

Centro de Enseñanza Técnica y Superior

Con reconocimiento de validez oficial de estudios del Gobierno del Estado de Baja California según Acuerdo de fecha 10 de octubre de 1983



Detección de materiales plásticos en flujos de producción por radiofrecuencia

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Presenta:

Oscar Agustín Martínez Rodríguez

Director:

Dr. Alejandro Guzmán Ocegueda
Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS Universidad)

Tijuana, Baja California, México
2019

TITULO DE TESIS

Detección de materiales plásticos en flujos de producción por
radiofrecuencia

Presenta:

Oscar Agustín Martínez Rodríguez

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Alejandro Guzmán Ocegueda

Dr. Oscar Adrian Morales Contreras
Dr. Emilio Hernández Martínez

Dr. Ricardo Martínez Soto
Coordinador del Posgrado en Cety
Tijuana

Oscar Agustin Martínez Rodríguez © 2019
Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor

Resumen de la tesis que presenta Oscar Agustín Martínez Rodríguez como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Detección de materiales plásticos en flujos de producción por radiofrecuencia

Resumen aprobado por:

Nombre y firma del director

En este trabajo es mostrado un método alternativo al análisis químico para la identificación de materiales plásticos en forma de resinas en un ambiente de producción industrial. El uso de radiofrecuencia (RF) es presentado como una opción para el reconocimiento de plásticos en forma rápida y no destructiva.

Para entender el contexto, son explicados el proceso de control de materia prima en una planta de inyección de plástico, los problemas asociados al error en la identificación apropiada de resinas, los conceptos de polímeros y los conceptos relacionados a las propiedades eléctricas de los materiales.

Fueron investigadas tres tipos de tecnologías de sensores basados en campos electromagnéticos alternantes para determinar las propiedades eléctricas de los materiales. La selección del circuito eléctrico (sensor) fue hecha de acuerdo a su sensibilidad, capacidad para diferenciar a los materiales y su costo de fabricación.

Cinco diferentes tipos de resinas fueron muestreados y determinadas sus propiedades eléctricas de acuerdo a su respuesta a las señales de prueba, esto es, fueron tomadas 30 muestras a cada tipo de resina y utilizando el sensor, les fueron aplicadas señales de RF dentro del rango de los 2.6 a 2.7 GHz para medir su comportamiento.

Los resultados obtenidos mostraron la capacidad del sensor seleccionado para medir dos propiedades intrínsecas de los materiales: el valor de la frecuencia donde entran en resonancia y el nivel de absorción de las señales aplicadas. Estas propiedades son únicas para cada tipo de resina y suficientes para diferenciarlas e identificarlas.

Las conclusiones de este trabajo son: es posible utilizar sensores de RF para identificar plásticos y desarrollar un sistema portátil de bajo costo para utilizarse en un ambiente de producción permitiendo identificar en forma inmediata a los diferentes tipos de resina.

Palabras clave: Radiofrecuencia, Analizador vectorial de redes (VNA), Resina, Polímero, Parámetros de dispersión.

Abstract of the thesis presented by Oscar Agustin Martínez Rodríguez as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Engineering with orientation in Radio Frequency

Plastics materials identification in production process by means of radio frequency

Abstract approved by:

Director of thesis

In this work, an alternative method to chemical analysis for the identification of plastic materials in the form of resins in an industrial production environment is shown. The use of radio frequency (RF) is presented for the identification of plastics as a faster and non-destructive option.

To understand the context, it is detailed: the process of control of raw material in a plastic injection plant, the problems associated with the error in the appropriate identification of resins, the concepts of polymers and the concepts related to the electrical properties of the materials.

Three types of sensor technologies based on alternating electromagnetic fields were investigated to determine the electrical properties of the materials. The selection of the electrical circuit (sensor) was made according to its sensitivity, ability to differentiate materials and its manufacturing cost.

Five different types of resin were sampled and their electrical properties determined according to the response to the test signals, that is, 30 samples were taken from each type of resin and using the sensor, RF signals were applied within the range of 2.6 to 2.7 GHz to measure their response.

The results obtained showed the ability of the selected sensor to measure two intrinsic properties of the materials: the value of the frequency where they enter in resonance and the level of absorption of the applied signals. These properties are unique for each type of resin and sufficient to differentiate and identify them.

The conclusions of this work are: it is possible to use RF sensors to identify plastics and develop a low-cost portable system to be used in a production environment allowing the immediate identification of different types of resin.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de manera especial a mi esposa Yane y a nuestros hijos Ulises y Josue, ellos son la base y motivación para cumplir con mis responsabilidades y mantenerme activo buscando la superación profesional.

Son ellos quienes me apoyaron este tiempo dándome sus palabras de aliento para seguir adelante, contribuyendo sin condiciones para lograr las metas propuestas.

Es para mí una gran satisfacción dedicarles a ellos y a mi familia el trabajo, el esfuerzo y dedicación para reunir en estas páginas este conocimiento nuevo.

Agradecimientos

Creo esta es la única página de la tesis escrita con seguridad de que no necesita revisión.

Para empezar, quiero agradecer al Dr. Ricardo Martínez Soto coordinador del posgrado de ingeniería en Tijuana por su apoyo decidido y comprometido, gracias a él por hacer transitable el camino desde el ingreso a la maestría en Cetys Universidad hasta la conclusión de este trabajo.

También al Dr. Alejandro Guzmán Ocegueda por su ayuda a seleccionar y revisar el tema de tesis y su guía y consejos invaluable para plasmar de la mejor manera la intención de esta investigación.

Mi especial agradecimiento al Dr. Humberto Lobato Morales, investigador del CICESE por su orientación y enseñanza en el manejo y comprensión de las técnicas de radiofrecuencia aplicada. Por haber contagiado en nosotros el interés en la ciencia y la investigación. Y a los Ingenieros Felipe Cortes y Jose de la Toba por su soporte en los distintos trabajos y jornadas compartidas, por ser compañeros en esta aventura del conocimiento.

Por último, un agradecimiento a mis padres, este también es un logro compartido que les trae felicidad.

Tijuana B.C. Septiembre 10 2019

Tabla de contenido

	Página
Resumen español	ii
Resumen inglés	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	x
Capítulo 1. Introducción	11
1.1 Respuesta de los materiales a campos electromagnéticos en alta frecuencia	12
1.2 Breve historia de los polímeros.....	13
1.3 Identificación de plásticos	14
1.4 Organización interna del documento	14
1.5 Literatura consultada	15
Capítulo 2. Antecedentes	17
2.1 Relevancia de los Plásticos	17
2.2 Aplicaciones de los Plásticos (polímeros).....	18
2.3 Identificación apropiada de los polímeros.....	20
2.3.1 Aplicaciones de Radio frecuencia y Micro ondas para el análisis y espectroscopía de impedancias como alternativa para identificar polímeros	20
2.3.2 Casos de uso de radio frecuencia para la identificación y caracterización	21
2.3.3 Materiales Plásticos y Dielectricidad.....	22
2.4 Mediciones dieléctricas.....	23
2.4.1 Concepto básico de polímeros dieléctricos.....	26
2.5 Interacciones electromagnéticas con materiales dieléctricos sólidos, líquidos y magnéticos	27
Capítulo 3. Justificación	30
3.1 Control de resinas en Ensambles Hyson	30
3.1.2 Frecuencia de las verificaciones de resina.....	31
3.2 Control de resinas en el piso de producción.....	33

3.3 Eventos y costo de resinas equivocadas	35
3.4 Pregunta de investigación.....	37
3.5 Hipótesis	37
Capítulo 4. Objetivos.....	38
4.1 Objetivo general.....	38
4.2 Objetivos específicos	38
Capítulo 5. Metodología	39
5.1 Técnicas de muestreo.....	39
5.2 Selección de la población y número de muestras	431
5.2.1 Selección de las muestras.....	43
5.3 Materiales a utilizar	45
5.4 Procedimiento	46
Capítulo 6. Resultados.....	48
6.1 Selección de las resinas	48
6.2 Selección del sensor para diferenciar los materiales	49
6.2.1 Especificaciones del sensor	49
6.2.2 Evaluación de la respuesta de las muestras de resina	51
6.2.3 Respuesta obtenida	52
6.2.4 Intervalos de confianza y clases.....	53
6.2.5 Propuesta de ensamble sistema portátil	537
Capítulo 7. Discusión de los resultados.....	58
Capítulo 8. Conclusiones.....	61
Lista de referencias bibliográficas	62

Lista de figuras

Figura	Página
1 Producción de plásticos a partir de petróleo virgen.	17
2 Principales tipos de resina y sus aplicaciones.	19
3 Rango de frecuencia de varias categorías de accesorios dieléctricos de prueba... 24	24
4 Variación en ϵ' de la muestra en las regiones de baja y alta frecuencia.....	25
5 Mecanismos de polarización de los materiales.....	26
6 Campos electromagnéticos en los materiales.....	29
7 Prueba para identificación de materiales plásticos en Ensamblés Hyson.	31
8 Manejo de resinas en una planta de inyección de plásticos	33
9 Control de cambio de resina semi automático	34
10 El material es surtido al pie de máquina	34
11 Depósito de resina al pie de la máquina.	36
12 Matriz de métodos de medición dieléctrica agrupados y organizados según la categoría del material.	40
13 Equipo utilizado para determinar la capacitancia, constante dieléctrica y factor de disipación de los materiales.....	41
14 Histograma de frecuencia relativa utilizado para elaborar intervalos de clases.....	43
15 Plan de medición de las muestras.	44
16 Gráfica de caracterización basada en las mediciones de las resinas.....	45
17 Equipos propuestos para evaluar las muestras de resina.	46
18 Consumo anual de resinas en Ensamblés Hyson registradas en 2018.....	47
19 El flujo general del proceso de medición de la permisividad con el material bajo prueba.....	47
20 Muestras de material para la caracterización de resinas.	48

21	Guía de onda integrada al substrato y estructura SIW de compuesto CRLH.	50
22	Prototipo de sensor para detección de los tipos de plástico	50
23	Proceso de evaluación del sistema y resinas en el laboratorio.....	52
24	Respuesta de las resinas al ser medidas.	52
25	Utilización del equipo VNA.....	53
26	La media muestral y distribución normal.....	55
27	Distribución de la respuesta en frecuencia de las muestras de resina.	56
28	Graficas de la distribución normal de la respuesta en frecuencia.....	56
29	Propuesta de ensamble de un sistema portátil para evaluación de las resinas	57

Lista de tablas

Tabla	Página
1 Bandas de Radio Frecuencia.....	27
2 Frecuencia mensual de las verificaciones de resina utilizando el equipo medidor del índice de flujo de fusión.	32
3 Resinas seleccionadas y sus características.	48
4 Respuestas leídas del sensor al aplicar muestreo.....	54
5 La distribución de las muestras (media y desviación estandar) y los intervalos de confianza.....	55

Capítulo 1. Introducción

La producción de plásticos está basada en materias primas fósiles, con un importante impacto en las emisiones de carbón, volviéndose más significativo con el aumento anual en el consumo. Más del 90% de los plásticos producidos son derivados de materias primas fósiles vírgenes. Esto representa, para todos los plásticos (no solo los empaques), alrededor del 6% del consumo mundial de petróleo, equivalente al consumo de petróleo del sector global de la aviación. Si continúa el fuerte crecimiento actual del uso de plásticos como es esperado, el sector de los plásticos representará 20% del consumo total de petróleo y 15% del anual global presupuesto de carbono para 2050. Los plásticos a menudo contienen una mezcla compleja de químicos sustancias, útiles para la producción industrial, pero de las cuales algunas plantean preocupaciones sobre el potencial efectos adversos en el medio ambiente. (Neufeld et al, 2016).

La importancia de investigar las relaciones entre los plásticos y los sistemas para identificarlos radica en la oportunidad de ahorros económicos y reducción de tiempos de procesos en la industria. Es posible el desarrollo de nuevas herramientas capaces de detectar las propiedades de los materiales utilizados en el piso de producción en forma instantánea y a costos más bajos, al utilizar técnicas de medición no invasivas (Schindler, A., 2017).

Ante el escenario tecnológico actual, surgen las preguntas:

¿Qué tecnología diferente a las conocidas puede utilizarse como herramienta para identificar plásticos?

¿Esta nueva herramienta de identificación puede construirse a un bajo costo y ser portátil para su uso en un ambiente de producción fuera de los laboratorios?

El presente trabajo de tesis tiene como principal propósito describir el desarrollo de un sistema para la identificación de *polímeros plásticos*, alternativo a los sistemas de identificación actuales. Para esto, son analizadas las propiedades eléctricas de resinas

plásticas y explicadas las tecnologías de detección de materiales por medio de circuitos de radiofrecuencia.

La importancia del trabajo descrito en esta tesis es la propuesta del uso de herramientas de telecomunicaciones en otro campo, el de la identificación y caracterización de materiales. La identificación de materiales, como por ejemplo polímeros, es de gran interés, particularmente con respecto al control de calidad de las materias primas y el análisis de fallas de elementos de construcción completos (Schindler, A., 2017).

Incluye además, la novedad de utilizar circuitos diminutos de bajo costo basados en señales electromagnéticas en aplicaciones para medir las propiedades eléctricas de los materiales.

Actualmente existen esfuerzos enfocados en la identificación de materias primas en forma líquida o sólida utilizando diferentes técnicas; en el caso de los plásticos están siendo aplicadas diversas tecnologías buscando reemplazar las pruebas químicas tradicionales; por ejemplo: 1) Uso de ondas ultrasónicas para medir la respuesta en frecuencia de diferentes plásticos (Kabir, M. F., 1998), 2) Reciclaje de partes plásticas por sorteo utilizando espectroscopia (ondas cercanas al infra rojo) y rayos X (Bruno, E., 2000), 3) Análisis térmico por escaneo diferencial de calor (DSC), en este son observados los efectos calóricos como la transición hacia la cristalización y la fundición (Schindler, A., 2017). Todas estas tecnologías tienen como común denominador el uso de equipo especializado y de construcción compleja.

1.1 Respuesta de los materiales a campos electromagnéticos en alta frecuencia

Las ondas electromagnéticas (EM) en el rango de alta frecuencia pueden operar de una manera distinta a las señales de baja frecuencia, esto es traducido en ejemplos tales como la capacidad de viajar a través de estructuras de ondas guiadas, la capacidad de lanzarse desde antenas como ondas de propagación y la capacidad de transportar información de banda ancha sobre largas distancias.

Al aplicar campos EM de alta frecuencia en la exploración científica y el desarrollo de productos, los investigadores e ingenieros pueden explorar parámetros de material

precisos para extraer resultados y predecir el comportamiento de sus productos (Baker-Jarvis, J. 2010)

1.2 Breve historia de los polímeros

La definición más simple de un polímero es la repetición de muchas unidades pequeñas, generalmente hidrocarburos; un polímero es como una cadena donde cada unión es una unidad básica, hecha de carbono, hidrógeno, oxígeno, y/o silicio. En el siglo XIX ocurrió el primer desarrollo, al procesar polímeros naturales o combinarlos con químicos para hacer sustancias útiles. Estos polímeros fueron llamados "Polímeros naturales modificados" o "Polímeros semi-sintéticos". El primero y más famoso de éstos es el caucho vulcanizado. En 1839, *Charles Goodyear* descubrió, después de años de experimentación, que la savia del árbol del hevea (látex) podría calentarse con el azufre para alterar las propiedades físicas del látex permanentemente, evitando sus limitaciones naturales, pues este era quebradizo en el frío y era fundido a altas temperaturas.

Fue hasta la Segunda Guerra Mundial donde la industria de los polímeros tomó un cambio significativo, para esta época, la tecnología para producir los polímeros sintéticos de los químicos estaba siendo desarrollada rápidamente, pero las aplicaciones no siempre eran comercialmente factibles o aprovechables. Las sustancias naturales estaban generalmente disponibles; por consiguiente, los materiales sintéticos no eran tan necesarios. Como antecedente, en la década del 30, químicos ingleses descubrieron que el gas etileno polimerizaba bajo la acción del calor y la presión, formando un termoplástico llamado polietileno (PE). Hacia los años 50 aparece el polipropileno (PP). Al reemplazar en el etileno un átomo de hidrógeno por uno de cloruro fue producido el cloruro de polivinilo (PVC), un plástico duro y resistente al fuego, especialmente adecuado para tubería de todo tipo. Al agregarles diversos aditivos es generado un material más blando, sustitutivo del caucho, comúnmente usado para ropa impermeable, manteles, cortinas y juguetes. Otro de los plásticos desarrollados en los años 30 en Alemania fue el poli estireno (PS), un material muy transparente comúnmente utilizado para vasos y popotes. El poli estireno expandido (EPS), una espuma blanca y rígida, es usado básicamente para embalaje y aislante térmico.

1.3 Identificación de plásticos

Los materiales termoplásticos pueden ser reutilizados mediante diferentes procesos de reciclaje, para los cuales, el paso más importante lo constituye la clasificación de los materiales. Pero también, como materia prima, los polímeros requieren de una apropiada identificación a fin de evitar errores en su uso en los procesos de producción. Las pruebas de laboratorio pueden servir para determinar los componentes de un material desconocido. Algunos métodos de pruebas muy sencillas son mostrados a continuación con el fin de dar las pautas necesarias para identificar fácilmente los tipos básicos de polímeros termoplásticos. Las resinas de polímeros pueden identificarse por las siguientes pruebas fundamentales:

- Marca normalizada
- Aspecto físico
- Efectos de calor
- Prueba Belstein
- Solubilidad
- Densidad relativa

1.4 Organización interna del documento

El presente trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera en sus capítulos centrales:

En el capítulo 2 es abordada la importancia y relevancia de los plásticos en la actualidad como un elemento presente en la vida diaria de millones de personas, sus aplicaciones y clasificaciones. Además son detallados ejemplos de la aplicación de radiofrecuencia para la identificación de diferentes elementos materiales. Es introducido el concepto de di-electricidad y polímeros dieléctricos.

En el capítulo 3 es detallado el proceso de control de resinas en la planta Ensamblados Hyson de Tijuana, con estimaciones en el historial de los costos del error en el uso de resinas equivocadas. Son introducidas en este capítulo la pregunta de investigación y las hipótesis de investigación y nula.

En el capítulo 4 son planteados los objetivos perseguidos en esta tesis.

En el capítulo 5 la metodología es explicada, indicando paso a paso como fue llevada a cabo la investigación y el desarrollo, las técnicas de muestreo de las resinas y el procedimiento para obtener las características del material muestreado.

En el capítulo 6 los resultados son presentados, haciendo énfasis en cómo fue seleccionado el sensor utilizado, el proceso de medición de la respuesta de las resinas, las diferencias encontradas para la caracterización y definición de las respuestas de cada una de las resinas y la propuesta del sistema a desarrollar e implementar como herramienta de evaluación en el piso de producción.

