

Estado del arte en la aplicación de la energía de microondas para el secado de poliéster grado botella (PET)

Cosme Zamorano - Romero¹, Joaquín Palacios - Alquisira²

²Departamento de Fisicoquímica, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

¹Departamento de Formación Básica, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México.

Resumen

Este artículo hace una revisión del estado del arte en el uso de la Energía de Microondas como medio de calentamiento en el proceso de secado de poliéster grado botella (PET). El principal enfoque en el desarrollo de nuevas tecnologías de manufactura y procesamiento de materiales es la reducción en los costos en consumo de energía y los tiempos de proceso. El uso de microondas en comparación con el proceso convencional de secado ofrece ventajas económicas en términos de ahorro de energía y tiempos de proceso. El presente trabajo se enfoca principalmente en la revisión de desarrollos globales en el campo del secado de materiales plásticos y sus relevantes aplicaciones industriales.

Abstract

This paper presents an overview of microwave heating as one method of thermal processing for polymers drying, as an example with take polyethylene terephthalate (PET). The main focused is centered on developing new processing and manufacturing technologies to reduce production or manufacturing costs and times. In comparison to the conventional processes, microwave drying offers economical advantages in terms of power and time savings. The present review work focuses mainly on global developments in the field of microwave drying of plastics and their relevant industrial applications.

Palabras clave: Aplicación, microondas, secado, poliéster (PET).

Keywords: Application, microwave, drying, polyester (PET).

Introducción

Las microondas son una forma de energía electromagnética que causa movimiento molecular por rotación de dipolos; pero no causa cambio en la estructura molecular. Las microondas ocupan una parte del espectro electromagnético, y se caracterizan por estar situadas en el intervalo de longitud de onda entre 1 mm hasta 1 m, y un intervalo de frecuencia entre 300 MHz y 300 GHz (figura 1). Son usadas normalmente para procesos industriales entre 915 MHz y 2450 Mhz.

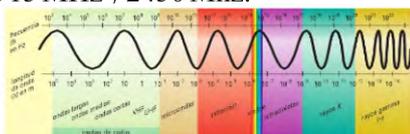


Figura 1. Espectro de ondas electromagnéticas.

Las microondas son generadas por un equipo conocido con el nombre comercial de magnetrón. El magnetrón es un tubo de vacío que sirve de oscilador, constituido por dos electrodos: un cátodo cilíndrico central rodeado por un ánodo también circular; su funcionamiento de basa en que los electrones sometidos a un campo eléctrico y magnético describen órbitas circulares y esa circulación genera oscilaciones de alta frecuencia en cavidades metálicas. Para comprender el funcionamiento se puede considerar lo que ocurre cuando se sopla un silbato. Dentro del silbato hay un pequeño objeto duro que está suelto en la cavidad y al soplar se mueve de un lado a otro, choca con las paredes, y así genera ondas sonoras de muchas frecuencias. Sin embargo, debido a la resonancia, solamente aquellas ondas que tienen longitudes de onda comparables con las de la cavidad sobreviven, mientras que las otras se amortiguan. El resultado es que se oyen sonidos de ciertas frecuencias que quedan determinadas por las dimensiones de la cavidad. Así, un silbato con una cavidad grande emite ondas de longitud de onda grande, o sea de frecuencia pequeña, y se oyen sonidos graves. Un silbato pequeño produce longitudes de onda pequeñas que corresponden a frecuencias grandes, así se oye un sonido agudo. El magnetrón es un pequeño bloque de cobre, pero dentro del ánodo tiene cavidades de dimensiones muy precisas. Al aplicar una corriente eléctrica entre el cátodo y el ánodo, y además un campo magnético a lo largo del eje del magnetrón, los electrones se mueven dentro del espacio de interacción. Estos electrones rebotan por el campo magnético y por tanto se aceleran. En consecuencia, emiten ondas electromagnéticas de muchas frecuencias. Sin embargo, debido a que estas ondas entran en las cavidades, por resonancia solamente perduran las que tienen longitudes de onda comparables con las dimensiones de las cavidades, mientras que las otras desaparecen. Las cavidades tienen dimensiones de centímetros, por lo que producen ondas con longitudes de onda del orden de los centímetros, o sea microondas, que corresponden a frecuencias muy altas. De forma simplificada el funcionamiento del magnetrón se muestra en la figura 2 (Astigarraga, 1998).

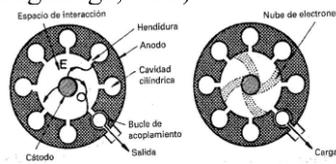


Figura 2. Esquema de funcionamiento de un magnetrón de cavidades.

Las microondas generadas en el magnetrón son transportadas al lugar de aplicación, donde se encuentra el material que las recibirá, por medio de una guía de ondas. La guía de ondas es un tubo, normalmente rectangular, aunque también puede ser de sección circular, utilizado para el transporte de la energía electromagnética, terminando en el aplicador, en la figura 3 se observa un aplicador de tipo túnel.

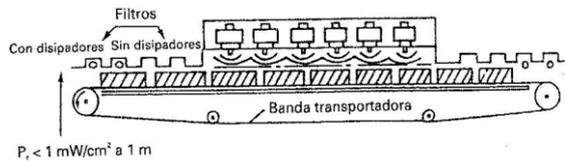


Figura 3. Aplicador de microondas tipo túnel.

En general, los materiales se clasifican en tres grupos: los materiales que no absorben las microondas, que son materiales transparentes a las microondas; los materiales conductores, opacos, que reflejan las microondas; y los que absorben las microondas, dieléctricos, los cuales convierten esta radiación en calor como se muestra en la siguiente figura (figura 4).

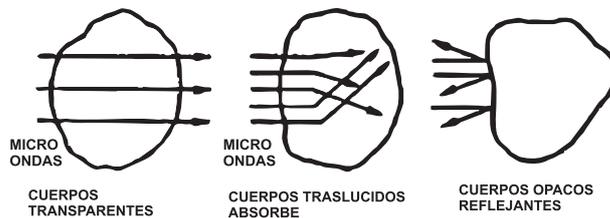


Figura 4. Tipos de materiales de acuerdo con el comportamiento respecto a las microondas.

El secado por microondas involucra la interacción dipolar, que se produce en presencia de moléculas polares. La rotación dipolar es una interacción que induce a las moléculas polares a alinearse con el campo eléctrico rápidamente cambiante de las microondas. El movimiento rotacional de las moléculas al intentar orientarse con el campo produce fricciones y colisiones responsables del calentamiento. La habilidad para acoplarse por este mecanismo está relacionada con la polaridad de las moléculas y su habilidad para alinearse con el campo eléctrico. Este mecanismo necesita que el acoplamiento entre las componentes del material irradiado y el campo eléctrico de las microondas sea efectivo.

El calentamiento efectivo de materiales usando microondas depende principalmente de las propiedades que causan la absorción de microondas, la permitividad, la constante dieléctrica y el factor de pérdida.

La permitividad es el término que se utiliza para describir a las propiedades dieléctricas que afectan la reflexión de ondas electromagnéticas en interfaces y la atenuación de la energía de la onda dentro del material. La permitividad compleja relativa (ϵ^*), relacionada al vacío se representa por:

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

donde ϵ' es la constante dieléctrica y ϵ'' el factor de pérdida, representan la parte real e imaginaria, respectivamente, de la permitividad.

