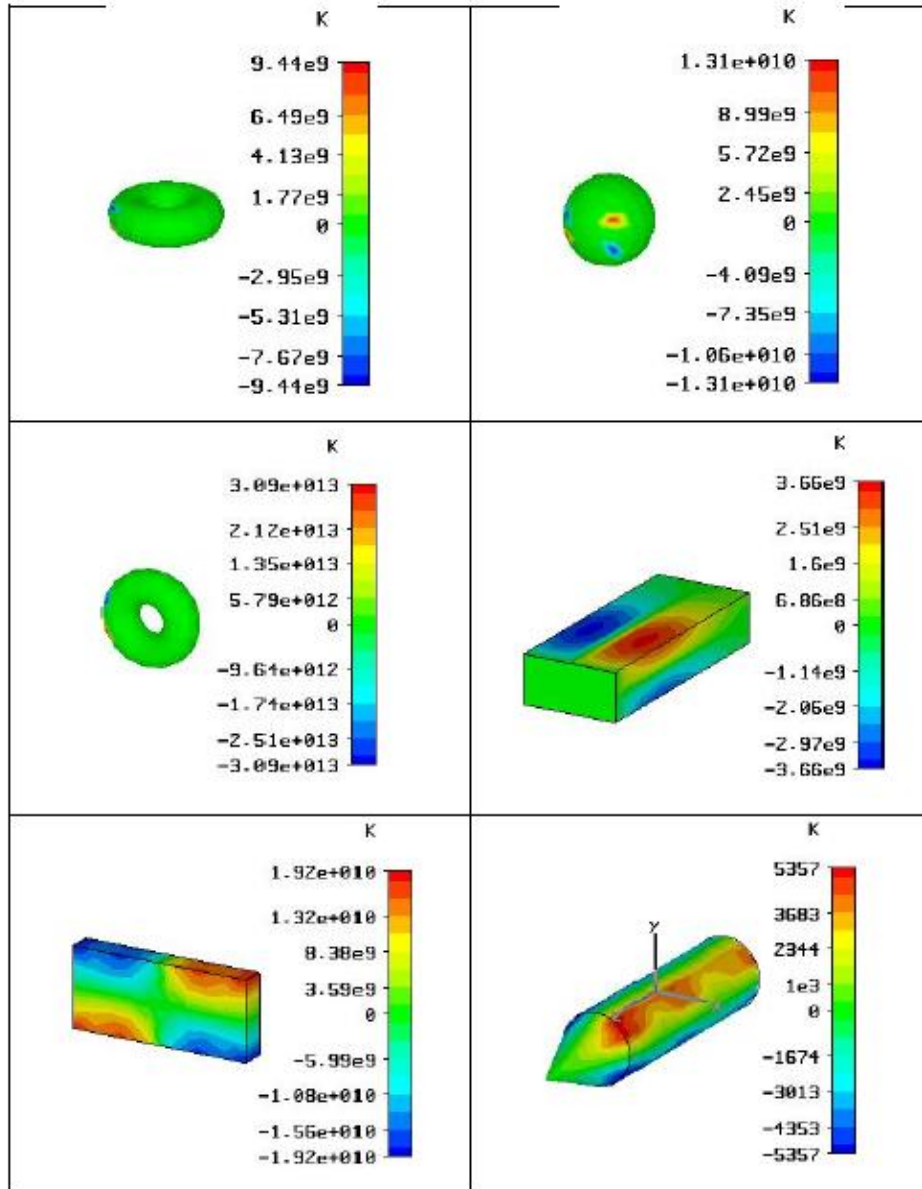
**Figura 37.** Propagación del Campo Magnético



**Fuente:** Autores del Proyecto.

Si se enfoca la simulación al análisis del calentamiento de materiales dentro de una guía de onda, es de mucha utilidad conocer el comportamiento de la muestra dentro del aplicador. En otras palabras, observar que sucede en materiales con distintas formas y figuras, así como su comportamiento cuando son expuestos a campos de microondas. En la figura 38 se muestra el resultado de aplicar un campo de microondas a muestras con distintos modelos geométricos. Se puede observar y concluir que la mejor distribución de la temperatura se da en materiales con geometrías ovaladas o circulares. Lo anterior debido a que en geometrías de bloque se presenta sobrecalentamientos en los bordes y las esquinas. Esta conclusión es muy importante en este proyecto, puesto que ayuda a mejorar las distintas propuestas presentadas. Se sugiere entonces utilizar un material lo mas circular u ovalado posible para poder extraer el mayor provecho al sistema de calentamiento por microondas

**Figura 38.** Diferentes Modelos Geométricos Con su Respectiva Distribución de Temperatura



**Fuente:** [SOL08] Solano F. Diseño y Simulación de Guías de Onda Para el Calentamiento de Materiales Con Microondas. Universidad Industrial de Santander. División de Ciencias Físico Mecánicas. Departamento de Electricidad y Electrónica. Tesis de Grado. 2008.

**4.2.2 Material Dentro de la Guía de Ondas.** Para simular un material dentro de la guía, se puede agregar las características del material deseado, o bien escoger uno que se encuentran en la librería del programa, como ejemplo ilustrativo, se decide escoger el teflón, que ya se encuentra en la librería. Se calcula para la guía y el material enclaustrado las pérdidas y el factor Q. En la Tabla 7, se puede observar que el valor numérico de las pérdidas es bajo y el factor de calidad alto. Este resultado era esperado y sirve para constatar la coherencia de los parámetros seleccionados.

**Tabla 7.** Cálculo del Factor Q y Pérdidas

| Material                       | Conductividad ( $\epsilon_R$ ) | Permeabilidad ( $\mu$ ) | Pérdidas/W(pico) | Factor de calidad |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|------------------|-------------------|
| Material dentro de la guía     | 5.8000e+007                    | 1.0000e+000             | 6.3718e-005      | 2.4329e+005       |
| Material de la guía: Aluminio  | 3.7200e+007                    | 1.0000e+000             | 1.0221e-003      | 1.5167e+004       |
| Suma de pérdidas superficiales |                                |                         | 1.0858e-003      | 1.4277e+004       |
| Volumen de pérdidas            |                                |                         | 6.1786e-003      | 2.5090e+003       |
| Suma total de pérdidas         |                                |                         | 7.2644e-003      | 2.1340e+003       |

**Fuente:** Autores del Proyecto.

## CONCLUSIONES

- Se diseñó una metodología experimental donde se describen los pasos que se deben seguir al implementar las microondas para procesar materiales a nivel de laboratorio y planta piloto; se explicaron cada una de las etapas con el fin de crear una guía para los futuros usuarios de esta tecnología, cumpliéndose así con los objetivos planteados en la propuesta de investigación.
- El calentamiento con microondas es una tecnología desconocida actualmente en Colombia, esta permite en una forma más rápida y eficiente, procesar materiales. Se describen los detalles del proceso y las características fundamentales que se deben tener en cuenta al momento de diseñarlo, además, de explicar de forma general cuales son los componentes del equipo básico necesario para iniciar un proceso piloto a nivel de laboratorio.
- Para seleccionar un proceso de fabricación es necesario tener claros unos criterios previos, con los cuales se evalúa si es justificable el desarrollo de esta aplicación, se enunciaron y explicaron en detalle para que fuesen evaluados, dando como resultado una implementación satisfactoria.
- En Colombia no se han desarrollado empresas que se dediquen a la comercialización de este tipo de equipos, por lo que se buscó despertar el interés en esta tecnología, para fabricar y procesar materiales.
- Se presentaron cuatro propuestas de sistemas para fabricar materiales usando las microondas como fuente de energía, dando a conocer sus ventajas y desventajas, para que el usuario escoja la que más se adapte a sus necesidades.

