

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**Proceso de secado del PET, microondas vs. calentamiento
conductivo**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

RUBÉN OMAR HERNÁNDEZ CASTILLO

MÉXICO D.F. 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente	Dr. Joaquín Palacios Alquisira
Vocal	M en C Carlos Guzmán de las Casas
Secretario	Dr. Fernando León Cedeño
1er suplente	M en C Minerva Estela Téllez Ortiz
2do suplente	Dr. Eduardo Vivaldo Lima

Lugar donde se llevo a cabo la tesis

Laboratorio 108 de “Fisicoquímica Macromolecular”, Edificio D, Facultad de Química, UNAM.

Asesor

Dr. Joaquín Palacios Alquisira

Sustentante

Rubén Omar Hernández Castillo

Dedicatorias

A mis padres Norma Castillo y Rubén Hernández a quienes les debo todo lo que soy, y todo lo que he logrado superar. Por su cariño y comprensión la cual manifiestan en todo momento. A mamá por ser tan cariñosa y por enseñarme a compartir. A mi papá por esforzarte tanto y enseñarme a ser responsable. Gracias por entenderme como soy y sepan que siempre estoy orgulloso de ustedes y que los quiero con todo mi corazón.

A Viris por ser mi apoyo durante este difícil camino, además de ser mi aliento y el motivo por el cual esforzarme siempre un poco más. Todo lo que hago es para un futuro mejor a tu lado, y para que estés orgulloso de mí.

A mi hermano Andrés el cual ha compartido todo conmigo y sin el cual la vida no sería la misma. Por sufrir y gozar las mismas cosas que yo, y por ser parte de mi vida. Espero que esto sea un motivo de aliento para ti, pues tienes la capacidad para sobresalir entre los demás.

A toda mi familia que siempre ha estado a mi lado, a mi mamá Nena, a mis abuelos, a mis tíos Nenis, Toña, Rodolfo, y Bety, gracias por ser parte de mi formación y por ayudar a mis padres a educarme, ustedes también son fuente de inspiración para todo lo que hago.

A mi nueva familia, que me ha aceptado y querido como si fuera un más.

A mis primos Moy, Gus, Iván, Me, Alan y Chucho por seguir unidos a pesar de todo, no quisiera decirles primos, sino hermanos.

A todos mis amigos de la facultad, que hicieron este difícil camino más ameno y muy divertido, pues fueron mi familia por 5 años, gracias por todo lo que hicieron por mí y por todo lo que me ayudaron.

A mis amigos de Conta, gracias por dejarme ser su amigo y por pasar tantas horas divertidas conmigo.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de ser parte de ella, y en especial a la Facultad de Química por darme los conocimientos necesarios para poder crecer y superarme.

A Dios por ayudarme y estar conmigo en todo momento, y ayudarme a creer en lo que soy.

Al Dr. Joaquín Palacios por su confianza y apoyo en la realización de esta Tesis.

A todos mis profesores, por sus enseñanzas.

Índice

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Objetivo General	1
1.2 Justificación	2
1.3 Hipótesis de Trabajo	3
1.4 Metodología de Trabajo	3
1.5 Marco Teórico	6
1.5.1 Características del PET	6
1.5.2 Obtención de Materias Primas	7
1.5.3 Reciclado del PET	16
1.5.4 Teoría de secado	17
1.5.5 Secado del PET	19
1.5.6 Uso de Microondas	19
1.5.7 Hornos de Microondas	21

Capítulo 2. Desarrollo Experimental

2.1 Equipo	22
2.2 Material	23
2.3 Diseño de experimentos	23
2.4 Procedimiento Experimental General	27
2.5 Resultados	29

Capítulo 3. Cálculos

3.1 Balance de Materia	31
3.2 Rapidez de Secado	39
3.3 Gráficas	44

Capítulo 4. Análisis de Resultados y Conclusiones

4.1 Análisis de Resultados	61
4.2 Conclusiones	63

Bibliografía

Capítulo 1

Antecedentes

1.1 Objetivo General

Analizar el proceso de secado del PET en horno de microondas y eléctrico atmosférico, a través de la determinación del contenido de humedad de hojuelas de este material, que se obtienen a partir de envases primarios de bebidas carbonatadas para el proceso de reciclado.

Objetivos Específicos

Obtención de graficas de rapidez de secado vs. tiempo de exposición y contenido de humedad para todos los experimentos a realizar.

Obtención de graficas de % de humedad contra tiempo, % de humedad vs. potencia y temperatura contra tiempo.

Estudio comparativo entre:

- Calentamiento con un horno eléctrico
- Calentamiento con un horno de microondas

1.2 Justificación

Este proyecto nace de una necesidad real, la cual tiene su origen en el proceso de reciclado de PET a nivel industrial.

Esta necesidad es la de optimizar la operación unitaria de secado del PET, la cual se lleva a cabo mediante hornos eléctricos convencionales en un proceso semicontinuo, con un determinado tiempo de residencia.

El problema que existe es que después de salir de un lavado anterior, las hojuelas del PET contienen un 6% en peso de humedad, la cual tiene que reducirse hasta un 0.04%, para poder ser alimentado a los extrusores.

En este momento lo que se utiliza para llevar a cabo esta operación son hornos industriales eléctricos los cuales tienen la desventaja de que no son lo suficientemente eficientes para los estándares que se necesitan en la actualidad, por la constante pérdida de energía en forma de calor, lo cual resulta muy costoso para su operación.

Lo que se propone en este trabajo es realizar la sustitución de estos hornos por hornos de microondas, los cuales mejoraran este proceso, además de hacerlo mas eficiente mediante el control de la energía utilizada, y como punto extra se mejora mucho el ambiente de trabajo, pues en la actualidad la zona cercana a los hornos se torna muy caliente, con temperaturas mayores a los 32°C. Por este motivo, además de ser un desarrollo tecnológico importante se desea llevar a cabo este proyecto.

Por otro lado a nivel industrial un punto por el cual se necesita este avance es por las horas equipo involucradas en el proceso, pues este rubro es uno de los mas costosos dentro de la producción del PET reciclado, y con esta nueva tecnología se podrían reducir los costos y con esto hacemos un proceso mas competitivo lo que llevaría a obtener mas ganancias.

Motivación.

El ver que el resultado de este proyecto resultará en algo productivo para este proceso en especial. Además de tener un interés personal en este tema del reciclado, del PET o cualquier plástico.

1.3 Hipótesis de trabajo

La rapidez de secado del polímero PET en forma de hojuelas vía microondas será mucho mayor a la observada con un horno eléctrico común.

El tiempo de secado a una potencia mayor será más corto que a potencias bajas.

El tiempo de secado a una temperatura más alta, será más corto, que a temperaturas bajas mediante el calentamiento con el horno eléctrico y con el horno microondas.

El secado vía microondas será mas rápido y fácil de controlar que el secado hecho vía calentamiento conductivo.

1.4 Metodología de trabajo

Actividad 1

Análisis del material de trabajo, el cual consta de PET y los equipos para el secado, con el cual se busca poder determinar el plan de trabajo específico como sería el tamaño de muestra, número de muestras, la forma de distribución, el medio de secado.

Actividad 2

Determinación de la humedad contenida en las muestras proporcionadas para determinar si es necesario o no homogeneizar la humedad contenida con ayuda del analizador de humedad MB35.

Actividad 3

Analizar las características del secado del PET mediante un horno de microondas multimodal a una temperatura y potencia constante, al medir la cantidad de humedad restante después del proceso.

Actividad 4

Analizar las características del secado del PET mediante un horno eléctrico a una temperatura y potencia constante, al medir la cantidad de humedad residual después del proceso de secado de hojuelas de PET. Se debe establecer que la temperatura deberá ser la misma para ambos hornos, así como el tiempo de exposición

Actividad 5

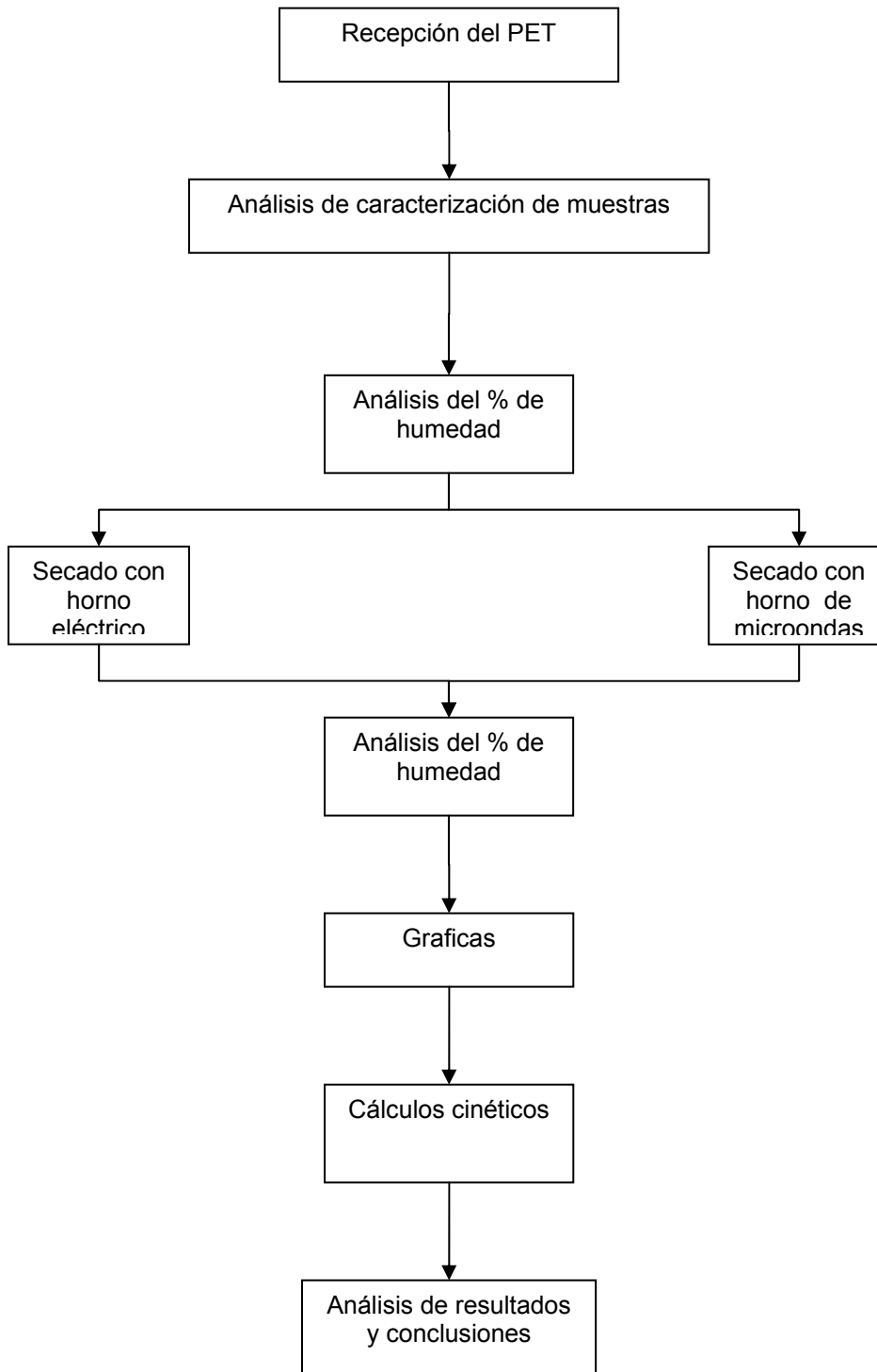
Analizar el proceso de secado del PET utilizando horno de microondas y horno eléctrico.

Para el análisis con horno de microondas las variables a manipular serán potencia, temperatura así como el tiempo de exposición a la radiación.

Para el horno eléctrico la variable a manipular será la temperatura y el tiempo de exposición al secado.

Actividad 6

Análisis de resultados y conclusiones.



1.5 Marco teórico

Con respecto a la información de investigación lo que se decidió fue dividida en varios temas de interés para el desarrollo de nuestro proyecto. Los temas que se decidieron investigar son:

- Propiedades fisicoquímicas del PET y Agua
- Secado de polímeros (PET)
- Proceso de reciclado del PET
- Uso de las microondas en polímeros

Y al tener un conocimiento sobre estos temas se podría tener una base sólida en la cual fundamentar la experimentación de este proyecto.

1.5.1 Características de PET

Lo primero que se debe conocer en esta investigación son las propiedades físicas y químicas de los componentes que intervienen dentro del sistema que se va a estudiar. En nuestro caso lo que deseamos conocer son las propiedades de dos compuestos en específico. Por un lado se encuentra el PET y por otro el agua.

El poli(tereftalato de etileno), conocido como PET, está compuesto de unidades repetidas de $(-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{OOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COO}-)$. Es un polímero obtenido por policondensación que se produce comúnmente por la reacción de etilenglicol con ácido tereftálico o con tereftalato de dimetilo, pero el camino más simple y común para obtenerlo es a través de la reacción directa de esterificación del ácido tereftálico con el etilenglicol para obtener el monómero bis-B-hidroxietil-tereftalato dando como resultado el polímero con cerca de 100 unidades repetidas de este monómero (4)

1.5.2 Obtención de las materias primas que se emplearan para la producción del PET.

Etilenglicol

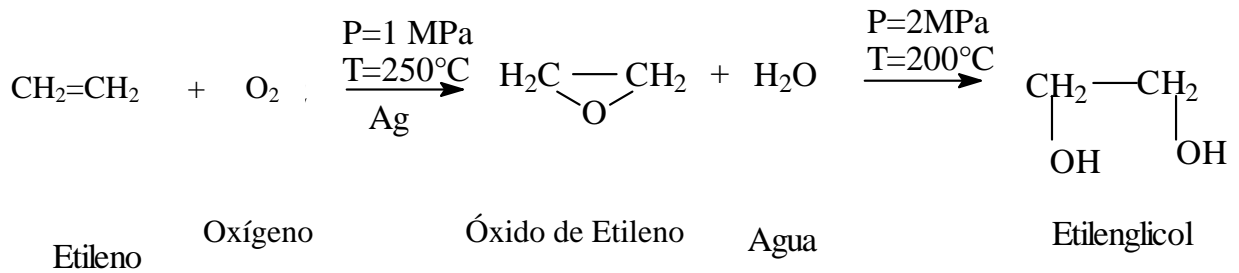
El etilenglicol es el reactivo limitante en la reacción de esterificación para la producción del PET. La formación del etilenglicol parte de un producto petroquímico básico el cual es el etileno, el cual a su vez se obtiene de la destilación fraccionada del petróleo. Este producto es de gran importancia para la producción de una gran cantidad de productos petroquímicos pues a partir de el se obtienen alcoholes, ácidos, monómeros para polímeros entre otros.