Las conclusiones encontradas en el capítulo 7 resumen los resultados de la investigación y ofrece el panorama completo de lo obtenido a través de la metodología y las pruebas de los elementos seleccionados para elaborar la nueva herramienta.

1.5 Literatura consultada

Existen muchas técnicas disponibles para identificar la resina química del plástico. Técnicas simples como la quema del color y el olor del humo, así como la prueba de sumersión en agua pueden identificar los plásticos (Brinson, H.F., 2015). Pero, para los sistemas de clasificación automática, existen diferentes técnicas diferentes entre sí, la identificación es para un material polimérico entre materiales no poliméricos o entre diferentes tipos de polímeros. En realidad, la clasificación de la resina es una operación crítica pues mezclar algunos de ellos puede causar un serio problema. Por ejemplo, el PVC ha sido un impedimento particularmente significativo para el reciclaje de PET. El PET y el PVC a veces pueden ser imposibles de separar con el ojo humano. Cuando el PET contaminado con PVC es derretido, el resultado es ácido clorhídrico, corrosivo a las partes metálicas de las máquinas de procesamiento. Tan solo 50 partes por millón de partes (ppm) de PVC pueden contaminar una carga completa de PET y hacer la carga no comercializable (Ehrenstein, G.W., 2004).

La identificación de la resina puede llevarse a cabo utilizando métodos químicos aplicando reacciones químicas para separar diferentes tipos de polímeros, o utilizando métodos mecánicos basados en su densidad, como la clasificación del aire y el agua (Ehrenstein, G.W., 2004). O utilizando tecnología de identificación electromagnética midiendo la relación de absorción del espectro electromagnético (Malyshkin, A. K.,

2012). Los diferentes plásticos difieren en su relación de absorción de luz en el espectro electromagnético proveniente de diferentes fuentes, como rayos X, láser y luz infrarroja cercana (NIR) (Mitchell, G, 2013).

Otra tecnología de identificación de resina está basada en la separación electrostática mediante el uso de un sistema para atraer o rechazar diferentes plásticos de acuerdo con su carga, haciendo a los diferentes plásticos realizar diferentes movimientos. Los polímeros pueden también clasificarse por la diferencia del punto de fusión; normalmente es usada para clasificar dos polímeros por medio de una cinta transportadora caliente o un rodillo caliente trabajando en una cinta transportadora donde es depositada una monocapa de escamas. Un tipo quedara pegado mientras el otro tipo cae por gravedad (Bruno, E., 2000).

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 Relevancia de los Plásticos

Los plásticos son el material omnipresente de trabajo de la economía moderna, no tienen rival pues combinan propiedades funcionales con bajo costo. Su uso ha aumentado veinte veces en el último medio siglo y su demanda está estimada sea duplicada de nuevo en los próximos 20 años. En este periodo, su producción mundial aumentó de 15 millones de toneladas en 1964 a 350 millones de toneladas en 2015 como lo muestra la figura 1.

Hoy las personas en todas partes y todos los días entran en contacto con los plásticos, especialmente con empaques. Aunque entrega altos beneficios, la economía del plástico tiene inconvenientes los cuales son evidentes día a día. Como por ejemplo, después del primer uso el 95% de los envases de plástico son desperdiciados, este valor material es de \$ 80-120 mil millones anuales (Neufeld et al, 2016).

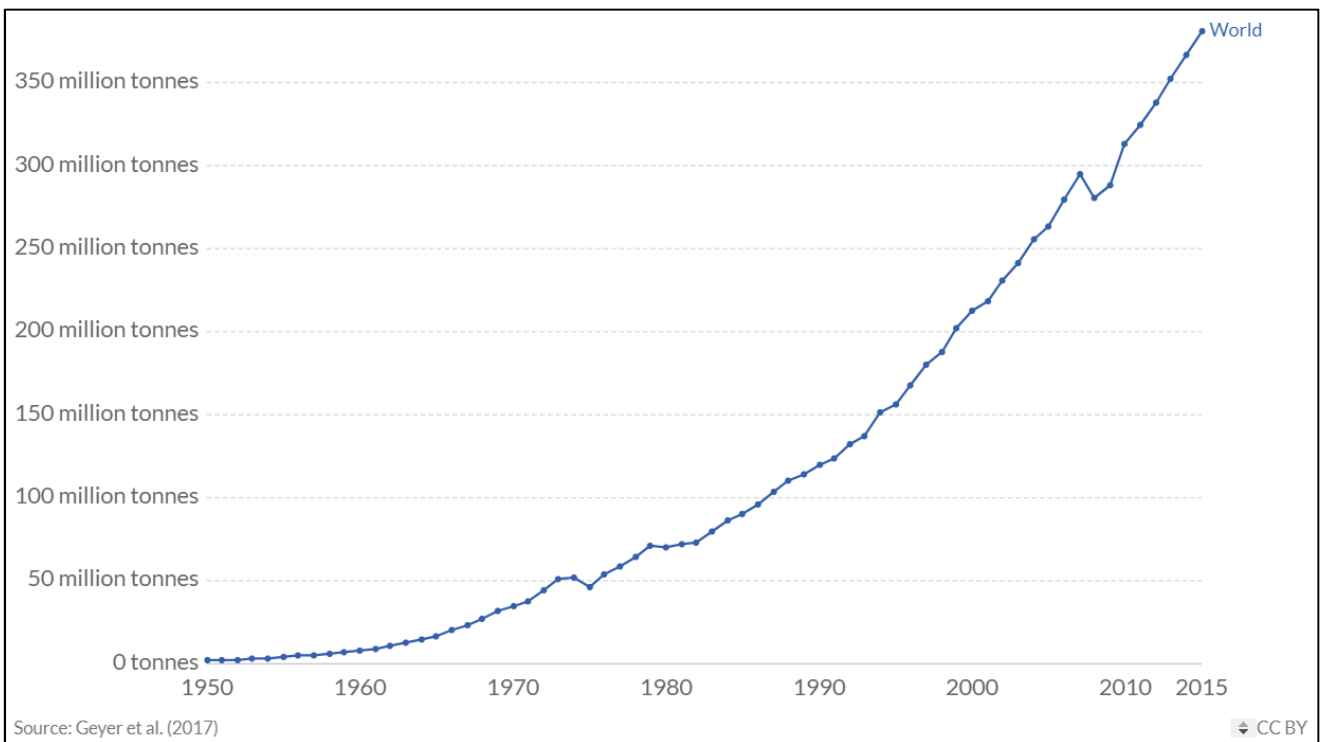


Figura 1. Producción de plásticos a partir de petróleo virgen (no incluye derivados bio-basados o basados en gases).

Fuente: (*Plastics Europe, 2015*)

La visión general de la nueva economía contempla a los plásticos no convertidos en residuos; más bien, entrando al sistema productivo como valiosos nutrientes técnicos o biológicos (Neufeld et al, 2016).

La clasificación de las categorías de resina en los plásticos es importante debido a las diversas características de cada uno de los diferentes tipos existentes. Por ejemplo, para reciclar plástico en resinas utilizables con las características deseadas, debe categorizarse y separarse solo residuos de un tipo de resina. Las empresas compradoras de resinas recicladas requieren de éstas las mismas características halladas en las resinas vírgenes. De lo contrario, no es eficiente usar materiales reciclados. Por lo tanto, los plásticos clasificados por tipo de resina tienen el mayor valor de mercado. Otro ejemplo clave de la necesidad de plásticos adecuadamente clasificados para el reciclaje es el caso del PET y PVC (los tipos de plásticos son mostrados en la figura 2), pues son indistinguibles a la vista. Estas dos resinas son contaminantes el uno para el otro, combinaciones de PVC y PET pueden resultar en la liberación de gases clorhídricos. La resina PET puede arruinarse incluso solo con unas pocas partes por millón de resina PVC (Scott 1995).

2.2 Aplicaciones de los Plásticos (polímeros)

La mayoría de los polímeros o plásticos utilizados para diseño en ingeniería son sintéticos, a menudo están específicamente formulados o "diseñados" por ingenieros químicos para servir a un propósito específico. Otros ingenieros (mecánicos, civiles, eléctricos, etc.) típicamente diseñan componentes de ingeniería a partir de los materiales disponibles o a veces, trabajan directamente con químicos o Ingenieros químicos para sintetizar un polímero con características particulares. Las propiedades útiles de varios polímeros de ingeniería son la relación de alta resistencia (módulo de Young) contra el peso (peso ligero, pero comparativamente rígido y fuerte), tenacidad, resiliencia, resistencia a la corrosión, baja conductividad (del calor y la electricidad), color, transparencia, procesado, y bajo costo. Muchas de las propiedades útiles de los polímeros son, de hecho, exclusivas de los polímeros y son debidas a su larga cadena de estructura molecular (Brinson, 2015).

Los polímeros son ampliamente utilizados en las industrias automotriz, aeroespacial, de la computación, la construcción de edificios y en otras aplicaciones. Por ejemplo, las defensas de automóviles ahora están hechas con una mezcla de polímeros con la suficiente dureza para cumplir con las normas oficiales. Esto reduce de manera significativa el peso y sustituye al metal, y es más rentable debido a la reducción de los costos de energía y la capacidad de reciclar fácilmente la mezcla de polímeros de autos usados para fabricar defensas de vehículos nuevos. En la figura 2 podemos ver aplicaciones comerciales de los polímeros.



Figura 2. Principales tipos de resina y sus aplicaciones.

Fuente: (Neufel, 2016)

2.3 Identificación apropiada de los polímeros

La identificación de materiales en el área de polímeros es de gran interés, particularmente respecto al control de calidad de las materias primas y el análisis de fallas de elementos de construcción completos (Ehrenstein et al, 2004).

Para caracterizar la composición de los polímeros pueden aplicarse técnicas de medición, como por ejemplo la *espectroscopia infrarroja por reflectancia total atenuada de la transformada de Fourier* (ATR) (Mitchell et al, 2013).

Existen otros métodos de análisis térmico clásico, tales como la calorimetría diferencial de barrido (DSC) y el análisis termo gravimétrico (TG) utilizados ampliamente para investigar polímeros (Hemminger, 1989; Schmölder, 2009). Sin embargo, los métodos como el ATR implican uso de equipo de laboratorio y son caros, por ejemplo para las operaciones de producción rutinarias, y en el caso de DSC y TG son destructivos pues están basadas en descomposición térmica y en el cambio de estado de la materia.

2.3.1 Aplicaciones de Radio frecuencia y Micro ondas para el análisis y espectroscopia de impedancias como alternativa para identificar polímeros

Los dispositivos (teléfonos celulares, equipo de transmisión) incluyen el manejo de microondas y radiofrecuencia basados en materiales dieléctricos; éstos han incrementado la demanda de materiales capaces de satisfacer las especificaciones requeridas para los sistemas de comunicación, tales como un *factor de calidad alto* (Q_f), una *constante dieléctrica* adecuada (ϵ_R) y un *coeficiente de frecuencia resonante* de temperatura cercana a cero (τ_f). Además de estos parámetros esenciales y aplicables para las aplicaciones de comunicación, existe también una demanda de optimización del proceso de producción de materiales garantizando una capacidad suficiente para la manufactura de dispositivos de telecomunicaciones (Filoh et al, 2017).

El objetivo entonces de la optimización es estudiar la permisividad y permeabilidad eléctrica en materiales a partir de conceptos microscópicos para luego llevarlo a conceptos macroscópicos. Queremos estudiar sus limitaciones y su comportamiento cuando están expuestos a altas frecuencias. Cuando utilizamos campos de alta frecuencia en la medición de estructuras compuestas y artificiales, estas restricciones de escala de longitud son importantes. La intención es examinar cantidades

alternativas, como la polarizabilidad característica del material dieléctrico y las interacciones magnéticas (Baker-Jarvis, 2012).

En este contexto, todos los materiales son sujetos a estudio para determinar sus propiedades eléctricas, las herramientas utilizadas en las evaluaciones de los materiales para comunicaciones pueden ser utilizadas para la evaluación de polímeros. La muestra es realizada mediante la técnica de reacción en estado sólido, consistente en un proceso simple y no destructivo, diferentes a los otros métodos utilizados para identificación, los cuales implican la utilización de soluciones químicas destructivas dañinas a las muestras.

2.3.2 Casos de uso de radio frecuencia para la identificación y caracterización

Los siguientes ejemplos son aplicaciones para la identificación o determinación de estados utilizando radio frecuencia como herramienta de interpretación.

Control de plagas por energía de micro ondas y radio frecuencia: propiedades dieléctricas de las frutas, Los pesticidas actuales como el bromuro de metilo son progresivamente retirados del mercado debido a los residuos dejados en los alimentos. La industria de la fruta busca alternativas para el control de insectos post cosecha para preservar los productos. Los métodos de control utilizando microondas y radio frecuencia tienen potencial para reemplazar la fumigación química al desinfectar térmicamente la cosecha. La aplicación consiste en utilizar frecuencias de entre 10 y 800 Mega Hertz (MHz) para elevar la temperatura de 20 a 60 °C y con esto eliminar las plagas (Ling et al, 2014).

Aplicación de micro ondas y radiofrecuencia para la identificación de insectos en un almacén de granos, la aplicación de la tecnología de microondas para identificar las especies y cantidades de siete tipos de insectos dentro de un almacén de granos; utilizando un nuevo método de medición, a base de un sensor y un dispositivo de campo eléctrico en el rango de frecuencia 0.3 a 1200 MHz. Fueron probados tres voltajes constantes diferentes (0, 20 y 40 V) y tres diferentes frecuencias de campos

eléctricos alternándose entre 0.01 Hz, 0.5 MHz, y 5 MHz con la intención de mejorar la identificación de insectos. Incluye la utilización de redes neuronales para la detección y reconocimiento. El nuevo método de medición dio como resultado una alta tasa de reconocimiento para identificar tanto las especies como la cantidad de insectos, lográndose tasas de identificación del 95.5%, 83.3% y 90.9% en las bandas de 660.1 y 768.1 MHz utilizando campos eléctricos constantes de 0, 20, y 40 V respectivamente (Ding et al, 2009).

Medición de cambios por medio de radiofrecuencia de las propiedades dieléctricas de la carne de pollo durante el almacenamiento, hay una necesidad de seguimiento continuo y evaluación de la calidad e higiene de la carne de pollo en las plantas procesadoras y los diferentes puntos de venta. Los cambios en las propiedades dieléctricas de la carne almacenada son rastreados utilizando el método de *espectroscopia dieléctrica de radiofrecuencia*. Es requerido un sensor para relacionar el pH, la capacidad retención de agua (WHC), la textura, etc. sustituyendo el proceso manual de los expertos en la evaluación de la calidad de la carne. Para este propósito, las propiedades dieléctricas son medidas con una probeta de línea coaxial de extremo abierto y un analizador de redes en el rango de frecuencias 200 MHz a 20 Giga Hertz (GHz) a 23 ° C. Las muestras de carne de pollo fueron almacenadas en un refrigerador durante 8 días a 4°C. La constante dieléctrica y el factor de pérdida son medidas diariamente durante ese período. La constante dieléctrica disminuyó con la frecuencia y la duración del almacenamiento en aproximadamente 4 GHz, el factor de pérdida dieléctrica aumentó 3 GHz manteniéndose casi constante por encima de eso. El resultado es una representación tridimensional del factor de pérdida dieléctrica como una función de la duración del almacenamiento, usada para estimar la condición actual del producto (Travelsi, 2018).

2.3.3 Materiales Plásticos y Dielectricidad

Los plásticos son considerados aislantes, pero son capaces de transmitir energía eléctrica cuando están expuestos a altas frecuencias. La efectividad de un material como aislante es medido por la *constante dieléctrica* (ϵ') y el *factor de disipación* (DF).

Existe un conjunto importante de datos sobre cómo varían estos parámetros en los plásticos en el rango de 0 a 1 GHz, en contraste con la poca información para el comportamiento dieléctrico de los plásticos en frecuencias superiores (Khamoushi, 2014).

La *dielectricidad*, un modelo físico, es usada para indicar cómo un campo eléctrico interactúa con átomos o moléculas dentro de un material. Por ejemplo, cuando un cuerpo de metal está expuesto, los electrones libres fluyen debido al impacto de la fuerza eléctrica contra el campo, hasta el desvanecimiento del campo en el cuerpo, dando lugar a la conducción de las cargas. La palabra dieléctrico deriva del prefijo "dia" en referencia a "a través", por lo tanto, el material dieléctrico puede denominarse como el permisible al paso del campo o flujo eléctricos; sin embargo, no son ningún tipo de portadores de carga. En estricta consideración, no hay una sustancia verdaderamente aislante resistente al transporte de carga eléctrica a través de él bajo cualquier circunstancia (Billah, 2018).

Aunque los materiales dieléctricos son sustancias no conductoras –aislantes-, el término "dieléctrico" es usado para considerar el efecto de campos eléctricos alternos en la sustancia, mientras el término "aislante" es usado a menudo para expresar la naturaleza eléctrica del material cuando está expuesto a soportar campos eléctricos elevados.

2.4 Mediciones dieléctricas

La investigación de la respuesta dieléctrica de una sustancia es una forma directa de estudiar las manifestaciones del movimiento de sus electrones, iones y agrupaciones atómicas y moleculares. En esta área han sido obtenidos datos teóricos y experimentales importantes. Ellos sostienen los conceptos establecidos de procesos fundamentales de las sustancias asociados con polarización y conducción. Aun así, la respuesta dieléctrica de los materiales sigue siendo un aspecto importante cuando buscamos soluciones a problemas nuevos y cuando surgen nuevas hipótesis científicas las cuales requieren verificación (Malyshkin y Pirogov, 2012).

Existe equipo de alta tecnología para medir la respuesta dieléctrica (utilizando varios tipos de configuraciones y métodos de evaluación) en un amplio rango desde

frecuencias ultra bajas (10^{-6} Hz) hasta ópticas (10^{15} Hz) –como referencia, las frecuencias de radio FM son entre 88 y 108×10^6 Hz-. De estos distinguimos dos métodos de medición: por impedancias (de contacto) y el óptico (sin contacto) (Volkov et al 1990, Bolivar et al ,2003).

De la figura 3 puede concluirse existen diferentes estrategias y opciones para cubrir el espectro de radiofrecuencias dentro del cual el material bajo prueba va a estar expuesto para caracterizarlo. Es fácil determinar la *Probeta Coaxial Abierta* y el *Resonador Dieléctrico* como las tecnologías de barrido capaces de cubrir el ancho de banda requerido para exponer a los materiales bajo prueba.