- Se escogió el ácido sulfúrico como el material a fabricar usando el calentamiento vía microondas. Se tomó una de las propuestas presentadas y se adecuó para que fuese el modelo a seguir en el momento de diseñar el sistema.
- Se efectuó la cotización de los equipos presentados, con el fin de fomentar el interés en su adquisición e implementación en la universidad.
- Se realizó el P&I, correspondiente a uno de los equipos propuestos, para lograr presentar una mejor descripción de sus componentes, sus interconexiones y un registro de la instrumentación sobre el proceso planteado.
- Se resaltó la importancia de la participación de los ingenieros electrónicos en el desarrollo de este tipo de procesamiento, ya que ellos cuentan con el conocimiento necesario para diseñar, controlar y realizar el mantenimiento del equipo con el que se trabajará.
- La capacidad para modelar las interacciones electromagnéticas es un elemento muy importante para el proceso de diseño de sistemas y de desarrollo con microondas. La comprensión de la variación de las propiedades dieléctricas con la temperatura es crucial para la simulación y modelado de procesos. La simulación puede utilizarse para optimizar el sistema generador o aplicador del diseño, puesto que proporciona diferentes métodos para analizar gran variedad de comportamientos de un material dentro de una guía de onda, lo que es muy beneficioso debido a que dichas pruebas no representan costo alguno, esto se logra de una manera muy sencilla cambiando las especificaciones deseadas en el software CST STUDIO SUITE™ y comprobando que los resultados sean coherentes.

## RECOMENDACIONES

- Al reconocer el ácido sulfúrico como un compuesto de suma importancia para el desarrollo del país se propone su fabricación utilizando el calentamiento con microondas, aprovechando sus características que le permiten ser un candidato viable para este tipo de proceso.
- Cuando se requiera analizar un material para evaluar la aplicabilidad de esta técnica de calentamiento, se deben definir las condiciones para las cuales las microondas ofrezcan un calentamiento uniforme; estas pueden ser desarrolladas utilizando herramientas de modelado numérico, y requieren una caracterización completa del producto incluyendo sus características dieléctricas.
- Conformar un grupo de trabajo que incluya miembros de diferentes disciplinas, esto con el fin de buscar una interacción adecuada entre Investigadores, Ingenieros Metalúrgicos, Químicos e Ingenieros Electrónicos, ya que el éxito de la operación radica en el desarrollo de una metodología que combine los conocimientos de los especialistas involucrados.
- Es necesario que el material que se va a calentar en la guía de ondas ocupe el mayor espacio posible en el interior de esta, con el fin de desarrollar una alta interacción con la energía electromagnética, además procurar que la geometría del material sea circular u ovalada para evitar el sobrecalentamiento que ocurre en los bordes, inconveniente que se presenta con geometrías de bloque.

## BIBLIOGRAFÍA

- [IND09] Industrial Symposium II Microwave Processing of Materials. Memories. Singapore. 2009.
- [SEM08] Sematron. Acopladores Direccionales. Departamento Comercial. España. 2008.
- [SOL08] Solano F. Diseño y Simulación de Guías de Onda Para el Calentamiento de Materiales con Microondas. Universidad Industrial de Santander. División de Ciencias Físico Mecánicas. Departamento de Electricidad y Electrónica. Tesis de Grado. 2008.
- [CHE08] Agrawal D, Cheng J, Peng H, Hurt L, Cherian K. Microwave Energy Applied to Processing of High-Temperature Materials. 2008.
- [DIN08] Dinesh KA. Microwave Processing of Various Materials And Its Advantage: An Overview. The Pennsylvania State University. USA. 2008.
- [YUS08] Ku HS, Yusaf T. Processing of Composites Using Variable And Fixed Frequency Microwave Facilities. University of Southern Queensland. Vol. 5. Australia. 2008. p. 185-205.
- [ALP07] Alpuente J, Sánchez R, López PL. Propagación de Ondas. Grupo de Electromagnetismo. Departamento Teoría de la Señal y Comunicaciones. 2007.
- [MAZ07] Mazo P, Galeano L, Restrepo G, Ríos L. Esterificación de los Ácidos Grasos Libres (FFA) del Aceite Crudo de Palma. Calentamiento Convencional Vs Microondas. 2007.
- [EPM06] EPM. Electromagnetic Field Processing of Materials at Microwave Frequency (2.45 GHz). The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials. Senday Japan. 2006.

- [MIT06] Mitsudo S, Hoshizuki H, Idehara T, Saito T. Development of Material Processing System by Using a 300 GHz CW Gyrotron. Research Center for Development of Far Infrared Region. University of Fukui. Japan / Journal of Physics: Conference Series 51. 2006.
- [CLA05] Clark DE, Folz DC. Microwave Solutions for Ceramic Engineers. 2005.
- [KUB05] Special Focus: Microwaves Heating / Advancements in Microwave Heating Technology. Ed. Kubel. January, 2005.
- [GER04] Gerling JF. Equipment Safety For Microwave And Radio Frequency Processing. Gerling Applied Engineering, Inc. USA. 2004.
- [SUH03] Suhm J, Möller M, Linn H. New Development for Industrial Microwave Heating. International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing Hannover. March 24-26, 2003.
- [HAY01] Hayt WH, Buck JA. Engineering Electromagnetics. 4<sup>a</sup> ed. McGraw Hill. 2001.
- [AGU00] Aguilar J, Rodríguez J. Producción de Carburo de Silicio Utilizando Microondas Como Fuente de Energía. XXII Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales. Instituto Tecnológico de Saltillo. Noviembre, 2000, p. 338-345.
- [BRA98] Bradshaw SM, Van Wyk EJ, De Swardt JB. Microwave Heating Principles And the Application to the Regeneration of Granular Activated Carbon. Institute of Mining and Metallurgy. South African. 1998.
- [ALI97] Ali IA, Al-Amri, AMS. Potential Applications of Microwave Heating in Industries. Sudan Engineering Society Journal. Vol. 44. N° 35. 1997.
- [MET96] Metaxas AC. Foundations of Electroheat: A Unified Approach. Ed. John Wiley And Sons. 1996.

[AST95] Astigarra Julio. Hornos de Alta Frecuencia y Microondas: Teoría, Calculo y Aplicaciones. McGraw Hill.1995.

[ANE94] An Emerging Industrial Technology. Microwave Processing of Materials Committee on Microwave Processing of Materials. Commission on Engineering and Technical Systems. 1994. <http://www.nap.edu/catalog/2266.html>

[MET93] Metaxas AC, Meredith R. Industrial Microwave Heating. IEE. 1983. Reprinted 1993.

[RAM84] Vargas RP. Acopladores Direccionales. Lima. 1984.

[JONXX] Jonhs AT, Warne DF. Engineering's Handbook of Industrial Microwave Heating.

[SANXX] Costantine S. Guía 3: Guía de Ondas. Universidad Metropolitana.

[RAY53] Raymond Riegel Emil. Chemical Process Machinery 2ª Ed. Reinhold Publishing Corporation. 1953.