La constante dieléctrica (ϵ') es la característica que determina la capacidad del material para absorber, transmitir o reflejar energía de una porción del campo eléctrico; es decir lo fácil o difícil que resulta polarizar un material, es constante para cada material a una frecuencia determinada, bajo condiciones constantes. El factor de pérdida (ϵ'') mide la cantidad de energía que pierde el campo eléctrico, está relacionado con la forma en que la energía del campo es absorbida y convertida a calor en un material cuando pasa a través de éste. Un material con bajo ϵ'' absorberá poca energía y por lo tanto, se calentará poco debido a su transparencia a la energía electromagnética.

Otro parámetro que puede ser calculado es la pérdida tangencial, más comúnmente denominada factor de disipación, y que se obtiene del cociente entre el factor de pérdida (pérdida dieléctrica) y la constante dieléctrica.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2)$$

Siendo δ , el Factor de disipación.

Al irradiar con microondas una molécula, ésta va a sufrir un proceso de rotación tratando de alinearse con el campo aplicado, ya que la frecuencia de radiación microonda es parecida a la frecuencia de rotación de la molécula. De ese modo, a una determinada frecuencia y temperatura, la energía electromagnética se convierte en energía calorífica. Esta relación está dada por el factor de disipación.

La transferencia directa de energía elimina pérdidas de calor por el calentamiento del equipo de proceso, sistemas de intercambio de calor y disipación de energía con los alrededores. El fenómeno de calentamiento es diferente para el método convencional comparado con el que usa microondas. El método convencional inicia con el calentamiento de la superficie del material y después se transfiere el calor hacia el interior por conducción y convección (figura 5); el calentamiento por microondas es un calentamiento volumétrico, donde el calor es generado prácticamente en todo el volumen del material, esto debido a la interacción entre las microondas y las moléculas que absorben la energía de microondas y la convierte en calor. Esta es la característica de este calentamiento que da ventajas sobre el método convencional como: reducción en el consumo de energía y tiempos cortos de proceso.

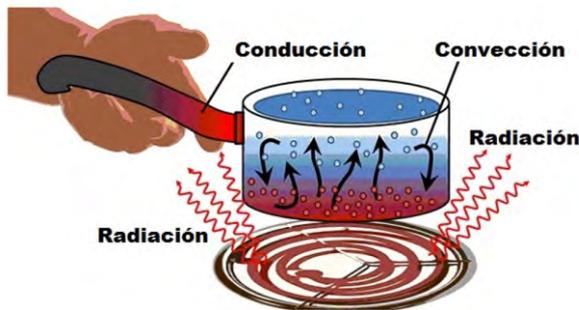


Figura 5. Ejemplos de las formas de transmisión de calor.

Este artículo reporta las ventajas y aplicaciones de las microondas en la tecnología de secado de materiales plásticos, incluyendo los últimos desarrollos en este campo.

Los materiales dieléctricos convierten la energía de las microondas en calor de acuerdo con la siguiente ecuación, considerando que es mínima la conducción de calor en el material y la pérdida de calor al medio que lo rodea, la energía absorbida por un dieléctrico colocado en un campo eléctrico uniforme será:

$$P_a = 55.6 \times 10^{-8} f E^2 \epsilon'' \quad (3)$$

Donde (P_a) es la potencia absorbida por el dieléctrico en W/m^3 , (f) es la frecuencia en Hz, (ϵ'') el factor de pérdida y (E) es la intensidad del campo eléctrico en V/m. La intensidad del campo eléctrico para un horno de microondas con una potencia de 800W a 2450 MHz es de 17.53 V/m, (Kumar, 1979).

Si queremos determinar la cantidad de energía de microondas que absorbe un Kilogramo de agua, tendremos:

$$Pa = \frac{55.6 \times 10^{-8} E^2 f \epsilon''}{\rho} \quad (4)$$

Frecuencia (f) = 2450 000 000 Hz

Intensidad del campo eléctrico (E) = 17.53 V/m

Factor de pérdida, entre 20°C y 30°C (ϵ'') = 12.5

Densidad del material en g/m^3 (ρ) = 1 000 Kg/m^3

tendremos:

$$Pa = \frac{55.6 \times 10^{-8} (17.53)(17.53)(2450000000)(12.5)}{1000} = 5230 \text{ W/Kg}$$

La temperatura del material se incrementará con una rapidez de:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Pa}{\rho Cp} \quad (5)$$

Donde (ρ) es la densidad del material en Kg/m^3 , (Cp) es el calor específico del material en $J/Kg^\circ C$, (dT) es el incremento de temperatura en $^\circ C$, (dt) es la duración del tratamiento en s.

Para determinar el tiempo para elevar la temperatura del PET húmedo hasta una temperatura determinada, se puede utilizar la fórmula (Kumar, 1982):

$$t_1 = (1/kk_2)\{(T_1 - T_2) + (k_1/k_2) \text{Ln}((k_1 - k_2 T_1)/(k_1 - T_2 k_2))\} \quad (6)$$

Donde (k , k_1 y k_2) son las constantes para el agua de la parte imaginaria de la permitividad, (T_1) es la temperatura de referencia [$^\circ C$] y (T_2) es la temperatura final [$^\circ C$].

Por ejemplo, si queremos determinar el tiempo para elevar la temperatura 25°C hasta 70°C, con $k=0.5$, $k_1=85$, $k_2=0.3260$, $T_1=25^\circ C$ y $T_2=70^\circ C$:

$$t_1 = (1/(0.5)(0.3260))\{(25 - 70) + (85/0.3260) \text{Ln}((85 - (0.3260)(25))/(85 - (70)(0.3260)))\}$$

$$t_1 = 62.73 \text{ s}$$

Uso de microondas en el secado de materiales.

El secado es un proceso térmico que busca reducir el contenido de humedad de los materiales, y es un proceso de gran consumo de energía y tiempo en la industria de procesamiento de polímeros.

Los parámetros generales considerados para el diseño de equipos industriales utilizados para el secado del PET son:

La temperatura utilizada en el secador.

El tiempo óptimo para obtener un material seco.

El consumo de energía eléctrica aprovechada para obtener materiales poliméricos secos.

Las operaciones de secado pueden clasificarse en operación por lotes o continuas (Treybal, 2003). La operación por lotes es aquella donde una cierta cantidad de material que se va a secar se carga en el equipo y permanece en él hasta que se seca, se expone a una corriente de aire que fluye continuamente, en la cual se evapora la humedad. En la operación continua, tanto el material que se va a secar, como el gas pasan continuamente a través del equipo en estado estacionario.

La forma en que el material se mueve dentro del equipo de secado define el nombre genérico del tipo de secador; a decir, si el material tiene una caída libre dentro del secador, es un secador por gravedad; si el cuerpo del secador gira, dejando caer el material una vez que llega a la parte superior de la pared interna hacia la pared inferior, es un secador rotatorio; si el material logra suspenderse y moverse libremente impulsado por un flujo ascendente de aire que pasa a través de un lecho de partículas; es un secador de lecho fluidizado; si el material se coloca sobre placas perforadas por donde una corriente de aire caliente pasa en forma ascendente, es un secador de charolas o bandejas; el material también puede moverse dentro del secador por medio de una banda transportadora. En la tabla 1 se muestra una clasificación del tipo de equipo que se utiliza para el secado de acuerdo con el tipo de secador y por la naturaleza del proceso de secado que se realiza (Nonhebel, G. y Moss, A.A.H., 1971),

Tabla 1. Clasificación de secadores.