Como parte de la ruta petroquímica de este producto que se obtiene a partir del etileno es el óxido de etileno. Este producto se obtiene a partir de la oxidación del etileno haciendo pasar el gas en columna empacada, así como el oxígeno, a la temperatura de 250°C y a través de una presión de 1 MPa, lo cual generalmente se hace con un catalizador a base de plata. Este producto también es de suma importancia a nivel industrial y así lo demuestra la producción mundial.

Como último paso en nuestra primera ruta petroquímica está la producción de etilenglicol a partir del óxido de etileno. Este paso se hace a una temperatura más baja (200°C) pero a una presión mas alta (2 MPa), para esta transformación química no se requiere de ningún catalizador.

A continuación se presenta la ruta completa para obtener etilenglicol a partir de etileno.

Reacción



- Etileno: es una olefina que sirve como materia prima para obtener una enorme variedad de productos petroquímicos.
- Óxido de etileno: La reacción se lleva a cabo en fase gaseosa haciendo pasar el etileno y el oxígeno a través de una columna empacada con un catalizador a base de sales de plata dispersas en un soporte sólido.
- Etilenglicol: (1,2-etanodiol) es un compuesto químico que pertenece al grupo de los glicoles. Es poco volátil y se fabrica a partir de la hidratación del óxido de etileno, el cual sale con pequeñas cantidades de agua pues es muy higroscópico.

Ácido Tereftálico

El ácido tereftálico es uno de los productos que se utiliza para formar este poliéster. Con anterioridad se utilizaba para la producción del PET el tereftalato de dimetilo pero gracias a la nueva tecnología este paso de trans-esterificación se omitió por que ahora la purificación del ácido es más eficiente.

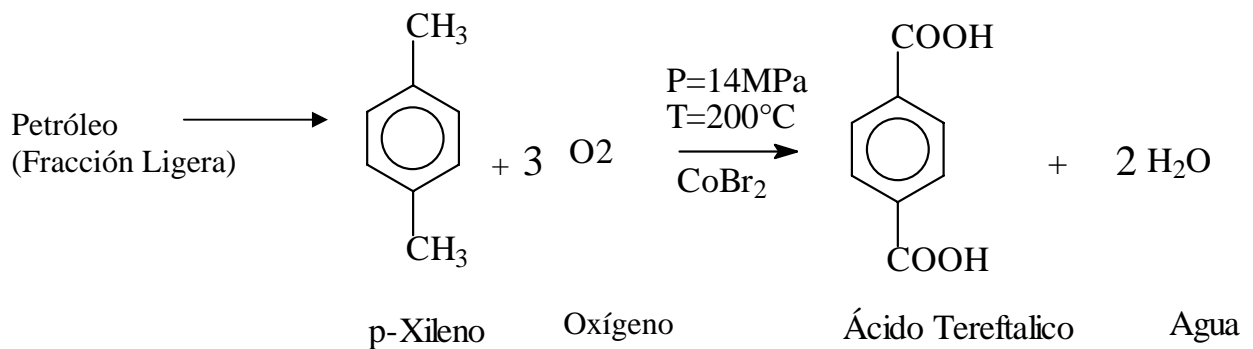
Como primer paso de nuestra segunda ruta petroquímica en la formación de *p*-xileno, este producto se obtiene directamente de la fracción ligera del petróleo, de hecho es producido por PEMEX, siendo el de mayor producción de los xilenos.

El *p*-xileno también se puede obtener a partir del benceno, pero su producción implica un costo adicional comparado con el compuesto obtenido a partir del petróleo, por lo que el proceso a partir del benceno es ineficiente y por consiguiente no se utiliza.

El segundo paso en esta ruta es la oxidación del *p*-xileno para obtener el ácido tereftálico el cual se obtiene en un reactor a una presión muy alta de 12 MPa y una temperatura de 200 °C con un catalizador de bromuro de cobalto.

A continuación se presenta la ruta completa para obtener ácido tereftálico a partir de la fracción ligera del petróleo.

Reacción



- *p*-xileno: se pueden obtener a partir del alquitrán por destilación, pero la fuente principal es el petróleo crudo.
- Ácido Tereftálico: producido mediante la operación de oxidación del *p*-xileno a temperatura y presión altas

El PET fue sintetizado por primera vez en los años 40 y en primera instancia usado como fibra, después se desarrollaron los demás grados de la resina, entre los que se encuentran (4).

- Resina grado envase
- Resina grado fibra
- Resina grado ingeniería
- Resina grado lámina.

Entre las propiedades importantes del PET encontramos que es un material higroscópico por lo que requiere de deshumidificación o secado antes de su transformación.

En cualquiera de sus formas presenta una elevada resistencia química a los alcoholes, ácidos inorgánicos y orgánicos, aceites y grasas. Además de una elevada fluidez en estado fundido. Así como resistencia a la deformación plástica, a la fatiga y al calor además tiene buenas propiedades dieléctricas (1).

Es un plástico duro, tenaz, su aspecto óptico tiende de opaco a transparente. Es soluble en cresol, ácido sulfúrico concentrado y nitrobenzeno.

La fabricación de botellas requiere de un proceso de transformación denominado Inyección Soplado Biorientado. Las características de estos envases son principalmente su barrera a gases y aromas, aunado a su apariencia transparente y brillante, además de su resistencia al impacto, lo cual lo hace muy útil para fabricar envase de bebidas.

En seguida se muestran las tablas 1.1 y 1.2 de algunas de las propiedades más importantes de estos 2 compuestos:

Tabal 1.1 de Propiedades físicas y químicas del PET (1) y (7)

Propiedad	Unidades	Cantidad	Condiciones
Coefficiente de fricción		0.45	Película
Coefficiente de conductividad térmica	$W m^{-1}K^{-1}$	3.75E-02	100°C
Coefficiente de expansión térmica	K^{-1}	1.70E-05	20° - 50°C
Densidad	$g cm^{-3}$	1.335	Amorfo
		1.385	Partly cristal
		1.39	Alto Cristal
		1.455	Cristal calculado
Punto de Fusión	°C	250 - 265	Comercial
Constante dieléctrica	M	3.0	1 MHz
Calor de fusión	$KJ Kg^{-1}$	121 - 144	
Absorción del Agua	%	0.8	1 semana y 25°C
Índice de refracción	Luz de sodio	1.576	Amorfo, 25°C
Temperatura de servicio	°C	-60 a +150	
Calor específico	$KJ Kg^{-1} K^{-1}$	4.184(0.2502 +10.7E-04T)	Hojuelas de -20° a 60°C
Conductividad térmica	$W m^{-1} K^{-1}$	1.47E-05	33°C
Difusividad térmica	$cm^{-2} s^{-1}$	9.24E-04	33°C

Tabla 1.2 Propiedades físicas del agua (18)

Propiedad	Unidades	Cantidad
Densidad	g cm^{-3}	1.000
Punto de congelación	$^{\circ}\text{C}$	0
Constante dieléctrica	μ	78.5
Temperatura crítica	$^{\circ}\text{C}$	374
Presión crítica	atm	217.5
Temperatura de ebullición	$^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$
Calor específico	$\text{J g}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$	4,184
Tensión Superficial	mN m^{-1}	72.75

En las tablas 1.1 y 1.2 se muestran las características de nuestro sistema, por que si no lo conocemos y consideramos, podemos encontrarnos en zonas de trabajo no deseadas.

De acuerdo al grado de polimerización del PET se tienen diferentes aplicaciones

Resina grado envase: Se utiliza para la fabricación de envases de productos como son bebidas, alimentos, cosméticos y productos farmacéuticos.

Resina grado fibra: Se emplea para la manufactura de telas, hilos, refuerzos de llantas y de mangueras, cerdas de brochas y cepillos.

Resina grado ingeniería: Sus aplicaciones en ingeniería se dirigen a donde se requiera resistencia térmica y eléctrica principalmente. Se utiliza en el área automotriz para la elaboración de un sin número de partes moldeadas, en el área de los enseres domésticos para fabricar asas, bases y armaduras de los mismos, en el área de plomería y cerrajería y en otros diversos usos.

Resina grado lámina: Por su resistencia al rasgado y a productos químicos se aplica en el área de fotografía, video, audio y rayos X. En el caso de las

películas se emplean en laminaciones con otros materiales para empaques de productos al alto vacío.

La tabla 1.3 nos muestra las constantes dieléctricas de varios compuestos, la cual nos permite una comparación y nos muestran como interactúan las microondas con el material, pues al tener una constante dieléctrica alta lo que sucederá es que la onda interactuará con la molécula provocando que esta vibre y aumente su energía para calentarla hasta evaporarla.

Tabla 1.3 Constantes dieléctricas para algunos materiales poliméricos y el agua. (1) y (4)

Polímero	ϵ
Poli (tetrafluoroetileno)	1.238
Poli (etileno)	2.3
Poli (isobutadieno-co-isopreno)	2.38
Poli (isopreno)	2.37 – 2.45
Poli (butadieno-co-estireno)	2.5
Poli (estireno)	2.49 – 2.55
Poli (butadieno)	2.51
Poli(metilmetacrilato)	2.6 – 3.0
PET	3.0
PVC	3.39
Poli (vinil-acetato)	3.5
Poliamida 6	3.5
Poliamida 6/6	3.6
Poli (oximetileno)	3.3 – 4.0
Poli (acronitrilo)	4.2 – 6.5
Poli (cloropreno) o neopreno	6.5 – 8.1
Agua	78.5
Aire	1.0

Como es de esperar los materiales poliméricos tienen una constante dieléctrica baja haciendo que sean casi transparentes para las microondas.

Otro de los temas que tenemos que tener claro se refiere al uso de microondas, pues hasta el día de hoy las microondas se utilizan en varios procesos (en la rama de los polímeros), para activar una reacción de polimerización hasta la degradación del polímero.

En seguida se muestra la tabla 1.4 en la cual se sintetiza la información contenida en los artículos encontrados en las revistas científicas del tema sobre estos puntos de interés.

Tabla 1.4 bibliográfica.

Tema	Referencias
Reciclado de PET	Mishra S. et al, (16) Oromiehie A et al (17) Karayannidis G. P. et al (6) Lusinchi J. M. (14) Dzie (7)
Uso de microondas en materiales poliméricos	Ku H.S. et al (9) Deshayes S. et al (2) Kazan A. (8) Shi S et al (20) Jeon J. Y. et al (5) Zhou J., et al (21) Latham R.J. et al (11) Lewis A. (12) Lidstrom P. (13)
Efecto del agua sobre PET	Langevin, D. et al(11) Latham R.J. et al (10) Saleh (19)

1.5.3 Reciclado de PET

El reciclado de los envases de PET que provienen de bebidas carbonatadas se lleva a cabo por dos métodos; el químico y el mecánico, a los que hay que sumar la posibilidad de su recuperación energética. (14) y (17)

El primer paso para su reciclado secundario es su selección desde los residuos procedentes de recolección selectiva o acopio común. En el primer caso, el producto recogido es de mucha mayor calidad; principalmente por una mayor limpieza.

El proceso de recuperación mecánico del PET se divide en dos fases. En la primera se procede a la identificación y clasificación de botellas, lavado y separación de etiquetas, triturado, separación de partículas pesadas de otros materiales como polipropileno, polietileno de alta densidad, etc., lavado final, secado mecánico y almacenaje de la escama.

El reciclado químico o terciario del PET se realiza a través de dos procesos: metanólisis y la glicólisis. Estos se llevan a cabo a escala industrial. Básicamente, en ambos, tras procesos mecánicos de limpieza y lavado, el PET se degrada o depolimeriza; se separan las moléculas que lo componen para, posteriormente, ser empleadas de nuevo en la fabricación de PET. (4)

En comparación, el reciclado mecánico es menos costoso, pero se obtiene un producto final de menor calidad para un mercado más reducido con un mayor volumen de rechazos. Con este método se obtiene PET puro incoloro destinado a bebidas refrescantes, agua, aceites y vinagres, PET verde puro para bebidas refrescantes y agua, mientras que el PET multicapa con barrera de color destinado a cervezas, zumos, etc. así como el PET puro de colores intensos, opacos y negros se obtienen del reciclado químico. Otro tipo, el PET puro azul ligero, empleado como envase de aguas, se obtiene a partir de los dos sistemas.

En cualquier caso, no todas las botellas de PET son reciclables, a pesar de que la tendencia actual de los fabricantes es conseguir envases ligeros, resistentes mecánicamente, etc. que a la vez sean cómodos y llamativos para el consumidor sin dificultar posteriormente su reciclado.

Este reciclado secundario se facilita con el empleo de envases de PET transparente, ya que sin pigmentos tiene mayor valor y mayor variedad de usos en el mercado, evitando los envases multicapa, así como los recubrimientos de otros materiales, que reducen la reciclabilidad del PET, aumentando el empleo de tapones de polipropileno o polietileno de alta densidad y evitando los de aluminio o PVC que pueden contaminar grandes cantidades de PET, así como la inclusión de etiquetas fácilmente desprendibles en el proceso de lavado del reciclador, evitando sistemas de impresión serigráfica que provocan que el PET reciclado y granulado tenga color, disminuyendo sus posibilidades de uso, mercados y precio, así como las etiquetas metalizadas o con pigmentos de metales pesados que contaminan el producto final (14)

1.5.4 Teoría de secado

Secar un sólido en general significa eliminar cantidades de agua, o de cualquier otro líquido, contenidas en un material sólido con el fin de disminuir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El agua u otros líquidos puede retirarse de los sólidos mecánicamente, con prensas o centrifugas, o térmicamente, por evaporación.

El contenido de humedad final de una sustancia seca varía de producto a producto. Ocasionalmente el producto no contiene agua y se denomina totalmente seco. Sin embargo, lo más frecuentemente es que el producto contenga algo de agua. El término de secado es relativo y significa que hay una reducción en el contenido de humedad desde un valor inicial a uno final.

La naturaleza del producto determina generalmente el tipo de secador que se usará. Los sólidos granulares se pueden secar en un secador agitado, con contacto directo a los gases de combustión. Los cristales frágiles de materiales orgánicos sensibles al calor deben secarse en un aparato sin agitación, por calentamiento indirecto o por contacto directo al aire caliente a temperatura y humedad cuidadosamente controladas. A menudo se utiliza la operación a vacío para reducir la temperatura de secado.

Los secadores típicos para sólidos rígidos o granulares que no se pueden someter a agitación son los de platos y los de cinta transportadora. Los sólidos que se pueden agitar se secan generalmente en secadores rotatorios, de tornillo sin fin, de torre y de evaporación súbita o flash. Algunos tipos de secadores evaporan disoluciones y suspensiones hasta sequedad por medios térmicos. Entre ellos los principales son los secadores de tambor y los secadores de pulverización.

La capacidad de un secador depende tanto de la rapidez de transmisión de calor como de la rapidez de transferencia de materia. Puesto que debe evaporarse el agua, hay que suministrar el calor de vaporización a la zona de vaporización que puede estar en, o cerca de, la superficie del sólido, o bien dentro de él dependiendo del tipo de material y de las condiciones del proceso.

