

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

**Caracterización del comportamiento
dieléctrico de los materiales utilizados por
impresoras 3D, para su posible utilización
en dispositivos a frecuencias microondas**

**Dielectric characterization of materials
used by 3D printers, for possible use in
microwave frequency devices**

Para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: David Palacio Abdallah

Octubre - 2015



INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: David Palacio Abdallah

Director del PFC: Jose M^a Zamanillo Sainz de la Maza

Título: “Caracterización del comportamiento dieléctrico de los materiales utilizados por impresoras 3D, para su posible utilización en dispositivos a frecuencias microondas”

Title: “Dielectric characterization of materials used by 3D printers, for possible use in microwave frequency devices “

Presentado a examen el día: 27 de Octubre de 2015
para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Fernandez Ibañez, Tomás

Secretario (Apellidos, Nombre): Zamanillo Sáinz de la Maza, José M^a

Vocal (Apellidos, Nombre):

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:.....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera Nº
(a asignar por Secretaría)

AGRADECIMIENTOS:

En primer lugar al tutor de este proyecto, José María Zamanillo Saiz de la Maza, por su atención, por su ayuda y su comprensión durante el desarrollo de este proyecto.

En segundo lugar, a todos los compañeros de travesía a lo largo de esta carrera, poceros, que no decaiga, hondureños... compañeros de estudio, de tensiones, de fiestas, de viajes... a los muchos amigos que hice en mi ERASMUS en Cergy.

Por último, a toda mi familia, en la que incluyo a M, mi faro, mis hermanas, porque ambas sois una sonrisa perpetua, y, en especial, gracias a mis padres, por aguantarme todo este tiempo sin echarme de casa y teniendo siempre muestras de cariño.

Gracias a todas las personas que habéis compartido aunque sea un momento conmigo en todo este tiempo.

“Una retirada a tiempo es siempre una derrota”
Enrique Bunbury

Capítulo 1 – <u>INTRODUCCIÓN</u>	Pág. 4
1.1 - <u>Introducción</u>	Pág. 5
1.2 – <u>Motivación del proyecto</u>	Pág. 5
Capítulo 2 – <u>RESEÑA TEÓRICA</u>	Pág. 7
2.1 – <u>Teoría de condensadores</u>	Pág. 8
2.2 – <u>Efecto borde en condensadores</u>	Pág. 9
Capítulo 3 – <u>MEDIDAS REALIZADAS</u>	Pág. 11
3.1 – <u>HP 4991A</u>	Pág. 12
3.2 – <u>Keysight E5991B</u>	Pág. 17
3.3 – <u>Multímetro MY60</u>	Pág. 22
Capítulo 4 – <u>CONCLUSIONES Y ESTUDIOS POSTERIORES</u>	Pág. 23
4.1 – <u>Conclusiones</u>	Pág. 24
4.2 – <u>Estudios secundarios</u>	Pág. 24
Capítulo 5 – <u>ANEXOS</u>	Pág. 25
5.1 – <u>Analizador de impedancias HP 4991A</u>	Pág. 26
5.1.1 – <u>Funciones del panel frontal</u>	Pág. 26
5.1.2 – <u>Valores iniciales</u>	Pág. 33
5.1.3 - <u>Displays</u>	Pág. 33
5.1.4 – <u>Modos de medida</u>	Pág. 34
5.2 – <u>Analizador de impedancias Keysight E5991B</u>	Pág. 41
5.2.1 – <u>Parámetros y rangos de medida</u>	Pág. 42
5.2.2 – <u>Opción E4991B-002 para medidas en materiales</u>	Pág. 46
5.3 – <u>Materiales utilizados</u>	Pág. 48
5.3.1 – <u>ABS</u>	Pág. 49
5.3.2 – <u>Cianocrilato</u>	Pág. 53

5.3.3 – <u>TPE</u>	Pág. 54
5.4 – <u>Impresión 3D</u>	Pág. 56
Capítulo 6 - <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	Pág.59

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 – INTRODUCCIÓN

A medida que el ser humano ha evolucionado, el uso de diferentes herramientas y materiales lo ha hecho de forma paralela. Lo que antes se descubría debido al azar, sin investigación previa, se ha ido transformando en la búsqueda de propiedades concretas en diferentes materiales, esto es útil de forma que, los recursos que una región tiene, puedan ser totalmente aprovechados, sin necesidad de importar materiales del exterior, normalmente más caros, y que no repercuten positivamente en la economía local. De ahí surge la necesidad de caracterizar materiales físicamente, materiales de los que se podrían desconocer ciertas cualidades, pero que gracias a ciertas investigaciones se pueden conocer y cuantificar. Así se sabe, por ejemplo, que la plata conduce mejor la electricidad que el cobre, aunque este último sea más utilizado para ello, debido a que es más abundante como materia prima, y con esto, más barato comercial e industrialmente, ya que la plata se utiliza más como metal precioso que como componente electrónico, al menos en lo que a nivel de usuario general respecta, ya que en ciertos niveles de la industria, el uso de la plata (o el oro) en lugar del cobre puede acarrear grandes beneficios, tanto económicos como de eficiencia. Aunque esto es sólo un ejemplo, escenifica a la perfección cómo ha evolucionado y como ha de hacerlo el uso de materiales.

En el punto actual de la historia, en el que se cuenta con unos avances científicos impresionantes, e impulsados por la pérdida de nivel económico mundial, se está intentando ahorrar dinero en todos los aspectos de la sociedad. Uno de esos ámbitos es la ciencia, lo que puede impulsar la búsqueda de nuevas formas de hacer lo mismo, pero abaratando costes, sobre todo en gastos de fabricación. En diferentes materiales se están llevando a cabo medidas de eficiencia, para, sin perder propiedades, hacerlo más barato si cabe.