Tipo de secador	Continuo	Batch
Bandejas	√	√
Por gravedad	√	
Lecho fluido	√	√
Banda	√	
Tambor	√	
Rotatorio	√	√
Pulverizador	√	√

Consecuentemente, nuevos métodos son dirigidos para reducir el tiempo y consumo de energía. El mecanismo de secado con energía de microondas es diferente al mecanismo de secado de forma convencional. En el secado convencional, la humedad es inicialmente retirada de la superficie y el

agua en el interior del material se difunde lentamente a la superficie. Mientras que en el secado por microondas, el calor es generado directamente en el interior del material, creando una mayor y mejor transferencia de calor. En el sistema que usa microondas, la transferencia de masa es debido al gradiente de presión generado por la rápida producción de vapor dentro del material; la mayor parte de la humedad se vaporiza antes de salir del material, lo anterior lo podemos observar en la siguiente figura (figura 6).

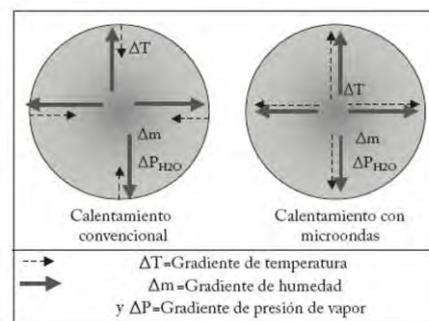


Figura 6. Diferentes gradientes que se presentan durante el secado de un material por calentamiento convencional y por calentamiento con microondas.

Consumo de energía en el secado de PET.

El PET utilizado para la inyección y soplado de botellas debe cumplir con las características mostradas en la tabla 2 (Jabarin, 1996).

El trabajo de Nakagomi (1988) reporta que el PET puede ser secado por medio de microondas a los niveles de 0.003% de humedad, que es el requerido para el procesamiento en máquinas de inyección, en un tiempo de una hora y media; en comparación con el tiempo de 4 a 6 horas de secado por el método convencional. La investigación realizada por Anjos (1994) sugiere el calentamiento híbrido microondas - aire, concluye que el tiempo de secado de PET para alcanzar un nivel de 0.004% de humedad se alcanza en un tiempo entre 30 a 60 minutos.

Tabla 2. Características del PET para inyección.

Propiedad	Unidades	Valor
Viscosidad intrínseca	dL/g	0.800
Densidad aparente	Kg/m ³	850
Coefficiente de expansión térmica	X10 ⁻⁴ K ⁻¹	6.8
Compresibilidad térmica	X 10 ⁻⁵ bar ⁻¹	7.7
Peso molecular	g/mol	49000 - 59000
Temperatura de transición vítrea	K	342
	KJ/KgK	0.4393
Conductividad térmica	W/Mk	0.15
Temperatura de fusión	K	613.2
Entalpia de fusión	J/mol	23 430
Índice de refracción		1.5045

Energía de activación	KJ/mol	63
Constantes dieléctricas		
ϵ'	$\times 10^7$ Hz	2.4
ϵ''_{eff}	$\times 10^7$ Hz	0.036
Difusividad	m^2/h	0.00089
C_p	J/kg $^{\circ}$ C	1 758
Humedad	%w	0.004 máx.
% Cristalinidad	%	65

Revisión del secado de plásticos usando microondas.

Esta sección se enfoca en la revisión de trabajos realizados desde los inicios del uso de microondas en el secado de plásticos. Algunos trabajos presentan mejoras detalladas en la tecnología del uso de microondas en aplicaciones industriales para el secado de PET.

Tooby [1966] plantea el uso de un secador continuo que comprende una serie de etapas, cada una cuenta con un magnetrón. El material es transportado por una banda a través de las etapas de irradiación de microondas para ser secado en sucesión; es decir, la primera etapa es de una mayor potencia y va disminuyendo conforme el material se acerca a la salida. No se muestra la forma en que se dosifica el material a la banda para que sea uniforme en ancho y espesor.

Forster [1969] muestra un equipo que remueve agua u otro solvente polar de polímeros sintéticos, pasando el material a través de dos secciones que suministran microondas. La primera, opera a una frecuencia de 915 MHz, reduce la humedad al 5% en peso; después, la segunda, opera a 2450 MHz, reduce la humedad al 0.001% en peso. La patente no muestra ejemplo de su utilización con PET, aún no se usaba este polímero en la elaboración de botellas empleadas como envases primarios de las bebidas carbonatadas.

White [1970] emplea un agitador del tipo persianas venecianas, en un equipo que utiliza microondas como medio de calentamiento, como un modificador del espacio geométrico del campo electromagnético para lograr una distribución uniforme de las microondas. La existencia de muchas partes móviles provoca una reducción en la eficiencia del equipo; así como, un alto costo de mantenimiento y consumo de energía.

Smith [1970] muestra un secador del tipo de lecho fluidizado que utiliza aire caliente y microondas,

donde el cuerpo del secador sirve como una guía de las microondas; la frecuencia utilizada es de 2450 MHz. El cuerpo del secador es dividido longitudinalmente en dos secciones por medio de una membrana porosa o permeable para que pueda pasar aire u otro gas a través de ella; el material de fabricación debe ser inerte al material a secar, tener un factor de pérdida dieléctrica bajo para las microondas y preferiblemente transparente, que puede ser de Nylon, cerámica porosa o fibra de vidrio. Para mantener el material en fluidización, el secador cuenta con entradas de aire deshumidificado caliente en la parte inferior y sale por ductos colocados en la parte superior del secador. No cuenta con un dosificador o una válvula que regule el gasto del material a secar; pues el control del gasto se lleva a cabo por medio de la inclinación de la membrana.

Forster [1970] mejora un secador de materiales no polares, esencialmente polímeros, removiendo vehículos polares del material. Dentro de la cavidad resonante, en lugar de usar una banda transportadora, el polímero húmedo es transportado sobre una malla vibradora fabricada de acero inoxidable recubierta por una tela permeable a las microondas. Las microondas son radiadas a contracorriente al flujo del material a secar. Para evitar condensación aire tibio es alimentado por la parte inferior del secador y sale por la parte superior. Nos se indica la calidad del aire para el arrastre de la humedad.

Futer [1971] cambia el uso de banda transportadora o lecho fluidizado por una placa perforada para el secado de materiales húmedos mediante el calentamiento por microondas. La placa se encuentra dentro de un compartimiento impermeable a las microondas y las perforaciones son ranuras formadas por pestañas que bajan con un ángulo de 5 a 18 $^{\circ}$; estas perforaciones provocan un efecto de chorro en el aire que se alimenta al secador por su parte inferior y pasa por los orificios a una velocidad de 500 a 2200 cm por segundo. Este chorro de aire mantiene separado al material lo suficiente para que reciba una cantidad de energía de microondas. No menciona la calidad del aire alimentado para el movimiento del material.

La invención de Muranaka [1973] es un aparato que sirve para calentar de forma continua polvos, gránulos u hojuelas, utilizando microondas como medio de calentamiento. Consta de una cámara

cilíndrica rotatoria, con interiores en forma de hélice que sirven para el movimiento de los gránulos a través de la cámara y para agitar las microondas. Este sistema de agitación de microondas tiene la ventaja de mantener un calentamiento continuo y uniforme, en comparación con los equipos que utilizan aire caliente como medio de calentamiento que presentan dificultades para mantener el flujo y la temperatura requeridos. La humedad desprendida durante el calentamiento, es retirada por medio de una corriente de aire seco caliente que entra y sale del equipo. De acuerdo con la experiencia en la operación de secadores rotatorios, este equipo puede utilizarse como un secador de pellets u hojuelas de PET, ya que cuenta con el sistema de extracción de la humedad desprendida durante el calentamiento; además, el movimiento provocado por las hélices interiores evita el aglomerado del material sin cristalizar, característico del PET cuando alcanza su temperatura de transición vítrea.