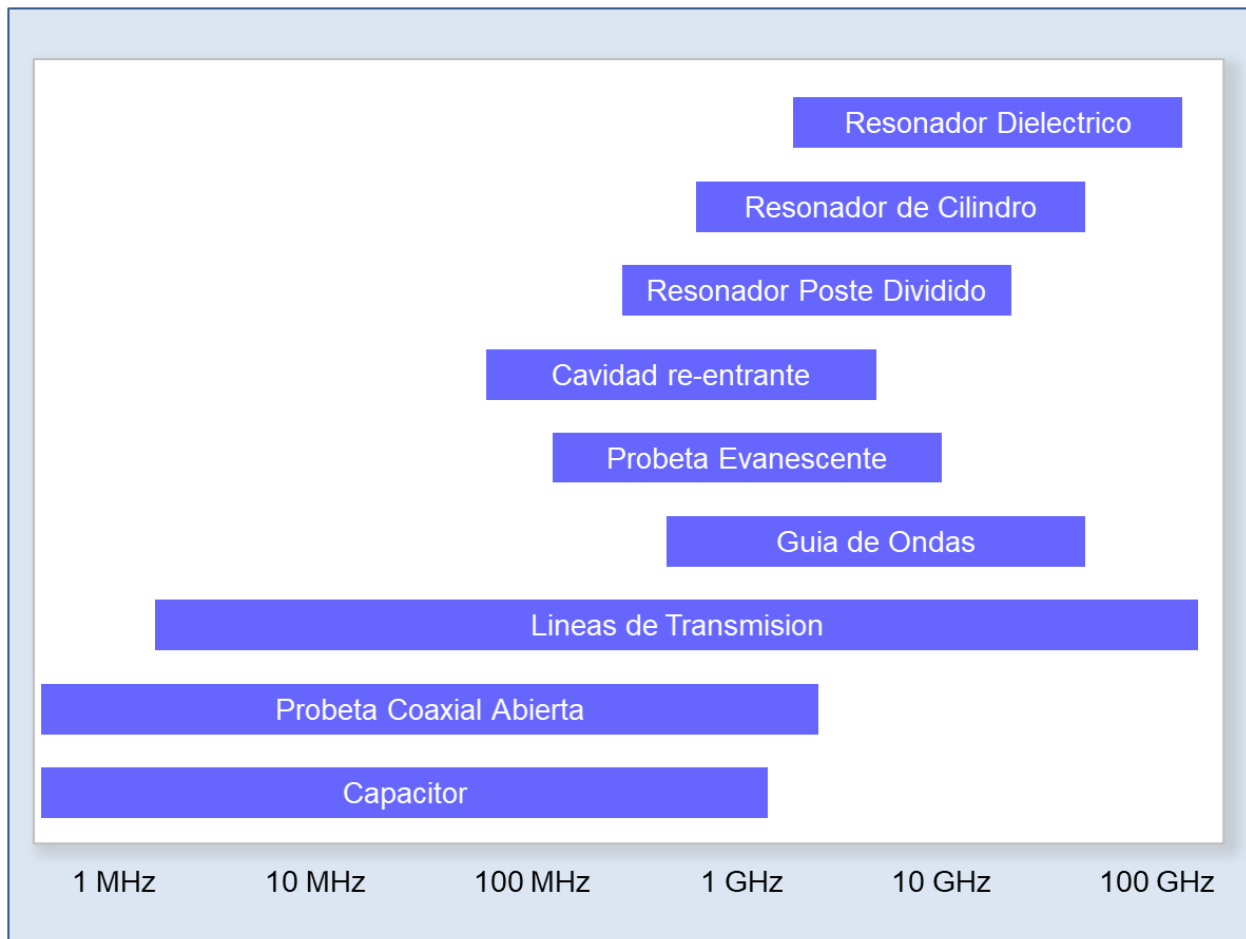


Figura 3. Rango de frecuencia de varias categorías de accesorios dieléctricos de prueba. Cada categoría puede incluir resonadores de frecuencia discreta y estructuras de banda ancha. En algunos casos, el accesorio es un patrón metálico depositado sobre la muestra.

Fuente: (Baker-Jarvis, 2010)

La figura 4 muestra el resultado de utilizar una combinación de dos configuraciones de medición para ampliar el rango de frecuencia en la investigación de materiales dieléctricos (en el ejemplo, sulfato de triglicina utilizado principalmente en sensores de calor), fueron utilizados el método de contacto para bajas y el método óptico para altas frecuencias. Estableciendo diferentes principios y procedimientos experimentales para la investigación de los materiales, cada configuración tiene diferentes limitaciones en cuanto a las características dieléctricas de la muestra, su tamaño, *estado agregado*, orientación en el espacio, grado de homogeneidad, posibilidad de ganar o perder calor, etc. En consecuencia, algunos materiales no pueden ser investigados con uno de estos métodos, por lo tanto, antes de iniciar la evaluación es requerido hacer una adecuada selección del material-método.

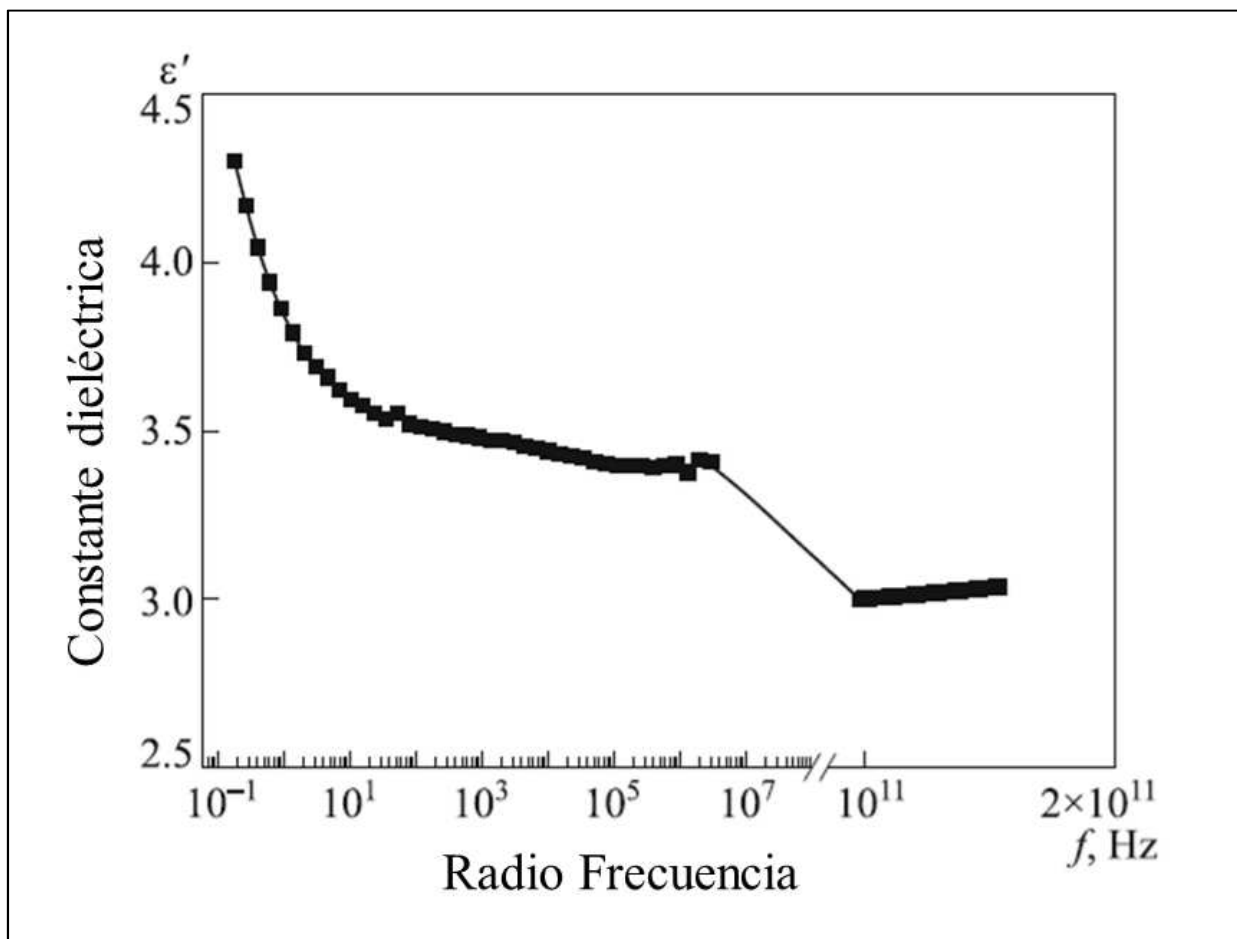


Figura 4. Variación en ϵ' de la muestra en las regiones de baja y alta frecuencia.

Fuente: (Malyshkin, 2012).

2.4.1 Concepto básico de polímeros dieléctricos

Generalmente, el término dieléctrico es utilizado para indicar la capacidad de almacenamiento de energía de los materiales mediante polarización. Cuando están expuestos a un campo eléctrico externo, los materiales son polarizados debido a un desplazamiento dieléctrico. Típicamente, los mecanismos de polarización más comunes son como están indicados en las figura 5: (a) polarización electrónica, (b) polarización orientacional, (c) polarización vibracional y (d) polarización interfacial

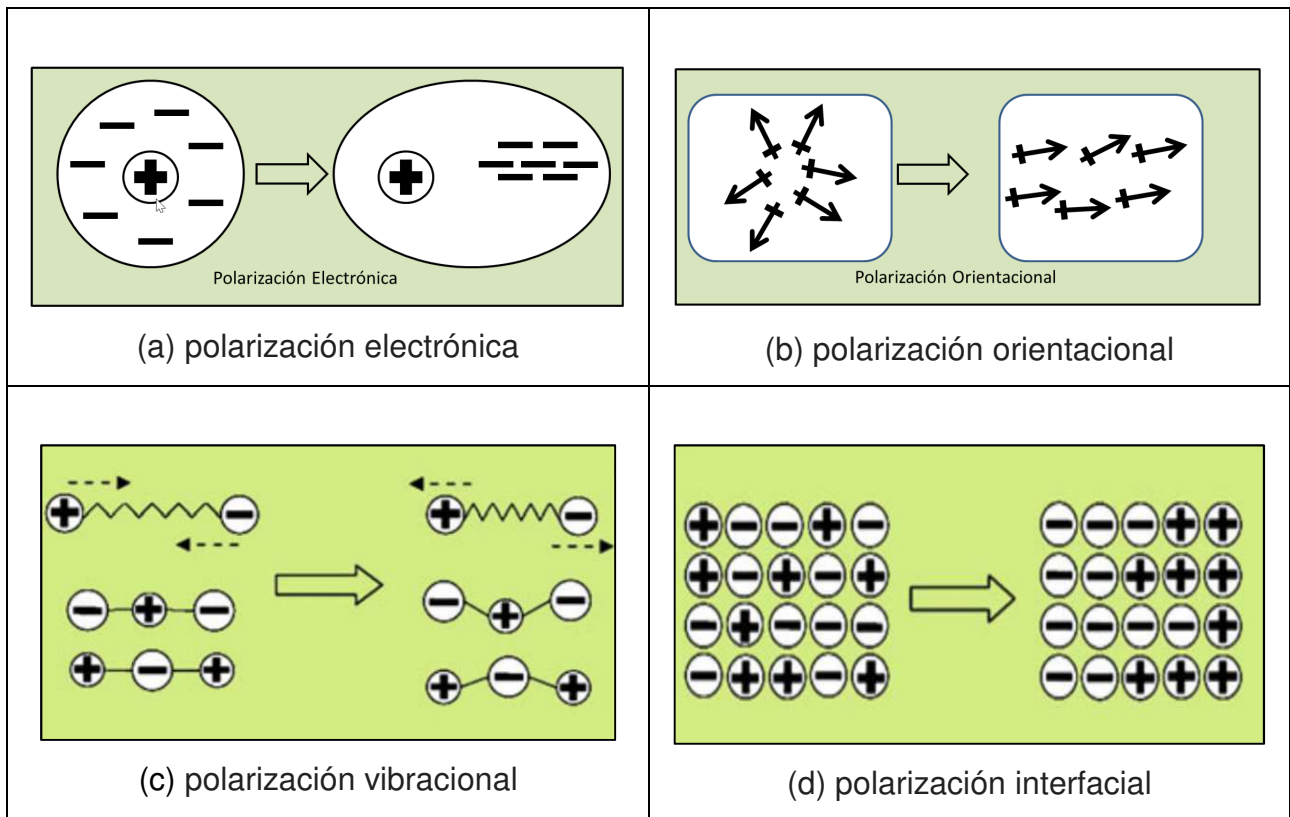


Figura 5. Mecanismos de polarización de los materiales.

Fuente: (M. A. Jafar Mazumder et al., 2018)

La constante dieléctrica (ϵ') es considerado como un parámetro crítico para un polímero dieléctrico donde la magnitud de ϵ' es una función de la cantidad de cargas polarizables y el grado de movilidad de estas en el polímero o material. La movilidad de carga y ϵ' son dependientes de la temperatura. Además, de la polarización del material requiriendo una cantidad de tiempo finita, la frecuencia del campo eléctrico también influye en la medición de la constante dieléctrica. Un buen polímero dieléctrico por lo

general tiene diferentes propiedades atractivas incluyendo la no variancia de la constante dieléctrica respecto a frecuencia y temperatura.

Por ejemplo, las *poliamidas* suelen tener constantes dieléctricas mayores a 3.0.

2.5 Interacciones electromagnéticas con materiales dieléctricos sólidos, líquidos y magnéticos

Frecuencias de radio: Las ondas de radio abarcan frecuencias desde 3 kHz hasta los 300 GHz. Las microondas abarcan frecuencias de 300 MHz a 30 GHz. Mientras las ondas de frecuencia extremadamente alta (EHF) y ondas milimétricas van desde 30 GHz a 300 GHz como lo muestra la tabla 1.

Tabla 1. Bandas de Radio Frecuencia.
Fuente: (Malyshkin, 2012).

Tabla 1.2.2.1. Bandas de Radio-Frecuencia

<i>Frecuencia</i>				<i>Longitud de Onda</i>		<i>Banda</i>	
3	–	30	kHz	100	– 10	km	VLF
30	–	300	kHz	10	– 1	km	LF
0.3	–	3	MHz	1	– 0.1	km	MF
3	–	30	MHz	100	– 10	m	HF
30	–	300	MHz	10	– 1	m	VHF
300	–	3000	MHz	100	– 10	cm	UHF
3	–	30	GHz	10	– 1	cm	SHF
30	–	300	GHz	10	– 1	mm	EHF
300	–	3000	GHz	1	– 0.1	mm	THz

Muchos dispositivos operan a través de la interacción de ondas electromagnéticas de *radio frecuencia* (RF) con materiales. La caracterización de la interfaz e interacción entre campos y materiales es una actividad crítica en el desarrollo de dispositivos

electromagnéticas (EM) o de instrumentos de medición para escalas nano o macro métricas.

Las Ondas electromagnéticas en el rango de radiofrecuencia tienen propiedades únicas. Estos atributos incluyen la capacidad de viajar en estructuras para guías de onda, la capacidad de las antenas para emitir ondas transportando información a largas distancias y cuya fase y magnitud pueden medirse, la capacidad de almacenamiento de imágenes y memoria, calentamiento dieléctrico, y la capacidad de penetrar materiales (Baker-Jarvis and Kim, 2012).

Las propiedades de los materiales como la polarización colectiva y pérdidas por conducción (Baker-Jarvis, 2005) son obtenidas comúnmente por inmersión en los campos de cavidades electromagnéticas, resonadores dieléctricos, métodos de espacio libre o líneas de transmisión. La respuesta medible, está relacionada a la resonancia intrínseca del material.

Por ejemplo, la respuesta de banda ancha es obtenida mediante el uso de líneas de transmisión o sistemas basados en antenas (Baker-Jarvis et al, 2001). Las películas delgadas son medidas comúnmente con Guías de onda coplanares o *microstrips*. Los métodos comunes utilizados para medir las propiedades del material a pequeña escala incluyen probetas de campo cercano, líneas de micro transmisión, microscopios de fuerza atómica y lentes. En el dominio del tiempo, las propiedades del material son obtenidas mediante el análisis de la respuesta a un pulso o impulso; sin embargo, la mayoría de las mediciones de materiales son realizadas por sometiendo el material a campos de tiempo-harmónicos. Cuando un campo es aplicado repentinamente a un material, las cargas, giros, corrientes y dipolos en un medio responden a los campos locales para formar un campo promedio. Si un campo EM es aplicado repentinamente a un material *semi-infinito*, el campo total incluirá los efectos de ambos: el campo aplicado, los transitorios y la reacción de las partículas a los campos de carga, giro y reordenamiento de corriente. Eso causa campos de despolarización, y ocasionara un estado no-equilibrado en el sistema durante un período de tiempo.

Por ejemplo, como es mostrado en la Fig. 6, cuando es aplicado un campo EM y éste interactúa con un material dieléctrico, los dipolos son reorientados y ocurren movimientos de carga, de esta forma los campos macroscópicos y locales en el material son modificados por campos dipolos (despolarización) de las cargas superficiales opuestas al campo aplicado. La magnitud del campo macroscópico es

aproximadamente el campo aplicado menos el campo de despolarización. Despolarización, des-magnetización, expansión térmica, intercambios, desequilibrio e interacciones anisotropía pueden influir en las orientaciones dipolares y por lo tanto en los campos y la energía interna.

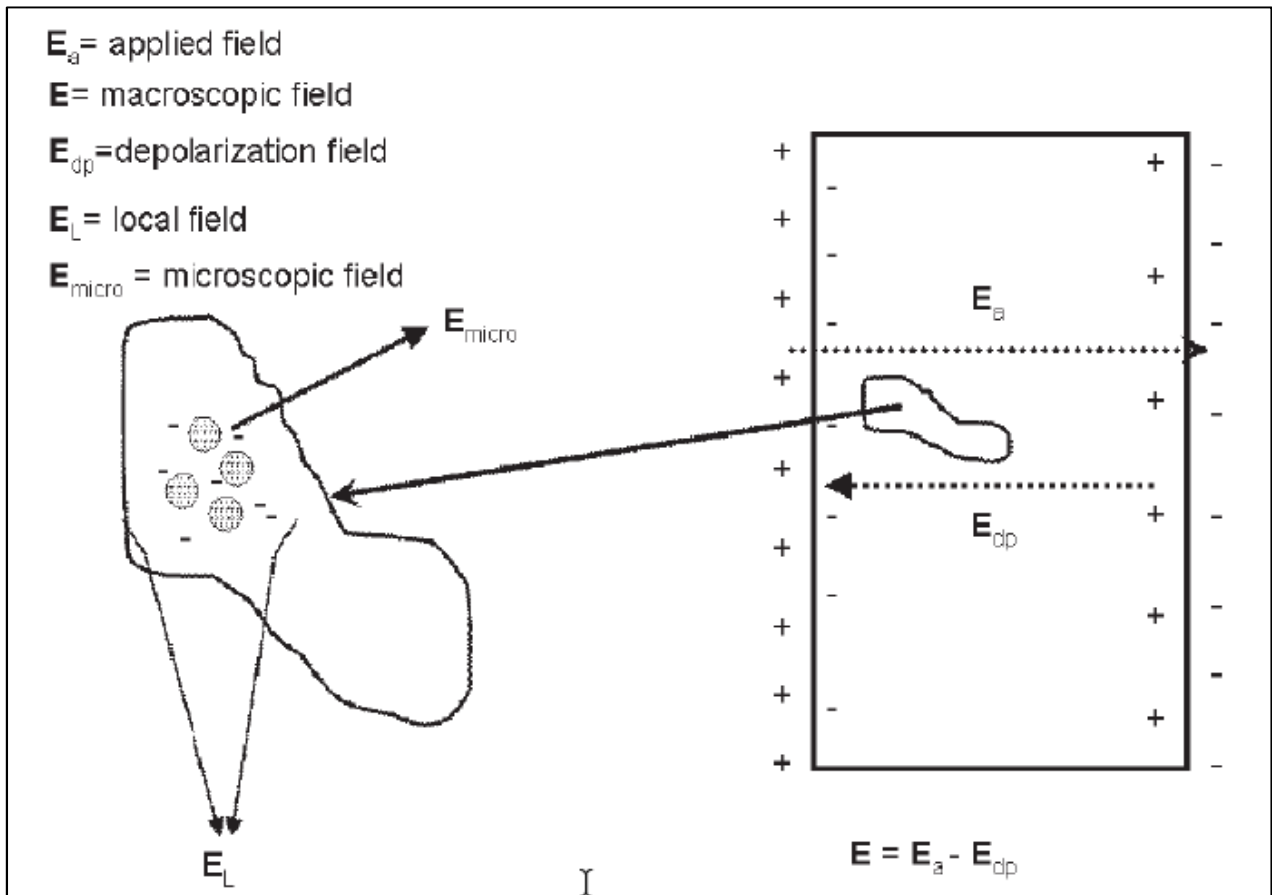


Figura 6. Campos electromagnéticos en los materiales.