1.2 – MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En los últimos años está avanzando la impresión en 3D, siendo aún caro, para un particular, comprar una impresora 3D, se está asistiendo a la llegada de una forma de fabricación prácticamente doméstica, no hacen falta grandes factorías ni complicados procesos de fabricación para su uso, esto puede permitir a empresas entrar en ciertos mercados gracias a este nuevo método, mercados antes inaccesibles. Sus usos se podrían extender desde realizar piezas para juguetes hasta fabricación de partes para circuitos microondas.

Aquí se puede encuadrar este proyecto, donde con materiales como el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (a partir de ahora, ABS) se podría conseguir abaratar en costes de fabricación, utilizando una impresora 3D para fabricar piezas utilizables en las telecomunicaciones, por ejemplo, como obstáculos en guías de onda, sustrato para condensadores...

Aquí nos situamos, buscando características eléctricas en materiales plásticos, como son el ABS o el Cianocrilato, que gracias a la impresión 3D, siendo ya presente, pasaría a formar parte del futuro, debido a que las facilidades respecto al metal o

materiales cerámicos son claras, el metal para las guías de onda debe ser hecho por tornero, lo que conlleva mucho tiempo de fabricación en comparación con lo que una impresora en 3D tardaría, sumado a que la esta se podría tener en el mismo lugar donde se diseña la pieza, con lo que se podría aumentar la capacidad de investigación dada la inmediatez con la que cuenta la impresión, comprobando in situ el proceso de fabricación, y posibilitando la prueba y error, dado el bajo precio de estos materiales plásticos. Lo mismo se podría aplicar a los sustratos de los condensadores, los cerámicos implican también un proceso de fabricación complicado y caro, lo que se puede simplificar y abaratar mediante el uso de plástico imprimible, con las ventajas ya mencionadas con anterioridad. Otro posible ejemplo sería poder obtener recambios de algunos aparatos dirigidos a la docencia universitaria, algo a tener en cuenta en tiempos de recortes, y que permitiría la recuperación de ciertos artilugios que están abandonados o infrautilizados debido a que no funciona correctamente. Para ello, se medirán las propiedades eléctricas de ciertos materiales, con el fin de caracterizarlos eléctricamente, así comprobar si son o no utilizables y válidos para su uso en las telecomunicaciones.

Para conseguir medir la constante dieléctrica de un material, se hará a partir de su capacidad, utilizando el material con la forma deseada e introduciéndolo entre un par de placas paralelas, esto es, se hace un condensador cuyo dieléctrico sea el material en cuestión. Para ello se utilizarán un puente analizador de impedancias HP 4192A, y se ha contactado con *Keysight* para obtener medidas en frecuencias a las cuales no llegan los equipos disponibles en la Universidad de Cantabria, con lo que se podría ampliar el rango de experimentación, en concreto, el equipo HP4192A llega hasta los 13MHz de frecuencia, y el equipo E5991B prestado por la empresa Keysight alcanza frecuencias de 3 GHz.

Capítulo 2

RESEÑA

TEÓRICA

2.1 – TEORÍA DE CONDENSADORES

Ahora se realizará una explicación teórica de todo lo que corresponde a las medidas realizadas, los aspectos físicos que se van a abordar, sumado a las explicaciones de las fórmulas utilizadas.

Para calcular la capacidad variable utilizando las características físicas únicamente se aplica la fórmula 1:

$$C = \frac{\varepsilon \times A}{d} \times (n - 1)$$

Fórmula 1

Donde,

La C es la capacidad del condensador, que se mide en Faradios (F).

La A representa el área que abarcan las placas paralelas del condensador, que se mide en metros cuadrados (m^2) y se calcula como

$A = \pi * r^2$ en nuestro caso, ya que estas son circulares.

En la d se pone el valor del espesor del sustrato entre placas, que se medirá en metros (m).

La n indica el número de placas paralelas con las que cuenta el condensador variable, como mínimo tendrá 2 placas.

ε es la constante dieléctrica del material utilizado como sustrato en el condensador. Esta constante,

Siendo, $\varepsilon_0 = 8,854 * 10^{-12}$

ε_r la constante dieléctrica del sustrato que se sitúa entre las dos placas del condensador. Como apunte, es lo que se busca calcular en este proyecto de final de carrera.

Se presentan algunos ejemplos de constantes dieléctricas en diferentes materiales, se conocen muchas,

Aire = 1,0006

Teflón = 2

Vidrio = 4 – 8,5

Óxido de aluminio=6-

50

En la figura 1 se muestra el condensador realizado, y los diferentes sustratos, cianocrilato el blanco y ABS el negro.



Figura 1. Diferentes sustratos.

Hay otra manera de calcular una capacidad, para ello se parte del conocimiento de la impedancia compleja, ya sea forma polar, forma módulo + fase, etc. La capacidad, como la inductancia, forma parte de la parte imaginaria de la impedancia compleja. Las fases de ambas son contrarias, siendo las ideales de -90° para las capacidades y de 90° para las inductancias.

Partiendo de la impedancia en módulo y fase, para hallar la parte imaginaria se debe calcular de la siguiente manera:

$$\text{Im}(Z) = |Z| \cdot \sin \alpha$$

Siendo Z la impedancia.

$|Z|$ sería el módulo de esta impedancia.

α nos indica la fase de la impedancia.

La forma de calcular la capacidad a partir de la parte imaginaria de la impedancia depende de la frecuencia de trabajo (f) en Herzios (H) y de la parte antes mentada de la impedancia. Ver en fórmula 2.

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot \text{Im}(Z)}$$

Fórmula 2

En estos cálculos no se tiene en cuenta el efecto de los bordes del condensador, esto es, se considera que las líneas de campo se concentran exclusivamente entre las placas, y que estas son rectas.