Forster [1973] propone el uso de la línea de transporte neumático, que lleva el material de una parte del proceso a otra, como cavidad resonante. La técnica usada es la aplicación de microondas en dos secciones, la primera trabaja a 915 MHz y reduce la humedad hasta un valor de 5% en peso; la segunda opera a 2 450 MHz para alcanzar un valor de 0.5 % en peso. El autor sugiere el uso de este equipo para polímeros no polares, como el poliestireno y el PET, con un factor de pérdida entre 0.0001 y 0.1 a la frecuencia de operación.

Janda [1974] presenta un aparato que sirve para secar plásticos que van a ser utilizados en moldeo por inyección; la humedad es removida usando microondas con una frecuencia de 2450 MHz y un vacío parcial de una décima parte de la presión atmosférica, deseable 20 pulgadas de agua. Usando este método es posible incrementar la temperatura de la humedad hasta 121°C sin causar problemas al plástico. No se presenta información sobre el secado de PET, ya que se inició en la fabricación de botellas en el año de 1976.

Janda [1977] hace mejoras al secado convencional de resinas moldeables, usando las microondas como medio de calentamiento y un flujo de aire caliente deshumidificado para arrastrar la humedad retirada del material, reduciendo el tiempo de secado en una décima parte del tiempo convencional y la

eliminación del sistema desecante. En la fecha de emisión de esta patente tenía un año de utilización el PET, en procesos tipo inyección y soplado, las condiciones de operación son para otras resinas moldeables.

Forster [1977] propone el uso de la línea de transporte neumático, que lleva el material de una parte del proceso a otra, como cavidad resonante. La técnica usada es la aplicación de microondas en dos secciones, la primera trabaja a 915 MHz y reduce la humedad hasta un valor de 5% en peso; la segunda opera a 2 450 MHz para alcanzar un valor de 0.5 % en peso. El autor sugiere el uso de este equipo para polímeros no polares, con un factor de pérdida entre 0.0001 y 0.1 a la frecuencia de operación en las instalaciones industriales.

Blok [1978] describe un sistema de secado continuo que utiliza microondas; incluye un secador rotatorio, dos magnetrones, un soplador centrífugo, un ciclón, sistema alimentador y de descarga. Las ondas de radio frecuencia se utilizan para calentar el cuerpo del secador y así eliminar el uso de otro medio de calentamiento. El material seco es descargado, por la succión que provoca el soplador, hacia el sistema de descarga. No se menciona la frecuencia de las microondas ni la forma en que se evita la fuga de energía hacia el exterior.

Tjurin [1980] explica el uso de un equipo que usa microondas para el secado de materiales dieléctricos. El material se mueve en un secador en forma de "U" invertida, impulsado por un flujo de aire que provoca una velocidad variable; las microondas circulan en forma paralela con el material, hasta donde se encuentra un separador de aire húmedo. No se muestran los detalles para evitar fuga de microondas, las que pueden afectar negativamente la salud de los operarios.

Le Viet [1980] provee un proceso y un aparato para secar material por medio de microondas, en el cual el producto a ser secado se coloca sobre una banda transportadora cuyo material es transparente a las microondas y recubierto con una capa de fibra de carbono incrustado en un material aislante; esta combinación produce un calentamiento de la banda que favorece el secado. Los magnetrones están colocados en la parte superior del secador y encerrados en un compartimiento con ventanas de

Teflón, permeable a las microondas e impermeable a la humedad. El secador está bajo vacío, excepto el compartimiento donde se localizan los magnetrones que trabaja a la temperatura ambiente y presión atmosférica.

Durant [1980] inventó un aparato que elimina la humedad de un material por medio de microondas, mientras está sujeto a una presión de vacío. El secador está a una presión por debajo de los 500mmHg; mientras el material se encuentra a baja presión, está sujeto a irradiación de microondas generadas por un magnetrón. El magnetrón se encuentra fuera del secador y las microondas son introducidas por medio de guías de onda que pasan a través de la pared del secador; el aplicador de las microondas está aislado de la sección de vacío por medio de un compartimiento impermeable a la humedad, pero permeable a las microondas. La humedad es retirada por medio de un condensador para facilitar su extracción utilizando una bomba.

Courneya [1982] propone un secador que utiliza microondas como medio de calentamiento. El secador trabaja a una presión inferior a la atmosférica, que se logra mediante una bomba de vacío. El material es transportado a través del secador por medio de un tornillo sinfín. El equipo cuenta con una corriente de aire que después de enfriar los magnetrones, sirve como medio de precalentamiento para el material cuando entra al secador. La humedad se retira del secador por medio de una corriente de aire que entra por un filtro en la parte opuesta a la tubería de succión de la bomba de vacío, haciéndola pasar a través del secador. No se especifica si el aire de arrastre de la humedad es sometido previamente a deshumidificación.

Mahan [1982] describe un equipo para calentar y secar material usando microondas. El equipo trabaja por lotes y consiste en un tambor, colocado de forma horizontal, que gira sobre su eje. Un sistema de circulación de aire sirve para enfriar el magnetrón y arrastrar la humedad retirada del sólido hacia el exterior. No se especifica si el aire que arrastra la humedad tiene un paso previo de deshumidificación.

Wear, Durant y Mckinney [1982] desarrollaron un aparato para secar material usando microondas. El proceso consiste en dirigir microondas de una región a presión atmosférica a una región al vacío donde se

encuentra el material a secar. El secador consiste en un recipiente cilíndrico, impermeable a las microondas, dentro del cual y de forma concéntrica se localiza una columna vertical que sirve como distribuidor de las microondas. En el espacio anular entre el cuerpo del secador y el distribuidor de microondas se encuentran dos columnas, fabricadas de material permeable a las microondas, por las cuales pasa el material a secar.

Soulier [1983] proporciona un equipo donde el material avanza continuamente con un gasto alto, constante y ajustable, mientras se mantiene un máximo campo de energía. El objetivo de esta invención es un bajo consumo de energía con una alta producción de material, lo que hace al equipo interesante y económico. El equipo consiste en una coraza y una parte movable en forma de hélice o tornillo de Arquímedes, que es movida por una flecha, y sirve para mover el material desde el conducto de entrada hasta la salida. Un conjunto de magnetrones que son colocados en la parte exterior de la coraza; la frecuencia utilizada es de 2.45 GHz y la potencia de cada magnetrón es de 1 kW. El equipo que consta de 10 módulos tiene una capacidad de una tonelada por hora. Se recomienda realizar pruebas para verificar la uniformidad del secado del material, así que el PET, pueda alcanzar los niveles requeridos para su procesamiento en extrusión o inyección (0.003%w).

De Vries [1984] declara un proceso para homogenización y secado de material húmedo usando microondas como medio de calentamiento. El secador es un recipiente cónico, dentro del cual se encuentra un tornillo sinfín que mezcla el material; el tornillo gira simultáneamente sobre su eje y alrededor del eje del secador. La humedad liberada es extraída por un sistema de vacío conectado al secador.