En la práctica del secado se encuentran dos clases completamente distintas de sólidos. Aunque muchos sólidos están comprendidos entre estos dos extremos, es conveniente suponer que el sólido es poroso o no poroso, en cualquier caso, puede ser también higroscópico o no higroscópico.

Cuando un sólido es poroso e higroscópico, se puede decir que se cuanta con agua ligada y no ligada al material. Cuando se ha eliminado el agua no ligada al material, queda una gran cantidad de agua ligada que se evapora

progresivamente por debajo de la superficie del sólido, que va acompañado de la difusión de vapor de agua a través del mismo.

1.5.5 Secado de PET

El PET en forma sólida absorbe humedad del medio ambiente (actúa de forma semejante a un desecante). Así durante el almacenaje del polímero este absorberá humedad hasta alcanzar el equilibrio. Este valor puede ser tan alto como 0.6%, dependiendo de las condiciones donde sea almacenado. En la práctica la resina no absorbe niveles mayores de humedad a 0.2% si se mantiene en un lugar cubierto y durante periodos cortos de tiempo. Sin embargo para fabricar un buen producto a base de PET se requiere reducir la humedad a menos de 0.004% (40 ppm) antes de extruir el material. (10)

En seguida se presentarán algunos puntos a considerar para un buen secado del PET:

- La temperatura de la hojuela debe estar entre 150°C y 160°C
- La temperatura del aire de secado debe encontrarse a la entrada del secador a 180°C
- Se recomienda que el tiempo de residencia del PET no sea menor a 4 horas siendo lo normal entre 6 y 8 horas.

1.5.6 Uso de microondas

El uso de microondas se ha estudiado con anterioridad y en el 2001 se realizó una extensa compilación. En seguida se presenta la información recabada: las microondas tienen una longitud de onda desde 1mm hasta 1m correspondientes a las frecuencias entre 0.3 y 300 GHz y se encuentra dentro del espectro electromagnético entre las regiones correspondientes a la radiación infrarroja y las ondas de radio. (12)

Lo que se hace para evitar la interferencia es utilizar una longitud de onda a la que trabajaran los aparatos industriales y caseros la cual es de 12.2 cm. correspondientes a 2.450 (± 0.050) GHz.

Como toda radiación electromagnética, la microonda tiene dos componentes un componente eléctrico y otro magnético. Este primero es responsable del calentamiento dieléctrico, el cual se puede explicar por medio de dos mecanismos: el mecanismo de polarización bipolar y el mecanismo por conducción.

Para que una sustancia genere calor cuando es irradiada con microondas, esta debe poseer un momento bipolar, como lo tiene la molécula del agua. La habilidad de las moléculas de un líquido para alinearse a un campo aplicado, variará con diferentes frecuencias y con la viscosidad del líquido. Bajo la irradiación de baja frecuencia, la molécula gana energía por este efecto. La molécula gana energía por este comportamiento, pero el efecto global de calentamiento producido por la alineación completa es pequeño. (13)

En la región de la radiación por microondas, la frecuencia de la radiación aplicada es suficientemente baja para que los dipolos tengan tiempo de responder al campo eléctrico alterno y que por lo tanto roten. Pero la frecuencia no es lo suficientemente alta como para que la rotación siga precisamente el campo. Por lo tanto, mientras el dipolo se reorienta para alinearse con el campo eléctrico y genera una diferencia de fases entre la orientación del campo y la del dipolo. Esta diferencia de fase provoca una pérdida de energía del dipolo debido a la fricción molecular y las colisiones, dando como resultado un aumento en la temperatura por calentamiento dieléctrico. En disolución los iones se moverán por efecto del campo eléctrico, desprendiendo energía por motivo de las colisiones. Este mecanismo por conducción es mucho más importante que el mecanismo bipolar.

Entonces el calor generado por ambos mecanismos da como resultado la temperatura final que es mucho mayor que la inicial.

1.5.7 Hornos de microondas

Esta constituido principalmente por un magnetrón o generador de microondas, la onda guía, la cavidad de microondas, un agitador y un ventilador o dispersor de microondas. En resumen el funcionamiento del horno es simple, las microondas se producen en el magnetrón, se propagan por la onda guía hasta el agitador el cual distribuye las ondas dentro de la cavidad en distintas direcciones y la muestra debido a sus características absorbe las ondas. Generalmente la potencia del magnetrón se mide en Watts la cual varía dependiendo del modo de operación del horno.

En la siguiente tabla algunos autores resumieron las ventajas significativas que existen entre el calentamiento con un horno eléctrico y el hecho por las microondas, tabla 1.5.

Tabla 1.5 comparativa de ventajas entre el calentamiento convencional y calentamiento microondas (12)

	Calentamiento eléctrico	Calentamiento por microondas
Rapidez de calentamiento	Lento, controlado por transferencia de calor.	Rápido, la energía se acopla directamente con las moléculas.
Selectividad	No presenta, el calor es debido al gradiente de temperatura.	Si presenta, el calentamiento es proporcional al factor de pérdida del material y a la potencia de entrada.
Transporte de calor	De afuera hacia adentro, la superficie controla el flujo de calor.	De adentro hacia fuera, calentamiento uniforme con pérdida de calor en las fronteras.
Control	Difícil, a causa de la fuente de calor.	Mayor, ya que la energía de microondas es fácil de manipular.

Capítulo 2

Desarrollo experimental

2.1 Equipo

- Analizador de humedad Ohaus
- Horno de microondas Pórtland modelo DMR-141 de 2450 MHz. Este horno tiene una capacidad de nueve niveles de potencia de 78 hasta 700 W, con un control de temperatura de 0 a 200 °F con charola giratoria.

En la tabla 2.1 se muestran los niveles de potencia para el horno de microondas que se utilizó para la experimentación.

Tabla 2.1

Nivel de potencia	Potencia emitida	
	(Watt)	(cal/seg)
1	78	8.63
2	156	37.25
3	233	55.64
4	311	74.27
5	389	92.89
6	467	111.52
7	544	129.91
8	622	148.53
9	700	167.16

- Horno eléctrico que tiene un intervalo de temperatura de 30°C a 450°C que corresponden a 303 y 723 °K
- Medidor de temperatura infrarrojo

Equipo de trabajo opcional

- Horno de microondas marca Sanyo modelo EM0900T de 2450 MHz con un consumo de poder de 1550 W
- Horno de microondas marca Panasonic

2.2 Material

- Hojuelas de PET reciclado provenientes de bebidas carbonatadas húmedo (.7 cm² aproximadamente de área y 0.5 mm de espesor)
- "Porta hojuelas de PET": refractario de vidrio de 25 x 25 cm.

2.3 Diseño de experimentos

Con el objetivo de optimizar el trabajo experimental, se hizo un diseño de experimentos con el cual buscamos que el trabajo experimental se hiciera de manera eficaz y eficiente, además de que se tiene un registro de las actividades que se tienen que realizar para cada sección de esta experimentación.

La experimentación realizada básicamente la podemos dividir en tres secciones, las cuales abarcan tres puntos importantes que deseamos abarcar con la realización de este proyecto, la primera tendremos como variables la potencia y el tiempo de exposición a la radiación en un horno microondas, la segunda la temperatura y el tiempo de exposición al proceso de secado mediante un horno eléctrico y la tercera y última la temperatura y el tiempo de exposición al proceso de secado mediante un horno microondas teniendo fija la potencia de 700W

En la tabla 2.2 se muestra los experimentos solo para el horno de microondas con variación del tiempo de exposición a una potencia fija la cual es de 311W

Tabla 2.2

Experimento	Potencia (Watt)	Tiempo (min)
1	311	1
2	311	2
3	311	3
4	311	4
5	311	5
6	311	6
7	311	8
8	311	10
9	311	12
10	311	14
11	311	16
12	311	18
13	311	20

En la tabla 2.3 se muestra el diseño de experimentos para el horno de microondas con variación del tiempo de exposición a una potencia fija

Tabla 2.3

Experimento	Potencia (Watt)	Tiempo (min)
14	700	1
15	700	2
16	700	3
17	700	4
18	700	5
19	700	6
20	700	8
21	700	10
22	700	12
23	700	14
24	700	16
25	700	18
26	700	20

En la tabla 2.4 se muestra el diseño de experimentos para el horno eléctrico con variación del tiempo de exposición a una temperatura fija.

Tabla 2.4

Experimento	Temperatura °C	Tiempo (min)
27	50	2
28	50	4
29	50	6
30	50	8
31	50	10
32	50	12
33	50	14
34	50	16
35	50	18
36	50	20
37	50	26

En la tabla 2.5 se muestra el diseño de experimentos para el horno eléctrico con variación del tiempo de exposición a una temperatura fija

Tabla 2.5

Experimento	Temperatura °C	Tiempo (min)
38	70	2
39	70	4
40	70	6
41	70	8
42	70	10
43	70	12
44	70	14
45	70	16
46	70	18
47	70	20
48	70	26

En la tabla 2.6 se muestra el diseño de experimentos para el horno de microondas con variación del tiempo de exposición a una potencia y temperatura fija

Tabla 2.6

Experimento	Potencia (Watt)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
49	700	50	1
50	700	50	2
51	700	50	3
52	700	50	4
53	700	50	5
54	700	50	6
55	700	50	8
56	700	50	10
57	700	50	12
58	700	50	14
59	700	50	16
60	700	50	18
61	700	50	20

En la tabla 2.7 se muestra el diseño de experimentos para el horno de microondas con variación del tiempo de exposición a una potencia y temperatura fija

Tabla 2.7

Experimento	Potencia	Temperatura	Tiempo
62	700	70	1
63	700	70	2
64	700	70	3
65	700	70	4
66	700	70	5
67	700	70	6
68	700	70	8
69	700	70	10
70	700	70	12
71	700	70	14
72	700	70	16
73	700	70	18
74	700	70	20

2.4 Procedimiento experimental general

Procedimiento para el analizador de humedad

1. Introducir las hojuelas de PET dentro del platillo para muestras de tal manera que la distribución en la superficie de este sea homogénea.
2. Operar el equipo:
 - Ajuste de temperatura a 70°C.
 - Ajuste del tiempo de secado a 12 minutos.
 - Inicio de la prueba.
3. Tomar lectura en la pantalla del analizador de humedad.

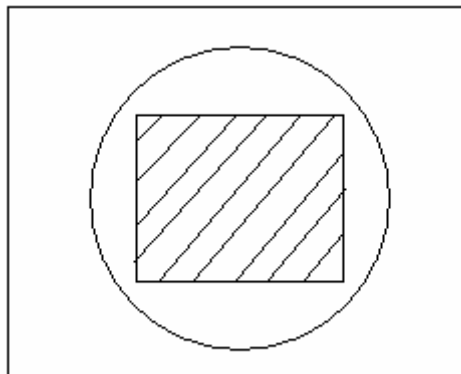
Procedimiento para el horno microondas

1. Medir la humedad inicial del PET con el analizador de humedad.
2. Pesar 100 gramos de PET húmedo en la báscula dentro del porta hojuelas
3. Introducir el porta hojuelas dentro del horno de microondas multimodal conservando siempre para cada una de las pruebas una distribución homogénea.
4. Operar el horno de microondas multimodal.
 - Ajustar la potencia deseada
 - Ajustar el tiempo a 1 minuto (aumentando progresivamente a 2, 3 hasta los 25 minutos, utilizando muestras distintas para cada caso, las cuales serán de 100 g aproximadamente)
 - Inicio del secado
5. Medir la humedad final con el analizador de humedad para cada una de
6. las pruebas.
7. Cambiar de potencia a 700W y volver al paso 2
8. Operar el horno de microondas para poder controlar el secado 50 y 70 grados centígrados y volver al paso 2

Procedimiento experimental para el horno eléctrico.

1. Medir la humedad inicial con el analizador de humedad para cada uno de las pruebas.
2. Pesar 100 gramos de PET húmedo en la báscula dentro del porta hojuelas
3. Precalentar el horno a la temperatura de 90°C
4. Introducir el porta hojuelas dentro del horno procurando hacerlo mas lo rápido posible.
5. Extraer la muestra después de haber transcurrido un minuto.
6. Medir la humedad final de la muestra con el analizador de humedad.
7. Para las siguientes pruebas se debe volver al paso tres aumentando un minuto progresivamente en el tiempo de secado hasta llegar a los 5 minutos.

Figura 2.1 Colocación de la muestra dentro del horno de microondas



2.5 Resultados

En la tabla 2.8 se muestra los contenido de humedad final que se obtuvieron después de calentar la muestra de 100 g aproximadamente para distintos tiempos de exposición a la radiación para el calentamiento con microondas y para dos temperaturas distintas, con una potencia de trabajo de 700W, correspondientes a los experimentos 49 al 61 para la temperatura de 50°C y de 62 al 74 para la temperatura de 70°C.

Tabla 2.8

Tiempo min	50°C	70°C
	%humedad	%humedad
0	6.06	5.97
1	5.6	4.5
2	4.9	3.65
3	3.79	2.8
4	3.43	2.29
5	2.71	1.79
6	2.5	1.43
8	1.8	0.82
10	1.36	0.71
12	1.1	0.64
14	0.75	0.36
16	0.53	0.32
18	0.49	0.18
20	0.38	0.13

Los resultados del contenido de humedad final que se obtienen después de calentar la muestra de 100 g aproximadamente para distintos tiempos de exposición a la radiación para el calentamiento un horno eléctrico y para dos temperaturas distintas se muestran en la tabla 2.9, dichos resultados corresponden a los experimentos 27 al 37 para la temperatura de 50°C y de 38 al 48 para la temperatura de 70°C.

Tabla 2.9

Tiempo min	50°C	70°C
	%humedad	%humedad
0	6.19	6.16
2	5.43	5.08
4	4.48	3.62
6	3.85	2.37
8	3.35	1.72
10	2.65	1.1
12	1.98	0.52
14	1.79	0.39
16	1.19	0.27
18	0.82	0.22
20	0.65	0.15
26	0.39	0.03

La tabla 2.10 muestra el contenido de humedad final después de someterse a un proceso de secado de aproximadamente 100 g de la muestra para distintos tiempo de exposición con un calentamiento vía microondas y para dos distintas potencias, correspondientes a los experimentos 1 a 13 para la potencia de 311 W y del 14 al 26 para la potencia de 700 W. Cabe señalar que la temperatura de esta experimentación no se controló pero fue supervisada.