Fuente: (Baker-Jarvis and Kim, 2012).

Capítulo 3. Justificación

Las variables importantes en el proceso de moldeo por inyección de plástico son aquellas causantes de tiempo de inactividad y producto no conformante. Ejemplo de estas son la cantidad y la calidad de las resinas utilizadas en el proceso. Obtener la máxima producción con respecto a la cantidad de resina comprada, requiere el uso y cuidado apropiado de material (Bozzelli, 2014).

La condición de resinas equivocadas o mezcladas es controlada en la planta de producción Ensamblados Hyson Tijuana por medio de un analizador de viscosidad y en forma manual; existen indicaciones y procedimientos para evaluarlas antes de usarlas en el proceso de inyección, haciendo verificaciones en los lugares de almacenamiento, como los depósitos locales de las máquinas o los silos donde son almacenadas toneladas de diferentes resinas.





La principal consecuencia de utilizar una resina equivocada es la de posibles reacciones de la pieza fabricada al contacto con los elementos o con otras sustancias, también la de no cumplir con parámetros de dureza y de elasticidad. El inspector de resinas experto las identifica por su textura y peso o porque siguen estructuras y patrones conocidos. Aunque la identificación común es la de los logotipos puestos por el fabricante al envase (véase figura 2).

3.1 Control de resinas en Ensamblados Hyson

En Ensamblados Hyson son fabricados componentes utilizados en sistemas de riego residencial, comercial e instalaciones deportivas. Las resinas comunes utilizadas son ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), CFPP (Polipropileno de Fibra de Carbono), Acetal, PVC (Cloruro de Polivinilo), TPE (Elastómero Termoplástico). Algunos de ellos son distinguibles a simple vista, pero otros como el PVC y el ABS es difícil diferenciarlos y no deben ser mezclados, para esto es requerido de un tercer elemento para hacerlos compatibles.

Para evitar mezcla de resinas, en Hyson Tijuana son tomadas muestras de los contenedores los cuales arriban a la planta, para validar si las resinas están de acuerdo a las especificaciones de los pedidos, la validación es hecha por personal de control de

calidad revisando el *flujo de fusión* (Melt Flow) y llenando los formatos indicados, el procedimiento está ilustrado en la figura 7.

INSTRUCCION DE TRABAJO		DOCTO-REV:LEH09223-01
AREA: MOLDEO OPERACIÓN: "OPERACIÓN DE MELT FLOW INDEXER"		No. Operación: N/A
		FECHA: 04-julio-2014
Paso 13		
	<p>Ya que comprima la resina se inserta por el orificio el accesorio porta pesa y se le pone la pesa correspondiente en la parte superior del accesorio.</p>	
Paso 14		
	<p>Una vez que tenga la pesa colocada, se presiona el botón "Run" para comenzar con la prueba. Cuando transcurran las 360 segundos de la prueba se debe cortar la resina que salio por el orificio.</p>	
Paso 15		
	<p>Una vez que se corte la resina presionar el botón "Run" nuevamente, y esperar que transcurran 60 segundos y cortar la resina que salga del orificio nuevamente.</p>	
Paso 16		
	<p>Tomar la resina que salio del orificio del melt flow y pesarla en la bascula, posteriormente presionar el botón "next" en el melt flow.</p>	

Página 4 of 5

LFEG06-00

Figura 7. Prueba para identificación de materiales plásticos en Ensamblados Hyson, es utilizado un equipo para medir el índice de flujo de fusión (la viscosidad del material al volverlo fluido por medio de calor).

Fuente: elaboración propia.

3.1.1 Frecuencia de las verificaciones de resina

Basado en los registros, la tabla 2 muestra los tiempos tomados por las validaciones de las resinas y la frecuencia de llenado de los silos. El procedimiento indica tomar una muestra de cada contenedor al arribar a la planta. También es incluida la regla de la baja incidencia en errores, si una resina acumula 10 validaciones y no presenta errores, el muestreo es reducido a uno de cuatro arribos muestreados. Por eso la cantidad de recibos y aplicaciones de la prueba Melt Flow Indexer son diferentes. Por lo tanto, el

26% de las resinas utilizadas en el piso de producción y surtidas a los silos son verificadas por QA (registros de mayo 2019).

Tabla 2. Frecuencia mensual de las verificaciones de resina utilizando el equipo medidor del índice de flujo de fusión (para el mes de mayo 2019). La cantidad de eventos de surtido está incluida en la segunda línea, esto como una estimación del tiempo invertido en el llenado de los silos.

Fuente: de elaboración propia).

Actividad	Frecuencia mensual	Tiempo invertido
Aplicación de prueba Melt Flow Indexer	12 resinas probadas	90 min por prueba 90 * 12 = 1,080 min
Descarga de contenedores a los silos	46 camiones recibidos	120 min por descarga 120 * 34 = 4,020 min 120 descarga + 90 espera validacion 210 * 12 = 2,520 min
Cambios de resina en el piso de producción	168 cambios	35 min x 168 = 5,880 min

Una vez hecha la verificación es autorizada la descarga del contenedor hacia uno de los silos. La capacidad de un silo es de 55,000 libras. En la figura 8 es mostrado el detalle de las operaciones de resurtido de resina a los silos.

Podemos concluir: la verificación científica de los tipos de resina es soportada por un equipo operado por personal de QA, herramienta no accesible al personal de otras áreas y no es posible llevarlo a los lugares donde las verificaciones son requeridas. Las demas etapas del proceso dependen de esta verificación.





Figura 8. Manejo de resinas en una planta de inyección de plásticos, debido a la demanda la resina es surtida por camiones y almacenada en silos conteniendo un tipo de ellas sin mezclarse. Luego son distribuidas por un sistema de succión hacia el interior de la planta de producción.

Fuente: elaboración propia.

3.2 Control de resinas en el piso de producción

Existen 2 tipos de control implementados para los cambios de resina en las máquinas de producción, el primero aplica para máquinas mayores a 40 toneladas y está basado en el control semi automatizado de los ductos a través de los cuales la resina llega a las máquinas, el segundo es en el área de máquinas menores a 40 toneladas y consiste en el surtido manual de las resinas (figuras 9 y 10).

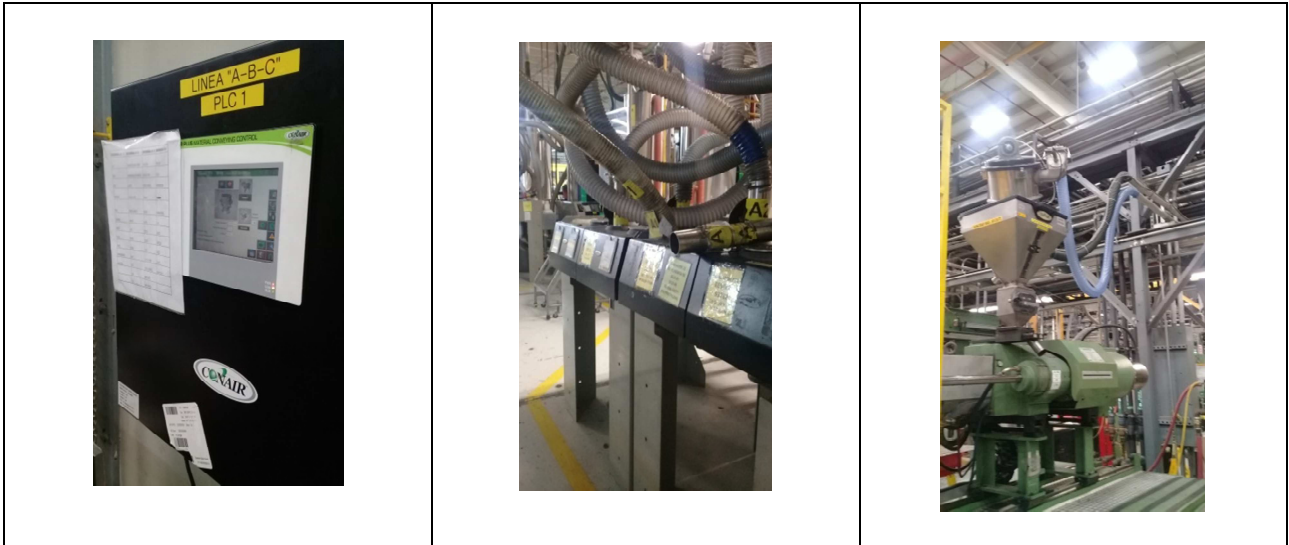


Figura 9. Control de cambio de resina semi automático; la línea para surtir a una máquina en particular es seleccionada en un sistema computarizado y su operación es detenida, el ducto es cambiado manualmente y luego la línea activada. Una verificación visual es hecha en los primeros artículos

Fuente: elaboración propia.

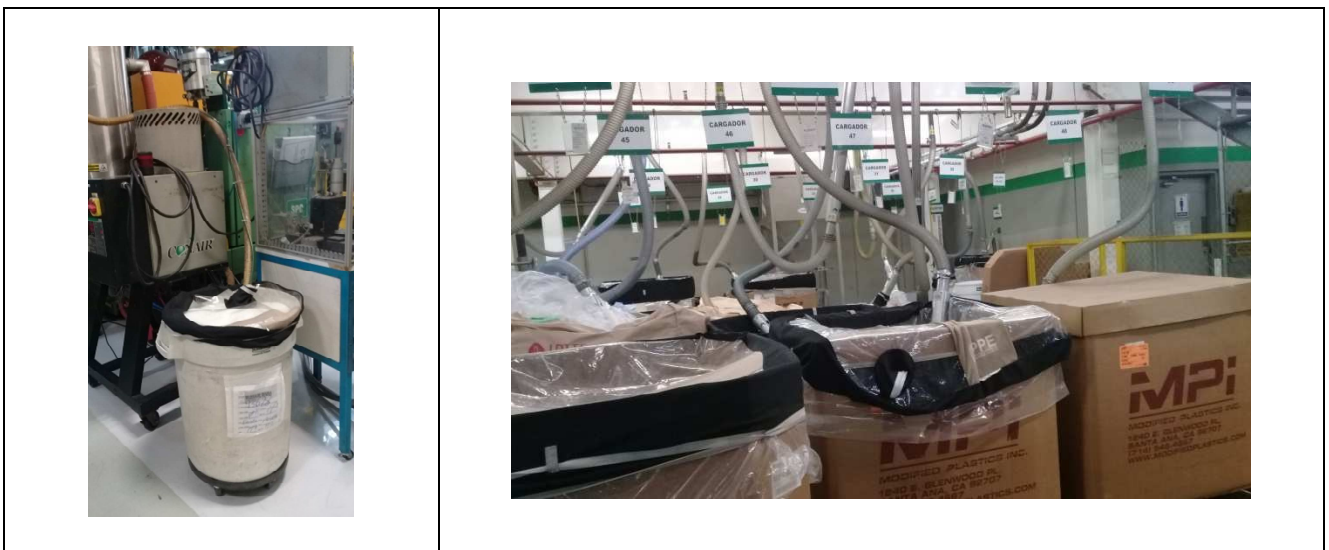


Figura 10. El material es surtido al *pie de máquina*. El resurtido o el cambio de resina es hecho rellenando el contenedor y regresándolo a su posición.

Fuente: elaboración propia.

3.3 Eventos y costo de resinas equivocadas

Entre Junio del 2018 a Marzo del 2019 ocurrieron tres eventos donde fue surtida resina incorrecta a uno los silos y un evento donde una conexión incorrecta fue hecha entre una de las máquinas y el deposito intermedio de.

1. Llenado de uno de los silos con resina de un tipo equivocado, este evento no fue detectado y fueron elaboradas 1,230,000 piezas plásticas. La detección es hecha en una de las revisiones pero la producción fue llevada a cabo por un periodo de tiempo si ser detectada. Al final el valor del material equivocado fue de \$43,200 USD, más el costo del drenaje del silo por \$7,000 USD y los costos no calculados del paro de producción para limpieza de materiales. Además el costo de Ingeniería para determinar la causa del problema y definir la disposición del material, inicialmente fue hecha la propuesta de enviarlo a mercado porque pasaba las pruebas de confiabilidad.
2. Llenado de un silo con material equivocado, esta vez la detección fue hecha mientras hacían el re surtido desde el camión al silo, pero la resina fue mezclada (contaminación) y es necesario limpiar el contenido y disponer las resinas mezcladas, el costo fue de \$18,000 USD en resina más \$7,000 USD por la limpieza del silo y una cifra no calculada por el paro de producción por 8 horas.
3. Conexión incorrecta de ducto de surtido la resina a máquina. La conexión es manual y fue seleccionada una salida equivocada. Después de 7 días fueron detectadas piezas opacas producidas debido al uso del material equivocado (PVC de bajo brillo). La decisión fue libera el producto después de realizar pruebas de calidad y de desempeño. La planta cliente paro actividades por 3 días. El costo de las pruebas fue de \$3,500 USD y de \$7,800 USD por las pruebas (resina, tiempo máquina) más los costos de ingeniería.

Para los primeros dos casos los protocolos de verificación de la resina fueron seguidos, pero el surtido fue hecho sin esperar los resultados de la prueba de Flujo de Fusión, pues no había eventos de error recientes. En el tercer caso el personal técnico de resinas hizo una conexión a la salida equivocada.

Junto con estos casos de error requiriendo una solución inteligente, podemos agregar otra demanda de solución a la actividad diaria de verificar los materiales los cuales son

almacenados en acumuladores distribuidos estratégicamente en el area de moldeo. Estos acumuladores tienen la función de reducir los tiempos de traslado de la resina desde los silos y al mismo tiempo incorporan un mecanismo de secado de la resina (des humidificación) antes de la inyeccion. En los acumuladores tambien son llevadas a cabo verificaciones diarias como un segundo filtro para detectar resinas mezcladas. La figura 11 muestra la entrega de los materiales de inyeccion hacia el proceso.



Figura 11. a) Deposito de resina al pie de la máquina (surtido manual), la identificación es hecha por el etiquetado del proveedor. b) Tubería de llegada de los silos a los acumuladores y secadores (surtido automatizado), de ahí son tomadas muestras para verificar la resina sea la correcta. De este lugar es surtida a las máquinas de inyeccion por medio de tuberias. c) Entrega de material a la máquina de inyeccion, aqui no hay forma de muestrear el material por la automatización del proceso. d) Piezas terminadas, muestras para el proceso de QA son tomadas, en esta etapa pueden detectarse problemas de resinas por los efectos secundarios en la calidad de las piezas.

Fuente: de elaboración propia.

3.4 Pregunta de investigación

¿Qué tecnología móvil detecta los tipos de plástico sin demorar el surtido al proceso de inyección de plástico?

3.5 Hipótesis

A partir de esto podemos plantear las siguientes hipótesis:

H_i Un sistema de antenas de radiofrecuencia detecta las diferencias dieléctricas de los plásticos a través de curvas características.

H_o Un sistema de antenas de radiofrecuencia no detecta las diferencias dieléctricas de los plásticos a través de curvas características.

Capítulo 4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Identificar los cinco tipos de resina con mayor utilización en forma rápida, para reducir los eventos donde el material no es el correcto y genera producto no conformante. Para aplicarlo en el proceso de inyección de plástico en Ensamblados Hyson en Tijuana B. C.

4.2 Objetivos específicos

- Proponer una herramienta técnica de uso portátil basada en mediciones de las características de las resinas por medio del uso de radiofrecuencia
- Determinar las características dieléctricas de los materiales de interés.

Capítulo 5. Metodología

La metodología consistió en una investigación documental para clasificar los tipos de polímeros utilizados en la industria de inyección de plástico, y las tecnologías disponibles para su detección e identificación. Para entender sus principios y disponibilidad, fueron revisados métodos desarrollados y equipos en el mercado. Seguido de una investigación de campo para determinar los tipos de polímeros a analizar, el proceso de manejo y utilización en el proceso de producción en Ensamblados Hyson de Tijuana, para implementar un prototipo de radiofrecuencia para la detección de los tipos de polímeros.

5.1 Técnicas de muestreo

Fue propuesto elaborar el inventario de las resinas utilizadas por Ensamblados Hyson en los procesos de moldeo por inyección para contabilizarlas e identificarlas, a partir de este listado son ordenadas de acuerdo al consumo anual (consumo en libras) para proponer la candidatas a evaluar sus propiedades dieléctricas para fines de esta investigación; la selección fue hecha utilizando la regla 80-20 de Pareto (Juran J., 1999): el 80% del consumo en libras corresponde al 20% de los tipos de resina.

El objetivo de las mediciones dieléctricas es estimar la permitividad (ϵ') y el factor de pérdidas (ϵ'') relativa de cada tipo de resina bajo prueba para una orientación de campo eléctrico, frecuencia y temperatura determinados. Los valores dieléctricos obtenidos (respuesta) cambian basados en la orientación del vector de campo eléctrico relativos a la orientación de los dipolos del material (Baker-Jarvis et al, 2010).

Para las pruebas de respuesta dieléctrica de las muestras la propuesta fue dividir las en rangos de frecuencia para hacer un barrido del espectro desde 1 kilo Hertz (kHz) hasta 20 GHz a fin de ubicar el patrón de alta respuesta y utilizar una herramienta para medir los parámetros de dispersión (específicamente el parámetro de reflexión S_{11}) resultantes. La figura 12 muestra un sistema de clasificación de los métodos de medición adecuados para categorías de material.