Inagaki [1984] propone un aparato para secar utilizando microondas. El material se transporta dentro del secador usando una banda perforada, a través de la cual, pasan las microondas que son irradiadas por magnetrones colocados en la parte superior e inferior del secador. Para retirar la humedad liberada durante el proceso, se introduce aire frío por la parte inferior del secador a través de deflectores que regulan la uniformidad del flujo y sale por la parte superior del secador. No se muestra

la forma de dosificación del material sobre la banda, ni la calidad del aire de arrastre de humedad.

Mahan [1985] propone un secador rotatorio, colocado dentro de un gabinete, que trabaja con microondas; el secador está montado sobre un eje axial y dentro del eje está colocado el magnetrón. Para evitar que el material toque al magnetrón, se coloca un domo fabricado de material transparente a las microondas. El equipo cuenta con un soplador que introduce aire al secador a través de la parte central del eje, este aire sirve para enfriar el magnetrón y a su vez arrastra la humedad retirada del polímero. El sistema trabaja por lotes, no se menciona la capacidad del secador.

Sugisawa, Matsumura, Taga y Hattori [1986] basan su invención en prevenir la formación de condensados en las paredes internas del secador, usando una capa de material poco dieléctrico (fibra de carbón) en al menos una parte de la superficie interna del secador. El sistema cuenta con una cámara de secado, un magnetrón externo con su guía de ondas; además una bomba de vacío y una trampa de condensados.

Tran [1986] llegó a la conclusión de que el uso de fases aleatorias en las microondas, mejoran la uniformidad del calentamiento del material; es decir, usar una combinación de frecuencias en cada una de las fuentes de microondas para producir una diferencia de frecuencias. Propone un compartimiento pentagonal con al menos una fuente de microondas en la parte central de cada lado del pentágono, un conducto para el material a secar de forma cilíndrica en el centro del pentágono; las esquinas del pentágono actúan como reflectores que guían las microondas a través del material de ida y vuelta, sin provocar daño a los magnetrones.

Sato [1987] efectúa mejoras al equipo que propuso De Vries [1984]. Para evitar fuga de microondas propone: (1) colocar una canastilla metálica alrededor del reductor del sistema de transmisión del tornillo agitador, (2) uso de un sello entre la canastilla y el reductor, (3) una canastilla metálica en el ducto de salida de vapores, (4) uso de un sello elástico entre la válvula de descarga y el secador, (5) colocar un sello tipo o-ring en el pasa hombre. Además, para evitar que todas las microondas reflejadas lleguen al magnetrón, propone que la guía

de ondas tenga una forma piramidal, con la abertura que se ensancha dirigida al material a secar. Este equipo debe utilizarse para PET ya cristalizado para evitar aglomerados.

Sugisawa, Matsumura, Taga y Hattori [1987] mejoran el proceso de secado al vacío que usa microondas para evitar el fenómeno de descarga luminosa. Para esto, el equipo está dividido en dos compartimientos: una región de aplicación de microondas y una región de secado; la primera, fabricada con un material permeable a las microondas e impermeable al solvente a retirar, cuenta con una bomba de vacío para el sistema de extracción; la segunda, fabricada con un material impermeable a las microondas, cuenta con un magnetrón (que trabaja a 2450 MHz) y una guía de ondas. La cámara de aplicación encierra a la cámara de secado, dejando un espacio anular entre ellas. No mencionan el tipo de material usado como plato de respiración a la salida de la cámara de secado que va hacia la trampa de humedad, sólo se menciona que es permeable a los gases e impermeable a las microondas.

Haagensen, Moses and Smith [1987] describen un aparato que incluye varias secciones para aplicación de microondas arregladas verticalmente una sobre otra. Cada sección consta de un magnetrón y una circulación de aire para eliminar la humedad removida. No menciona la calidad del aire que se utiliza para remover la humedad.

Wear and Mc Kinney [1987] inventaron un aparato para secar materiales sólidos utilizando microondas como medio de calentamiento y trabaja a una presión inferior a la presión atmosférica, que se logra por medio de una bomba de vacío. El equipo consta de un recipiente, dentro del cual una banda transportadora mueve el material para que pase a sucesivas zonas de irradiación de microondas. El material es distribuido en la banda en ancho y espesor uniformes. En la primera zona, por razones de mayor humedad en el material, mayor energía es suministrada al producto; la energía suministrada disminuye conforme avanza la banda transportadora. Cuenta con una purga de vapor para sacar del equipo la humedad retirada del sólido. La existencia de muchas partes móviles dentro del equipo eleva los costos de mantenimiento.

Nakagomi [1988] describe un aparato para el secado

de PET usando microondas con una frecuencia de 2450 MHz; el secador tiene un agitador interno para mantener el material en agitación y un sistema de purga para retirar la humedad. El magnetrón se encuentra fuera del cuerpo del secador y las microondas se transportan por un ducto que une al secador con el cuerpo del magnetrón. Recomienda que para reducir el consumo de energía se coloque en paralelo varios secadores pequeños, ya que el magnetrón usado para cada uno será de una capacidad menor al que se utilizaría para manejar grandes volúmenes de PET. Además, muestra una gráfica, del contenido de humedad contra tiempo, con los resultados obtenidos utilizando: microondas, agitación y gas inerte; se observa que se obtiene una humedad menor a 0.005%w en una hora y media de operación. El sistema es por lotes y se requiere de una batería de secadores para obtener volúmenes industriales.

Nakagome [1988] propone un secador de pellets usando microondas, que consiste de un recipiente cilíndrico con un agitador en la parte central que mantiene el material homogéneo durante la aplicación de microondas. El magnetrón está colocado en la parte exterior del secador y las microondas son introducidas por medio de una guía de ondas. El sistema trabaja por lotes; es decir, el magnetrón deja de trabajar cuando los pellets son descargados a la siguiente etapa del proceso. No existe un flujo de aire que impulse a la humedad que se retira de los pellets.

Nakagome [1988] mejora un secador de pellets usando microondas, que consiste de un recipiente cilíndrico con un agitador en la parte central que mantiene el material homogéneo durante la aplicación de microondas. El magnetrón está colocado en la parte exterior del secador y las microondas son introducidas por medio de una guía de ondas. La humedad es expulsada a través de un tubo de escape por medio de un flujo de aire que es introducido al secador por medio de un soplador; que además proporciona aire para enfriar el magnetrón. No existe un sistema de deshumidificación del flujo de aire que impulsa la humedad que se retira de los pellets.

Nakagome [1988] optimiza un secador de pellets usando microondas, que consiste de un recipiente cilíndrico con un agitador en la parte central que

mantiene el material homogéneo durante la aplicación de microondas. El magnetrón está colocado en la parte exterior del secador y las microondas son introducidas por medio de una guía de ondas. La humedad es expulsada a través de un tubo de escape por medio de un flujo de aire que es introducido al secador por medio de un soplador; este aire húmedo se envía a un deshumidificador que purifica el aire para ser retornado al secador y nuevamente retirar la humedad evaporada de los pellets. El sistema trabaja por lotes y el magnetrón se detiene durante el paso de vaciado del material.

Nakagome [1989] propone un secador de plásticos semicontinuo que cuenta con ocho secciones de secado, cada una con un magnetrón para suministrar microondas y un agitador para mantener homogéneo el material plástico. Las ocho secciones están conectadas a un silo que recibe el material seco. El material en el silo receptor es mantenido seco por medio del suministro de gas inerte, como el nitrógeno.