[3W1] <http://www.webwire.com/ViewPressRel.asp?ald=58548>

[3W2] [http://yaqui.mx.l.uabc.mx/~dhernan/especial/ing\\_mic.html#queson](http://yaqui.mx.l.uabc.mx/~dhernan/especial/ing_mic.html#queson)

[3W3] <http://www.wa1mba.org/wavegd.htm>

[3W4][http://www.unicrom.com/topic.asp?cat\\_id=11&FORUM\\_ID=31&TOPIC\\_ID=1446&T](http://www.unicrom.com/topic.asp?cat_id=11&FORUM_ID=31&TOPIC_ID=1446&T)

[3w5] <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>


# ANEXOS


**ANEXO A.**


**DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO  
EN LA SIMULACIÓN**

## DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO EN LA SIMULACIÓN


El software utilizado en este proyecto es **CST STUDIO SUITE™**, éste se ha consolidado durante varios años como la mejor herramienta a la hora de realizar diseños electromagnéticos, convirtiéndose en una solución práctica, rápida y confiable en simulaciones electromagnéticas de alta y bajas frecuencias. Está constituido por los siguientes módulos:

**CST MICROWAVE STUDIO®**  (CST MWS), es una herramienta especializada para las simulaciones electromagnéticas en 3D de componentes de alta frecuencia, las aplicaciones típicas incluyen RF y microondas, comunicación móvil, diseño inalámbrico, antenas, entre otros.

**CST DESIGN STUDIO™**  (CST MWS), acelera el análisis y optimización de estructuras complejas. Esto es porque permite la ruptura de los sistemas complejos en componentes más pequeños, donde se analiza el comportamiento del sistema completo en muy corto tiempo.

**CST EM STUDIO®**  (CST EMS), está dedicado a la simulación de dispositivos estáticos y de baja frecuencia. Ofrece una gran variedad de soluciones para abordar la electrostática, magnetostática, flujo de la corriente, e incluso problemas de temperatura estacionaria.

Las aplicaciones incluyen: actuadores, frenos, generadores, motores, sensores, instrumentos de medición de transformadores.

**CST PARTICLE STUDIO®**  (CCT PS), es una herramienta especializada para el análisis rápido y preciso del movimiento de partículas libres cargadas en 3D de los campos electromagnéticos.

Además de los módulos antes descritos el software **CST STUDIO SUITE™**, proporciona un alto rango de soluciones para aplicaciones de ancho de banda en simulaciones electromagnéticas de 3D como: HF dominio en el tiempo, HF dominio de la frecuencia, eigenmode, reducción de orden por módulos, análisis en modulo electromagnético, magnetostática, flujo de corriente y temperatura fija.

## **REQUISITOS DE INSTALACIÓN**

### **REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE**

- El Software corre bajo Windows 2000 o Windows XP

### **REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE HARDWARE**

- Intel Pentium.
- Tarjeta gráfica OpenGL compatible.
- Unidad de DVD.
- 256 MB de RAM.
- 5 GB de espacio en el disco.

**ANEXO B.**

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS  
EQUIPOS**

## Precision 3-Stub Tuner

GERLING

Model GA1001  
Model GA1002  
Model GA1003

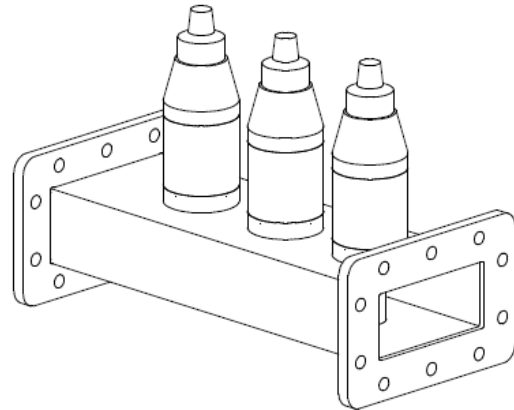
GAE's family of Precision 3-Stub Tuners are designed for load impedance matching in high power microwave heating systems. Their simple yet rugged design makes these tuners ideal for a variety of laboratory, production and OEM applications.

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.

### General Specifications:

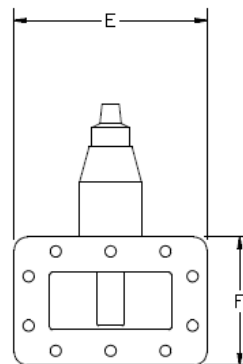
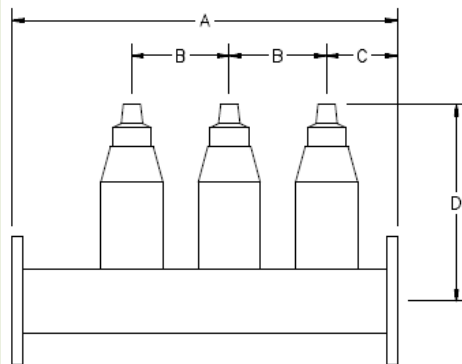
|                    |   |
|--------------------|---|
| Waveguide          | WR284 (GA1001)<br>WR340 (GA1002)<br>WR430 (GA1003)              |
| Flange             | UG1725/U (GA1001)<br>UG554/U (GA1002)<br>UG437B/U (GA1003)      |
| Frequency          | 2450 MHz +/- 50 MHz   |
| Power (continuous) | 3 kW (GA1001)<br>6 kW (GA1002)<br>10 kW (GA1003)                |
| Impedance Matching | 3 stubs with 1/4-wave chokes on<br>1/4 guide wavelength spacing |
| Construction       | Aluminum waveguide and stubs                                    |
| Finish             | Chemical conversion coating;<br>textured black paint            |



Model GA1001

### Options:

- ♦ Heli-Coils or studs on flanges (any combination)
- ♦ Round flanges with taper for quick-disconnect clamp (GA1001 or GA1002 waveguide only)
- ♦ Flange interlock switches
- ♦ Water cooling



| DIM | GA1001          | GA1002          | GA1003          |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|
| A   | 9.00<br>[228,6] | 9.00<br>[228,6] | 9.00<br>[228,6] |
| B   | 2.27<br>[57,7]  | 1.71<br>[43,4]  | 1.45<br>[36,8]  |
| C   | 1.66<br>[42,2]  | 2.37<br>[60,2]  | 2.68<br>[68,1]  |
| D   | 4.60<br>[116,8] | 5.14<br>[130,6] | 5.82<br>[147,8] |
| E   | 4.50<br>[114,3] | 5.44<br>[138,1] | 6.34<br>[161,0] |
| F   | 3.00<br>[76,2]  | 3.75<br>[95,3]  | 4.19<br>[106,4] |

GERLING  
GERLING APPLIED  
ENGINEERING, INC.

All dimensions are in inches [millimeters].

© 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

Updated 09AUG07

## 2-Port Isolator, WR340

GERLING

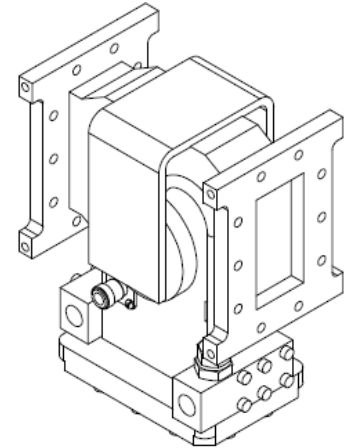
### Model GA1107

The model GA1107 2-port isolator is designed for high power industrial heating applications requiring high reliability and rugged construction. This isolator is most often used for protecting magnetrons from the damaging effects of reverse microwave power. It is designed for 6kW continuous forward microwave power and will withstand a full reflection indefinitely. Calibrated coupler ports are provided for monitoring forward power entering port 1 (model GA1107-1 only) and reverse power entering port 2 (both models).

Construction of the GA1107 is all brazed aluminum waveguide. Reverse power is absorbed directly into water through internal quartz tubes. All other water lines and fittings are copper or brass to minimize corrosion due to harsh cooling water supplies.