2.2 – EFECTO BORDE EN CONDENSADORES

Como se ha comentado en el apartado de los condensadores, las fórmulas convencionales que se utilizan para medir o calcular capacidades en condensadores no son del todo exactas, ya que no se toma en cuenta el efecto borde que sucede en ellos. Hay una parte de este efecto que se debe a que se tienen partes del campo que dan un rodeo por fuera del material, y esta parte no se cuenta ya que se toma el modelo de placas paralelas infinitas, tampoco se toma en cuenta el espesor no nulo de estas, algo que puede influir, de hecho lo hace, en la medida de la capacidad.

En la figura 2 se ve con más claridad este efecto.

Hay infinidad de modelos de aproximación, se expondrán todos brevemente. Uno de ellos fue desarrollado por H. B. Palmer en 1927 (fórmula 3), que Promovió una fórmula a partir

de la transformada de Schwartz-Christoffel. Para R.S. Elliot (fórmula 4), en 1966, usando la misma transformada que Palmer, la de Schwartz-Christoffel, llegó a una conclusión, si bien parecida, diferente a la anterior. En 1982 surgió otro modelo, realizado por Yuan y Trick (fórmula 5). Un año más tarde, en 1982, fueron Sakurai y Tamaru los que impulsaron un nuevo modelo de aproximación (fórmula 6). Tras ellos, otra pareja se atrevió a abordar esta aproximación, fueron Van de Meijs y Fokkema en 1984 (fórmula 7). Ya en el año 2000 Yang (fórmula 8) realizo otra aproximación.

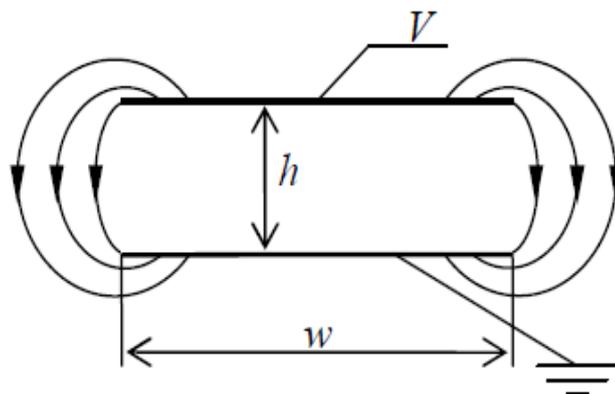


Figura 2. Esquema Efecto borde

$$C = \varepsilon \frac{w}{h} \left[1 + \frac{h}{w\pi} + \frac{h}{w\pi} \ln \left(\frac{2\pi w}{h} \right) \right] \quad C = \varepsilon \frac{w}{h} \left[1 + \frac{2h}{\pi w} \ln \left(\frac{\pi w}{h} \right) + \frac{2h}{\pi w} \ln \left(1 + \frac{2t}{h} + 2\sqrt{\frac{t}{h} + \left(\frac{t}{h} \right)^2} \right) \right]$$

Fórmula3 *Fórmula8*

$$C = \varepsilon \left\{ \frac{w-t/2}{h} + \frac{2\pi}{\ln \left[1 + \frac{2h}{t} + \sqrt{\frac{2h}{t} \left(\frac{2h}{t} + 2 \right)} \right]} \right\} \quad C = \varepsilon \left[1,15 \left(\frac{w}{h} \right) + 2,8 \left(\frac{t}{h} \right)^{0,22} \right]$$

Fórmula5 *Fórmula6*

$$C = \varepsilon \left[\left(\frac{w}{h} \right) + 0,77 + 1,06 \left(\frac{w}{h} \right)^{0,25} + 1,06 \left(\frac{t}{h} \right)^{0,5} \right] \quad C = \varepsilon \frac{w}{h} \left[1 + \frac{h}{w\pi} \ln \left(\frac{\pi w}{h} \right) \right]$$

Fórmula7 *Fórmula4*

Un buen modelo de aproximación del efecto borde fue fijado por Kirchhoff. Se ha elegido este por su universalidad, es el más utilizado de entre todos los modelos de aproximación que se han barajado, ya que toma en cuenta ambos aspectos del efecto borde, las placas finitas y con espesor no nulo. En este proyecto se tratará el caso de placas paralelas circulares de radio R y espesor δ , siendo C^* la capacidad corregida del capacitor, f^* la función de proporcionalidad definida por Kirchhoff y C_0 la capacidad del condensador sin tomar en cuenta estos efectos mencionados (fórmula 9).

$$\frac{C^*}{C_0} \equiv f^* = 1 + \frac{1}{\pi} \frac{d}{R} \left[-1 + \ln \left(16\pi \frac{(1+\delta/d)}{d/R} \right) + 4\pi \delta/d \ln(1+d/\delta) \right]$$

Fórmula9

Capítulo 3

MEDIDAS

REALIZADAS

En este capítulo se pasa a presentar los resultados obtenidos en las diferentes medidas. Se hará por apartados, separando los diferentes equipos de medida para poder verlo con más claridad.

3.1 – HP 4192A

En esta primera parte se utilizará un equipo que está disponible en la Universidad de Cantabria, un analizador de impedancias de HP, el modelo HP4192A, que servirá para hacer las primeras medidas, en este caso, en baja frecuencia, hasta 13MHz, las frecuencias altas se realizarán con otro analizador. Se ha considerado poner en la memoria los valores de frecuencia, módulo y fase de las impedancias resultantes, la capacidad resultante con los tres valores anteriores, el coeficiente del efecto borde que se ha decidido utilizar en este caso, la capacidad corregida y para cerrarlas se sitúan las diferentes constantes dieléctricas que se han calculado. Para ver con más detalle las características de este analizador de impedancias, ver Anexo 1 (pág. XX).

Las medidas se tomaron a mano, esto hace que para presentar los datos se haya formado una tabla con ellos, y gracias a las fórmulas ya explicadas con anterioridad, poder calcular la constante dieléctrica relativa de cada material y a cada frecuencia. Las gráficas representan las diferentes constantes dieléctricas calculadas en cada una de las frecuencias que nos permitía el analizador, comparando las constantes tras aplicar el factor de corrección debido al efecto de borde y sin aplicarlo.