Tabla 2.10

Tiempo	Potencia	Potencia
	311W	700W
0	5.8	6.1
1	4.6	4.6
2	3.8	3.1
3	3.6	2.9
4	3.4	2.2
5	3	2
6	2.5	1.7
8	1.8	1
10	1.6	0.7
12	1.3	0.5
14	0.7	0.3
16	0.4	0.2
18	0.5	0.1
20	0.3	0.08

Capítulo 3

Cálculos

3.1 Balance de materia

Para el balance necesitamos los valores experimentales obtenidos en el laboratorio para varias muestras de PET húmedo, si conocemos la cantidad de PET húmedo que entra y el porcentaje de humedad así podemos conocer la cantidad de PET seco y agua que entran así como los que salen.

$$(PET + Agua)_e = (PET + Agua)_s$$

Para un 6% de humedad del sistema en 100 g de muestra tenemos:

- 94 g de PET seco
- 6 g de Agua

Tomando como muestra el experimento 55 consistente en un calentamiento vía microondas con 8 minutos de exposición a la radiación a una potencia de 700W teniendo un control de temperatura de 50°C el ejemplo de balance de materia es el siguiente

Entrada de PET húmedo: 100 gramos con 6.06 % de humedad por lo tanto en el sistema hay: 93.94 gramos de PET seco y 6.06 gramos de agua y después de la exposición a la radiación, el porcentaje de humedad a la salida es de 1.8 %, por tanto el contenido de agua disminuye, mientras que el PET seco se mantiene constante pues este no sufre ninguna transformación física solo el calentamiento, por lo tanto existen los mismos 93.94 gramos.

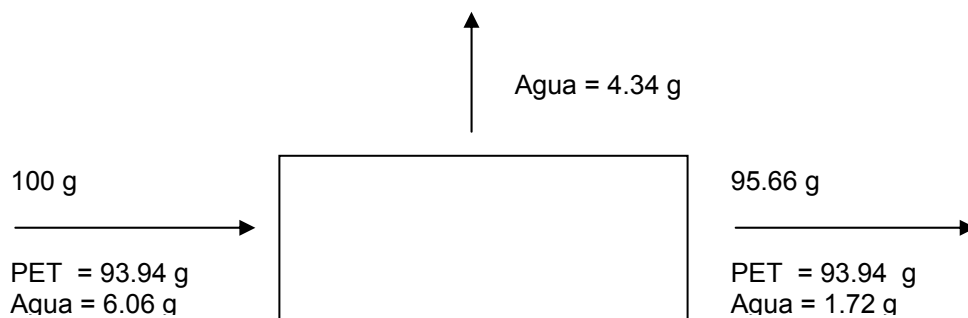
El nuevo sistema tiene 93.94 gramos de PET, con un porcentaje de humedad de 1.8%, por lo tanto el porcentaje de PET en el sistema es de $100\% - 1.8\% = 98.2\%$, con este dato podemos calcular el contenido de agua en gramos que quedo después del calentamiento en el sistema, mediante una simple proporción:

$$\text{Gramos de agua} = \text{Gramos de PET} * \frac{\% \text{ Agua}}{\% \text{ PET}}$$

$$\chi = 93.94 * \frac{1.8}{98.2}$$

$$\chi = 1.72 \text{ gramos de agua}$$

Con este valor obtenido mediante este sencillo cálculo podemos obtener el valor de agua que se evaporó mediante la acción de secado, y además necesitaremos el valor en gramos de agua que se tenía al inicio de la experimentación el cual era de 6.06 gramos. Para obtener este valor se necesita restar el valor que quedó dentro del sistema después de la radiación al valor inicial o sea $6.06 \text{ g} - 1.72 \text{ g} = 4.34 \text{ g}$ de agua que fueron evaporados por medio del calentamiento.



Con estos cálculos y resultados tenemos completo el balance de materia que deseamos, por el lado de la entrada tenemos gramos de PET, gramos de Agua y gramos de sistema, y por parte de la salida tenemos gramos del PET, gramos de agua dentro del sistema y gramos de agua evaporada del sistema.

La siguiente tabla 3.1 presenta el balance de materia para calentamiento hecho con un horno microondas a una potencia de 700W y una temperatura de 50°C, variando los tiempos de exposición a la radiación, donde el primer valor de la tabla representa el valor a la entrada al proceso. El valor de PET seco se mantiene constante pues no sufre ninguna transformación física solo el calentamiento, este valor es de 93.94 gramos.

Tabla 3.1

SALIDA			
Temperatura 50°C			
	Agua dentro del sistema	Agua evaporada	Peso total del sistema
Tiempo (min.)	Gramos	Gramos	Gramos
Entrada	6.06	0.00	100.00
1	5.57	0.49	99.51
2	4.84	1.22	98.78
3	3.70	2.36	97.64
4	3.34	2.72	97.28
5	2.62	3.44	96.56
6	2.41	3.65	96.35
8	1.72	4.34	95.66
10	1.30	4.76	95.24
12	1.04	5.02	94.98
14	0.71	5.35	94.65
16	0.50	5.56	94.44
18	0.46	5.60	94.40
20	0.36	5.70	94.30

La siguiente tabla 3.2 presenta el balance de materia para calentamiento hecho con un horno microondas a una potencia de 700W y una temperatura de 70°C, variando los tiempos de exposición a la radiación, donde el primer valor de la tabla representa el valor a la entrada al proceso. El valor de PET seco se mantiene constante pues no sufre ninguna transformación física solo el calentamiento, este valor es de 94.03 gramos.

Tabla 3.2

SALIDA			
Temperatura 70°C			
	Agua dentro del sistema	Agua evaporada	Peso total del sistema
Tiempo (min.)	Gramos	Gramos	Gramos
Entrada	5.97	0.00	100.00
1	4.43	1.54	98.46
2	3.56	2.41	97.59
3	2.71	3.26	96.74
4	2.20	3.77	96.23
5	1.71	4.26	95.74
6	1.36	4.61	95.39
8	0.78	5.19	94.81
10	0.67	5.30	94.70
12	0.61	5.36	94.64
14	0.34	5.63	94.37
16	0.30	5.67	94.33
18	0.17	5.80	94.20
20	0.12	5.85	94.15

La siguiente tabla 3.3 presenta el balance de materia para el calentamiento hecho con un horno eléctrico y una temperatura de 50°C, variando los tiempos de exposición a la radiación, donde el primer valor de la tabla representa el valor a la entrada al proceso. El valor de PET seco se mantiene constante pues no sufre ninguna transformación física solo el calentamiento, este valor es de 93.81 gramos

Tabla 3.3

SALIDA			
Temperatura 50°C			
	Agua dentro del sistema	Agua evaporada	Peso total del sistema
Tiempo (min.)	Gramos	Gramos	Gramos
Entrada	6.19	0.00	100.00
2	5.39	0.80	99.20
4	4.40	1.79	98.21
6	3.76	2.43	97.57
8	3.25	2.94	97.06
10	2.55	3.64	96.36
12	1.89	4.30	95.70
14	1.71	4.48	95.52
16	1.13	5.06	94.94
18	0.78	5.41	94.59
20	0.61	5.58	94.42
26	0.37	5.82	94.18

La siguiente tabla 3.4 presenta el balance de materia para calentamiento hecho con un horno eléctrico y una temperatura de 70°C, variando los tiempos de exposición a la radiación, donde el primer valor de la tabla representa el valor a la entrada al proceso. El valor de PET seco se mantiene constante pues no sufre ninguna transformación física solo el calentamiento, este valor es de 93.84 gramos.

Tabal 3.4

SALIDA			
Temperatura 70°C			
	Agua dentro del sistema	Agua evaporada	Peso total del sistema
Tiempo (min.)	Gramos	Gramos	Gramos
Entrada	6.16	0.00	100.00
2	5.02	1.14	98.86
4	3.52	2.64	97.36
6	2.28	3.88	96.12
8	1.64	4.52	95.48
10	1.04	5.12	94.88
12	0.49	5.67	94.33
14	0.37	5.79	94.21
16	0.25	5.91	94.09
18	0.21	5.95	94.05
20	0.14	6.02	93.98
26	0.03	6.13	93.87

La siguiente tabla 3.5 presenta el balance de materia para calentamiento hecho mediante un horno microondas a una potencia de 311W y sin un límite de temperatura, variando los tiempos de exposición al secado, donde el primer valor de la tabla representa el valor a la entrada al proceso. El valor de PET seco se mantiene constante pues no sufre ninguna transformación física, solo el calentamiento, este valor es de 94.20 gramos.

Tabla 3.5

Tiempo (min.)	SALIDA		
	Potencia 311W		
	Agua dentro sistema	Agua evaporada	Peso del sistema
	Gramos	Gramos	Gramos
Entrada	5.80	0.00	100.00
1	4.54	1.26	98.74
2	3.72	2.08	97.92
3	3.52	2.28	97.72
4	3.32	2.48	97.52
5	2.91	2.89	97.11
6	2.42	3.38	96.62
8	1.73	4.07	95.93
10	1.53	4.27	95.73
12	1.24	4.56	95.44
14	0.66	5.14	94.86
16	0.38	5.42	94.58
18	0.47	5.33	94.67
20	0.28	5.52	94.48

La siguiente tabla 3.6 presenta el balance de materia para calentamiento hecho mediante un horno microondas a una potencia de 700 W y sin un límite de temperatura, variando los tiempos de exposición al secado, donde el primer valor de la tabla representa el valor a la entrada al proceso. El valor de PET seco se mantiene constante pues no sufre ninguna transformación física solo el calentamiento, este valor es de 93.90 gramos.

Tabal 3.6

SALIDA			
Potencia 700W			
	Agua dentro sistema	Agua evaporada	Peso del sistema
Tiempo (min.)	Gramos	Gramos	Gramos
Entrada	6.10	0.00	100.00
1	4.53	1.57	98.43
2	3.00	3.10	96.90
3	2.80	3.30	96.70
4	2.11	3.99	96.01
5	1.92	4.18	95.82
6	1.62	4.48	95.52
8	0.95	5.15	94.85
10	0.66	5.44	94.56
12	0.47	5.63	94.37
14	0.28	5.82	94.18
16	0.19	5.91	94.09
18	0.09	6.01	93.99
20	0.08	6.02	93.98

4.2 Rapidez de Secado

Uno de los valores de nuestro interés es el cálculo de rapidez de secado, el cual se realizó de acuerdo con la referencia (22), esta forma de calcularlo es muy utilizada pues toma en consideración conceptos como el de la masa de polímero seco, y el área expuesta al secado. Este cálculo podrá definir con mayor claridad que tipo de secado es mas rápido.

El cálculo de la rapidez de secado fue realizado con la siguiente ecuación:

$$W = \frac{m\Delta X}{A\Delta\theta}$$

$W = \text{velocidad o rapidez de secado} \frac{\text{Kg}}{\text{h} * \text{m}^2}$

$m = \text{masa del sólido seco Kg}$

$\theta = \text{tiempo h}$

$X = \% \text{ humedad}$

$A = \text{área de la superficie expuesta m}^2$

Esta rapidez podría definirse como un flux por sus unidades de masa por hora por metro cuadrado, pero debe considerarse que esa masa y la superficie se mantienen constantes en todo momento.

Enseguida se presenta un ejemplo de cálculo para esta velocidad de secado, los datos corresponden al experimento 14 para un horno microondas a una potencia de 700W.

Datos :

$$m = 0.0939 \text{ Kg}$$

$$\Delta\theta = 0.016 \text{ hrs.}$$

$$X_1 = 6.1$$

$$X_2 = 4.6$$

$$A = 0.0625 \text{ m}^2$$

El dato correspondiente al $\Delta\theta$ es el tiempo que tardó la muestra expuesta al proceso de secado, el cual fue de 1 minuto. Esta cantidad fue convertida a horas mediante un factor de conversión, el cual fue de 0.016 hrs. El dato correspondiente al área es resultado del cálculo de esta porta hojuelas, la cual es la multiplicación de sus lados los cuales mide 25 cm cada uno, dando como resultado 625 cm^2 y utilizando un factor de conversión resulta la cantidad de 0.0625 m^2 .

$$W = \frac{0.0939 \text{ Kg.} * (4.6 - 6.1)}{0.0625 \text{ m}^2 * 0.016 \text{ hrs}}$$

$$W = -141.98 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 * \text{hrs.}}$$

De esta manera se realizaron todos los demás cálculos para completar las siguientes tablas. Recordando que lo que se busca es el valor mas negativo posible, pues eso significaría que la variación del contenido de humedad de un punto al otro fue lo mas grande posible, teniendo como resultado un secado mas rápido, siendo esto último el objetivo primordial de esta tesis. El significado físico del valor negativo es la disminución del contenido de humedad, el cual decrece al paso del tiempo.

La tabla 3.10 muestra las rapidez de secado para un horno de microondas teniendo como variable la temperatura (las cuales fueron de 50°C y 70°C), la condición con que trabajo el horno microondas fue a una potencia de 700W.

Tiempo min	50°C	70°C
	Rapidez de secado	
	Kg/hrs m ²	
1	-130.40	-136.34
2	-84.00	-102.50
3	-66.60	-80.57
4	-42.80	-48.34
5	-68.18	-47.39
6	-19.89	-34.12
8	-32.14	-40.70
10	-13.80	-31.20
12	-11.94	-3.22
14	-16.07	-12.87
16	-10.10	-1.84
18	-1.84	-6.43
20	-5.05	-2.30

Lo que observamos en esta tabla son valores altos al inicio de la experimentación, como era de esperarse, ya que es cuando el contenido de agua es mayor para esos tiempos lo cual facilita que el agua se evapore con mayor facilidad. Las dos temperaturas analizadas en esta parte de la experimentación resultaron tener valores bastante altos, pues la temperatura de 50°C presenta un valor de -130 Kg/hrs m² el cual se considera alto comparado con los demás experimentos obtenidos, mientras para 70 °C es de -136 Kg/hrs m² la cual es muy parecida. Estos valores son muy parecidos por que al inicio del secado las condiciones que operan son casi las mismas, pues el control de la temperatura se presenta minutos después. Hasta los 10 minutos se presenta una velocidad mayor por parte de la temperatura de 70 °C pero después de este punto las condiciones cambian y se tiene una velocidad mayor a una temperatura mas baja. Este efecto se debe a que el contenido de humedad es mayor para la temperatura baja lo cual permite que la velocidad se comporte de una manera constante, al contrario de la temperatura alta, la cual tiene un lapso de alta velocidad y uno de baja velocidad.

A continuación se presenta la tabla 3.11, la cual muestra el cálculo de las rapidezces obtenidas para el secado hecho con un horno eléctrico. Este cálculo fue hecho para los resultados obtenidos para las dos temperaturas analizadas, las cuales son 50°C y 70°C.

Tiempo min	50°C	70°C
	Rapidez de secado	
	Kg/hrs m ²	
2	-61.30	-65.40
4	-43.56	-58.00
6	-28.89	-57.33
8	-22.93	-29.81
10	-32.10	-28.44
12	-30.00	-26.60
14	-8.71	-13.50
16	-27.51	-5.50
18	-16.96	-6.60
20	-7.79	-3.21
26	-3.93	-1.82

Los resultados presentados en esta tabla 3.11 muestra que las dos rapidezces máximas alcanzadas con este tipo de secado son de -65.4 Kg/hrs m² para la temperatura de 70°C y de -61.3 Kg/hrs m² para los 50°C los cuales no son muy diferentes ya que hay solo una diferencia de 4 unidades. En los primeros 12 minutos de experimentación se nota la misma tendencia que en los experimentos realizados para el horno microondas con un control de temperatura, donde la temperatura alta tiene una rapidez alta y mayor que la temperatura baja, pero después de este punto las rapidezces disminuyen abruptamente, cambiando la tendencia de mayor velocidad la cual es ahora para la temperatura baja. También la temperatura baja se observa la tendencia del experimento anterior la cual es que se mantiene relativamente constante durante la mayor parte de la experimentación.