#### General Specifications:

|                     |  |
|---------------------|--|
| Frequency           | 2450 MHz nominal   |
| Input Power         | 6 kW continuous max. (fwd and rev)   |
| Waveguide           | WR340 (RG113/U)  |
| Flanges             | WR340 (UG554/U) with M6 tapped holes   |
| Input VSWR          | 1.2 max. (Port 1)  |
| Insertion Loss      | 0.15 dB max. (Port 1 to Port 2)  |
| Isolation           | 20 dB min. (Port 2 to Port 1)  |
| Coupler Probe       | Type N female  |
| Coupler Calibration | Forward: 60 +/- 1.0 dB (measured within +/- 0.2 dB)<br>Reflected: 50 +/- 1.0 dB (measured within +/- 0.2 dB)                       |
| Water Connections   | 3/8 ISO Tapered female threads   |
| Water Flow          | 0.5 gpm (1.9 lpm) min., 60 psig (414 kPa) max. inlet pressure, 10-40°C inlet temp (must be above dew point), 50°C max. outlet temp |
| Construction        | Dip brazed aluminum, brass water connections   |



#### Ordering Information:

GA1107: Reflected Power Probe Only

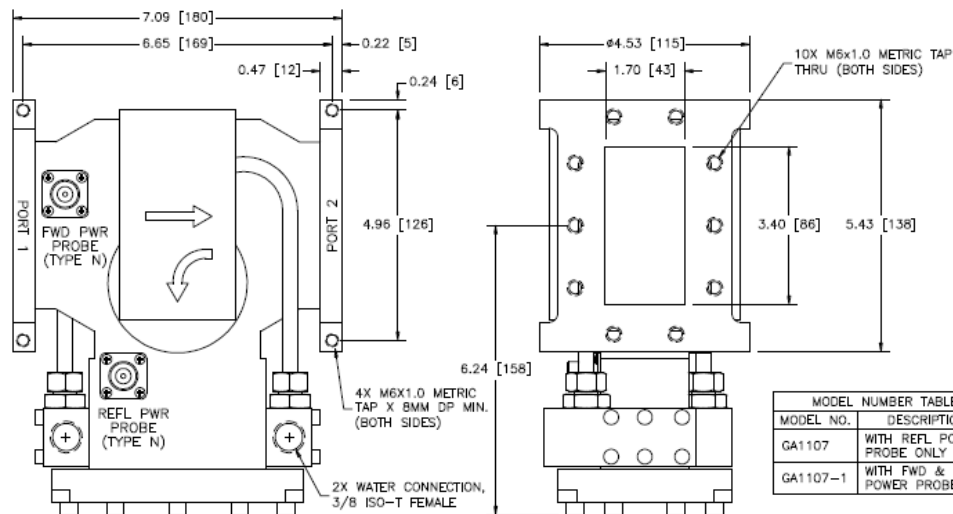
GA1107-1: Forward & Reflected Probes

#### Options:

- ♦ Flange interlock switch (either flange)
- ♦ Water connection fittings (various types available)

#### Accessories:

- ♦ GA3208 Analog Power Meter Set
- ♦ GA3301 Coupler Power Interface



| MODEL NUMBER TABLE |                              |
|--------------------|------------------------------|
| MODEL NO.          | DESCRIPTION                  |
| GA1107             | WITH REFL POWER PROBE ONLY   |
| GA1107-1           | WITH FWD & REFL POWER PROBES |

GERLING  
GERLING APPLIED  
ENGINEERING, INC.

All dimensions are in inches [millimeters].

© 2004-2008 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

Updated 16DEC08

## Precision Sliding Short Circuit

GERLING

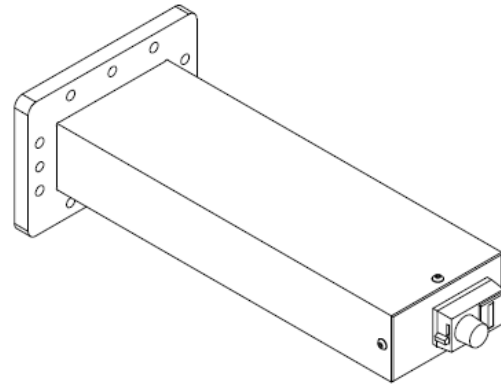
Model GA1206A  
Model GA1207A

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 continuously vary the location of the standing wave throughout a range of positions. 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.

### General Specifications:

|                     |   |
|---------------------|---|
| Frequency           | 2450 MHz nominal  |
| Power (continuous)  | 6 kW  |
| Waveguide           | GA1206A: WR340 (RG113/U)<br>GA1207A: WR430 (RG105/U)            |
| Input Flange        | GA1206A: UG554/U<br>GA1207A: UG437B/U                           |
| Plunger Travel      | GA1206A: 4.0 inches (10 cm)<br>GA1207A: 3.5 inches (8.9 cm)     |
| Position Indicator  | Multi-turn dial with digital readout                            |
| Readout Calibration | 0.008 inches (0.02 cm) movement per unit on the digital readout |
| Backlash            | 0.015 inches (0.04 cm) max.                                     |
| Return Loss         | 0.05 dB max @ 2450 MHz  |



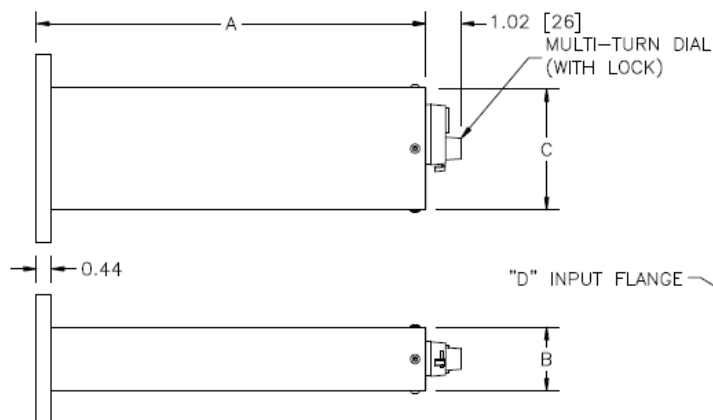
Model GA1206A

### Options:

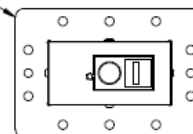
- ♦ Heli-Coils or studs on flanges (any combination)
- ♦ Round flange with taper for quick-disconnect clamp on WR340
- ♦ Flange interlock switches

### Accessories:

- ♦ Flange Hardware Kit, Model GA8409 (please see GA8409 specification for selection)



|           | GA1206A          | GA1207A           |
|-----------|------------------|-------------------|
| WAVEGUIDE | WR340            | WR430             |
| A         | 11.25<br>[286]   | 10.00<br>[254]    |
| B         | 1.86<br>[47.2]   | 2.31<br>[58.7]    |
| C         | 3.56<br>[90.4]   | 4.46<br>[113]     |
| D         | UG554/U<br>(CPR) | UG437A/U<br>(CPR) |



GERLING APPLIED  
ENGINEERING, INC.

© 2005-2008 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

## Microwave Leakage Detector, 2.45 GHz

GERLING

### Model GA3202

The GAE model GA3202 Microwave Leakage detector is the Holaday model HI-1501 Survey Meter manufactured by ETS-Lindgren. Long established as the industry standard, this meter is designed for commercial and industrial use by manufacturers and end-users of microwave heating equipment. Its robust design also provides accuracy and portability for field service technicians, regulatory agencies and public health officials, and it can withstand exposure to excessively high power density.

Microwave leakage is measured by an array of carrier diodes that detect electromagnetic fields of any polarization in a plane perpendicular to the axis of the probe. This results in a broad measuring area around the probe which simplifies inspection around cavity doors, waveguide connections and other possible sources of microwave leakage. A styrofoam cone mounted to the probe provides a 5 cm spacing between the diode array and cone tip. Operator conveniences include three detection ranges, two selectable meter response times, battery test and probe test. Operates on two 9-Volt batteries. Includes a foam-fitted carrying case and user manual.