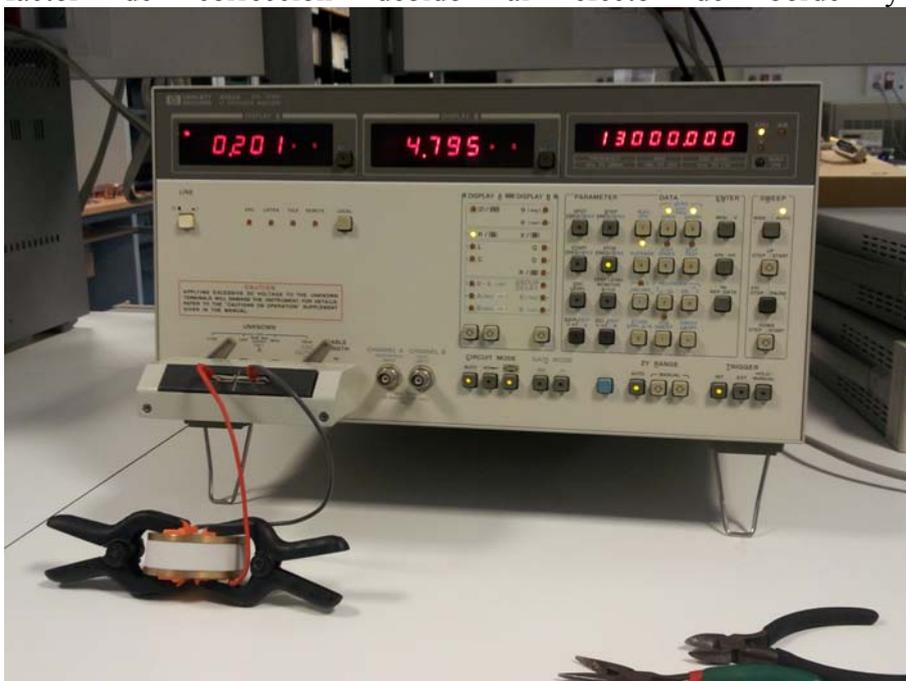


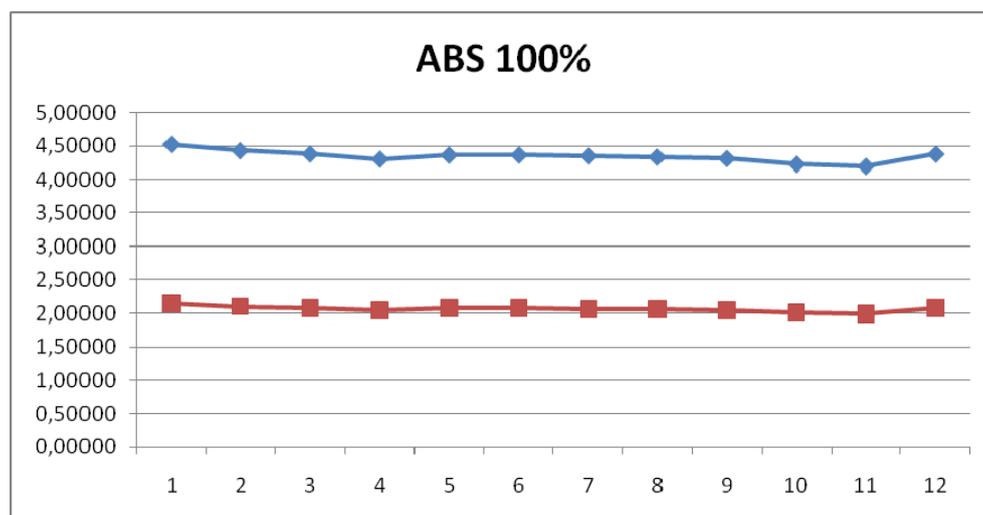
Figura 3. Analizador de impedancias HP4192A.

En la imagen de al lado (figura 3), se muestra el condensador realizado con cianocrilato, el par de placas de latón y el analizador de impedancias HP4192A.

En primer lugar, en la tabla 1, se pueden ver las medidas recogidas del analizador para la pieza de ABS maciza, es decir, el ABS 100%. También se detalla en la gráfica 1 como queda con respecto a la constante sin contar con el efecto de borde calculado.

Frecuencia	Módulo Impedancia (Ω)	Capacidad medida (F)	Coefficiente efecto borde	Capacidad con efecto borde	ϵ_r con ef. Borde
1,0E+06	3,2710E+04	4,86565E-12	2,113	1,0279E-11	4,51986
2,0E+06	1,6700E+04	4,76515E-12	2,113	1,0067E-11	4,42651
3,0E+06	1,1260E+04	4,71153E-12	2,113	9,9534E-12	4,37670
5,0E+06	6,8740E+03	4,63068E-12	2,113	9,7826E-12	4,30159
6,0E+06	5,6500E+03	4,69493E-12	2,113	9,9183E-12	4,36128
7,0E+06	4,8420E+03	4,69608E-12	2,113	9,9208E-12	4,36234
8,0E+06	4,2500E+03	4,68123E-12	2,113	9,8894E-12	4,34855
9,0E+06	3,7920E+03	4,66382E-12	2,113	9,8526E-12	4,33238
1,0E+07	3,4300E+03	4,64055E-12	2,113	9,8035E-12	4,31077
1,1E+07	3,1800E+03	4,55064E-12	2,113	9,6135E-12	4,22724
1,2E+07	2,9400E+03	4,51666E-12	2,113	9,5417E-12	4,19568
1,3E+07	2,6000E+03	4,71022E-12	2,113	9,9506E-12	4,37548