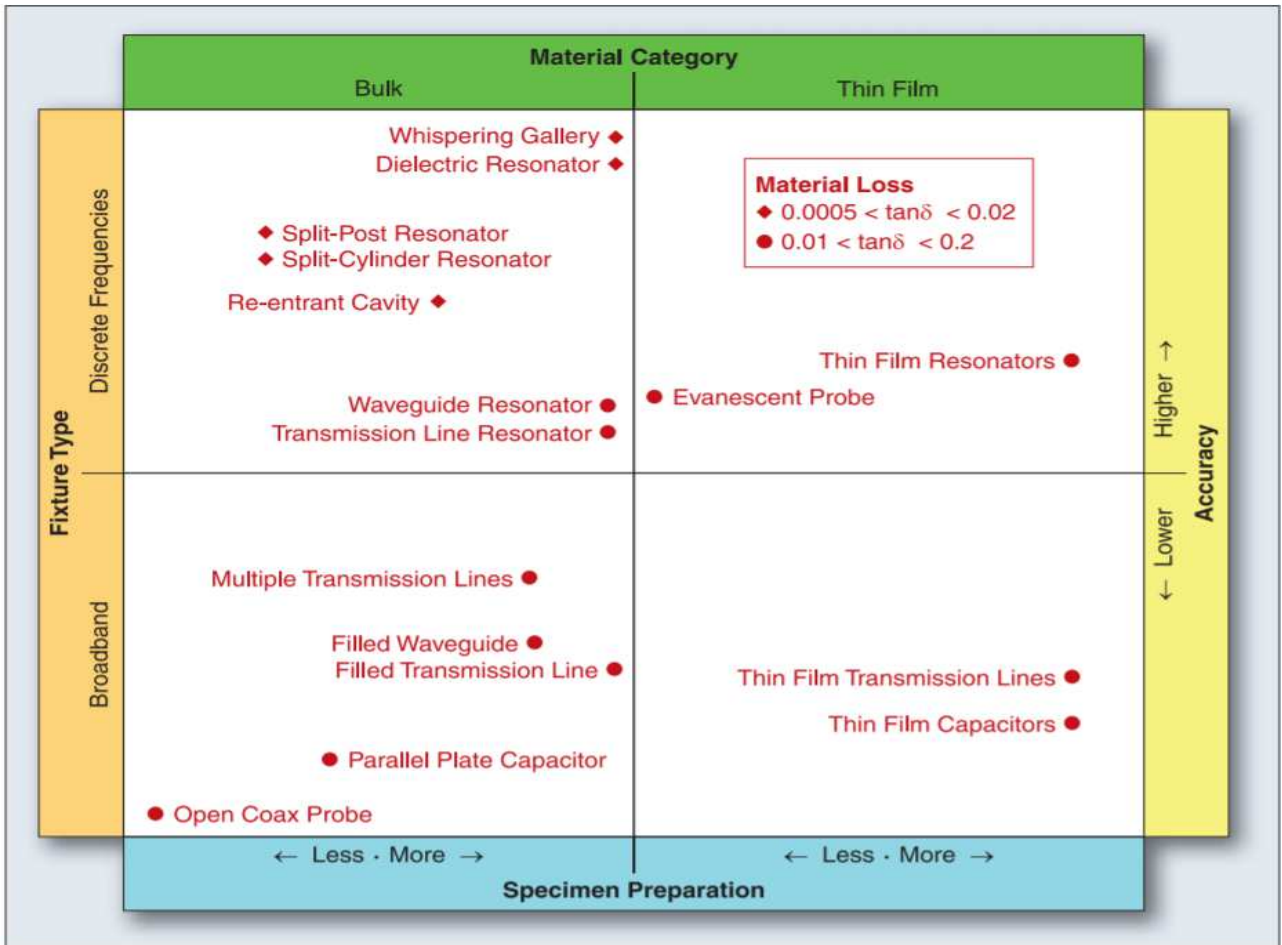


Figura 12. Matriz de métodos de medición dieléctrica agrupados y organizados según la categoría del material / preparación de la muestra y la banda de frecuencia / exactitud relativa. La matriz identifica así los rangos de pérdida de material válidos.

Fuente: (Baker-Jarvis, 2010)

El equipo de medición a utilizar difiere dadas la capacidad de las tecnologías de barrido y medición de radio frecuencia para cubrir el ancho de banda, son propuestas tres técnicas de medición cada una cubriendo un rango de frecuencias, esto es mostrado en la figura 13; la restricción del muestreo es mantener una temperatura ambiental de entre 20°C y 32°C (Baker-Jarvis et al, 2010).

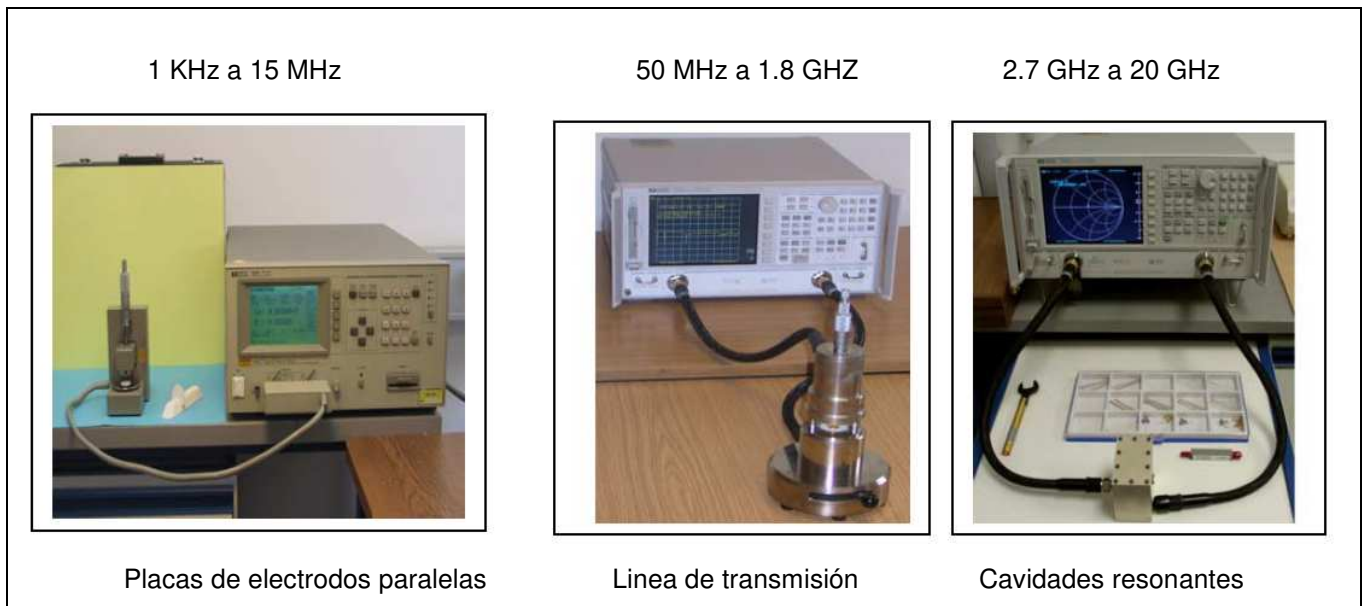


Figura 13. Equipo utilizado para determinar la capacitancia, constante dieléctrica y factor de disipación de los materiales.

Fuente: elaboración propia.

5.2 Selección de la población y número de muestras

Para inferencias de población, un recuento completo de la población es deseable, pero el tiempo y recursos por lo general no lo permiten. Por lo tanto fueron tomadas muestras por inferencias poblacionales como válidas.

La ventaja del muestreo es una mayor velocidad en la obtención de resultados, pues el número de la cantidad de observaciones es menor comparada con un recuento completo. Por lo tanto los datos son recogidos y procesados en forma rápida (Miah A., 2016).

Entre otras cosas, hay dos consideraciones principales cuando debemos pensar en la determinación del tamaño de una muestra. Una es la precisión, si la precisión deseada es mayor (menor error) el tamaño de la muestra debería ser mayor y viceversa. El otro punto de consideración es el costo. Si el tamaño de la muestra es grande, el costo involucrado es alto. Entonces, si queremos tener un mayor grado de precisión, un tamaño de muestra más grande es necesario, y esto requiere una mayor cantidad de presupuesto. Así, no podemos optar por un tamaño de muestra más grande si existen restricciones presupuestarias. Si vamos por una muestra de tamaño más pequeño,

podemos reducir el costo, pero en este caso estamos sacrificando el grado de precisión. Por lo tanto, necesitamos hacer un balance entre el grado de precisión y el costo en la determinación del tamaño de la muestra en cualquier situación particular. La balanza apuntará a la máxima precisión obtenible con el mínimo costo.

Otra discusión es la del costo del muestreo. Incluye el costo de diseñar la muestra, construir el marco, renta de equipo, recolectar, compilación y cálculo de datos, gastos de oficina, otros gastos generales, etc. Sin embargo, estos costos pueden dividirse en dos categorías: costo fijo y costo variable. Por lo tanto, la función de costo puede ser representada en una forma simple

$$C = c_0 + c_1 * n$$

donde C = costo total del muestreo, c_0 = costo fijo, c_1 = costo por unidad muestreada y n = número de muestras (Miah A., 2016).

El costo total es determinante en este trabajo, debido al uso de equipo de medición especializado para capturar y registrar las lecturas. Por lo tanto es propuesto utilizar estadística descriptiva, donde los datos son agrupados en clases y luego construimos histogramas con los datos agrupados (Hogg et al, 2015). La forma de seleccionar las unidades es toma de muestra sin reemplazo. La población es de 31 muestras por cada tipo de resina seleccionada, la constante dieléctrica fue medida en 30 y una muestra con el equipo *Melt Flow indexer* para compararlas.

Regla de medición de las 30 muestras:

1. fue determinado el rango de las mediciones, rango = medición máxima – mínima
2. fue definida la clase $k = 5$, como un intervalo sin traslape
3. cada intervalo inicia y termina a la mitad entre dos posibles valores de medición
4. los intervalos fueron llamados “intervalos de clase” y los límites “límites de clase”
5. los límites de clase son las mediciones mínimas y máximas de observadas para cada clase
6. una marca de clase es el punto medio de una clase

7. con los datos obtenidos es construido un histograma para las 30 muestras como estimación visual; el histograma representa la distribución de respuesta para la frecuencia de prueba a las cuales son sometidas las 30 muestras (figura 14)

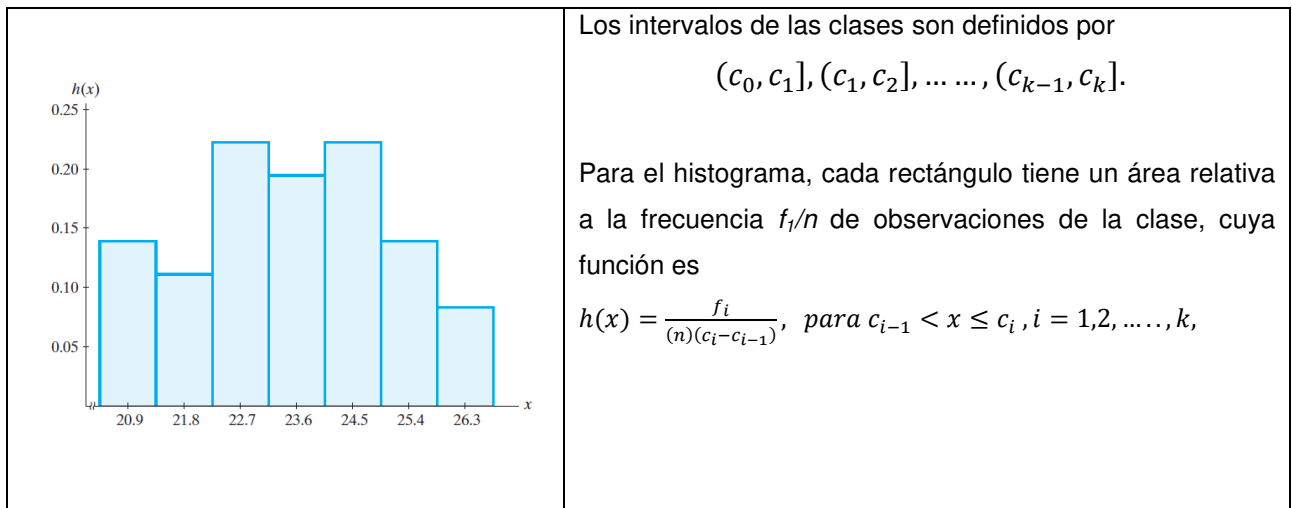


Figura 14. Histograma de frecuencia relativa utilizado para elaborar los intervalos de clases, como referencia para clasificar a los tipos de resina seleccionados.

Fuente: (Hogg et al, 2015).

5.2.1 Selección de las muestras

Las muestras fueron seleccionadas a partir de su consumo, y su extracción fue hecha de los inventarios en almacenes de la planta de producción, donde están almacenadas a temperatura ambiente. Para cada muestra fue elaborada una tabla de evaluación bajo diferentes frecuencias y técnicas de medición como es mostrado en la figura 15.


	<table border="1"> <thead> <tr> <th style="border-right: 1px solid black;">Frecuencia</th> <th>Constante Dieléctrica ϵ'</th> <th>Factor de pérdida Dieléctrica ϵ''</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="border-right: 1px solid black;">500 kHz</td> <td colspan="2"><i>Placas Electroodos</i></td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black;">1 MHz</td> <td colspan="2"><i>Placas Electroodos</i></td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black;">300 MHz</td> <td colspan="2"><i>Línea de transmisión</i></td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black;">800 MHz</td> <td colspan="2"><i>Línea de transmisión</i></td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black;">1 GHz</td> <td colspan="2"><i>Línea de transmisión</i></td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black;">2.5GHz</td> <td colspan="2"><i>Cavidades resonantes</i></td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black;">15 GHz</td> <td colspan="2"><i>Cavidades resonantes</i></td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black;">20 GHz</td> <td colspan="2"><i>Cavidades resonantes</i></td> </tr> </tbody> </table>	Frecuencia	Constante Dieléctrica ϵ'	Factor de pérdida Dieléctrica ϵ''	500 kHz	<i>Placas Electroodos</i>		1 MHz	<i>Placas Electroodos</i>		300 MHz	<i>Línea de transmisión</i>		800 MHz	<i>Línea de transmisión</i>		1 GHz	<i>Línea de transmisión</i>		2.5GHz	<i>Cavidades resonantes</i>		15 GHz	<i>Cavidades resonantes</i>		20 GHz	<i>Cavidades resonantes</i>	
	Frecuencia	Constante Dieléctrica ϵ'	Factor de pérdida Dieléctrica ϵ''																									
	500 kHz	<i>Placas Electroodos</i>																										
	1 MHz	<i>Placas Electroodos</i>																										
	300 MHz	<i>Línea de transmisión</i>																										
	800 MHz	<i>Línea de transmisión</i>																										
	1 GHz	<i>Línea de transmisión</i>																										
	2.5GHz	<i>Cavidades resonantes</i>																										
15 GHz	<i>Cavidades resonantes</i>																											
20 GHz	<i>Cavidades resonantes</i>																											

Figura 15. Plan de medición de las muestras, para cada una es elaborada una tabla mostrando sus características dieléctricas y de pérdidas en un rango de ocho frecuencias.

Fuente: (Trabelsi, S., 2018).

La respuesta de cada clase es graficada y los espacio entre las frecuencias no evaluadas son llenados por medio de correlación. De tal forma, la respuesta dieléctrica de cada resina es visualmente comparada para verificar por superposiciones o regiones de comportamiento común.

La figura 16 muestra un ejemplo de agrupación de respuesta de materiales donde es fácil observar sus comportamientos bajo diferentes frecuencias.

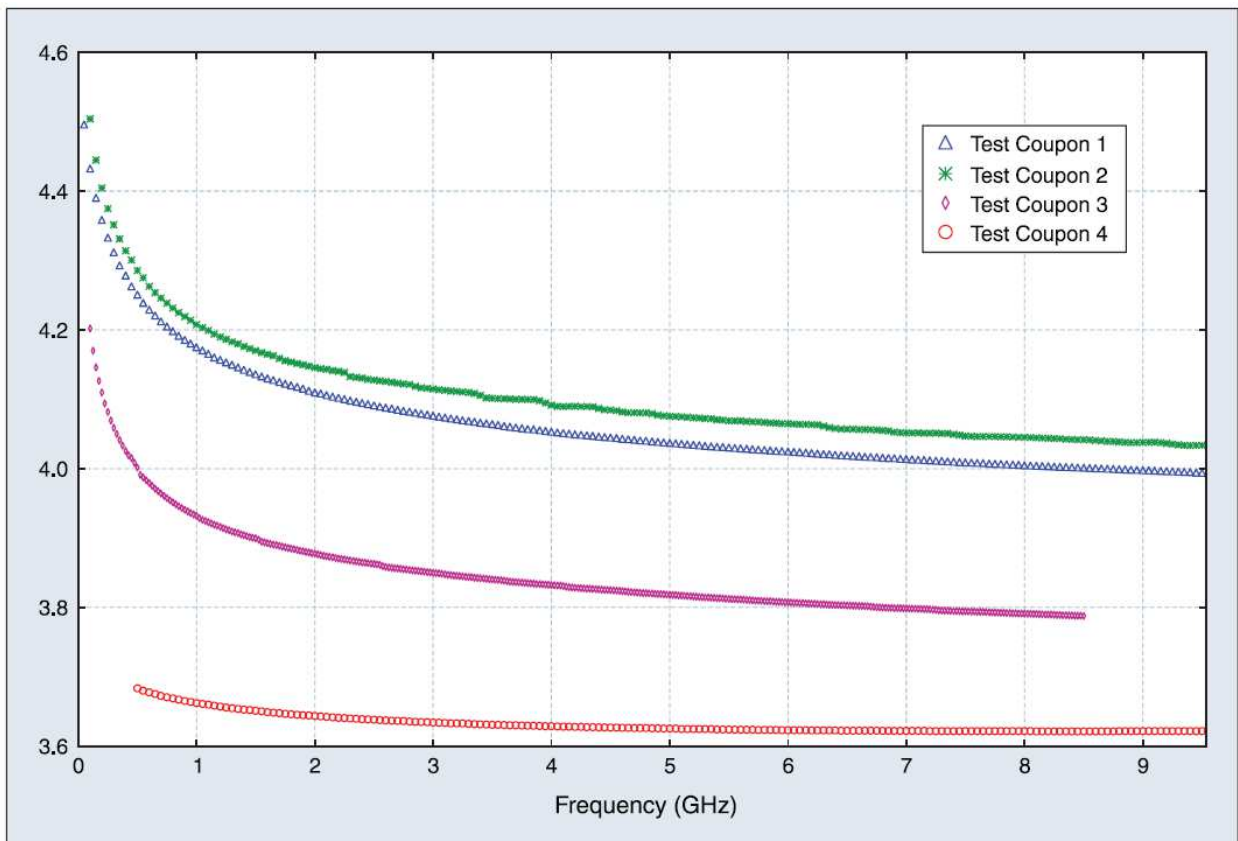


Figura 16. Gráfica de caracterización basada en las mediciones de las resinas. Son agrupadas para tener una visión clara de los espacios ocupados por cada una de ellas a fin de implementar las curvas de respuesta en el sistema de radiofrecuencia a desarrollar.