#### General Specifications:

|                    |  |
|--------------------|--|
| Frequency          | 2450 MHz   |
| Operating Range    | 0-2, 0-10, 0-100 mW/cm <sup>2</sup>                            |
| Accuracy           | +/- 1 dB (0-2, 0-10 ranges)                                    |
| Response Time:     | Fast Mode: 1 second<br>Slow Mode: 2.5 seconds (90% of impulse) |
| Power Density      | 2 W/cm <sup>2</sup> maximum                                    |
| Dimensions         | 8.9 W x 15.3 H x 6.4 D cm (3.5" x 6" x 2.5")                   |
| Probe Length       | 30 cm (12 inches)  |
| Probe Cable Length | 1.2 m (4 feet)   |



GERLING  
GERLING APPLIED  
ENGINEERING, INC.

All dimensions are in inches [millimeters].

© 2005 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 22MAR05

## Analog Power Meter Set

GERLING

### Model GA3208 Model GA3209

GAE offers analog meter sets that provide a convenient and cost-effective means for monitoring microwave power in conjunction with a separate waveguide coupler. Model GA3208 is a single meter set for monitoring either forward or reverse power while model GA3209 is a dual meter set for monitoring power in both directions. Each set includes an attractive meter case suitable for bench-top use and a crystal diode detector and BNC cable for each meter.

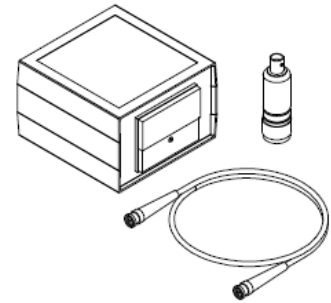
These sets are ideal for use with the customer's existing waveguide coupler or other waveguide component having a power coupling port. Each channel is factory-calibrated for a coupling factor of 60 dB (by default) or other suitable value as specified by the customer. When ordered together with a GAE waveguide coupler component, the meter set is factory-calibrated with that component.

#### Specifications:

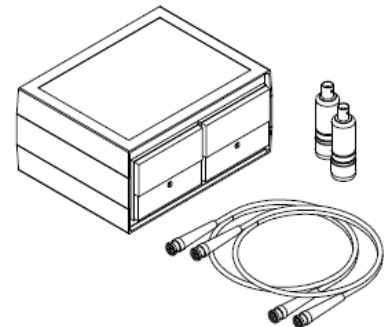
|                 |  |
|-----------------|--|
| Frequency       | 2450 MHz +/- 50 MHz  |
| Input Power     | 100 mW peak maximum  |
| Input Waveform  | Calibrated for low ripple (<5% RMS)                            |
| Coupling Factor | Calibrated for 60 dB +/- 0.2 dB                                |
| Accuracy        | +/- 5% of full scale @ 25°C                                    |
| Meter Scale     | 700W, 1.2 kW, 1.8 kW, 2 kW, 3 kW, 6 kW,<br>10 kW, 15 kW, 30 kW |
| Detector        | Crystal diode, Type N male input, BNC female output            |
| Cable           | RG-58/U, BNC male connectors, 6' long                          |

#### Options:

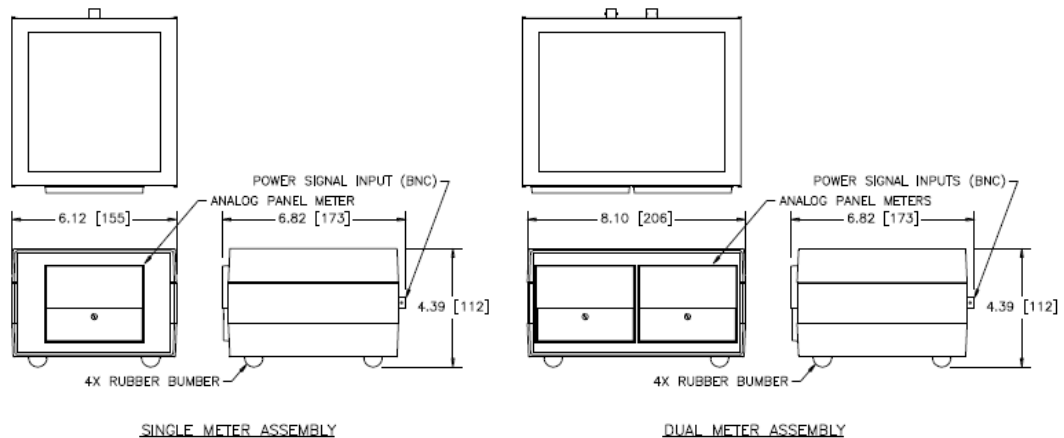
- Alternate meter scales
- Alternate coupling factor calibration
- Alternate waveform calibration (medium or high ripple)
- SMA male input connector on detector



MODEL GA3208



MODEL GA3209



GERLING  
GERLING APPLIED  
ENGINEERING, INC.

All dimensions are in inches [millimeters].

© 2008-2009 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

Updated 22OCT09

## 1.2kW Microwave Generator, 2.45 GHz

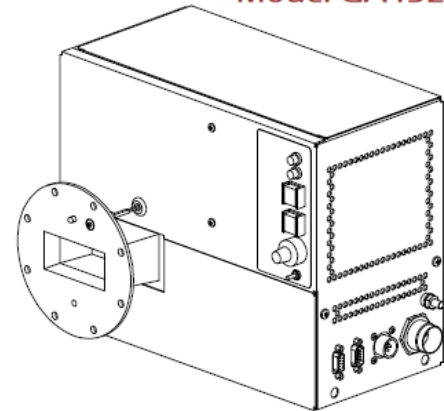
GERLING

Model GA4308  
Model GA4310  
Model GA4327

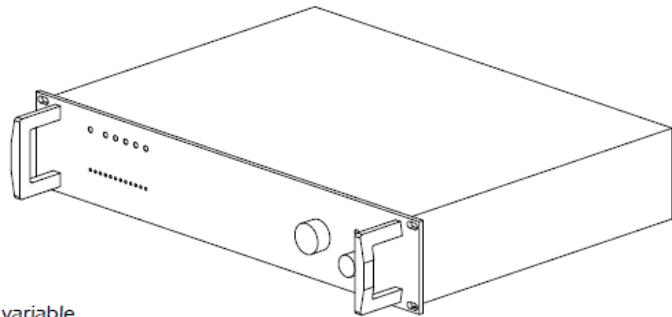
Models GA4308, GA4310 and GA4327 are complete 1.2kW microwave generator systems designed for use in laboratory research and process development applications. Consisting of a rack mounted power supply (model GA4104A) and remote magnetron head (models GA4001A, GA4015 or GA4024), this user-friendly system is easily installed and operated with a minimal amount of set-up. Local controls provide complete functionality safely and conveniently near the work area as well as remotely via fully functional analog and digital (serial) remote control interfaces. Included with the system is a complete set of interconnect cabling between the two modules for safe and convenient setup and operation.

Serviceability of the magnetron heads was a primary consideration in their design. Removal and replacement of the internal magnetron can be done in minutes using standard tools. Both are designed to use the Panasonic 2M137 magnetron which is available from multiple distributors. Model GA4001A also features the popular WR284 Q-D (quick-disconnect) waveguide flange that uses a convenient quick-release clamp (GAE model GA8410) for waveguide connections.

The GA4104A power supply combines state-of-the-art inverter technology with microprocessor controls to provide high performance in a compact and light weight package. An embedded microprocessor allows multi-functional user programmability.