Tabla 1. ABS100%

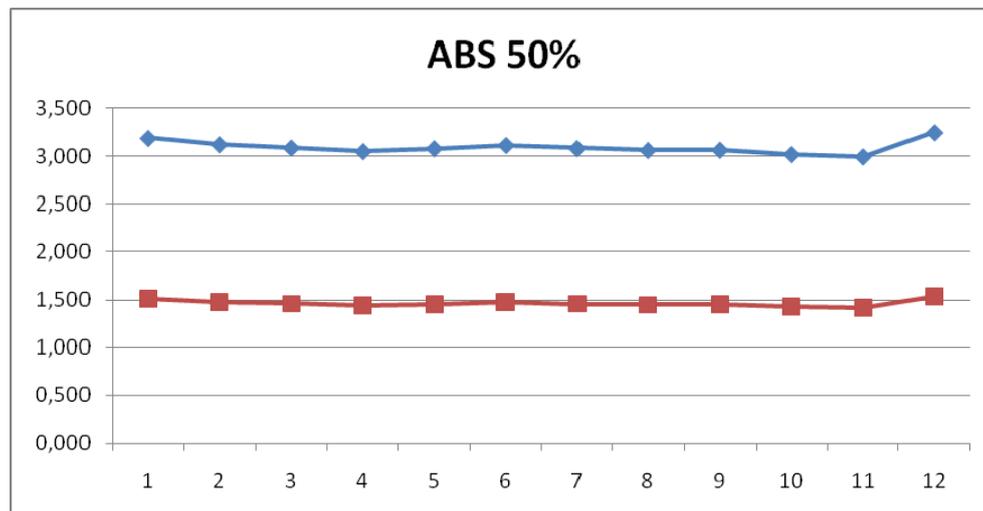


Gráfica 1. ABS100%. Azul cte. Dieléctrica corregida. Rojo cte. Dieléctrica sin corregir

En segundo lugar, en la tabla 2, se pueden ver las medidas recogidas del analizador para la pieza de ABS semi-maciza, es decir, el ABS 50%. También se detalla en la gráfica 2 como queda con respecto a la constante sin contar con el efecto de borde calculado.

Frecuencia	Impedancia (Ω)	Capacidad medida (F)	Coefficiente efecto borde	Capacidad con efecto borde	ϵ_r con ef. Borde
1,0E+06	4,63E+04	3,43754E-12	2,113	7,2620E-12	3,193
2,0E+06	2,36E+04	3,36624E-12	2,113	7,1114E-12	3,127
3,0E+06	1,59E+04	3,32821E-12	2,113	7,0311E-12	3,092
5,0E+06	9,68E+03	3,28791E-12	2,113	6,9459E-12	3,054
6,0E+06	7,99E+03	3,32056E-12	2,113	7,0149E-12	3,085
7,0E+06	6,78E+03	3,35778E-12	2,113	7,0935E-12	3,119
8,0E+06	5,99E+03	3,32201E-12	2,113	7,0180E-12	3,086
9,0E+06	5,36E+03	3,30028E-12	2,113	6,9721E-12	3,066
1,0E+07	4,82E+03	3,30338E-12	2,113	6,9786E-12	3,069
1,1E+07	4,45E+03	3,25388E-12	2,113	6,8740E-12	3,023
1,2E+07	4,13E+03	3,22723E-12	2,113	6,8177E-12	2,998
1,3E+07	3,50E+03	3,50215E-12	2,113	7,3985E-12	3,253

Tabla 2. ABS 50%

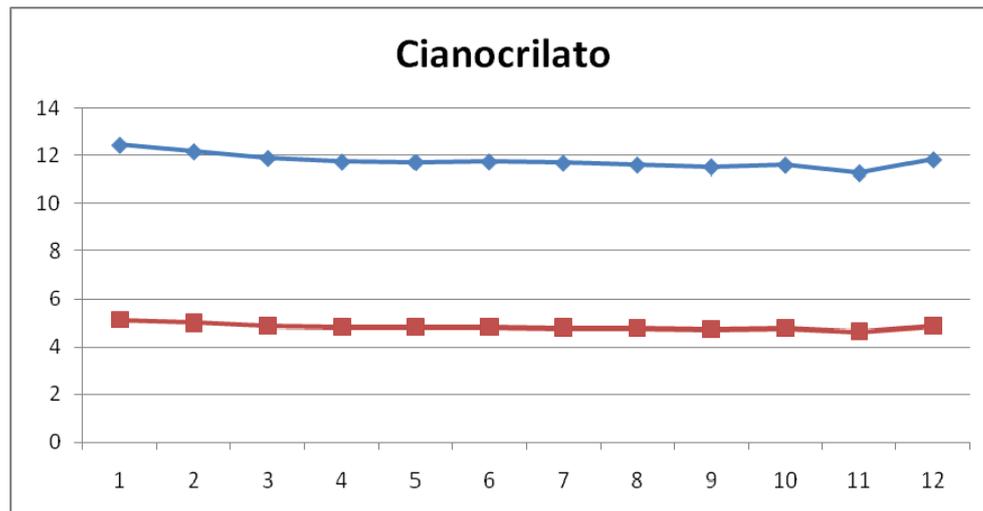


Gráfica 2. ABS 50%. Gráfica 1. Azul cte. Dieléctrica corregida. Rojo cte. Dieléctrica sin corregir

En tercer lugar, en la tabla 3, se pueden ver las medidas recogidas del analizador para la pieza de Cianocrilato. También se detalla en la gráfica 3 el valor de la constante dieléctrica y como queda con respecto a la constante sin contar con el efecto de borde calculado.