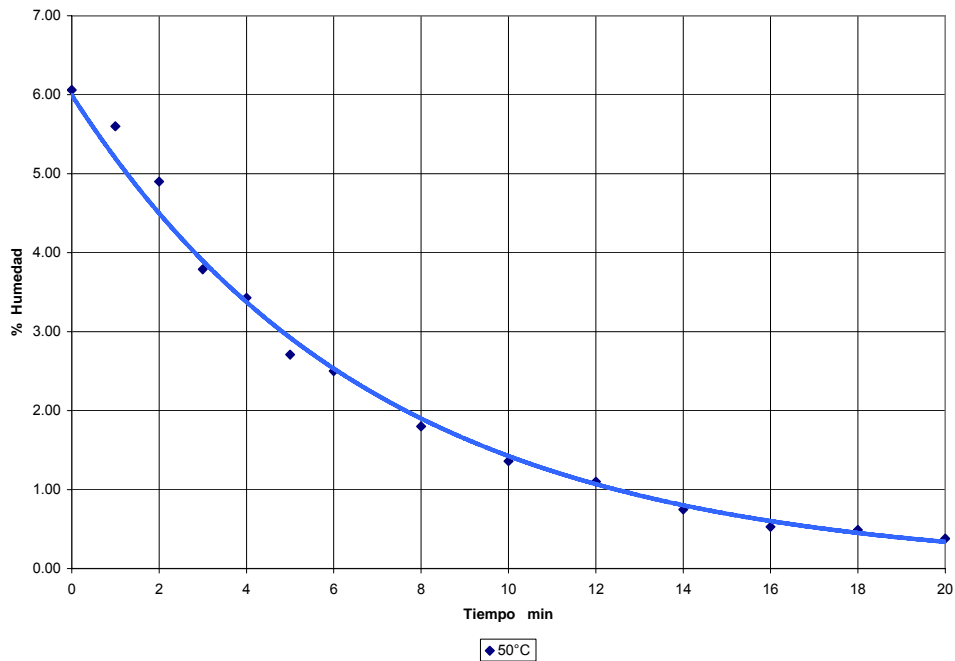
En la tabla 3.12 se muestran los cálculos obtenidos de rapidez de secado correspondientes a las series de experimentos 1 al 13 para la potencia de 311W y 14 a 26 para 700W realizadas en el horno de microondas.

Tiempo min	311W	700W
	Rapidez de secado	
	Kg/hrs m ²	
1	-113.95	-141.99
2	-75.97	-141.99
3	-56.00	-80.80
4	-28.99	-66.26
5	-37.98	-32.70
6	-47.48	-28.40
8	-32.23	-32.13
10	-19.21	-13.77
12	-13.81	-9.18
14	-27.62	-9.18
16	-13.81	-4.59
18	4.60	-4.59
20	-9.21	-0.92

Esta tabla muestra resultados muy interesantes. Por una parte, encontramos el valor de rapidez mas alto para todos los experimentos que se realizaron el cual es de -141 Kg/hrs m² para la potencia de 700W, este valor se repite durante los dos primeros minutos de experimentación después de este tiempo se observa una disminución paulatina la cual concluye también con el valor mas pequeño de velocidad de secado el cual es de -0.92 Kg/hrs m², este valor es tan bajo debido a que en estas condiciones y a ese tiempo el contenido de humedad restante en el sistema es muy bajo, lo cual no favorece la salida del agua del sistema por los factores mencionados con anterioridad. Por lo que respecta a los valores de rapidez de secado obtenidos para la potencia de 311W al inicio también son muy altos iniciando con un valor de -113 Kg/hrs m² y después disminuyen rápidamente pues a los 3 minutos prácticamente el valor que se tiene es de la mitad del inicial. Después de este punto los valores fluctúan pero sin ser tan extremos, teniendo un valor final de -9.2 Kg/hrs m² el cual es un valor considerablemente alto para los valores finales obtenidos en este trabajo.

3.3 Graficas

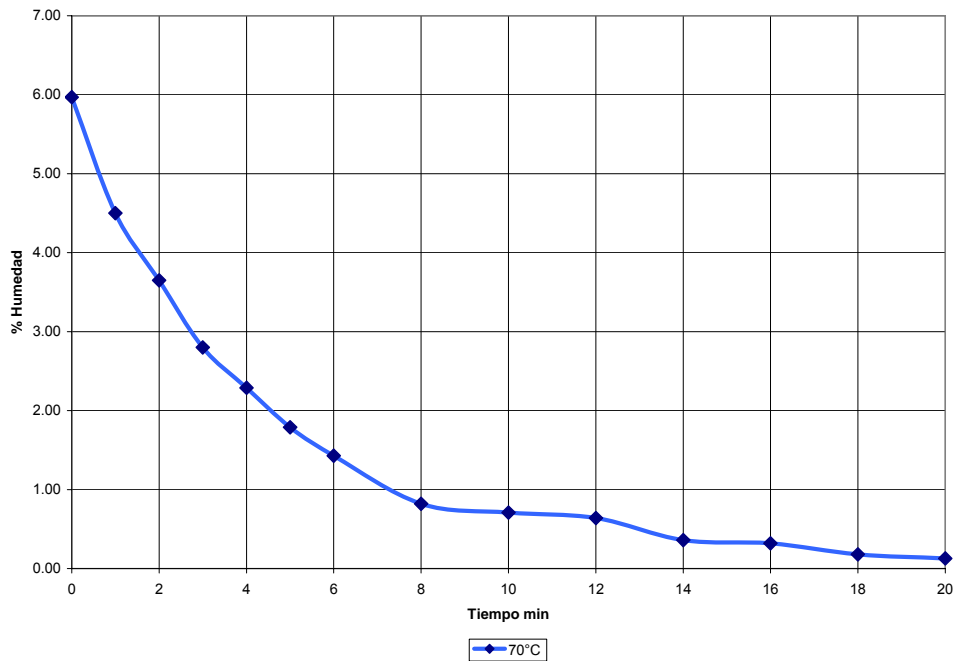
En la grafica 3.1 se muestran los resultados obtenidos para los experimentos del número 49 al 51, mostrando la variación del contenido de humedad con el tiempo de exposición a la radiación con microondas con una potencia de 700 W, manteniendo la temperatura del sistema a 50°C.



Grafica 3.1 Perfil de contenido de humedad para distintos tiempos de exposición en un horno de microondas a 50°C, a una potencia de 700W.

Como se puede ver en esta gráfica, en los primeros 8 minutos la variación del contenido de humedad disminuye desde un 6% hasta un 2% de manera relativamente rápida. Después de este punto, la pérdida de agua se hace mas lenta hasta llegar a un valor limite de 0.5% después de 18 minutos de exposición. Más allá de este punto, la humedad varía muy poco aunque se continúe el tiempo de calentamiento. Este efecto se debe a que como sabemos por debajo de los 0.5% de humedad el sistema contiene una cantidad baja de agua y entonces se hace muy importante la baja absorción de radiación de microondas por medio del polímero PET y por lo tanto el agua adsorbida y absorbida sobre el polímero no puede salir o evaporarse fácilmente, además del control de temperatura que se tiene sobre el sistema.

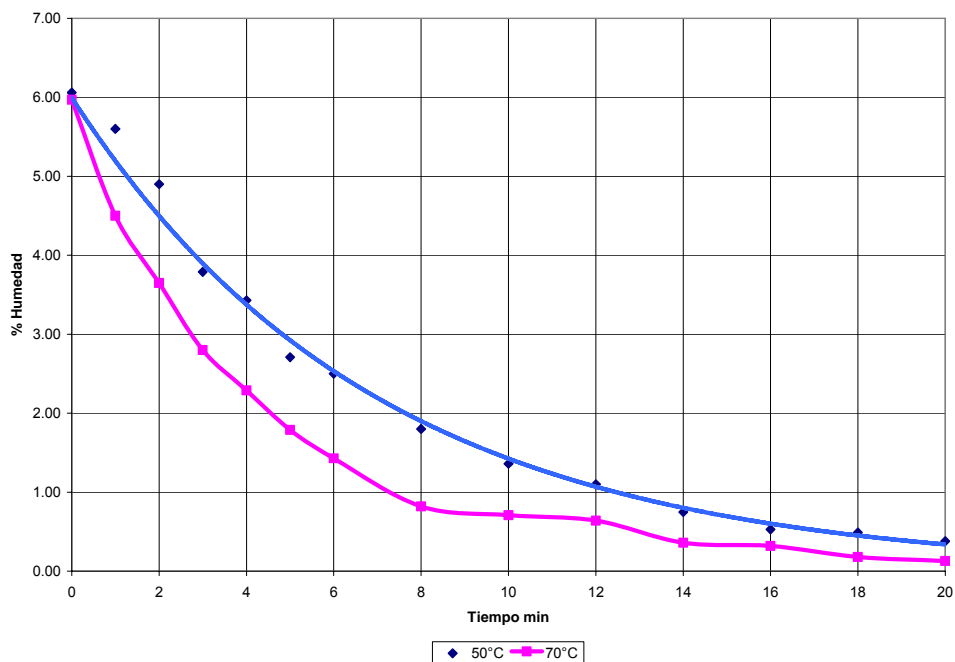
La grafica 3.2 muestra los resultados obtenidos para los experimentos del 62 al 74 como se muestra en la tabla 2.8. aquí es donde se ve de manera gráfica la variación del contenido de humedad con el tiempo de exposición a la radiación con un horno microondas a una potencia de 700 W, manteniendo la temperatura del sistema a 70°C.



Grafica 3.2. Perfil de contenido de humedad para distintos tiempo de exposición en un horno de microondas a 70°C y a una potencia de 700W.

Lo que se puede observar en la grafica 3.2 es que a los ocho minutos de exposición a las microondas el contenido de humedad es menor al 1% (aproximadamente 0.8%) y después el contenido de humedad disminuye de manera mas lenta hasta aproximadamente 0.2% a los 20 minutos de exposición a la radiación. Esta gráfica muestra una disminución mayor del porcentaje de humedad a la obtenida en la gráfica 3.1. Este efecto es causado por que el control de temperatura en estos experimentos fue a una temperatura mayor, con lo cual se facilitó la salida de agua del sistema.

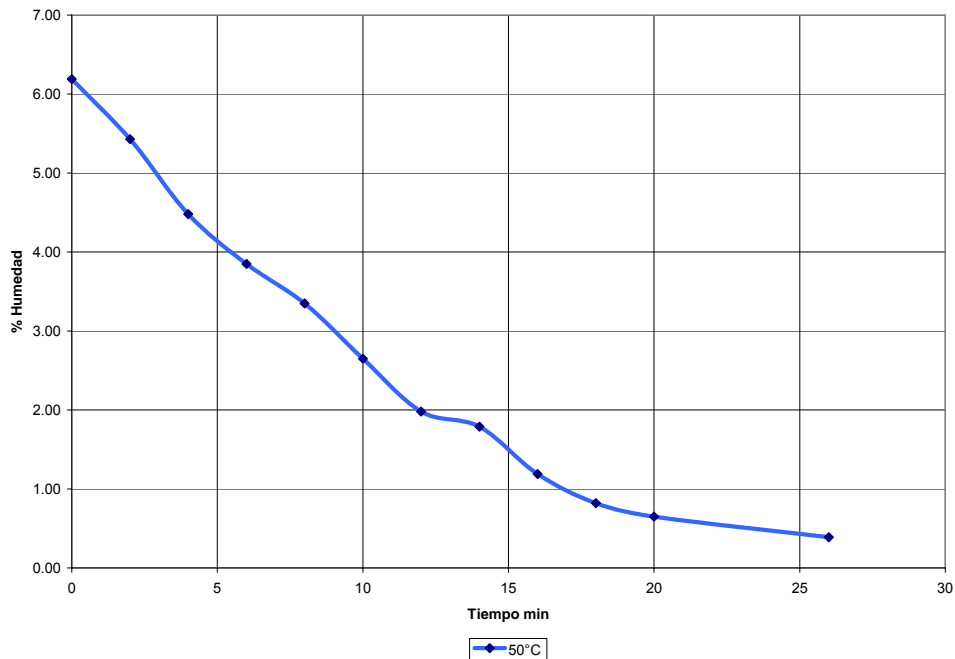
La gráfica 3.3 muestra el comparativo entre el proceso de secado del PET para los 2 procesos de secado, hechos a través de un horno microondas con una potencia de 700W variando las temperaturas de 50°C a 70°C, correspondientes a una de las secciones del diseño de experimentos.



Grafica 3.3. Comparación de perfiles de contenido de humedad para distintos tiempo de exposición en un horno de microondas a 50°C y 70°C

Esta gráfica (3.3) lo que busca es dar un elemento de comparación mas tangible sobre las 2 temperaturas que se seleccionaron para hacer el proceso de secado. Como se puede ver en la curva correspondiente a los 70 °C siempre se encuentra por debajo de la curva correspondiente para los 50°C, aunque después de los 2 minutos las pendientes de secado se ven muy parecidas. Este efecto se debe a que fueron hechas en el mismo horno, a distintas temperaturas. Al final de estas gráficas se puede observar que el secado hecho a 50 °C contiene un porcentaje de humedad de casi el doble al obtenido con una temperatura mayor.

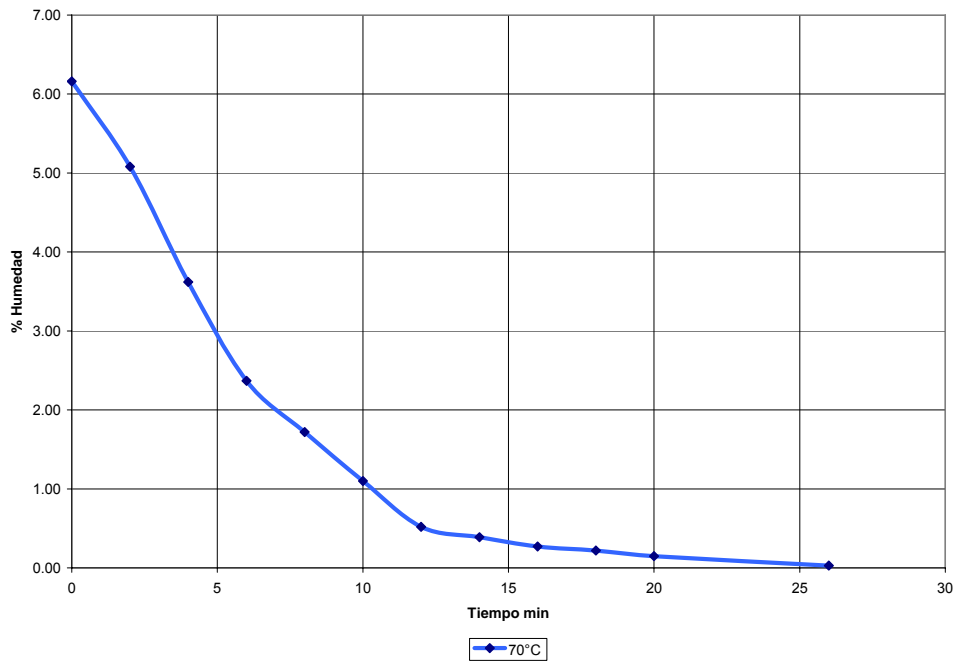
En la grafica 3.4 se muestran los resultados del proceso de secado del PET, empleando un horno eléctrico, a distintos tiempos de exposición, con un control de temperatura de 50°C correspondiente a los experimentos número 27 al 37.