La invención de Ishikawa [1990] muestra una técnica que incluye un aparato para cristalizar y secar pellets de resinas sintéticas usando microondas en un proceso continuo. Consiste de un tanque de calentamiento en forma de un paralelepípedo rectangular con sección transversal tipo U, en la parte interior se mueve una flecha que tiene discos con paletas, estos discos forman separaciones en el material y lo agitan. En la parte superior del tanque se colocan los magnetrones provistos con guías de onda para irradiar el tanque de calentamiento. Una vez calentado el material a la temperatura de secado, se pasa al tanque de secado, para que los magnetrones tengan una operación constante sin interrumpir la aplicación de microondas. Este sistema elimina el calentamiento no uniforme causado por reflexiones irregulares de las microondas y por la variación del tiempo de residencia; además de, proporcionar un equipo económico que puede optimizar su operación y reducir el tiempo de secado. El autor muestra los resultados de tiempos de residencia en una gráfica de frecuencia, donde el tiempo de residencia promedio es de 20 minutos; adicionalmente, se aclara qué al incrementar el número de discos o separaciones, la forma de la campana de Gauss se adelgaza, disminuyendo la variación en los tiempos de residencia. Para eliminar la humedad se alimenta aire deshumidificado al tanque de calentamiento y al

tanque de secado. Puede presentarse un movimiento no uniforme a lo largo del tanque de calentamiento, debido a que los discos no tienen una forma helicoidal que garantice el avance del material de la zona de alimentación a la zona de descarga; lo anterior se podría mejorar con una flecha en forma de tornillo sinfín o helicoidal.

Doelling [1990] propone un sistema de lecho fluidizado por lotes asistido por microondas para secar materiales de diversos tipos. El sistema está compuesto por un recipiente donde se realiza la fluidización del material a secar; con una entrada para las microondas que se localiza sobre el nivel del sistema de soporte del lecho fluidizado, para definir una cavidad de resonancia de microondas que garantice la máxima utilización de la energía.

Nakagomi [1990] muestra un aparato que usa microondas como medio de calentamiento para secar PET. El aparato consiste de un tanque con agitación que mantiene el material en movimiento mientras es calentado y secado por microondas. El magnetrón está colocado fuera del tanque agitado y las microondas conducidas por un ducto. La humedad es retirada del tanque por medio aire seco que se introduce al tanque y es retirado por el ducto de purga que va a una bomba de vacío. El sistema es por lotes y no se indican las condiciones de operación.

Marzat [1991] describe un aparato que usa microondas para secar materiales en diversas formas y tipos. El material es transportado por una banda que lo expone a cada una de las etapas que irradian microondas; la aplicación de las microondas tiene una inclinación con respecto al plano de posición del material de acuerdo a la inclinación del ángulo de Brewster. No se menciona en la patente como se retira la humedad eliminada del material.

Nakagomi [1991] aporta un método para el secado de PET usando microondas, generadas por un magnetrón que trabaja a 2450 MHz, mientras el material se agita en un secador rotatorio. El magnetrón está colocado en la parte exterior del secador y las microondas son guiadas por el interior del eje axial que mueve al secador. El secador tiene un sistema de eliminación de la humedad que no permite la salida del material ni de las microondas. El sistema es por lotes y no se describe claramente el

equipo que se utiliza para la extracción de la humedad.

Oess [1993] cita un secador de tipo cónico, el cual utiliza como medio de calentamiento microondas generadas por un magnetrón colocado en la tapa del secador. El material se mantiene en movimiento por medio de un agitador tipo tornillo para un calentamiento uniforme. Además, muestra un arreglo adicional, colocando dos magnetrones, en lugar de solo uno, para incrementar la potencia y reducir el tiempo de secado. El secador trabaja por lotes, no se menciona la capacidad del recipiente ni de los magnetrones.

El trabajo realizado por Anjos [1994] se enfoca en un proceso por lotes, los primeros experimentos fueron realizados en un horno de laboratorio para establecer los valores de energía, tiempo de residencia y posible remoción de humedad; posteriormente, al utilizar una planta piloto se incrementaron los niveles de eliminación de humedad en comparación con los obtenidos en laboratorio. Los autores sugieren el calentamiento híbrido, microondas - aire, como una alternativa que ofrece las ventajas de reducir sustancialmente el volumen de aire utilizado, tiempo de operación y el control de la calidad del producto. De acuerdo con la experiencia acumulada, el sistema híbrido para el secado de PET ayuda a eliminar la mayor cantidad de humedad con las microondas; pero al disminuir la cantidad de agua, la disminuye la energía utilizada para evaporar agua, esto provocará que una cantidad de microondas sin utilizar pueden dañar al magnetrón. Por eso se sugiere que la parte final de eliminación de la humedad se realice con aire caliente deshumidificado.

Tsutomu y Masaaki [1994] describen un método y un aparato para secar materiales plásticos por medio de calentamiento por microondas. El material es calentado por las microondas a una presión reducida dentro de un rango que no provoque un arco eléctrico; después, el material se pasa a una zona de un vacío mayor para lograr la humedad requerida. Existe el riesgo de formar un arco eléctrico en la zona de bajo vacío debido a que no existe separación en la zona, entre las microondas y la humedad que se libera en la primera etapa.

Leconte, Deramond y Germain [1995] diseñaron un equipo para el secado de materiales utilizando

microondas. El diseño consta de un ducto, dentro del cual existe un tornillo sinfin para mover el material de un extremo a otro, un compartimiento para la aplicación de microondas y una serie de magnetrones colocados en la parte externa del compartimiento. El ducto se localiza dentro del aplicador para que el material sea expuesto a la acción de las microondas y los magnetrones están separados de la sección de aplicación por medio de una ventana permeable a las microondas. No se menciona la calidad del aire caliente que se suministra al ducto para evitar la condensación de la humedad.

Goodman [1995] presenta un invento, que utiliza calentamiento dieléctrico para el secado de resinas higroscópicas mediante el uso de radio frecuencias. El desarrollo propuesto es un proceso continuo, donde el aplicador de ondas de alta frecuencia se encuentra en el centro de la línea de transmisión por donde pasa la resina alimentada por gravedad. Este sistema evita, pérdidas en la línea de transmisión de las ondas, ajustes en los elementos del circuito por diferencias en los materiales de fabricación y el uso de múltiples aplicadores que se requieren en sistemas convencionales. Un flujo de aire con un punto de rocío de 14°C debajo de la temperatura de entrada del polímero es suministrado en contracorriente para arrastrar la humedad que es retirada de la resina. De acuerdo con mi experiencia, trabajando con secadores que utilizan la caída libre del material para pasar a través del secador, se requiere de una altura más que considerable para lograr el tiempo de residencia óptimo hasta alcanzar la humedad requerida. Tal vez, si no fuera en caída libre, sino en movimiento circular, por gravedad en el lecho, podrían obtenerse menores dimensiones del equipo; esto siempre y cuando el PET esté ya cristalizado, de lo contrario se tendrían aglomerados cuando el material alcance su temperatura de transición vítrea.