Frecuencia	Módulo Impedancia (Ω)	Capacidad medida (F)	Coef. Efecto borde	Capacidad con efecto borde	ϵ_r con ef. Borde
1,0E+06	2,05E+04	7,76710E-12	2,430	1,8874E-11	12,449010
2,0E+06	1,05E+04	7,59235E-12	2,430	1,8450E-11	12,168915
3,0E+06	7,16E+03	7,41656E-12	2,430	1,8022E-11	11,887163
5,0E+06	4,35E+03	7,31990E-12	2,430	1,7788E-11	11,732244
6,0E+06	3,63E+03	7,30762E-12	2,430	1,7758E-11	11,712561
7,0E+06	3,11E+03	7,32368E-12	2,430	1,7797E-11	11,738294
8,0E+06	2,73E+03	7,28889E-12	2,430	1,7712E-11	11,682536
9,0E+06	2,44E+03	7,24016E-12	2,430	1,7594E-11	11,604429
1,0E+07	2,21E+03	7,19309E-12	2,430	1,7479E-11	11,528987
1,1E+07	2,00E+03	7,23511E-12	2,430	1,7581E-11	11,596334
1,2E+07	1,89E+03	7,03733E-12	2,430	1,7101E-11	11,279331
1,3E+07	1,66E+03	7,37973E-12	2,430	1,7933E-11	11,828131

Tabla 3. Cianocrilato.

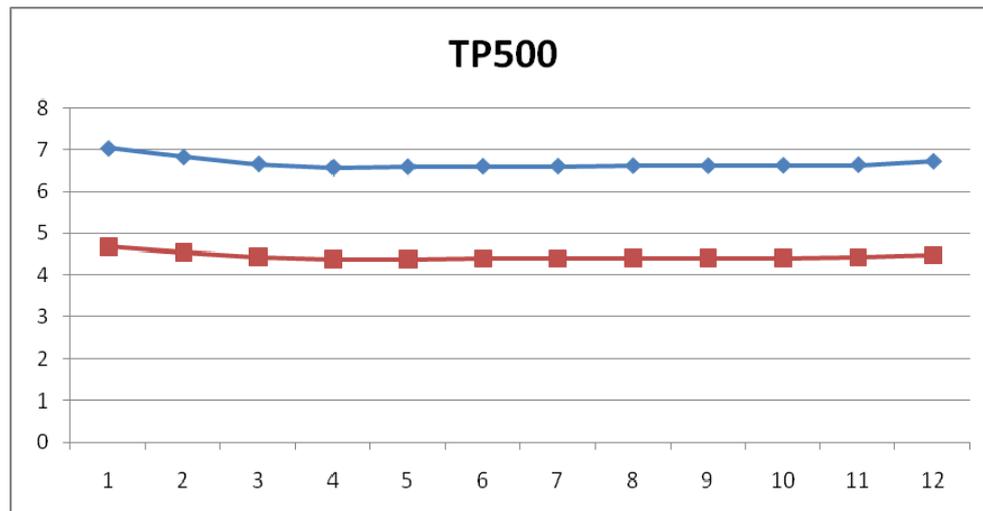


Gráfica 3. Cianocrilato. Azul es corregida. Rojo es sin corregir.

En cuarto lugar, en la tabla 4, se pueden ver las medidas recogidas del analizador para la pieza de TP5000. También se detalla en la gráfica 4 el valor de la constante dieléctrica y como queda con respecto a la constante sin contar con el efecto de borde calculado.

Frecuencia	Módulo Impedancia (Ω)	Capacidad medida (F)	Coef. Efecto borde	Capacidad con efecto borde	ϵ_r con ef. Borde
1,0E+06	4,48E+03	3,55538E-11	1,499	5,3290E-11	7,0297876
2,0E+06	2,31E+03	3,44837E-11	1,499	5,1686E-11	6,8182064
3,0E+06	1,58E+03	3,36132E-11	1,499	5,0381E-11	6,6460787
5,0E+06	9,60E+02	3,31863E-11	1,499	4,9741E-11	6,5616707
6,0E+06	7,98E+02	3,32654E-11	1,499	4,9860E-11	6,5773204
7,0E+06	6,83E+02	3,33201E-11	1,499	4,9942E-11	6,5881423
8,0E+06	5,97E+02	3,33341E-11	1,499	4,9963E-11	6,5909003
9,0E+06	5,30E+02	3,33897E-11	1,499	5,0046E-11	6,6018875
1,0E+07	4,77E+02	3,33909E-11	1,499	5,0048E-11	6,6021405
1,1E+07	4,33E+02	3,34413E-11	1,499	5,0124E-11	6,6121034
1,2E+07	3,96E+02	3,35149E-11	1,499	5,0234E-11	6,6266474
1,3E+07	3,61E+02	3,39429E-11	1,499	5,0876E-11	6,7112763

Tabla 4. TPE.



Gráfica 4. TPE. Azul es corregido. Rojo es sin corregir.

3.2 – Keysight E5991B

Esta segunda parte se utiliza para comprobar el comportamiento de estos materiales en frecuencias altas o de microondas, ya que permite medidas hasta los 3 GHz. En este caso, el equipo no está disponible en la Universidad de Cantabria, para solucionarlo se contactó con la empresa Keysight, quien desinteresadamente ha prestado el analizador para realizar estas medidas en el laboratorio de la Universidad de Cantabria. Se expondrá como en el apartado anterior, poniendo para cada material, una tabla y una gráfica que identifiquen las diferentes constantes dieléctricas. Para leer más detalladamente las especificaciones técnicas de este analizador, ver Anexo 2(pág. XX).

Este analizador ha dado 200 puntos frecuenciales, con sus respectivos valores de impedancia en módulo, por lo que para hacerlo más legible, se han cogido 22 puntos, en todos los materiales los mismos.