Grafica 3.4. Perfil de contenido de humedad para distintos tiempo de exposición en un horno eléctrico a 50°C.

Esta gráfica nos muestra un comportamiento más constante que las dos gráficas anteriores, casi hasta los 18 minutos su comportamiento no varia, pero después de ese tiempo se vuelve asintótico y al final de la experimentación a los 26 minutos el resultado que tenemos es de 0.4% de humedad.

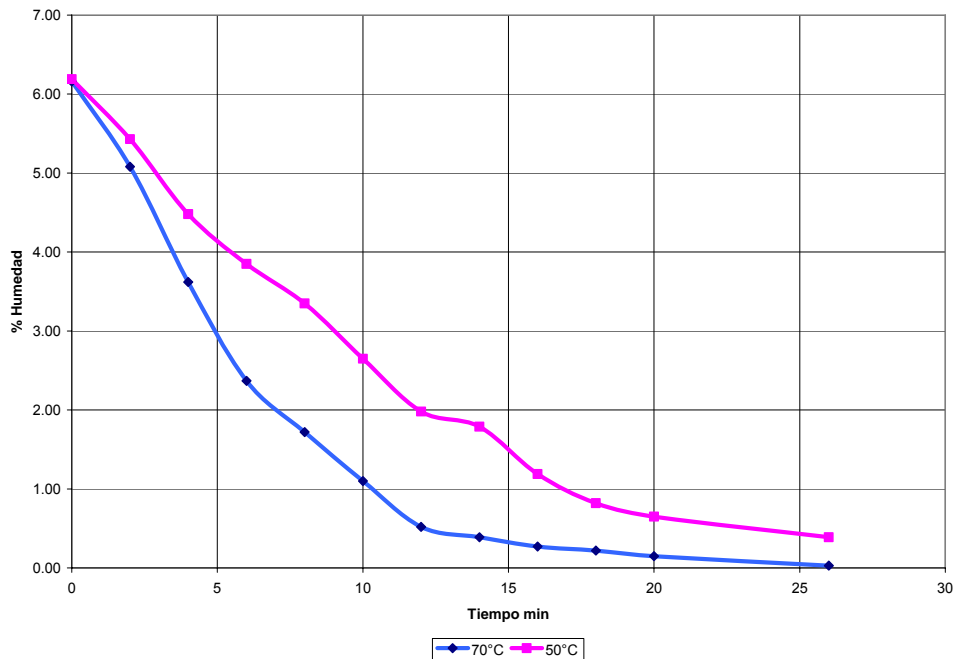
A continuación se presenta la grafica 3.5, la cual muestra los experimentos del número 38 al 48 (tabla 2.5), los cuales fueron hechos en un horno eléctrico con una temperatura de 70°C, la cual se controló durante todo el proceso.



Grafica 3.5 Perfil de contenido de humedad para distintos tiempo de exposición en un horno eléctrico a 70°C

Esta gráfica presenta una disminución mucho mayor del porcentaje de humedad que la gráfica 3.4, se alcanza un valor de 1% de humedad después de los 10 minutos, lo cual es bastante bueno para nuestros intereses. Con respecto al valor final obtenido, el resultado fue el valor de 0.03% de humedad el cual es el valor mas bajo obtenido en todos los experimentos realizados. Sin embargo, este valor es alcanzado hasta los 26 minutos de secado continuo. Este valor es ideal para el proceso de secado de PET.

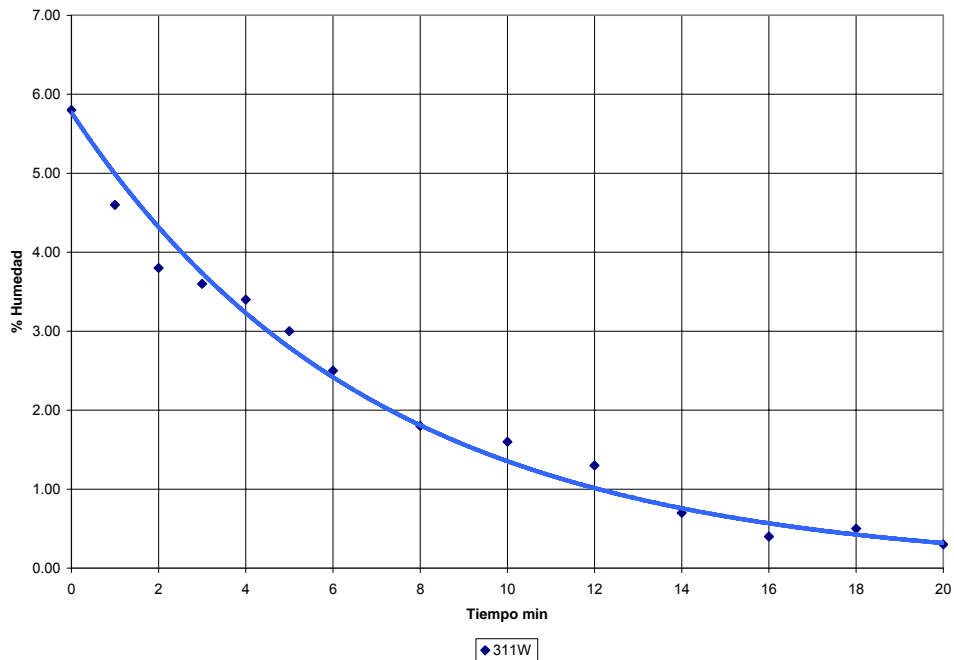
En la gráfica 3.6 se muestra un comparativo entre las distintas temperaturas utilizadas, correspondientes a 50 ° C y 70 ° C a las que fueron sometidas las muestras de PET en los experimentos correspondientes al horno eléctrico.



Gráfica 3.6. Comparación de perfiles de contenido de humedad para distintos tiempo de exposición en un horno eléctrico a 50°C y 70°C

El análisis comparativo de la gráfica 3.6 resulta muy interesante por que nos muestra como varían los resultados del secado con el cambio de una variable como lo es la temperatura. La gráfica muestra que el calentamiento a 70°C es mucho más rápido que el hecho a los 50°C. Por ejemplo tenemos los puntos correspondientes a los 15 minutos, que nos dicen que el contenido de humedad de la muestra correspondiente al secado a la temperatura de 50°C se encuentra en aproximadamente 1.5% mientras que la correspondiente al los 70°C esta aproximadamente al los 0.3%, esta diferencia es de mas de 1% de humedad y es muy significativa. A los 26 minutos también existe una diferencia considerable. Por un lado, a los 70°C se obtiene un valor excepcional de 0.03, con los 50°C el valor obtenido es muy baja, de tan solo de 0.5%, lo cual está muy alejado de lo idóneo o deseable.

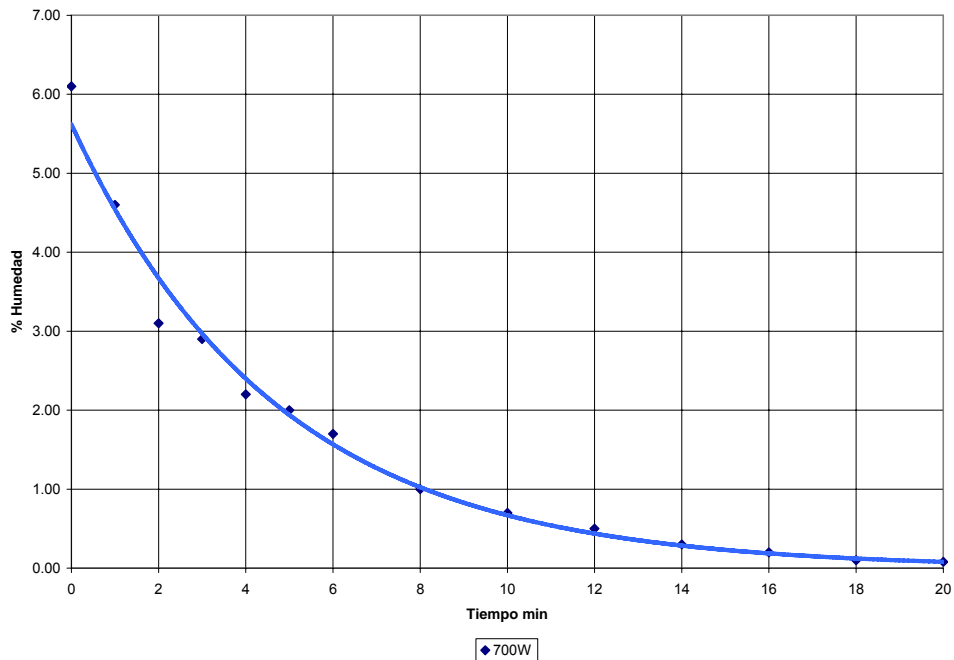
En la siguiente gráfica 3.7 se muestran los resultados obtenidos para los experimentos del 1 al 13 (tabla 2.2), en donde se puede observar de manera gráfica la variación del contenido de humedad en función del tiempo de exposición a la radiación microondas con una potencia de 311 W.



Gráfica 3.7. Perfil de contenido de humedad para distintos tiempo de exposición en un horno de microondas trabajando a una potencia de 311W

Esta gráfica muestra una variación del porcentaje de humedad contra el tiempo de radiación en un horno microondas con una potencia baja. Se observa que a 10 minutos se tiene aproximadamente 1.8% de humedad, lo cual es un buen resultado. Al final de la experimentación los resultados correspondientes de los 16 minutos hasta los 20 minutos, el valor del porcentaje de humedad se mantiene constante en 0.5%. Este fenómeno también se presenta en los experimentos relacionados con el horno de microondas a una potencia mas alta, este fenómeno se trato de explicar con anterioridad en las gráficas 3.1 y 3.2.

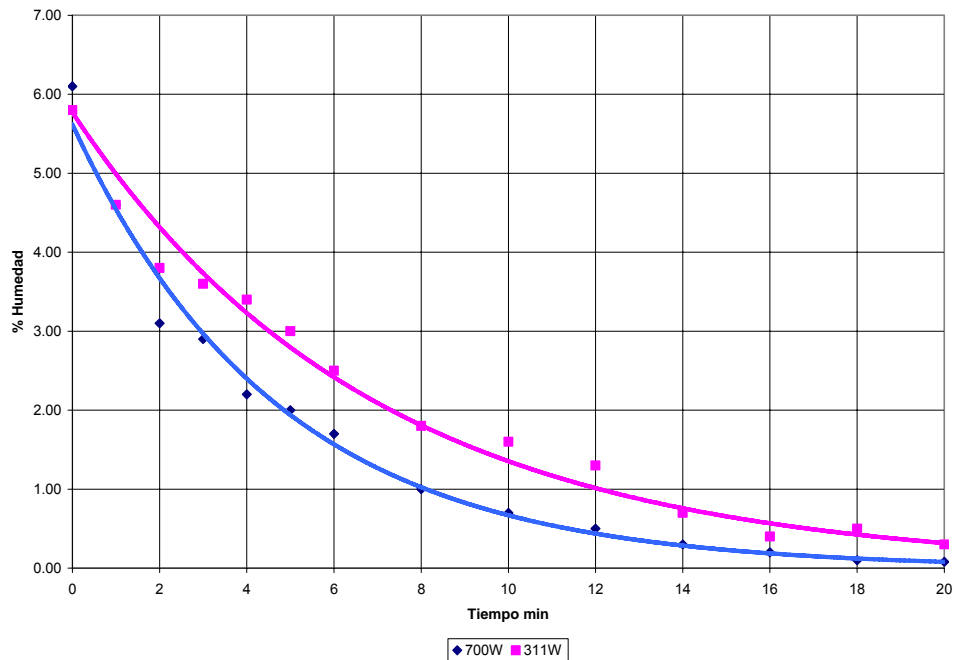
En la grafica 3.8 se muestran los resultados obtenidos en la tabla 2.2 donde se ve de manera gráfica la variación del contenido de humedad con el tiempo de exposición a la radiación de un horno microondas con una potencia de 700 W, correspondientes al los experimentos 14 al 26.



Gráfica 3.8. Perfil de contenido de humedad para distintos tiempo de exposición a un horno de microondas trabajando a una potencia de 700W

Esta gráfica es una de las mas importantes en este trabajo, por que presenta de manera gráfica lo que se esta buscando, una mejora significativa entre los procesos de secado aquí analizados, como lo muestra esta gráfica los resultados obtenidos en tiempos cortos como a 5 minutos, donde se reduce el contenido de humedad hasta aproximadamente un 2%. Este resultado es bastante bueno, pues en un tiempo muy corto se reduce de manera muy significativa el porcentaje de humedad. Después de los 5 minutos la variación de la humedad es mas lenta, muy parecida a los otros experimentos utilizando el horno de microondas, y como se esperaba al final el porcentaje de humedad permanece constante. Sin embargo, se llega a observar una disminución mayor a la de los anteriores experimentos, llegando al final hasta al 1% de humedad.

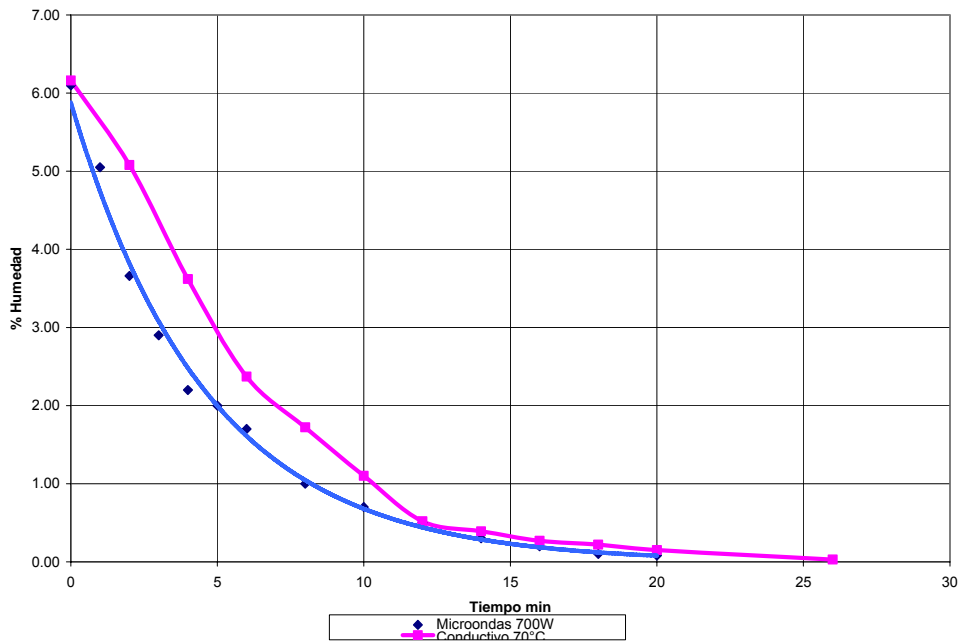
En la gráfica 3.9 se muestra el comparativo entre el proceso de secado del PET para el proceso de secado, hecho a través de un horno microondas con un potencia de 700W y 311W, correspondientes a una de las secciones del diseño de experimentos.