Model GA4001A Magnetron Head



Model GA4104A Power Supply

### General Specifications:

|                    |  |
|--------------------|--|
| Output Power (max) | 1.2kW  |
| Output Power Range | 10-100%, continuously variable                                     |
| Output Ripple      | <4% of full power  |
| Regulation         | <1% for +/- 10% line voltage variation                             |
| Magnetron          | Water-cooled Panasonic 2M137                                       |
| Output Waveguide   | GA4308 and GA4327: WR284<br>GA4310: WR340                          |
| Output Flange      | GA4308: UG584/U w/Q-D taper<br>GA4310: UG554/U<br>GA4327: UG1725/U |
| Frequency          | 2450 MHz +/- 30 MHz  |
| Cooling            | Internal fans  |
| Input Power        | 180-265 VAC, 50/60 Hz, 1-phase, 12 Amps (@ 230 VAC)                |
| Remote Controls    | Analog   |
| Interlocks         | Waveguide flange; Access cover;<br>Magnetron over-temp             |

|                  |   |
|------------------|---|
| Weight (approx.) | Mag Head: 20 lb (9 kg)<br>Power Supply: 26 lb (12 kg) |
|------------------|---|

### Options:

- ◆ Arc detector
- ◆ Alternate flange and mounting styles
- ◆ Captive flange fasteners
- ◆ Custom cable set

### Accessories:

- ◆ Flange Hardware Kit, Model GA8409 (please see GA8409 specification for selection)
- ◆ Flange Clamp, Quick-Release, Model GA8410



GERLING APPLIED  
ENGINEERING, INC.

© 2006-2008 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 01JUL08

## Universal Waveguide Applicator, WR340

GERLING

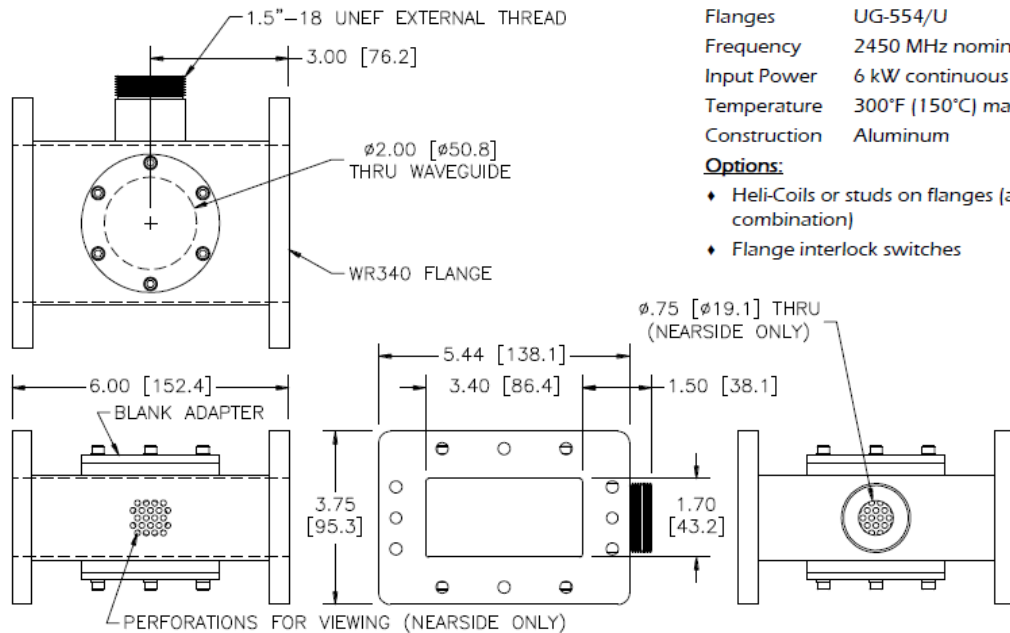
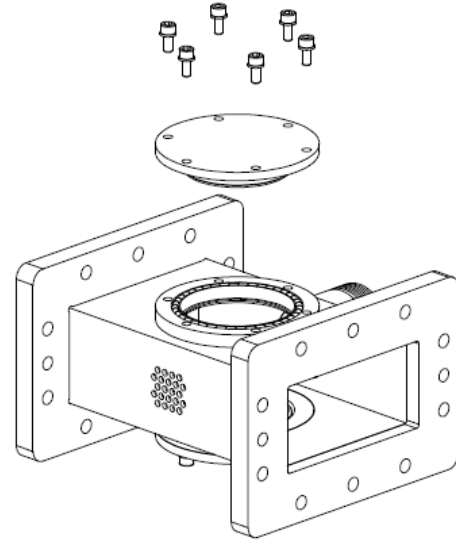
### Model GA6004A

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 TE<sub>10</sub> 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 GA1202) for traveling wave heating applications or a Sliding Short Circuit (model GA1206) for resonant chamber heating. Depending on the application, typical configurations might also include directional couplers for power measurement (model GA3106 or GA3108) and tuners for impedance matching (model GA1002).

The model GA6004 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.



#### General Specifications:

|              |                      |
|--------------|----------------------|
| Waveguide    | WR340                |
| Flanges      | UG-554/U             |
| Frequency    | 2450 MHz nominal     |
| Input Power  | 6 kW continuous max. |
| Temperature  | 300°F (150°C) max.   |
| Construction | Aluminum             |

#### Options:

- ◆ Heli-Coils or studs on flanges (any combination)
- ◆ Flange interlock switches

GERLING  
GERLING APPLIED  
ENGINEERING, INC.

© 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

All dimensions are in inches [millimeters].

Updated 16MAY08

# Test Tube Adapter for Universal Waveguide Applicator (UWA)

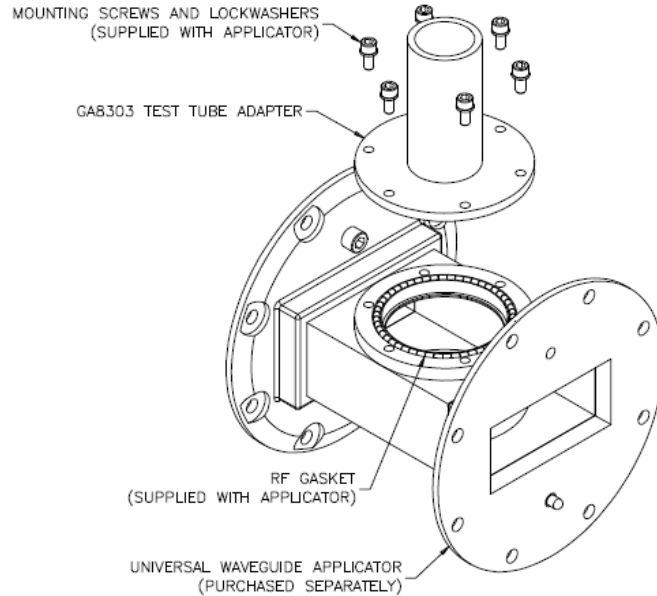
**GERLING**

## Model GA8303

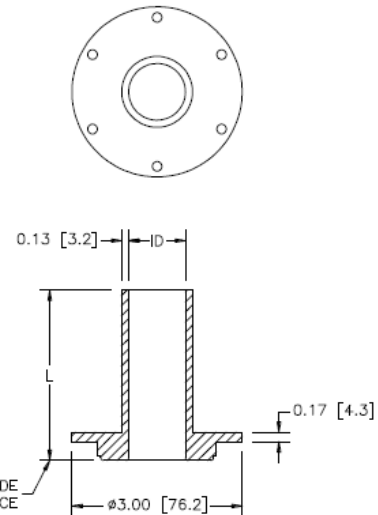
The model GA8303 Test Tube Adapter is designed for use with the Universal Waveguide Applicator (UWA) manufactured by GAE. It provides a convenience means to support a standard size test tube for purposes of heating a contained substance inside the applicator.