En la foto de la figura 4

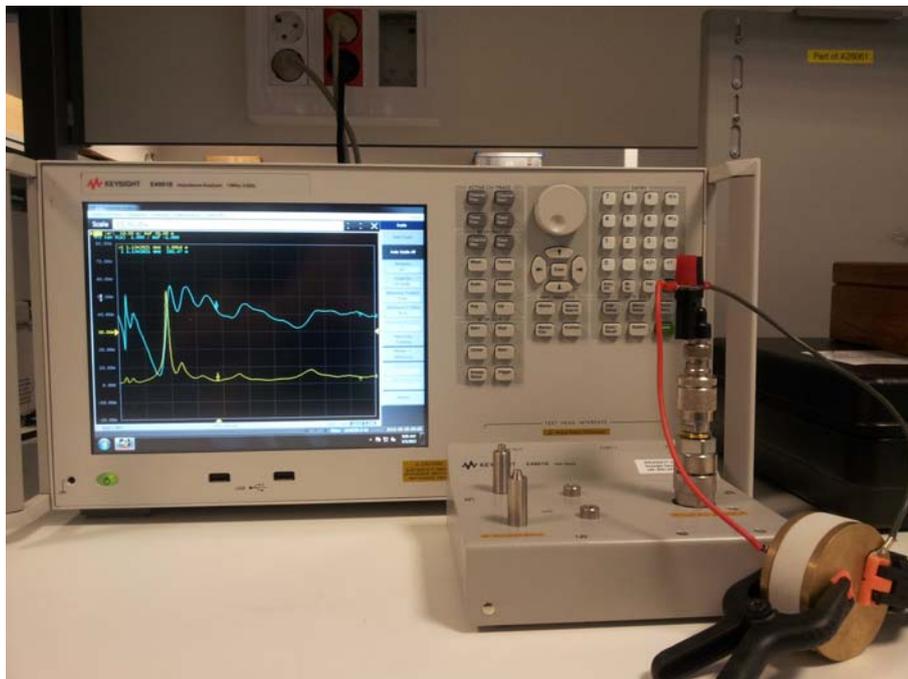
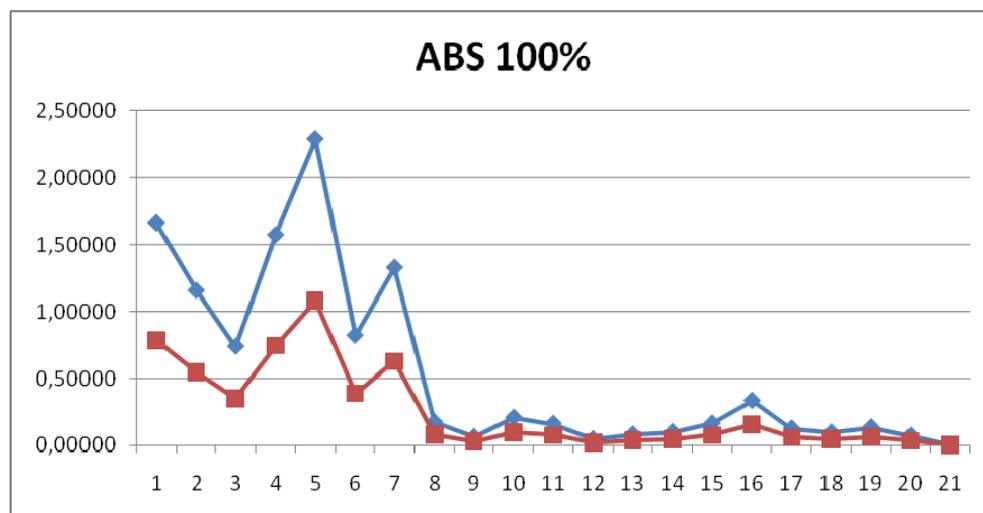


Figura 4. Analizador de impedancias Keysight E5991B

En primer momento se pasa a mostrar en la tabla 5 los datos obtenidos por el ABS 100%, y en la gráfica 5 las diferentes constantes dieléctricas.

Frecuencia	Módulo Impedancia (Ω)	Capacidad medida (F)	Coef. Efecto borde	Capacidad con efecto borde	er con ef. Borde
1,00E+06	8,90E+04	1,78783E-12	2,113	3,7769E-12	1,66077
1,51E+08	8,48E+02	1,24362E-12	2,113	2,6272E-12	1,15524
3,01E+08	6,65E+02	7,94964E-13	2,113	1,6794E-12	0,73847
4,51E+08	2,09E+02	1,69313E-12	2,113	3,5769E-12	1,57281
6,01E+08	1,08E+02	2,46055E-12	2,113	5,1981E-12	2,28569
7,51E+08	2,40E+02	8,83226E-13	2,113	1,8659E-12	0,82046
9,01E+08	1,24E+02	1,42909E-12	2,113	3,0190E-12	1,32753
1,08E+09	7,94E+02	1,85542E-13	2,113	3,9197E-13	0,17236
1,23E+09	1,93E+03	6,69986E-14	2,113	1,4154E-13	0,06224
1,35E+09	5,29E+02	2,22706E-13	2,113	4,7048E-13	0,20688
1,50E+09	6,10E+02	1,73823E-13	2,113	3,6721E-13	0,16147
1,65E+09	1,96E+03	4,92381E-14	2,113	1,0402E-13	0,04574
1,80E+09	1,01E+03	8,75166E-14	2,113	1,8488E-13	0,08130
1,95E+09	7,70E+02	1,05996E-13	2,113	2,2392E-13	0,09846
2,10E+09	4,31E+02	1,75657E-13	2,113	3,7109E-13	0,16317
2,25E+09	1,97E+02	3,59172E-13	2,113	7,5877E-13	0,33365
2,40E+09	4,89E+02	1,35560E-13	2,113	2,8638E-13	0,12593
2,55E+09	6,08E+02	1,02598E-13	2,113	2,1675E-13	0,09531
2,70E+09	4,06E+02	1,45270E-13	2,113	3,0689E-13	0,13495
2,85E+09	7,27E+02	7,68527E-14	2,113	1,6236E-13	0,07139
3,00E+09	8,31E+03	6,38117E-15	2,113	1,3481E-14	0,00593

Tabla 5. ABS 100%.