Grafica 3.9. Comparación de perfiles de contenido de humedad para distintos tiempo de exposición a un horno de microondas con las potencias de 311 y 700W

En la gráfica 3.9 se presenta el comparativo entre el secado de PET hecho con un horno microondas a distintas potencias (331W y 700W). En la gráficas se observa que a una potencia de 700W el secado es mas rápido que el hecho con una potencia menor (311W) por que en tiempos mas cortos se obtiene una mayor cantidad de agua separada del sistema. Por ejemplo a los 5 minutos aunque los dos presentan una buena disminución en el contenido de humedad, para la potencia de 700 W se tiene un contenido de humedad 2% y para la potencia de 311W es un punto porcentual mayor que la anterior potencia. Después de este punto, los comportamientos se mantienen muy similares. De hecho las curvas parecen casi iguales pero con la diferencia de que una esta mas arriba del la otra. Al final de la experimentación el contenido de humedad para ambas series de experimentos se estabiliza tal y como ocurre en los anteriores experimentos donde se utilizó el horno microondas.

Es la gráfica 3.10 se presenta un comparativo muy importante donde se muestra uno de los objetivos de esta tesis el cual es la comparación entre los procesos de secado entre un horno eléctrico con una temperatura controlada de 70°C con un horno microondas con una potencia de 700W.

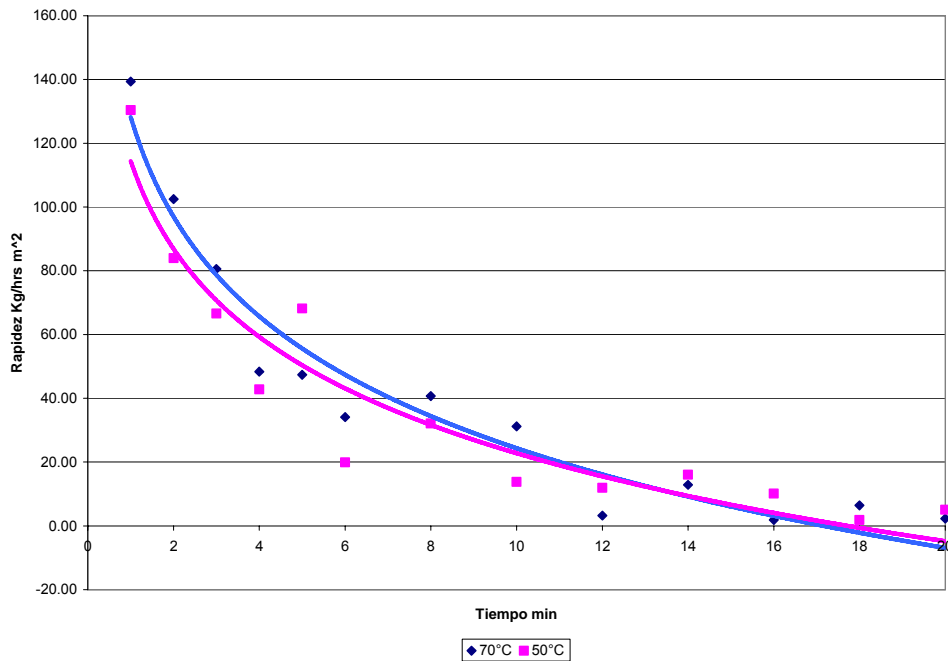


Grafica 3.10. Comparación de perfiles de contenido de humedad para distintos tiempo de exposición con un horno de microondas a 700W de potencia y un horno eléctrico con una temperatura de 70°C.

Esta gráfica es muy importante para este trabajo de tesis por que presenta de manera gráfica uno de los objetivos: el comparativo entre los procesos de secado. Se decidió hacer un comparativo entre estas dos series de experimentos por que presentaban los mejores resultados para el tipo de horno seleccionado, por un lado la temperatura de 70°C resulto mejor que la de 50 °C para el horno eléctrico, y por el otro dentro de la sección de horno microondas la potencia de 700W sin un limite de temperatura fijo resulto mejor que los otros experimentos en este horno.

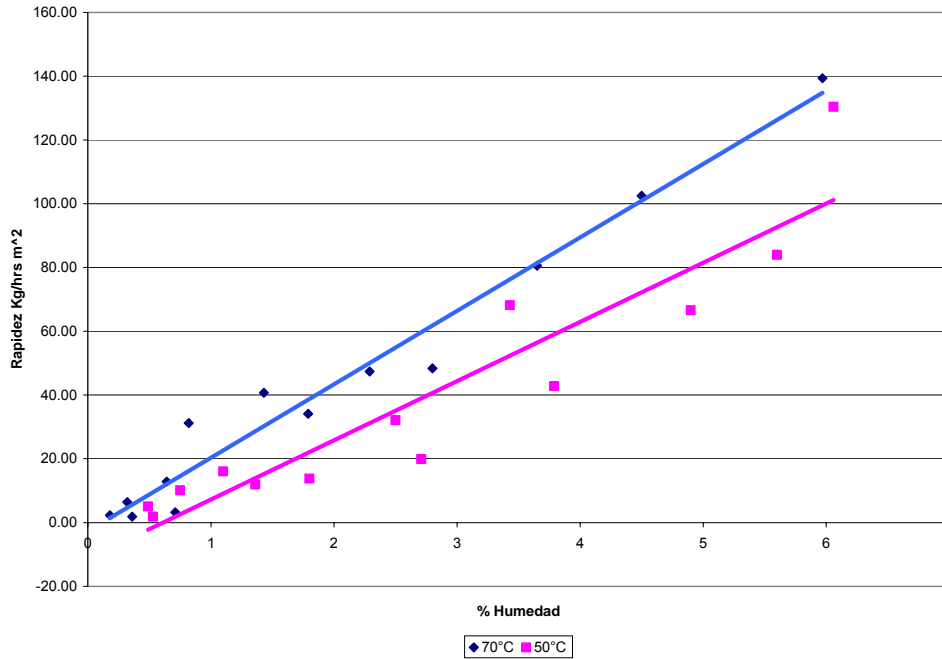
Lo que se analiza de inicio es que a tiempos cortos como de 2 minutos la diferencia es grande entre los dos procesos, se ve que en el horno eléctrico a este tiempo se tiene un contenido de humedad de aproximadamente 5%, mientras que el horno microondas tiene aproximadamente 3% esta es una gran diferencia pues son dos puntos porcentuales mas. Después la diferencia no es tan significativa ni tan grande como en esta condición. El horno microondas sigue estando por debajo de la gráfica del horno eléctrico hasta pasados los 20 minutos donde se cruzan y se ve una ventaja en el contenido de humedad final por parte del horno eléctrico.

Las siguientes gráficas (3.11 – 3.16) presentarán valores de rapidez de secado a los cuales se les cambió el signo de tenían, esto con la finalidad de que se observe de manera más clara la disminución o aumento de las velocidades, pues es más sencillo ver la gráfica en el primer cuadrante. Los valores no fueron modificados, el único cambio es en signo.



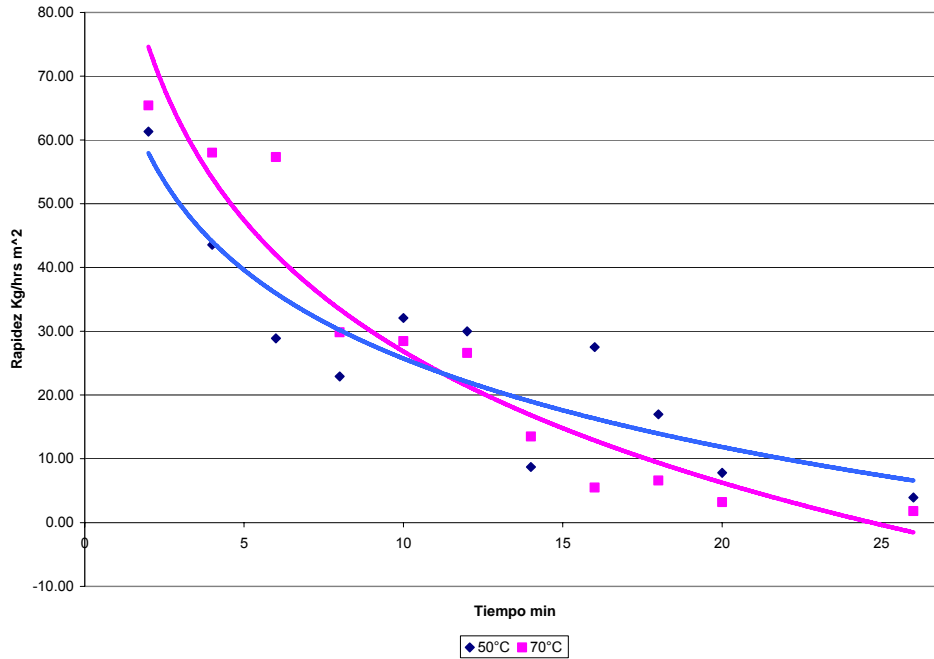
Gráfica 3.11 Comparación de rapidez de secado para distintos tiempos de exposición con un horno de microondas a temperaturas de 50°C y 70°C con una potencia de 700W.

La gráfica 3.11 muestra de manera comparativa las rapidezces de secado para un horno de microondas teniendo como variable la temperatura. Como se observa en esta gráfica existe una velocidad mayor a la temperatura de 70°C hasta los 13 minutos donde la temperatura con una rapidez mayor es la temperatura baja. Cabe mencionar que la diferencia entre las dos curvas no es muy grande.



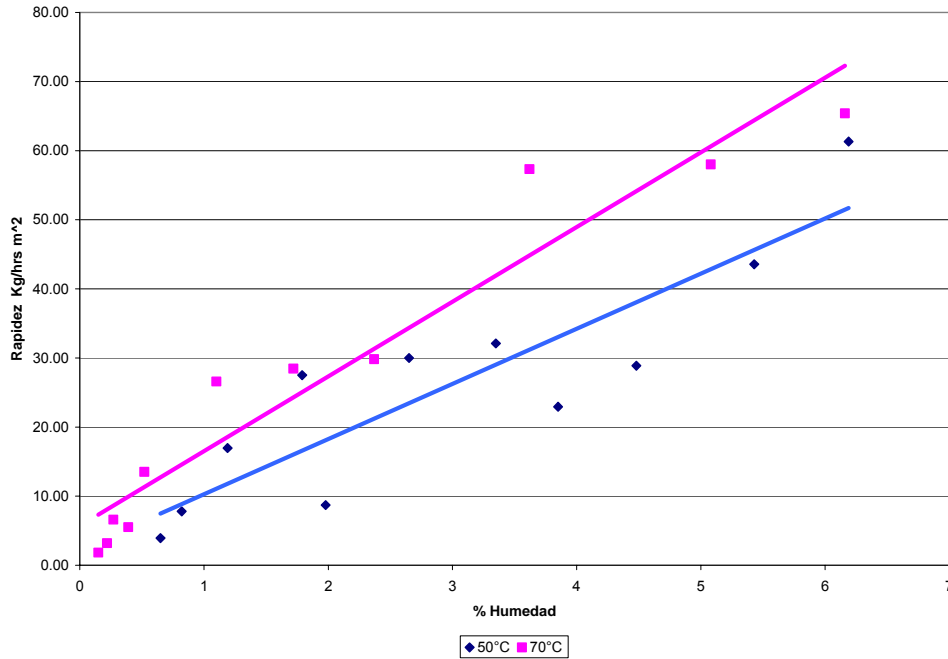
Gráfica 3.12 Comparación de rapidez de secado para distintos contenidos de humedad para un horno de microondas con las temperaturas de 50°C y 70°C

En la gráfica 3.12 se presenta la comparación de las rapidezces de secado contra el contenido de humedad inicial para los experimentos correspondientes al horno de microondas teniendo como variable la temperatura. Lo que se observa es una tendencia idéntica para ambas líneas, donde a mayor contenido de humedad la rapidez con la que el agua es separada del sistema es mayor. La diferencia que se ve en las dos líneas, es el resultado de la variación de temperatura, pues con una temperatura más alta la rapidez de sacado es mayor.



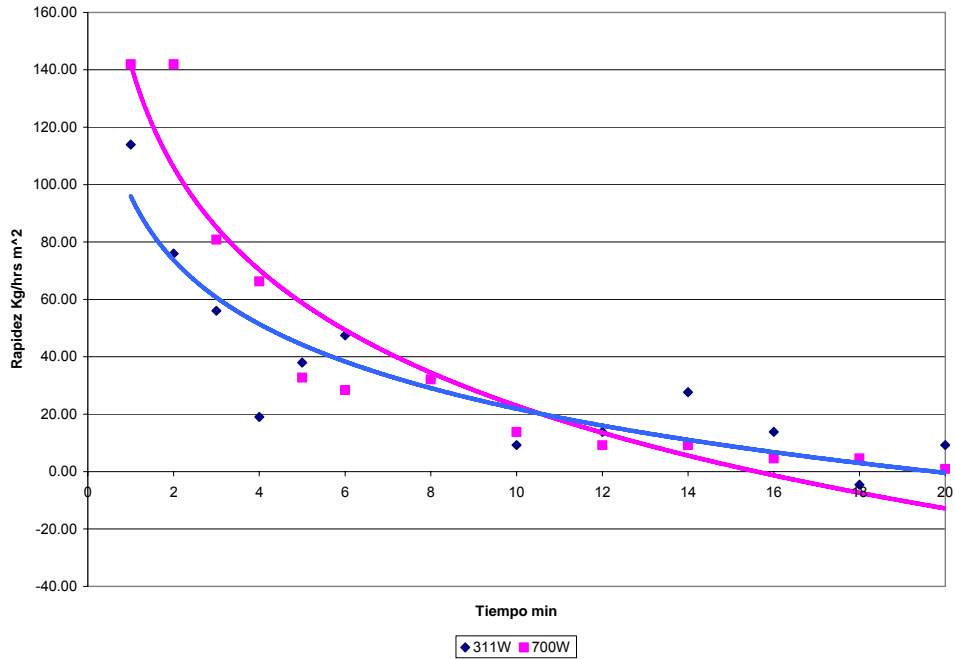
Gráfica 3.13 Comparación de rapidez de secado para distintos tiempos de exposición con un horno eléctrico con temperaturas de 50°C y 70°C

La gráfica 3.13 permite hacer una comparación entre la rapidez de secado contra el tiempo, para un horno eléctrico con temperaturas de 50°C y 70°C, donde se muestra claramente que en un principio la rapidez de secado para la temperatura de 70 °C es mayor hasta después de los 10 minutos punto en el cual los resultados se invierten dando lugar a que la rapidez correspondiente a los 50 °C sea mayor. Este fenómeno se debe a que al principio es mayor la rapidez de secado para la temperatura alta, pero después de los 10 minutos se observa que para los experimentos con esta temperatura se redujeron significativamente el contenido de humedad, haciendo que la rapidez disminuya pues es más difícil la separación del agua del sistema. Lo que pasa para la temperatura de 50°C es que como la disminución el contenido de humedad es más lenta, pasados los 10 minutos queda un mayor contenido de humedad por lo que su rapidez después de este punto se vuelve mayor que para la temperatura de 70°C.