The basic concept of the GA8303 design is that of a "cut-off" tube. As microwave energy propagates from the waveguide into the empty cylindrical body of the adapter, the energy is attenuated at a sufficient rate such that energy exiting the end is below the maximum level allowed for safe human exposure. Inserting a standard (thin wall) test tube has minimal effect on the attenuation rate. However, the user is cautioned that test tubes filled with a dielectric material can increase or decrease the attenuation rate depending on the dielectric properties. **UNDER NO CIRCUMSTANCES SHOULD A METALLIC SUBSTANCE BE PLACED INSIDE THE ADAPTER BODY.**

The GA8303 can also be used for other purposes. For example, continuously flowing fluids can be heated by passing a tube through two GA8303 adapters installed opposite each other on a dual sided UWA. Similarly, plasmas can be formed within a quartz or sapphire tube inserted through opposing GA8303 adapters. Contact GAE for more information about special uses of the GA8303 and other adapters available for use with the UWA.



| CONFIGURATION TABLE |             |            |
|---------------------|-------------|------------|
| SIZE                | ID          | L          |
| 6 MM                | .250 [6.4]  | 1.25 [32]  |
| 8 MM                | .328 [8.3]  | 1.30 [33]  |
| 10 MM               | .406 [10.3] | 1.38 [35]  |
| 12 MM               | .484 [12.3] | 1.50 [38]  |
| 13 MM               | .531 [13.5] | 1.75 [44]  |
| 15 MM               | .609 [15.5] | 2.00 [51]  |
| 16 MM               | .641 [16.3] | 2.25 [57]  |
| 18 MM               | .719 [18.3] | 2.75 [70]  |
| 20 MM               | .797 [20.3] | 3.25 [83]  |
| 22 MM               | .875 [22.3] | 3.75 [95]  |
| 25 MM               | 1.00 [25.4] | 4.25 [108] |
| 36 MM               | 1.44 [36.5] | 6.00 [152] |



### Specifications:

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Frequency             | 2.45 GHz +/- 50 MHz                         |
| Waveguide Power       | 10 kW maximum                               |
| Construction Material | 6061-T6 Aluminum                            |
| Finish                | Clear chemical conversion coating (Alodine) |
| Compatible UWA Models | GA6001 thru GA6004                          |

**GERLING** GERLING APPLIED ENGINEERING, INC.

© 2005 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

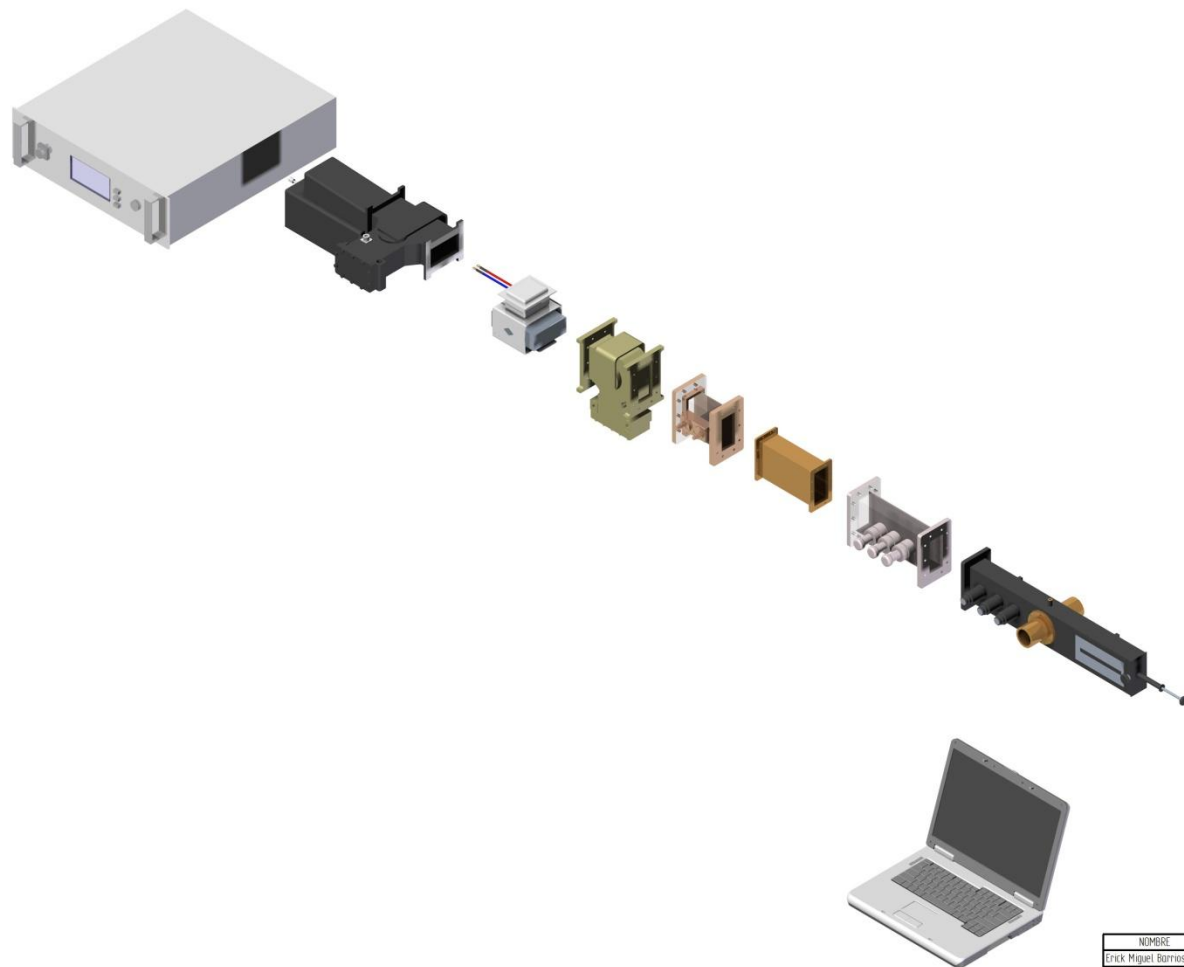
All dimensions are in inches [millimeters].