Rohr [1997] explica la forma en que su dispositivo se puede utilizar para cristalizar o secar plásticos utilizando microondas, donde la humedad retirada se extrae por medio de una circulación de aire que va a un deshumidificador. El material se dosifica sobre una banda transportadora, que cuenta con un sistema de pesaje integrado, la cual se encuentra dentro de una cubierta que encapsula las microondas y evita fugas. La potencia de los magnetrones y la velocidad

de la banda transportadora se regulan por medio de un sistema de control automático que recibe las mediciones de: a) la radiación residual, usando un sensor de microondas; b) la temperatura dentro del dispositivo, medida por un sensor de infrarrojo; y c) el valor de la masa del material, determinado por la balanza. El dispositivo trabaja en forma continua; en nuestro caso, solo puede secar PET cristalizado, porque al usar PET amorfo se formarían aglomerados en la banda transportadora.

Kaa [2000] usa microondas de 2450 MHz para secar pellets, el agua es evaporada y retirada del secador por medio de una corriente de aire. El aparato reduce el consumo de energía y el tiempo de secado en un 90%. No se indica la calidad del aire que arrastra la humedad.

Tu [2004] sugiere un secador para plásticos con un magnetrón dentro del cuerpo del secador, el magnetrón está conectado a una tubería, la cual está provista en un extremo de un filtro y en el otro extremo está la succión del ventilador principal. El aire que circula por esta tubería sirve como medio de enfriamiento al magnetrón; después, ya precalentado, el aire sirve como alimentación a un calentador de aire. Se puede colocar una derivación al segundo ventilador para extraer el aire húmedo y el polvo generado usando el ducto de venteo; además, el aire que se utiliza no está deshumidificado y puede provocar variaciones en la humedad del producto. No se cuenta con un dosificador del producto a la salida, lo que dificultaría el control del tiempo de residencia del material.

Petri [2005] presenta un equipo que puede realizar tres funciones; mezclar, secar y activar la reacción de los componentes del material; o en su caso solo efectuar una de las funciones. La forma de aplicación de las microondas es a través de la flecha del agitador. Las microondas entran por un extremo de la flecha que es hueca y salen por orificios, que tienen el cuerpo de la misma, para distribuir las microondas en el material a secar. No se menciona la forma en que es extraída la humedad liberada durante el secado.

Pagotto [2006] muestra un aparato que puede manejar de forma continua pellets a una temperatura de hasta 180°C; el equipo consiste de un silo alimentador y un cilindro horizontal (cuerpo del secador), dentro del cilindro se mantiene una cama

fluidizada del material que se mueve longitudinalmente por medio de un mezclador helicoidal para sólidos. Para la eliminación de la humedad, cuenta con un sistema de alimentación de aire deshumidificado colocado en la parte inferior del secador, el cual es distribuido por medio de un filtro de material sinterizado. Consta de indicadores humedad relativa del material a la entrada y a la salida del secador para garantizar la calidad del material. Los magnetrones se encuentran en la parte superior del cuerpo del secador para suministrar las microondas sobre los pellets. La experiencia nos muestra que el uso de un filtro sinterizado para el suministro de aire, garantiza la uniformidad del aire que entra al secador. En la industria manufacturera de fibras sintéticas, los filtros sinterizados son utilizados para la sección de hilatura, para el enfriado uniforme del polímero antes de aplicar el aceite de ensimaje.

Cattapan [2008] muestra un proceso y un sistema para secado de plásticos, en forma de pellets, usando microondas. Esta invención evita el uso de agitadores, vibradores o distribuidores de microondas que complican el diseño y control operativo del equipo, puesto que el material se mueve dentro del secador por la acción de la gravedad. La técnica usada consiste en una etapa de aplicación de microondas, donde los pellets son expuestos al campo de microondas como máximo 60 minutos, y otra sección de calentamiento donde el aire caliente deshumidificado arrastra la humedad retirada de los pellets. Este sistema pareciera del tipo híbrido, pero no lo es, ya que en la zona de radiación por microondas alcanza la humedad requerida. Me parece un sistema avanzado, ya que el proceso continuo mantiene una carga constante de agua en el sistema, que ayuda a que el flujo de microondas tenga material para disipar la energía. A diferencia de la falta de humedad que se presenta en el proceso por lotes cuando se alcanzan niveles de humedad cercanos al objetivo (0.003% en peso) para el procesamiento correcto del PET. Éste sistema es útil siempre y cuando el PET esté ya cristalizado, de lo contrario se tendrían aglomerados cuando el material alcance su temperatura de transición vítrea.

Hein [2008] declara el uso de un secador reclinable, que utiliza microondas como medio de calentamiento. El sistema usa un ariete reciprocante para desplazar el material de la zona de alimentación

a la zona de secado, donde un conjunto de magnetrones, emiten microondas que calientan la humedad del material para ser retirada, y ésta se extrae por medio de aire deshumidificado que es alimentado por ventiladores convencionales. El secador puede ser inclinado, por medio de uno o varios pistones hidráulicos colocados en la parte baja de la sección de alimentación, para ajustar la velocidad de flujo del material a través del secador. Cuenta con sensores de temperatura, humedad, flujo y nivel de material; todos conectados a un control lógico programable (PLC), que ajusta el ciclo del ariete reciprocante, el ángulo de inclinación, el sistema de aire de inyección y la potencia de los magnetrones, para mantener las condiciones de operación que garanticen la calidad del producto. El sistema utilizado, tiene una inclinación, para ajustar la velocidad de flujo que puede provocar fluctuaciones en la cantidad de material que pasa través del secador, y a pesar de tener un PLC, tendríamos dificultades en la operación del equipo.

Tsuruta and Hayashi [2010] muestran un equipo que trabaja a una presión inferior a la atmosférica, que irradia intermitentemente las microondas sobre un objeto para mantener una temperatura constante en el material.

Pagotto [2012] describe un proceso que deshumidifica y seca plásticos en presentación de gránulos, pellets u hojuelas usando microondas para alimentarlos a sistemas de extrusión o inyección. El aparato consiste de una columna que se alimenta por la parte superior; coaxialmente cuenta con un agitador para mezclar el material durante su paso por el secador. De forma periférica, se conectan los magnetrones. En la parte inferior del secador se encuentra un sistema de calentador, filtro y deshumidificador de aire; que introduce el aire, para que fluya a través del plástico. La válvula rotativa colocada en la descarga del secador regula el tiempo de residencia del material dentro del secador. No se menciona la forma en la que el aire sale del secador y el tratamiento posterior del mismo; es necesario identificar si el flujo es el correcto para evitar que la humedad se acumule dentro del equipo.

Pittari and Zoppas [2012] optimizan el proceso para producir botellas de PET, que consta de una unidad en la cual los pellets son secados, antes del proceso de fundición del plástico, en la cual el PET es

calentado usando microondas y es deshumidificado por el flujo de aire de venteo que se recupera después del proceso de soplado.

Lam [2013] propone un método para secar materiales utilizando microondas como medio de calentamiento. El método consiste en colocar el material a secar dentro de un compartimiento impermeable a las microondas, con una potencia de 1800 a 2000 watts a una frecuencia entre 915 a 2450 MHz; donde la humedad retirada del sólido es extraída del secador por medio de un flujo de aire, que es impulsado por un soplador y retenida por una celda de vapor. El sistema es del tipo, por lotes, no se describe la manera como se retira el material en forma continua.

Conclusiones.

El calentamiento por medio de microondas reduce drásticamente el consumo de energía durante el proceso de secado de PET, comparado con el método convencional.

El secado de PET, usando microondas está ganando popularidad por sus características de ahorro de energía y reducción en los tiempos de proceso.

El proceso de secado con calentamiento híbrido, microondas - aire seco, reporta los mejores resultados para tener los niveles de humedad y reducción de tiempos que se desean alcanzar.