Fuente: (Baker-Jarvis, 2010)

5.3 Materiales a utilizar

Para las evaluaciones, fueron propuestos los siguientes instrumentos de caracterización:

- Analizador de redes
- Probeta coaxial de radiofrecuencia
- Equipo medidor de flujo de fusión

5.4 Procedimiento

Para la evaluación de la respuesta y caracterización de los materiales fue propuesta utilizar un sistema de microondas y el equipo de evaluación por índice de fusión, de esa manera son medidas la respuesta dieléctrica de 30 muestras y el índice de 1 muestra de cada uno de los tipos de resina. Incluir el índice de fusión y relacionarlo a la respuesta dieléctrica establece una relación del sistema desarrollado y la herramienta ya en uso. La figura 17 muestra los sistemas propuestos para la evaluación.

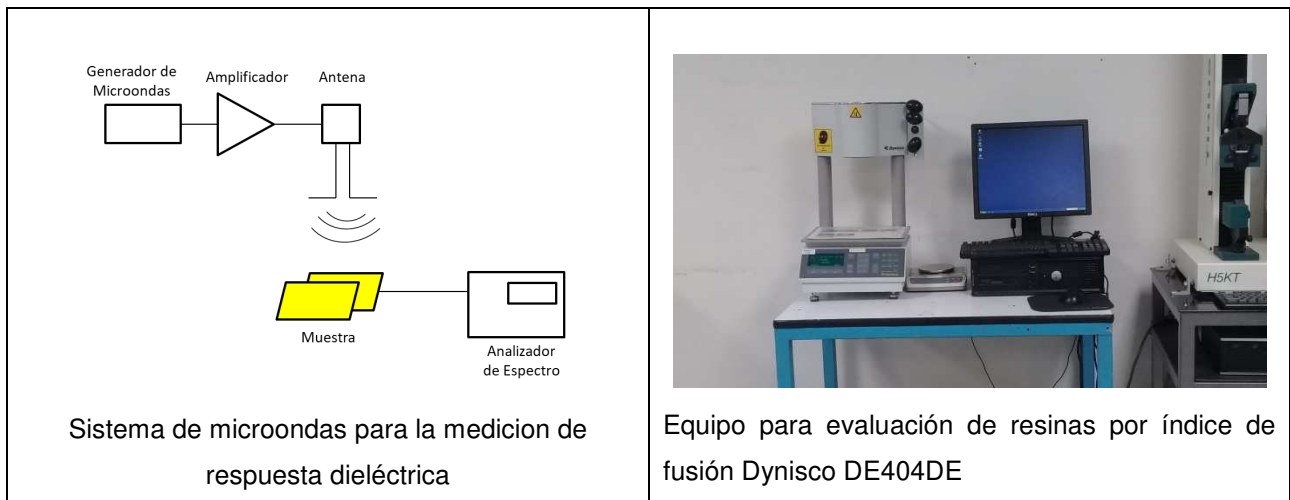


Figura 17. Equipos propuestos para evaluar las muestras de resina.

Fuente: elaboración propia.

Ensamblés Hyson utiliza 18 tipos de resina en sus procesos; para evaluar sus características dieléctricas y diferenciarlos, un grupo de 4 tipos de resina es comparado, estos son ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), Acetal, PP (Polipropileno) y ASA (Acrílico Estireno Acrilonitrilo). Los 4 materiales fueron seleccionados como representativos del proceso de producción por su alto consumo en la planta de inyección de plástico Ensamblés Hyson en Tijuana B.C. El consumo anual para 2018 es mostrado en la figura 18.

El tipo de investigación utilizado para llevar a cabo este trabajo es el documental.

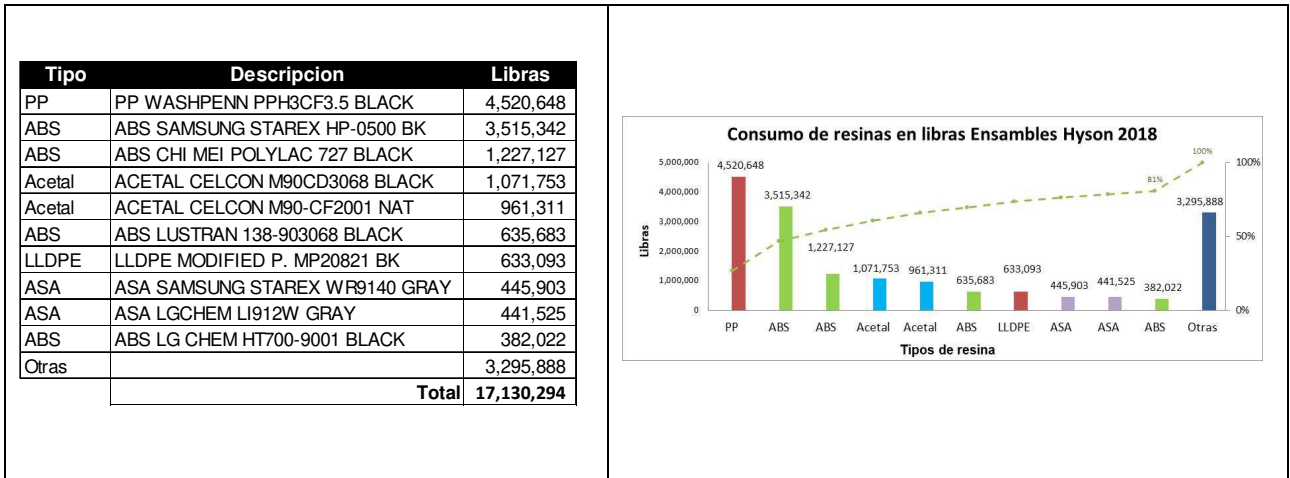


Figura 18. Consumo anual de resinas en Ensambles Hyson registradas en 2018. Los consumos más altos son de las resinas tipo PP, ABS, Acetal, ASA y LLDPE. En ellas está concentrado el 80% del consumo.

Fuente: elaboración propia.

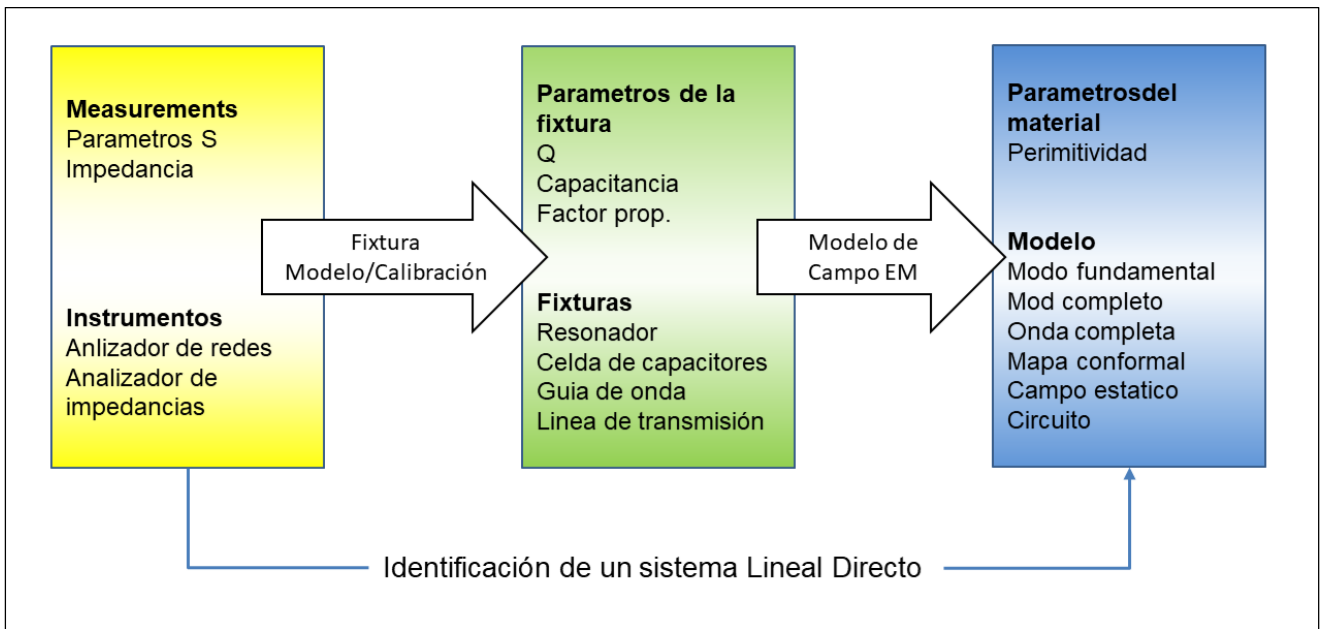


Figura 19. El flujo general del proceso de medición de la permisividad con el material bajo prueba y los modelos de campo requeridos para pasar del dispositivo a los parámetros del material.

Fuente: (Baker-Jarvis, 2010).

Capítulo 6. Resultados

6.1 Selección de las resinas

Muestras de cinco tipos de resina fueron tomadas de los depósitos a partir de los cuales son surtidas las máquinas de inyección de plástico. Anteriormente es explicado el criterio de selección: fue hecho a partir de su frecuencia de uso en el proceso de producción.

Las resinas seleccionadas fueron las mostradas en la tabla 3 y en la figura 20.

Tabla 3. Resinas seleccionadas y sus características.
(Fuente: Elaboración propia).

Resina –compuesto-	Número de parte	Fabricante
PP –Polipropileno-	93371	Washington Penn
ABS –Acrilonitrilo Butadieno Estireno-	93782	Samsung
Acetal –Copolímero-	90181	Celanese
LLDPE –Polietileno lineal de baja densidad-	93969	Modified Plastics
ASA –Acrilonitrilo estireno acrilato-	93867	Unitech Polymers



Figura 20. Muestras de material para la caracterización de resinas, representativas del uso en el piso de producción.

Fuente: Elaboración propia.

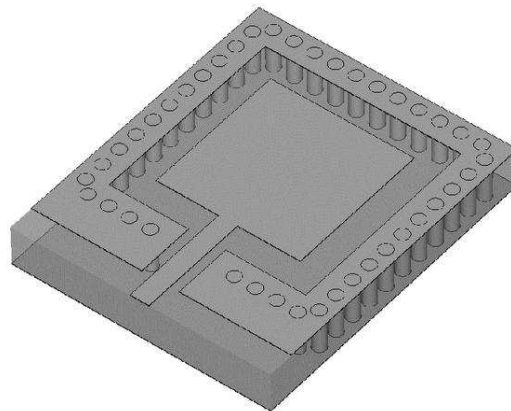
6.2 Selección del sensor para diferenciar los materiales

Basado en la investigación documental de la aplicación de los tres tecnologías de medición propuestas en el capítulo cinco (placas de electrodos paralelas, línea de transmisión y cavidades resonantes), fue seleccionada la técnica de medición de cavidades resonantes. Entre los métodos de caracterización de materiales populares, las técnicas basadas en resonador han atraído mucha atención debido al proceso de caracterización simple, porque pueden determinarse las propiedades de las muestras analizadas simplemente midiendo la frecuencia de resonancia y el factor de calidad (*factor Q*) del sensor (Lobato-Morales, 2019).

En particular, los sensores dieléctricos resonantes diseñados con la tecnología planar presentan ventajas únicas, como tamaño pequeño, mediciones en tiempo real y una pequeña cantidad de muestras de prueba necesarias para realizar las mediciones (Li, 2011).

6.2.1 Especificaciones del sensor

La figura 21 muestra la tecnología del sensor seleccionado, conocida como guía de onda integrada al sustrato (*SIW*) y el concepto de estructura SIW de compuesto mano derecha-izquierda (*CRLH*) operando en resonancia de orden negativo (*NOR*) (Dong, 2011).



(a)

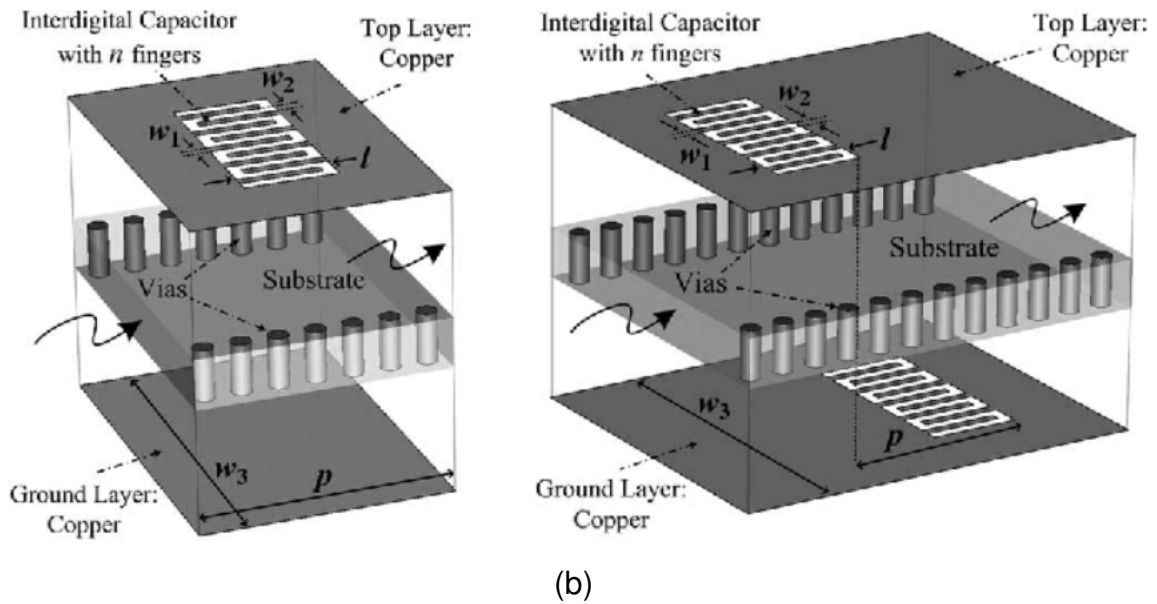


Figura 21. a) Guía de onda integrada al sustrato. b) Estructura SIW de compuesto CRLH.

Fuente: (Dong, Y., Itoh, T., 2011).

El sensor resonante de tipo SIW-NOR utilizado en este trabajo es mostrado en la figura 22, está diseñado utilizando un sustrato dieléctrico RO4003C, tiene una permitividad relativa $\epsilon_r = 3.55$, $\tan\delta = 0.0021$ y altura $h = 1.524$ mm. La frecuencia de funcionamiento es elegida alrededor de 2,45 GHz, definida dentro de una de las bandas industrial-científica-médica (ISM) (Lobato-Morales, 2019).

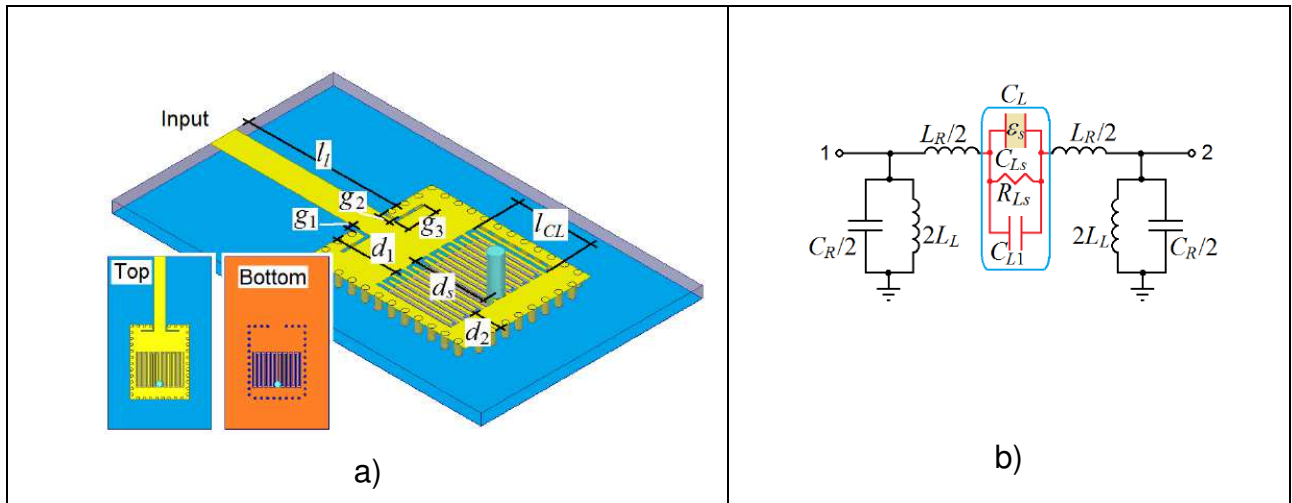


Figura 22. Prototipo de sensor para detección de los tipos de plástico. a) vista superior del sensor, b) *circuito equivalente*.

Fuente: (Lobato-Morales H, 2019).

6.2.2 Evaluación de la respuesta de las muestras de resina

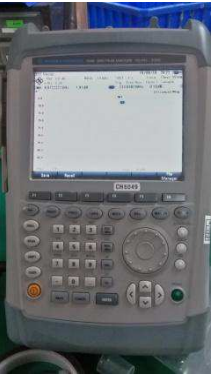

Para la evaluación de la respuesta fueron utilizados estos elementos:

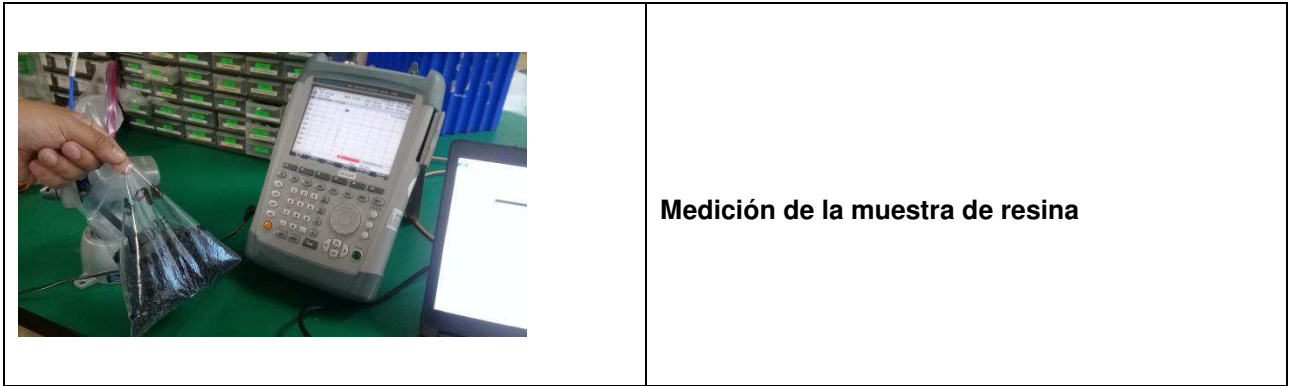
- Sensor SIW-NOR
- Muestras de resinas Acetal, PP, ABS, LLDPE, ASA (400 gm de cada una)
- Analizador de espectros Rohde & Schwarz FSH8

El procedimiento de medición consistió en estos pasos:

- Configuración del analizador de espectros en modo Analizador de redes (VNA)
- Conexión y calibración del sensor al analizador midiendo el coeficiente de reflexión de la señal del puerto de entrada (*reflection coefficient*) S_{11} (en decibeles dB) y la frecuencia de respuesta (en GHz)
- Medición del sensor en modo abierto, fue encontrado la respuesta en este modo es $S_{11} = -18.8 \text{ dB @ } 2.682 \text{ GHz}$

La verificación y mediciones iniciales son mostradas en la figura 23.