Updated 29MAR05

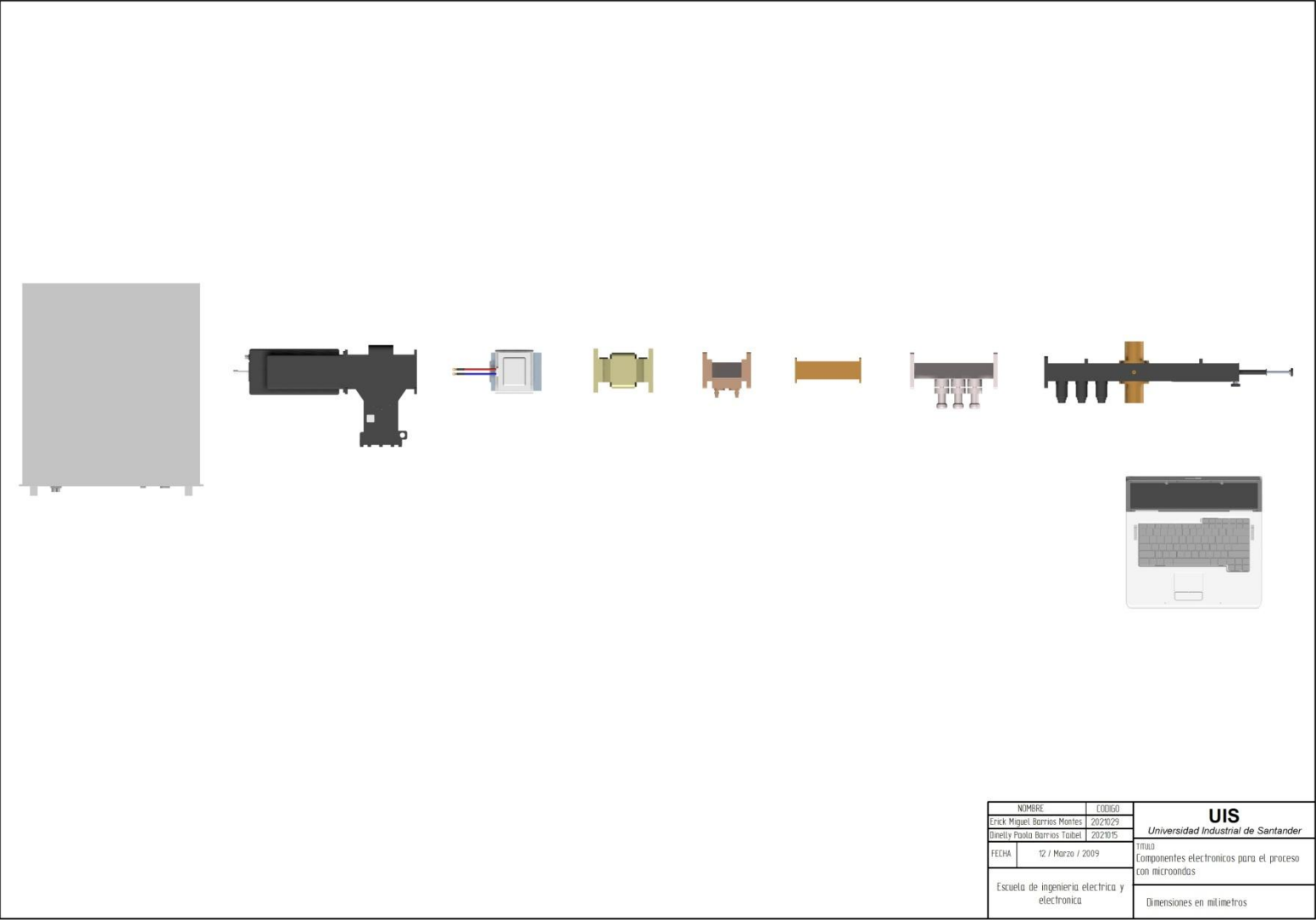
**ANEXO C.**

**PLANOS:**

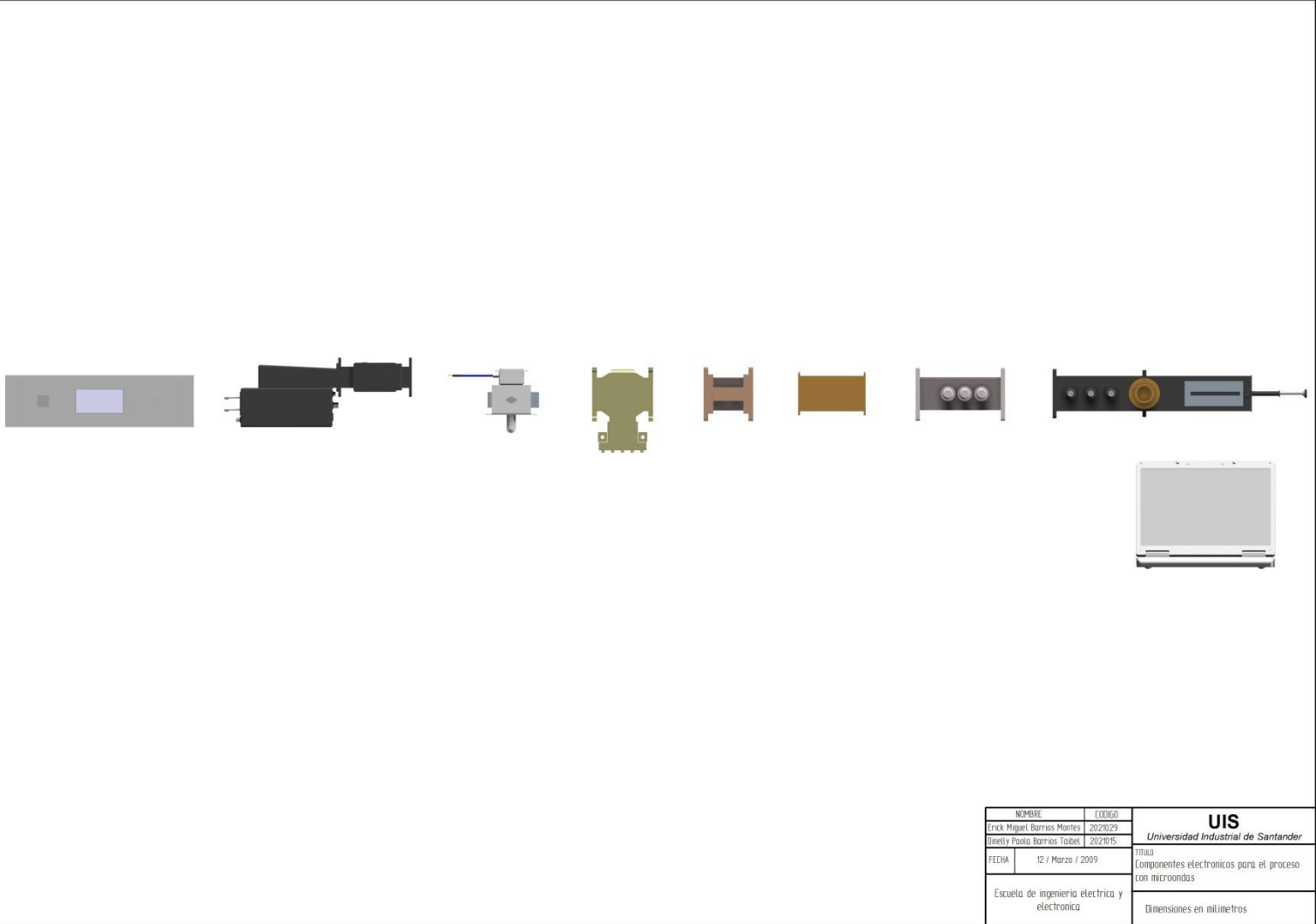
**COMPONENTES ELECTRÓNICOS PARA EL  
PROCESO CON MICROONDAS**



| NOMBRE  | CODIGO            | UIS<br>Universidad Industrial de Santander              |
|---|-------------------|---|
| Erick Miguel Barras Montes                    | 2021029           |   |
| Direlly Paola Barras Tabat                    | 2021016           | TITULO  |
| FECHA   | 12 / Marzo / 2009 | Componentes electronicos para el proceso con microondas |
| Escuela de ingenieria electrica y electronica |                   | Dimensiones en milimetros                               |



| NOMBRE  |                   | CODIGO                    | UIS<br><i>Universidad Industrial de Santander</i>       |
|---|-------------------|---------------------------|---|
| Erick Miguel Barrios Montes                   |                   | 2022029                   |   |
| Danelly Paola Barrios Tobal                   |                   | 2022015                   |   |
| FECHA   | 12 / Marzo / 2009 | TITULO                    | Componentes electronicos para el proceso con microondas |
| Escuela de ingenieria electrica y electronica |                   | Dimensiones en milimetros |   |



|  |                    |  |
|--|--------------------|--|
| NOMBRE   | (CODIGO)           | <b>UIS</b><br><i>Universidad Industrial de Santander</i>             |
| Erick Miguel Barrrios Montes<br>Dieeth Paola Barrrios Tabuel | 2021029<br>2021015 |  |
| FECHA  | 12 / Marzo / 2009  | TITULO<br>Componentes electronicos para el proceso<br>con microondas |
| Escuela de ingenieria electrica y<br>electronica             |                    | Dimensiones en milimetros  |