Los desarrollos presentados en el campo de secado y calentamiento de plásticos usando microondas proveen soluciones útiles en la industria.

La tecnología de calentamiento por microondas ha sido aplicada exitosamente en el proceso de secado de PET.

Referencias.

Anjos, C., Faria, J., and Marsaioli, A., *Continuous microwave drying of Polyethylene Terephthalate (PET)*; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 1994; pp.796-798.

Astigarraga, J., Hornos de altafrecuencia y microondas, Ed. Nomos S.A., Santa Fé de Bogotá, Colombia, 1998.

Blok, A., *Microwave drying apparatus*. US Patent 4087921, 1978.

Cattapan, G. *Process for drying plastic material in granule form with the use of microwaves and drying system operating according to the process*. US Patent 2008/0060212 A1, 2008.

Courneya, C., *High efficiency material drying*. US Patent 4330946, 1982.

De Vries, J., *A process and apparatus for drying and homogenisation of material containing liquids*. EP 0187173 A1, 1984.

Doelling, M., *Microwave assisted fluidized bed processor*. US Patent 4967486, 1990.

Durant, D., *Microwave heated vacuum dryer for powders*. US Patent 4229886, 1980.

Forster, E., and Creighton, P. *Microwave drying process for synthetic polymer*. US Patent 3771234, 1973.

Forster, E., and Creighton, P. *Microwave drying process for synthetic polymers*. US Patent 4055001, 1977.

Forster, E., *Microwave drying process for synthetic polymers*. US Patent 3434220, 1969.

Forster, E., *Microwave vibrating resonating cavity and drying process*. US Patent 3545093, 1970.

Futer, R., *Method and apparatus for treating pieces of material by microwaves*. US Patent 3555693, 1971.

Goodman, W., and Vulpe, A. *Apparatus and continuous process for drying of dielectric material*. US Patent 5420404, 1995.

Haagensen, D., Moses, D. and Smith, L., *Apparatus and method for processing dielectric materials with microwave energy*. US Patent 4714812, 1987.

Hein, W., *Tilting microwave dryer and heater*. US Patent 2008/0282573 A1, 2008.

Inagaki, M., *Cold air microwave drying apparatus*. US Patent 4468865, 1984.

Ishikawa, K., Hayashi, R., and Yoshimoto, A. *Drying and crystallizing apparatus for granules, which employs a microwave device*. US Patent 4954681, 1990.

Jabarin, S., *PET Technology*, Technical Seminar Hosokawa Bepex Corporation, Minneapolis, Minnesota U.S.A., 1996.

Janda, R., *Method for drying moldable resins*. US Patent 3834038, 1974.

Janda, R., *Method and apparatus for drying moldable resins*. US Patent 4023279, 1977.

Kaa, J., *System to dry plastics granules uses high frequency microwaves to evaporate contained water molecules which escape from the granules with the vapor carried off in an air stream*. DE 19858212 A1, 2000.

Kumar, A., *Complex permittivity and microwave heating of pure water, tap water and salt solution*, International Journal

- Electronics, vol.47, No.6, 1979, pp. 531-536.
- Kumar, A., Microwave drying of wet polyester fibres, *International Journal Electronics*, vol.52, No.5, 1982, pp. 491-495.
- Lam, K., Microwave dryer and microwave drying method. US Patent 2013/0091722 A1, 2013.
- Le Viet, T., Microwave freeze drying method and apparatus. US Patent 4204336, 1980.
- Leconte, D., Deramond, F. and Germain, A., Installation for continuously drying, dehydrating or microwave baking of granular or powdered products. US Patent 5400524, 1995.
- Mahan, D., *Horizontal axis tumbler type microwave drying mechanism*. US Patent 4510361, 1985.
- Mahan, D., Microwave treating mechanism. US Patent 4334136, 1982.
- Marzat, C., *Method and device for the speedy drying of a material by application of microwaves*. EP0459204 A1, 1991.
- Muranaka, T. *Microwave heating apparatus*. US Patent 3777095, 1973.
- Nakagome, M., Apparatus for drying plastic particle. JPS 6458512 A, 1989.
- Nakagome, M., Dryer of plastic pellet. JPS 63216711 A, 1988.
- Nakagome, M., Dryer of plastic pellet. JPS 63231908 A, 1988.
- Nakagome, M., Dryer of plastic pellet. JPS 63231909 A, 1988.
- Nakagomi, S., *Method and apparatus for the microwave drying of plastic material*. EP0312741 A2, 1988.
- Nakagomi, S., *Plastic material dryer*. US Patent 4996779, 1991.
- Nakagomi, S., *Plastic drying apparatus*. US Patent 5105555, 1990.
- Nonhebel, G., Moss, A.A.H., (1971), *Drying of solids in the chemical industry*, Butterworth and Co. Publishers LTD, London.
- Oess, J., *Method drying/mixing apparatus*. US Patent 5255444, 1993.
- Pagotto, A., *Apparatus for the fast and continuous dehumidification of loose materials, particularly pellets for a plastic moulding plant*. EP 1703239 A2, 2006.
- Pagotto, A., *Drying, dehumidifying apparatus of microwave type for the rapid and continuous drying of plastic material, e.g. granules, pellets or flakes, for feeding an injection or extrusion moulding system*. European Patent Application EP 2511635 A1, 2012.
- Petri, R., Microwave mixer/dryer reactor for industrial use. US Patent 2005/0118077 A1, 2005.
- Pittari, G. and Zoppas, M., Apparatus and process for drying plastic material for a machine used to produce plastic containers. US Patent 8286366 B2, 2012.
- Rohr, M., *Process and apparatus for drying*. EP 0814311 A1, 1997.
- Sato, I., Apparatus for drying material which is mixed with a solvent. EP0306563 B1, 1987.
- Smith, F., *Microwave fluidized bed dryer*. US Patent 3528179, 1970.
- Soulier, J., *Microwave device for the heat treatment of powdery or granular materials*. US Patent 4406937, 1983.
- Sugisawa, K., Matsumura, Y., Taga, K. and Hattori, R., Low pressure microwave drying apparatus. US Patent 4637145, 1987.
- Sugisawa, K., Matsumura, Y., Taga, K. and Hattori, R., Microwave drying apparatus and use thereof. US Patent 4622446, 1986.
- Tjurin, N., *Method and apparatus for drying granulate dielectric materials*. US Patent 4222176, 1980.
- Tooby, G., *Method and apparatus for drying*. US Patent 3277580, 1966.
- Tran, V., System for the microwave treatment of materials. US Patent 4631380, 1986.
- Treybal, R.E., *Operaciones de transferencia de masa*, Mc Graw Hill/Interamericana, México D.F., 2003.
- Tsuruta, T. and Hayashi, T., Method for drying under reduced pressure using microwaves. US Patent 7665226 B2, 2010.
- Tsutomu, O. and Masaaki, N., Method and apparatus for drying granular materials. US Patent 5341576, 1994.
- Tu, Ch., Tsao, Ch., and Liu, Y. *Plastic dryer*. US Patent 2004/0200090 A1, 2004.
- Wear, F. and Mc Kinney, H., Zoned microwave drying apparatus and process. US Patent 4640020, 1987.
- Wear, F., Durant, D. and McKinney, H., Apparatus and process for drying granular products. US Patent 4347670, 1982.
- White, J., *Microwave heating cavity with a venetian blind mode stirrer*. US Patent 3521019, 1970.