	<p>Analizador Rohde & Schwarz FSH8. Este equipo es utilizado para medir parámetros de dispersión de RF y redes de microondas. Es programable y capaz de medir desde 9 kHz a 20 GHz, hacer correcciones de errores, desplegar la información en múltiples formatos y realizar conversiones de datos.</p>
	<p>Medición del sistema en circuito abierto</p>



Medición de la muestra de resina

Figura 23. Proceso de evaluación del sistema y resinas en el laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3 Respuesta obtenida

En la figura 24 es mostrado un comparativo entre la respuesta de cada una de las cinco resinas bajo evaluación, para esto fueron medidas una sola vez con la intención de verificar si había diferencias entre ellas. Fue verificado como S_{11} cambiaba y entre ellas encontrados mínimos a diferentes niveles y frecuencias, por lo tanto era posible distinguirlas por medio del sensor resonante.

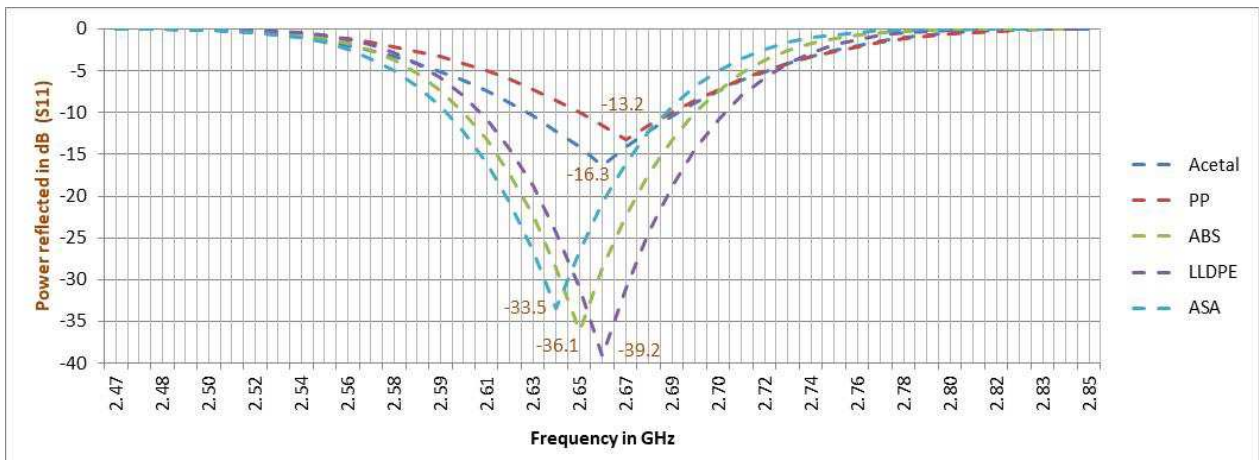


Figura 24. Respuesta de las resinas al ser medidas.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 25 muestra las mediciones realizadas con el equipo VNA y una tabla con los resultados. El equipo fue configurado con una impedancia de entrada de 50Ω con 8 GHz de ancho de banda.

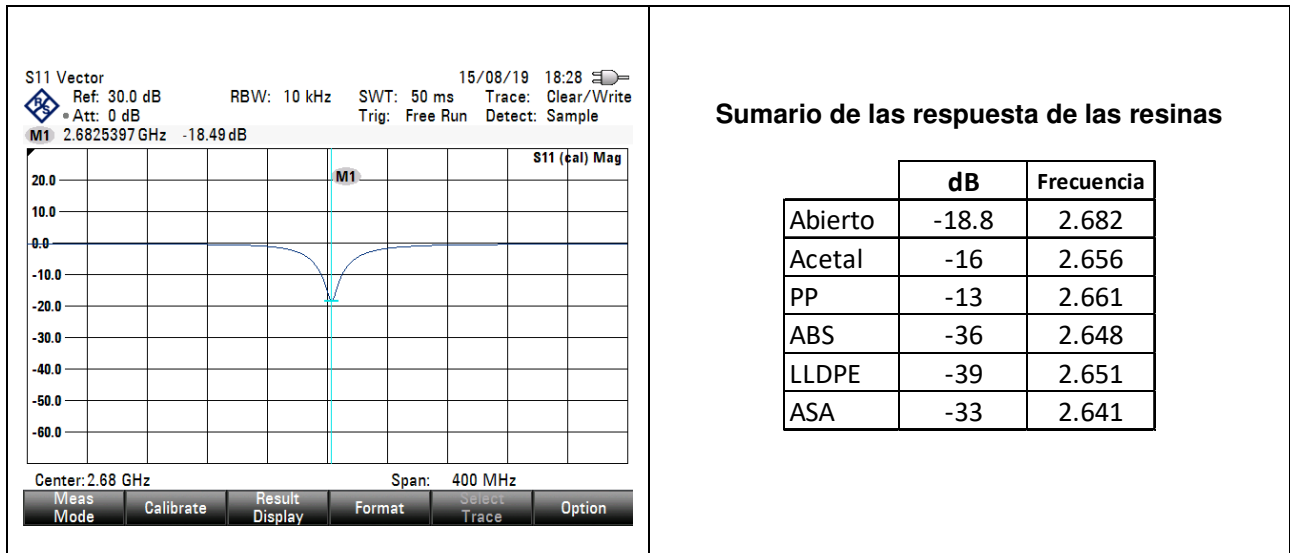


Figura 25. Utilizando el equipo VNA, fueron tomadas las mediciones de las respuestas de las resinas en circuito filtro utilizando solo un puerto del analizador (S_{11}). Fuente: Elaboración propia.

6.2.4 Intervalos de confianza y clases

Del muestro individual siguió el muestreo poblacional. Para esto fueron tomadas 30 muestras de cada tipo de resina para ver las variaciones (respatabilidad), esto es, del mismo material fueron seleccionados sub grupos de resina, evaluándose y reemplazándose hasta completar las 30 mediciones. Los datos son mostrados en la tabla 4, de acuerdo a los resultados es posible concluir las 30 mediciones tienen una distribución normal, y fue obtenida más información acerca de su precisión al calcular los intervalos de confianza (Navidi, W., 2006).

Tabla 4. Respuestas leídas del sensor al aplicar muestreo. Es mostrada la asociación de la frecuencia de respuesta y el nivel de la señal reflejada (S_{11} en dBs) para los cinco tipos de resina.

Fuente: Elaboración propia.

Muestreo de resinas S11 (Reflexión de potencia y frecuencia de resonancia)

	Resinas									
	PP		ABS		ACETAL		LLDPE		ASA	
	S_{11} dB	Freq GHz	S_{11} dB	Freq GHz	S_{11} dB	Freq GHz	S_{11} dB	Freq GHz	S_{11} dB	Freq GHz
Especificación	-13	2.662	-36	2.648	-16	2.656	-39	2.651	-33	2.641
Tolerancia (+)	1.5	0.0025	1	0.0025	1	0.0025	1	0.0025	1	0.0025
Tolerancia (-)	1.5	0.0025	1	0.0025	1	0.0025	1	0.0025	1	0.0025
Muestra 1	-12.95	2.664	-36.91	2.650	-16.57	2.654	-38.11	2.652	-33.05	2.642
Muestra 2	-13.43	2.663	-35.76	2.648	-16.5	2.657	-38.18	2.649	-33.74	2.642
Muestra 3	-13.29	2.663	-36.53	2.650	-16.57	2.654	-39.91	2.653	-33.44	2.64
Muestra 4	-11.99	2.663	-36.42	2.648	-16.92	2.658	-38.42	2.653	-33.29	2.64
Muestra 5	-12.33	2.660	-36.91	2.648	-16.19	2.654	-38.78	2.652	-32.26	2.641
Muestra 6	-13.22	2.663	-36.22	2.646	-15.12	2.656	-38.36	2.65	-33.54	2.64
Muestra 7	-12.75	2.660	-36.67	2.650	-16.47	2.655	-39.14	2.653	-33.09	2.641
Muestra 8	-12.11	2.661	-36.17	2.650	-16.98	2.654	-38.7	2.652	-32.69	2.639
Muestra 9	-12.19	2.663	-36.78	2.650	-15.62	2.654	-38.68	2.651	-33.46	2.64
Muestra 10	-13.36	2.663	-35	2.646	-15.37	2.658	-39.6	2.65	-33.2	2.64
Muestra 11	-12.1	2.661	-36.59	2.650	-16.17	2.658	-39.22	2.652	-32.34	2.64
Muestra 12	-13.22	2.663	-35.32	2.648	-16.38	2.654	-38.2	2.652	-32.15	2.641
Muestra 13	-11.96	2.660	-35.98	2.650	-16.02	2.656	-39.12	2.65	-33.52	2.642
Muestra 14	-12.04	2.662	-36.55	2.646	-15.93	2.654	-39.73	2.65	-32.67	2.642
Muestra 15	-12.34	2.662	-35.73	2.646	-15.9	2.657	-39.56	2.653	-33.23	2.641
Muestra 16	-12.8	2.663	-36.07	2.648	-15.87	2.656	-39.69	2.653	-33.11	2.641
Muestra 17	-12.76	2.662	-35.28	2.649	-16.09	2.658	-39.79	2.653	-33.9	2.64
Muestra 18	-13.44	2.661	-36.51	2.646	-15.96	2.658	-39.17	2.65	-32.73	2.642
Muestra 19	-12.88	2.662	-36.76	2.648	-15.17	2.655	-38.84	2.649	-33.09	2.643
Muestra 20	-11.87	2.660	-36.36	2.646	-15.91	2.657	-39.34	2.651	-33.22	2.643
Muestra 21	-12.64	2.663	-35.53	2.648	-16.84	2.657	-39.31	2.649	-33.91	2.641
Muestra 22	-11.83	2.662	-36.26	2.649	-15.74	2.657	-39.65	2.653	-32.47	2.64
Muestra 23	-11.94	2.662	-36.8	2.650	-15.41	2.656	-39.39	2.651	-32.19	2.64
Muestra 24	-13.26	2.661	-35	2.646	-16.7	2.658	-39.23	2.65	-33.08	2.639
Muestra 25	-12.91	2.664	-36.72	2.646	-16.5	2.658	-39.9	2.652	-33.56	2.643
Muestra 26	-13.18	2.663	-36.2	2.649	-16.31	2.657	-38.25	2.65	-33.57	2.643
Muestra 27	-13.43	2.664	-35.41	2.650	-15.52	2.658	-38.85	2.65	-33.34	2.642
Muestra 28	-13.07	2.663	-36.83	2.646	-15.5	2.656	-39.64	2.649	-32.81	2.64
Muestra 29	-12.49	2.661	-36.26	2.649	-16.64	2.655	-39.62	2.651	-32.76	2.642
Muestra 30	-12.3	2.662	-36.48	2.648	-15.8	2.656	-38.74	2.649	-32.92	2.642
Prom. Lecturas	-12.3	2.662	-36.0	2.649	-15.9	2.656	-39.1	2.651	-33.0	2.641
Desviación Estandar	0.62	0.0012	0.61	0.0015	0.53	0.0011	0.56	0.0015	0.57	0.0012

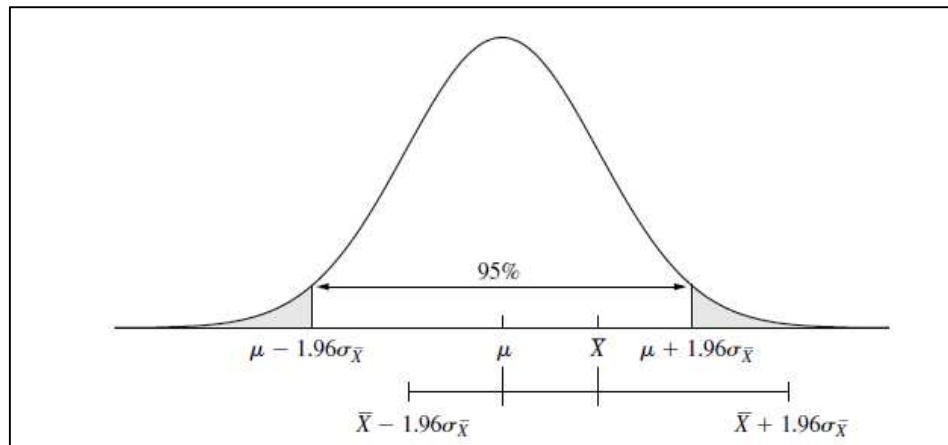


Figura 26. La media muestral \bar{X} es extraída de una distribución normal con media μ y desviación estándar $\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$. Para esta muestra en particular, \bar{X} proviene de 95% intermedio de la distribución, por lo tanto el intervalo de confianza 95% $\bar{X} \pm 1.96 \sigma_{\bar{X}}$ contiene con seguridad la media poblacional μ .

Fuente: (Navidi, W., 2006).

Si sustituimos los símbolos de la fórmula mostrada en la figura 26, uno por valores específicos obtendremos dos valores; los cuales representan el límite inferior y superior del intervalo de confianza, la tabla 5 muestra estas relaciones calculadas para los cinco tipos de resina.

Tabla 5. La distribución de las muestras (media y desviación estandar) y los intervalos de confianza al 95% son mostrados.

Fuente: Elaboración propia

		PP	ABS	ACETAL	LLDPE	ASA
Promedios	S11	-12.999	-36.13	-16.45	-38.75	-32.96
	Freq	2.6639	2.648	2.6565	2.652	2.642
Desviación Estándar	S11	0.5561	1.203	1.1046	1.009	1.107
	Freq	0.0024	0.002	0.0017	0.001	0.002

S11	$\bar{X} - [z(x/2)(\sigma/\sqrt{n})]$	-13.20	-36.56	-16.84	-39.12	-33.36
	$\bar{X} + [z(x/2)(\sigma/\sqrt{n})]$	-12.80	-35.70	-16.05	-38.39	-32.57
Freq	$\bar{X} - [z(x/2)(\sigma/\sqrt{n})]$	2.663	2.648	2.656	2.651	2.641
	$\bar{X} + [z(x/2)(\sigma/\sqrt{n})]$	2.665	2.649	2.657	2.652	2.642

Intervalos de confianza 95%

	S11 (dB)	Frecuencia (GHz)
PP	(-13.2, -12.8)	(2.663, 2.665)
ABS	(-36.56, -35.7)	(2.648, 2.649)
ACETAL	(-16.84, -16.05)	(2.656, 2.657)
LLDPE	(-39.12, -38.39)	(2.651, 2.652)
ASA	(-33.36, -32.57)	(2.641, 2.642)

Como complemento, es elaborada una gráfica mostrando la distribución de las 30 muestras y el espacio en el ancho de banda ocupado por cada muestra. Es comprobada la respuesta en frecuencia de cada una de ellas es diferente, por lo tanto la capacidad del sensor para identificarlas es suficiente para establecer un patrón de medición y reconocimiento. Esto es observado en las gráficas 27 y 28.

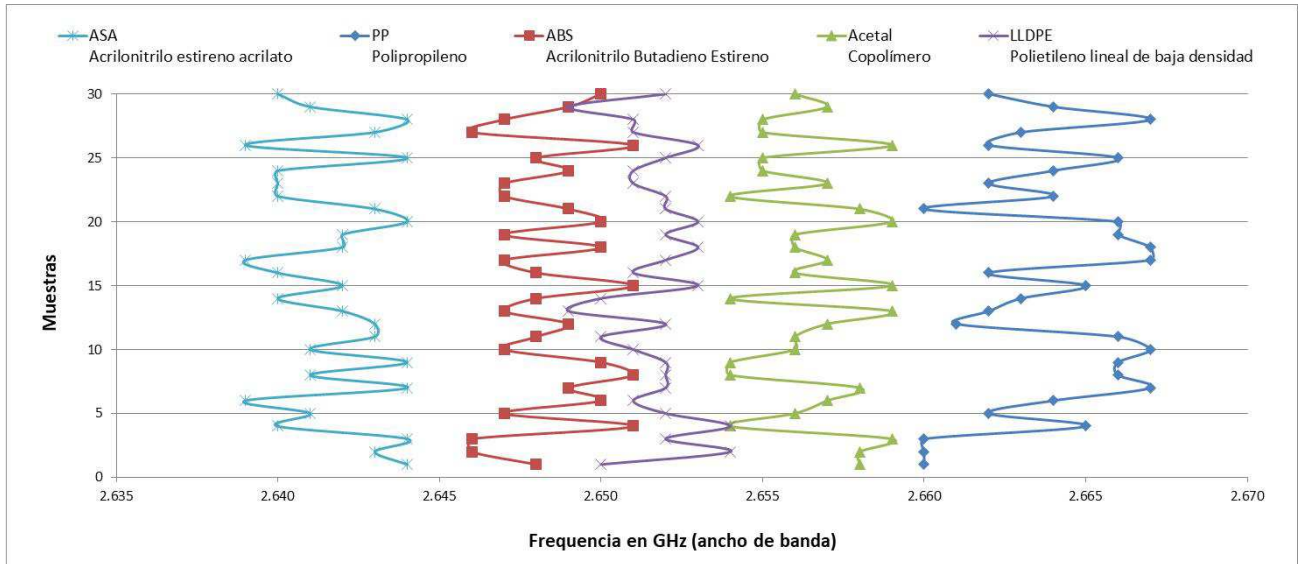


Figura 27. Distribución de la respuesta en frecuencia de las muestras de resina.
Fuente: Elaboración propia.