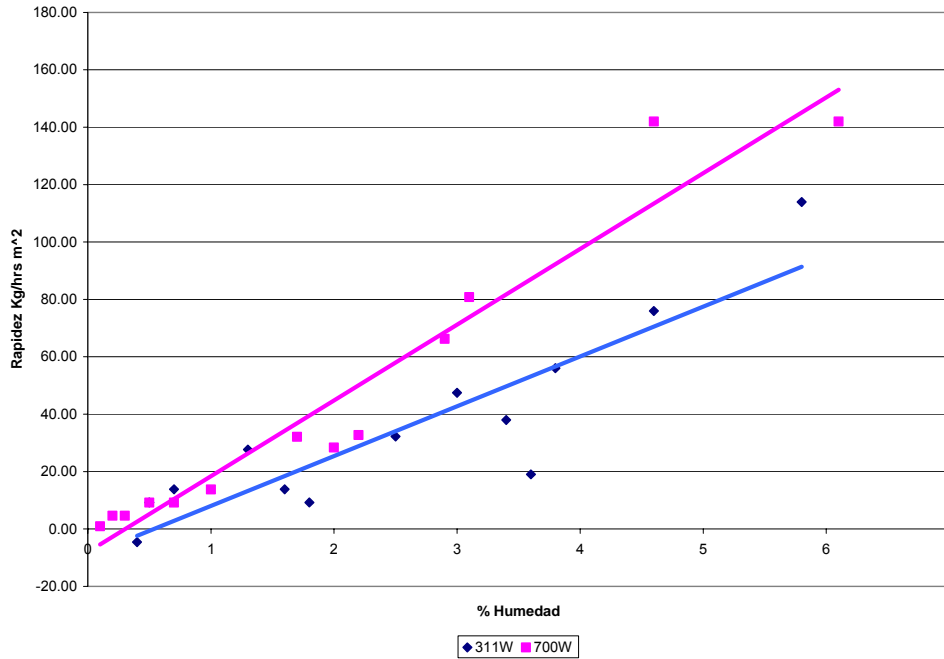
Gráfica 3.14 Comparación de rapidez de secado para distintos contenidos de humedad para un horno eléctrico a 50 y 70°C.

La gráfica 3.14 presenta la comparación de la rapidez de secado contra el contenido de humedad para los experimentos correspondientes al horno de eléctrico teniendo como variable la temperatura. Esta gráfica muestra la misma tendencia para ambos experimentos, donde a mayor contenido de humedad la rapidez de secado es mayor. La diferencia que se observa en las dos líneas es el resultado de la diferencia de temperatura, pues con una temperatura más alta la velocidad o rapidez de secado es mayor.



Gráfica 3.15 Comparación de rapidez de secado para distintos tiempos de exposición con un horno de microondas, a potencias de 311W y 700W

La gráfica 3.15 muestra el comparativo entre la rapidez de secado de PET con un horno de microondas a distintas potencias, y como se observa en la gráfica la rapidez de secado hecha con una potencia de 700W resultó mas alta que con una potencia de 311W para los primeros 10 minutos de trabajo debido a que en tiempos mas cortos se obtiene una mayor cantidad de agua separada del sistema. Después de los 10 minutos, los comportamientos cambian, siendo la curva correspondiente a las rapideces para la potencia de 311W mayor que para la potencia de 700W. Este efecto es similar al que aparece en la gráfica 3.14, en donde se ve este cruce de las líneas experimentales también, debido a que después de los 10 minutos queda mas agua en los experimentos para la potencia baja que para la potencia alta, por lo cual la rapidez es mayor.



Grafica 3.16 Comparación de rapidez de secado para distintos contenido de humedad con un horno de microondas, a diferentes potencias (311W y 700W).

En la gráfica 3.16 se presenta la comparación de la rapidez de secado contra el contenido de humedad para los experimentos correspondientes al horno de microondas variando la potencia. Lo que se observa en la gráfica es una tendencia idéntica para ambas líneas y es similar a las anteriores gráficas donde se analiza la velocidad de secado y contenido de humedad, teniendo como resultado que a mayor contenido de humedad, la rapidez de secado es mayor. También muestra una diferencia entre las dos líneas provocada por el efecto de la potencia, que siendo mayor la velocidad de secado también es mayor para un mismo contenido de humedad.

Capítulo 4

Análisis de resultados y Conclusiones

4.1 Análisis de resultados

Con base en los resultados obtenidos para horno eléctrico y microondas, como se puede observar estos resultados muestran un tiempo de secado menor con horno de microondas (con una potencia de 700 W) pues para obtener un porcentaje de humedad de 1%, esta se obtiene al calentar durante 8 minutos, mientras que para el calentamiento hecho con un horno eléctrico (a 70°C) le toma 11 minutos en alcanzar esta cantidad de humedad.

El estudio realizado para el horno de microondas fijando la potencia a 700W pero variando la temperatura de secado, coincidió con las hipótesis planteadas con anterioridad, donde se muestra que si se aumenta la temperatura de 50 a 70°C se reduce en el tiempo de secado, además de que la velocidad de secado resulta ser mayor para los 70°C, durante los tiempos iniciales de calentamiento pero como se muestran en la gráfica 3.11 después de los 14 minutos la velocidad a 50°C es mayor que la de 70°C debido a que el contenido de humedad para las muestras con un temperatura de 50°C era mayor y como lo muestra la gráfica 3.12 a mayor contenido de humedad mayor es la rapidez de secado.

Lo mismo sucede para la experimentación con el horno eléctrico, al aumentar la temperatura de secado, lo que se obtiene es una disminución en el tiempo de secado para un porcentaje de humedad establecido como por ejemplo para obtener una cantidad de 1% con una temperatura de 50°C, toma 16 minutos alcanzarla, mientras que para 70°C solo le toma 11 minutos llegar a esa condición.

Lo destacable de esta sección de la experimentación es que al efectuar el calentamiento con este sistema se pudo obtener el valor mas bajo de porcentaje de humedad el cual es de 0.03, con el horno de microondas. De acuerdo a las gráficas no se logró esto, debido a que al haber menos cantidad de agua mezclada con el PET, para la microonda es mas difícil interactuar con el agua, debido a que la constante dieléctrica de PET tan baja que este no se calienta y por lo tanto es difícil eliminar el agua restante, llegando así a un porcentaje de humedad de equilibrio. Aunque aumentemos el tiempo de exposición a las microondas el contenido de humedad no varía. Este porcentaje de humedad de equilibrio está entre 0.5 y 0.2%.

Los resultados obtenidos para el calentamiento vía microondas teniendo como variable la potencia del horno, también comprobaron la hipótesis hecha al inicio de este trabajo, mostrando que a una mayor potencia el tiempo de secado para un porcentaje de humedad deseado es menor. El punto a destacar en esta sección es que con la potencia de 700W se obtuvo la rapidez de secado mas alta para todos los experimentos, pues al inicio comenzó con un valor de casi $-141 \text{ Kg. / hrs m}^2$, y este valor permaneció así otro minuto mas. Esto ayudó a llegar con mayor rapidez a un porcentaje de equilibrio en tan solo 5 min., siendo el tiempo mas corto en alcanzar este punto. Por lo que respecta a los experimentos con una potencia baja (311W) los resultados obtenidos son buenos, pues se disminuye de manera constante el contenido de humedad, este efecto es deseable si se quiere tener un mayor control sobre el proceso, pues la disminución del contenido de humedad es mas lenta.

En las gráficas de rapidez de secado contra porcentaje de humedad en todas se observa una misma tendencia, la cual es que a mayor cantidad de humedad en el sistema la rapidez también aumenta. Todas las gráficas para todos los experimentos comprueban esta hipótesis, variando solo los valores puntuales, pero con una misma tendencia. Este efecto es causado por que al existir una mayor cantidad de agua dentro del sistema, es más sencillo retirarla de este.

Un análisis que se puede hacer, es que los resultados dependen del tamaño del material y de su colocación, pues como se especificó el material tenía aproximadamente 0.7 cm^2 de área y se colocaban sobre el porta hojuelas de manera uniforme, al centro de los hornos, este tamaño y coloración de la muestra facilitaban que el proceso se llevara a cabo. Este aspecto de la experimentación es comentado por que el proceso no sería igual si el tamaño de muestra fuera más grande o más pequeño, esto con base en las teorías de secado estudiadas. Con base en estas consideraciones se podría hacer un estudio buscando la dependencia con el tamaño de la muestra y su colocación dentro del horno para el secado.

4.2 Conclusiones

De acuerdo al análisis de resultados hecho en las paginas anteriores, se puede concluir que el horno de microondas tiene un mejor funcionamiento para secar el materia de manera rápida y controlada, y se encontró que al trabajar a 700W de potencia hace que la rapidez de secado sea la mayor a tiempos cortos, con lo cual se comprueba una de las hipótesis propuestas para este proyecto, la cual establecía que la rapidez de secado para un horno de microondas seria mayor que con un horno eléctrico.

El horno eléctrico muestra una mejor capacidad para reducir el contenido de humedad del material a porcentajes de humedades mas bajos, hecho que no puede ser cumplido por el horno de microondas, pues este solo llegaba a hasta un porcentaje de humedad definido como de equilibrio, el cual se encuentra en el intervalo de 0.5% y 0.2% de humedad. La condición de más bajo contenido de humedad se alcanzó con el horno eléctrico trabajando a 70°C, la cual fue de 0.03% de humedad. Este resultado no se contempló dentro de las hipótesis propuestas pero fue grato el poderlo descubrir.

Otra hipótesis confirmada es que al aumentar la temperatura de 50°C a 70°C la velocidad o rapidez de secado fue mayor para ambos tipos de calentamiento, comprobando así el efecto de la temperatura sobre el tiempo de secado, pero con la desventaja de que está cerca del punto de transición vítrea la cual es de 73°C, lo cual hace que el PET cambie sus propiedades pasando de un material sólido amorfo a uno liquido viscoelástico, con lo cual varía la densidad y estructura del material.

Como conclusión final tenemos que este trabajo sirve como base para el diseño de un sistema de secado el cual involucra ambos sistemas, utilizando al inicio un secado con un horno de microondas, esto dará como resultado una disminución rápida del contenido de humedad hasta el punto deseado y después utilizar un horno eléctrico para poder alcanzar las especificaciones deseadas de contenido de humedad para el material PET, para que este pueda ser alimentado al los extrusores, ahorrando tiempo y energía.

Bibliografía

1. Brandrup J. **Polymer handbook**, fourth edition Vol. 2 Wiley Interscience Publication, V-113 a V-119, (1999).
2. Deshayes S. **Microwave Activation in Phase Transfer Catalysis** Tetrahedron, 55, 10851-10870, (1999).
3. Dzie M., et. al. **Studies of Temperature Influence on Volatile Thermal Degradation Products of Poly(ethylene terephthalate)** J Appl Polym Sci, 69, 2377–2381, (1998).
4. Herman F (2002) **Polymeric Materials Encyclopedia**, Vol. 8 John Wiley and Son, New York, N.Y., 6078 – 6100.
5. Jeon H. Y. et al. **Microwave irradiation effect on diffusion of organic molecules in polymer**, European Polymer Journal, 36, 895-899, (2000).
6. Karayannidis A.P. et al **Poly(ethylene terephthalate). Recycling and Recovery of Pure Terephthalic Acid by Alkaline Hydrolysis**. Adv. Polym. Techn, 21, 250–259, (2002).
7. Kroschmitz J. (2003) **Encyclopedia of Polymer Science and Technology**, Vol. 7 John Wiley and Son, New York, N.Y. Interscience, 510 – 515
8. Krzan A. **Microwave Irradiation as an Energy Source in Poly(ethylene terephthalate) Solvolysis** J. Appl. Polym. Sci., 69, 1115–1118, (1998).
9. Ku H.S. et. al. **Applications on fixed and variable microwave (VFM) facilities in polymeric materials processing and joining**. Journal of Material Processing, 113, 184-188, (2001).

10. Langevin D. J. et al **Moisture Sorption in PET Influence on the Termokinetic Parameters** European Polymer Journal, 42, 579-588, (2002).
11. Latham R.J. et. al. **The effect of microwave drying on polymer electrolyte conductivity** J Appl Polym Sci, 75, 1534–1541, (2002).
12. Lewis D. **Microwave processing of polymers- an overview** Material Research Society Symposium Proceedings Vol. 269 (1992).
13. Lidstrom P. **Microwave assisted organism synthesis a review** Tetrahedron report No. 589, 9225-9283, (2001).
14. Lusinchi J.M. et. al. **Recycling of PET and PVC Wastes** J Appl Polym Sci, 69, 657–665, (1998).
15. Mark Herman (2000) **Encyclopedia of polymers science and Engineering**. John Wiley and Son, New York, N.Y, 172-203.
16. Mishra S. et. al. **Chemical Recycling, Kinetics, and Thermodynamics of Poly (Ethylene Terephthalate) (PET) Waste Powder by Nitric Acid Hydrolysis** Polymer Reaction Engineering, 11, 79-99, (2003).
17. Oromiehie A. et. al. **Recycling PET beverage bottles and improving properties** Polymer International, 10, 1389-1394, (2004).
18. Perry John (1963) **Chemical Engineers Handbook** Mc Graw Hill section 3.
19. Saleh A. **Effects of water Absorption on Physical Proprieties and Degree of Molecular Orientation of Poly (Ethylene Terephthalate)**, Polymer Engineering and Science, 26, No 9, 620-625, (1986)

20. Shi S. et. al. **Microwave-assisted wet chemical synthesis: advantages, significance, and steps to industrialization** Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 2, No. 2, 101-110, (2003).
21. Zhou J. et. al. **Research on the technology and the mechanical properties of the microwave processing of polymer** Journal of Materials Processing Technology, 137, 156–158, (2003).
22. Galicia P.(2002) **Prácticas de laboratorio, Procesos de separación 2** Facultad de Química UNAM, 27-32.
23. Mc. Cabe W., Smith (2003) **Operaciones básicas de Ingeniería Química** Editorial Reverté, 997-1005