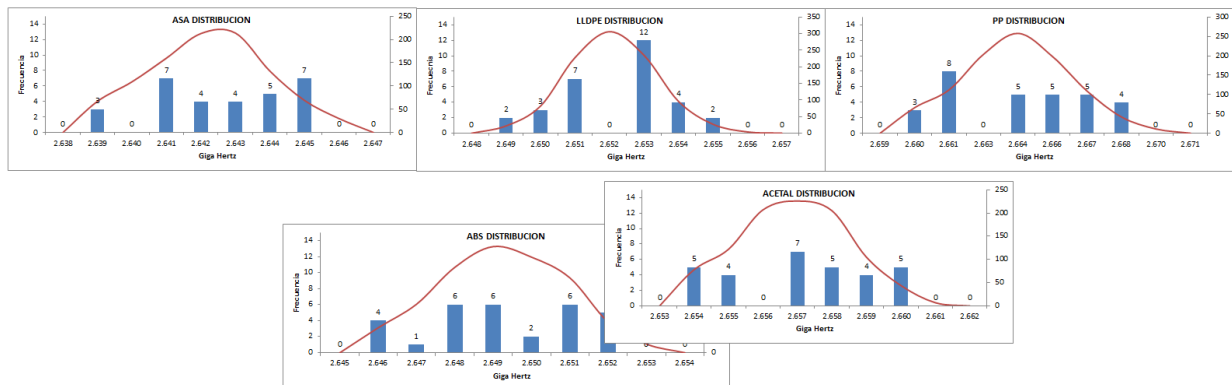


Figura 28. Graficas de la distribución normal de la respuesta en frecuencia de cada muestra.
LLDPE y ABS comparten parte del ancho de banda, sin embargo es fácil identificarlas por el coeficiente de reflexión.
Fuente: Elaboración propia.

6.2.5 Propuesta de ensamble sistema portátil

El ensamble del sistema móvil propuesto es mostrado en la figura 29, fueron seleccionados los siguientes componentes:

- Sensor de permitividad dieléctrica basado en resonancia de orden negativo (NOR) de manufactura local.
- Analizador vectorial de redes PocketVNA Hardware versión 4 GHz 2.0
- Computadora Raspberry Pi 4: procesador 64-bit, puertos de HDMI, 4 GB RAM, Ethernet, USB 3.0
- Monitor 7", resolución 800x480 pixeles, entrada HDMI, modelo AR0836
- Cable coaxial SMA Macho - SMA Macho 15 cm 50 ohm modelo B01MXSF9IM

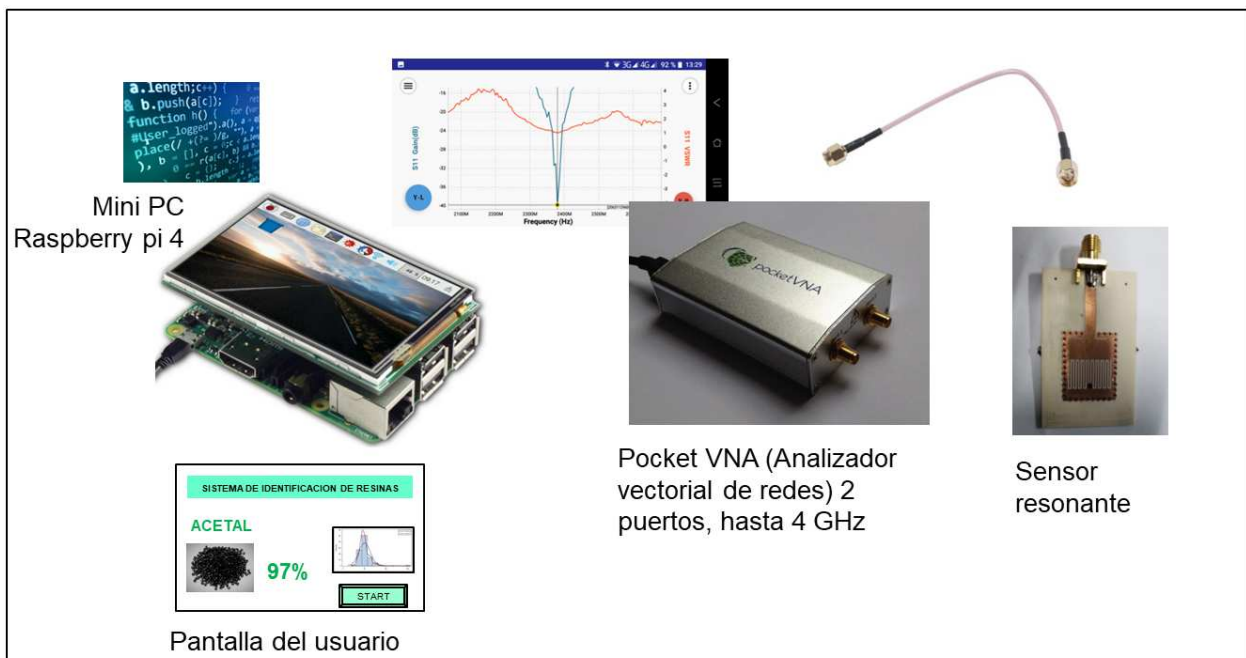


Figura 29. Propuesta de ensamble de un sistema portátil para evaluación de las resinas en el piso de producción. Existen en el mercado componentes de bajo costo para la aplicación específica.

Fuente: elaboración propia.

El complemento para lograr la interfaz entre los componentes y mostrar los resultados de la evaluación es desarrollar rutinas programadas y residentes en la computadora Raspberry Pi.

Capítulo 7. Discusión de los resultados

El propósito fundamental de esta tesis fue buscar una alternativa a la identificación de materiales plásticos en forma de resinas, ofreciendo una herramienta sustituta a las utilizadas actualmente en la industria de inyección de plástico.

Así pues, la aportación principal de este trabajo consistió en la utilización de una tecnología diferente aplicada al campo de la evaluación de las resinas plásticas. Enfocada en someter a las muestras de resinas a campos electromagnéticos para medir sus respuestas y de esta forma medir sus propiedades.

De los resultados obtenidos es inferida la eficiencia del sensor resonante para detectar las respuestas de las cinco resinas evaluadas. Como muestran las figuras 24, 27 y 28 fue posible diferenciar y ubicar las respuestas y dimensionarlas en un rango de frecuencias y coeficiente de reflexión específicos.

Fue demostrado también el no traslape en el ancho de banda utilizado para las evaluaciones, siendo de 2.638 a 2.671 GHz y mostrado en la figura 28. Puede concluirse por su distribución en el rango de frecuencias y por los niveles del coeficiente de reflexión, es asumido las resinas son identificables individualmente, esto prueba la viabilidad de utilizar el sensor resonante y el equipo VNA para implementar un sistema de identificación para plásticos en forma de resinas.

Fue posible establecer la asociación del nivel más bajo para S_{11} (índice de reflexión) y la frecuencia donde cada una de los cinco tipos de resina entra en resonancia, mostrada en la tabla 5, donde estimamos estará el valor de la respuesta con una probabilidad del 95% de acierto. Por ejemplo, para el polipropileno (PP) los intervalos de confianza para el par son de S_{11} (-13.2, -12.8) dB y (2.663, 2.665) GHz, y para el Acetal son de S_{11} (-16.84, -16.05) dB y (2.656, 2.657) GHz; es asumido entonces la posibilidad de identificar las resinas plásticas por pares asociados.

Los objetivos de este trabajo fueron logrados y podemos enumerarlos de esta manera:

Respuesta de las resinas y distribución. Una de las herramientas actuales para identificar los diferentes tipos de resina es por medio de la medición de su flujo de fusión. En este documento es demostrada la alternativa de identificarlas por medio de

su respuesta a la frecuencia cuando son sometidas a campos electromagnéticos alternantes.

Como fue explicado, existe un método para diferenciar a los cinco tipos de resina utilizadas en este trabajo: 1) PP –*Polipropileno*-, 2) ABS –*Acrilonitrilo Butadieno Estireno*-, 3) Acetal –*Copolímero*-, 4) LLDPE –*Polietileno lineal de baja densidad*-, 5) ASA –*Acrilonitrilo estireno acrilato*- por medio del parámetro de dispersión S_{11} y del valor de la frecuencia bajo la cual entran en resonancia. Estos valores son obtenidos por medio de un analizador vectorial de redes.

La identificación de las resinas es dada por dos parámetros: el valor de la frecuencia donde está localizado el mínimo de la señal reflejada. Como es mostrado en las gráficas, estos puntos son únicos para cada material muestreado y son la base a partir de donde el sistema desarrollado hace la identificación.

Selección del tipo de sensor. Fueron propuestas tres tecnologías de radiofrecuencia para medición de materiales: 1) placas de electrodos paralelas, 2) líneas de transmisión, y 3) cavidades resonantes. La tecnología seleccionada fue la de un circuito resonante debido a la sensibilidad y construcción permitiendo controlar y distribuir los campos magnéticos en forma puntual. Además, existe amplia investigación y documentación respaldando su uso como sensores especializados para gases y materiales. Otra ventaja son los rangos de frecuencia de configuración permitidos. Para este trabajo fue seleccionada una banda de frecuencia de uso comercial de 2.45 GHz.

Desarrollo técnico del sensor. Para el desarrollo de las mediciones, fue seleccionado un sensor cuya aplicación estaba enfocada en evaluaciones de líquidos mezclados. Fue encontrado su respuesta y capacidad de medición de sólidos es igual a la aplicación original. Al ser un sensor con elementos activos en las dos caras del circuito, resultado de utilidad para introducirlo en el recipiente conteniendo las muestras plásticas.

Equipo en el mercado para elaborar el sistema propuesto. En esta investigación, como resultado de las pruebas, fueron identificados los componentes existentes en el mercado para ensamblar un sistema portátil de medición para identificar las resinas plásticas. Esto es hecho en base a dos hallazgos:

- El costo de los analizadores vectoriales de redes es limitante para fabricar equipos de bajo costo, pero fue encontrado un analizador de aplicación específica con un rango de trabajo de 500 MHz a 4 GHz.
- Los sensores como el utilizado están disponibles en el mercado y son fabricados bajo demanda.

Comparación de este estudio con estudios previos. Es posible comparar los resultados obtenidos con estudios consultados durante esta investigación, por ejemplo los resultados obtenidos en el artículo "*Optimum Design of a Microstrip Ring Resonator Sensor to Determine the Moisture Content in Oil Palm Fruits and Seeds*" (Ahmad, A., 2019), donde se miden las respuestas de una fruta para determinar su grado de maduración, donde de manera similar se relacionan los parámetros de dispersión S_{11} a lo largo de un rango de frecuencia (2 a 3 GHz).

Capítulo 8. Conclusiones

Con los experimentos realizados (figura 23) no puede probarse la hipótesis nula, por lo tanto fue asumida la hipótesis alternativa con las siguientes conclusiones:

Un sistema de antenas de radiofrecuencia utilizando un sensor resonante dieléctrico detecta las diferencias dieléctricas de los plásticos de resinas ABS, PP, Acetal, ASA, LLDPE a través de curvas características.

Las conclusiones derivadas del trabajo de investigación enlazan los temas propuestos metodológicamente y son listados a continuación:

Un circuito del tipo resonante trabajando en el rango de la frecuencia comercial de 2.4 GHZ fue superior a las tecnologías de placas de electrodos paralelos y línea de transmisión contra las comparadas en la investigación documental. Las ventajas comprobadas fueron la alta sensibilidad y un tamaño menor, sus dimensiones de 3.5 cm por 2.5 cm lo hacen idóneo para una aplicación portátil.

Fue posible diferenciar las resinas por medio de la aplicación de radiofrecuencia y medición de respuesta.

Existen en el mercado los componentes para fabricar un equipo portátil conteniendo las herramientas utilizadas en este trabajo y configurados para medir y mostrar los resultados al usuario.

A partir de los hallazgos demostrados en este trabajo, como estudios futuros puede plantearse reemplazar el sensor resonante por otro de mayor resolución para lograr diferenciar resinas similares conteniendo ligeras variantes químicas o físicas debidas a su morfología o a variaciones entre fabricantes, desarrollar un sistema móvil más barato y ergonómico, o integrar en los análisis de las respuestas la variable de la temperatura

Para concluir, las limitaciones de este estudio están relacionadas a la presentación de la resina, esto es, fueron evaluadas las resinas en tamaños preparados para el consumo de máquinas de inyección (granulado), el caso del comportamiento de las resinas en polvo o en sólidos de mayor dimensión no es cubierto aquí.

Lista de referencias bibliográficas

- Abdul-Rahman, M.S., Mukhopadhyay, S.C., Yu PL. (2014) Novel Planar Interdigital Sensors. In: Novel Sensors for Food Inspection: Modelling, Fabrication and Experimentation. *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, vol 10*. Springer, Cham
- Ahmad, A., Abbas, Z., Abrass, H., & You, K. (2019). Optimum Design of a Microstrip Ring Resonator Sensor to Determine the Moisture Content in Oil Palm Fruits and Seeds. *BioResources*, 14(1), 1819-1837. Retrieved from https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_14_1_1819_Ahmad_Optimum_Design_Microstrip_Ring_Resonator
- Baker-Jarvis, J, Janezic, M. D., Riddle, B., Holloway, C. L., Paulter, N. G., and Blendell, J. E. (2001), Dielectric and conductor-loss characterization and measurements on electronic packaging materials, *NIST Tech. Note* 1520.
- Baker-Jarvis, J, Janezic, M. D., and DeGroot, D. (2010), High Frequency Dielectric measurements, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*.
- Baker-Jarvis, J., Kim, S. (2012). The Interaction of Radio-Frequency Fields With Dielectric Materials at Macroscopic to Mesoscopic Scales. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Boulder. Co.
- Baker-Jarvis, J., (2005), Time-dependent entropy evolution in microscopic and macroscopic electromagnetic relaxation, *Physics Rev. E* 72, 066613. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.72.066613>
- Billah, S.M. (2018) Dielectric Polymers. In: Jafar Mazumder M., Sheardown H., Al-Ahmed A. (eds) Functional Polymers. Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series. Springer, Cham
- Bogner, A., Steiner, C., Walter, S., Jaroslaw, K., Hagen, G., Moos, R. (2017) Planar Microstrip Ring Resonators for Microwave-Based Gas Sensing: Design Aspects and Initial Transducers for Humidity and Ammonia Sensing. *Department of functional materials*, Univeristy of Bayreuth, Bayreuth Germany
- Bolivar, P. H., Brucherseifer, M., Rivas J. G., Gonzalo, R., Ederra, I., Reynolds, A. L., Holker, M., y Maagt P., (2003), Measurement of the Dielectric Constant and Loss Tangent of High Dielectric-Constant Materials at Terahertz Frequencies, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 51(4), 1062.
- Bozzelli, J. (2014), Injection molding solutions, *Moldeo Científico*, Midland Mich.

- Brinson, H.F., Brinson L.C. (2015) Characteristics, Applications and Properties of Polymers. *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity*. Springer, Boston, MA
- Bruno, E., (2000). Automated Sorting of Plastics for Recycling.
- Dong, Y., Itoh, T. (2011). Composite Right/Left-Handed Substrate Integrated Waveguide and Half Mode Substrate Integrated Waveguide Leaky-Wave Structures. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59, 767-775.
- Ding, F., Jones, C., Weckler, P. (2009). RF/microwave technology application for identification of stored-grain insects under electric fields. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*. 3. 227-238. 10.1007/s11694-009-9089-x.
- Ehrenstein, G.W., Riedel, G., Trawiel, P. (2004), *Thermal analysis of plastics: theory and practice*. Cincinnati: Hanser Gardner Publications.
- Filho, J.M.S., (2017) Rodrigues Junior, C.A., Sousa, D.G. et al. *Journal of Electrical Material* 46: 4344. <https://ebiblio.cetys.mx:4083/10.1007/s11664-017-5324-0>
- Hogg, R., Tanis, A., Zimmerman, D., (2015), *Probability and Statistical Inference 9th ed.* (p. 202), Pearson, Upper Saddle River, NJ
- Jafar Mazumder, M. A. et al. (eds.),(2018), *Functional Polymers, Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series*, https://doi.org/10.1007/978-3-319-92067-2_8-1
- Juran, J., (1999), *Juran's Quality Handbook 5th ed.* (Sec. 5-20), McGraw-Hill
- Khamoushi, K. (2014), *Characterization and Dielectric Properties of Microwave Rare Earth Ceramics Materials for Telecommunications*, Tampere University of Technology. Tampere Finland.
- Kabir, M. F., (1998), Dielectric and ultrasonic properties of rubber wood. Effect of moisture content, grain direction and frequency. *Springer Verlag* p. 223-227.
- Li, Y., Bowler, N., Johnson, D., A resonant microwave patch sensor for detection of layer thickness or permittivity variations in multilayered dielectric structures. *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 1, Jan. 2011.
- Ling, B., Tiwari, G. & Wang, S. Agron. Sustained Development (2015) 35: 233. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0228-3>
- Lobato-Morales, H., Lee, H., Medina-Monroy, J., (2019), Compact Dielectric-Permittivity Sensors of Liquid Samples based on Substrate-Integrated-Waveguide with Negative-Order-Resonance, *IEEE Sensors Journal*, DOI 10.1109/JSEN.2019.2922137

- Malyshkin, A. K., Pirogov, T. (2012) *Combined Low-Frequency and Microwave Dielectric Spectroscopy*, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscu Rusia.
- Miah A.Q. (2016) *Sampling Theory. Applied Statistics for Social and Management Sciences*. Springer, Singapore
- Mitchell, G, Fenalla, F, Nordon, A, Leung Tang, P, Gibson, LT., (2013) Assessment of historical polymers using attenuated total reflectance- Fourier transform infrared spectroscopy with principal component analysis. *Herit Sci.*; doi:10.1186/2050-7445-1-28.
- Navidi, W., (2006), *Estadística para ingenieros y científicos*, Ed. McGraw Hill, p. 300-312
- Neufeld, L., Stassen, F., Sheppard, R., & Gilman, T. (2016). The new plastics economy: rethinking the future of plastics. *In World Economic Forum*. Available at: http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf.
- Scott, D. M., and R. L. Waterland (1995). Identification of Plastic Waste Using Spectroscopy and Neural Networks. *Polymer Engineering and Science*, v35 n12, June, 1011-1015.
- Schindler, A., Doedt, M., Gezgin, S., Menzel, J., Schmolzer, S. (2017). Identification of Polymers by means of DSC, TG, STA, and computer assisted database search. *Journal of Thermal Analytic Calorimetry* (2017) 129:833–842 DOI 10.1007/s10973-017-6208-5
- Trabelsi, S. (2018) *Food Measure* 12: 683. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9681-4>
- Volkov, A., Goncharov Yu. G, Kozlov G.V., y Lebedev, S.P.,(1990) Dielectric Measurements and Properties of Solids at Frequencies 10^{11} – 10^{12} Hz. *Proceeding of the Prokhorov General Physics Institute*, Vol.25: Submillimeter Dielectric Spectroscopy of Solids, Ed. by G.V. Kozlov (Nauka, Moscu, Rusia), p. 3