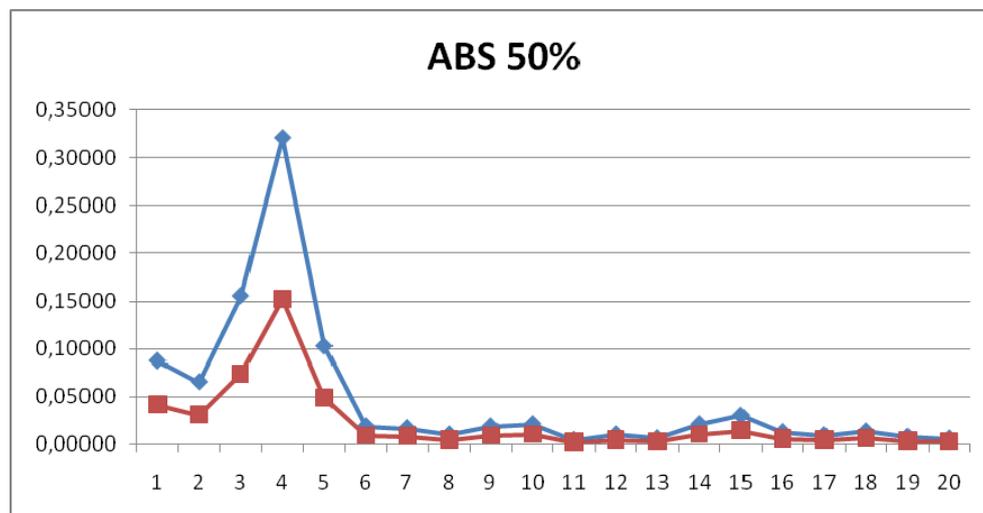


Gráfica 5. Azul corregido. Rojo sin corregir.

En segundo término se pasa a representar en la tabla 6 los valores obtenidos para el ABS 50%, y en la gráfica 6 su constante corregida y sin corregir.

Frecuencia	Módulo Impedancia (Ω)	Capacidad medida (F)	Coef. Efecto borde	Capacidad con efecto borde	er con ef. Borde
1,00E+06	8,78E+04	1,81218E-12	2,113	3,8284E-12	1,68340
1,51E+08	1,12E+04	9,40770E-14	2,113	1,9874E-13	0,08739
3,01E+08	7,51E+03	7,04745E-14	2,113	1,4888E-13	0,06547
4,51E+08	2,11E+03	1,67620E-13	2,113	3,5411E-13	0,15571
6,01E+08	7,66E+02	3,46007E-13	2,113	7,3096E-13	0,32142
7,51E+08	1,92E+03	1,10527E-13	2,113	2,3350E-13	0,10267
9,01E+08	8,74E+03	2,02289E-14	2,113	4,2735E-14	0,01879
1,08E+09	8,14E+03	1,80957E-14	2,113	3,8228E-14	0,01681
1,23E+09	1,19E+04	1,08670E-14	2,113	2,2957E-14	0,01009
1,35E+09	5,85E+03	2,01284E-14	2,113	4,2523E-14	0,01870
1,50E+09	4,71E+03	2,25127E-14	2,113	4,7560E-14	0,02091
1,65E+09	2,06E+04	4,68255E-15	2,113	9,8922E-15	0,00435
1,80E+09	8,02E+03	1,10290E-14	2,113	2,3300E-14	0,01025
1,95E+09	1,23E+04	6,64543E-15	2,113	1,4039E-14	0,00617
2,10E+09	3,35E+03	2,25988E-14	2,113	4,7741E-14	0,02099
2,25E+09	2,19E+03	3,22970E-14	2,113	6,8230E-14	0,03000
2,40E+09	4,85E+03	1,36683E-14	2,113	2,8875E-14	0,01270
2,55E+09	6,22E+03	1,00403E-14	2,113	2,1211E-14	0,00933
2,70E+09	4,09E+03	1,44087E-14	2,113	3,0439E-14	0,01338
2,85E+09	6,87E+03	8,12670E-15	2,113	1,7168E-14	0,00755
3,00E+09	8,27E+03	6,41870E-15	2,113	1,3560E-14	0,00596

Tabla 6. ABS 50%.

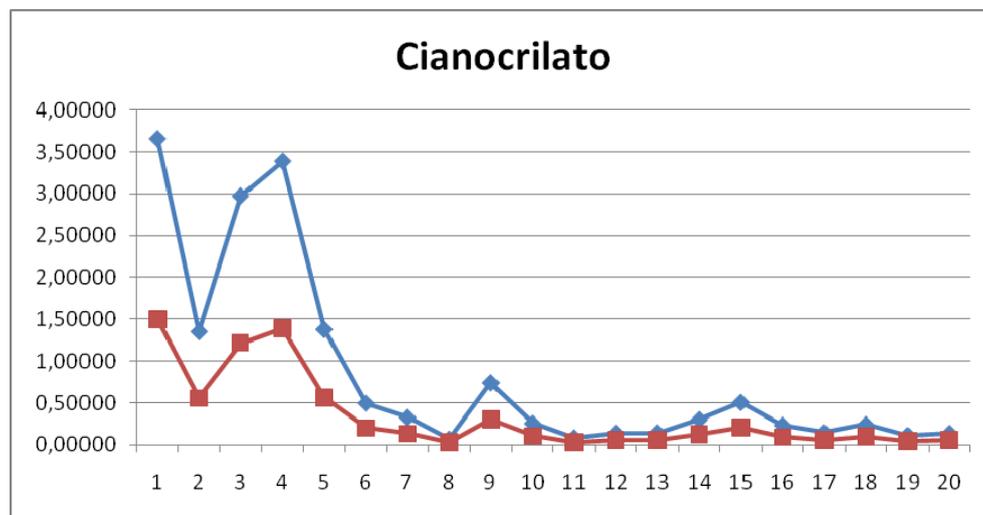


Gráfica 6. Azul er corregido. Rojo sin efecto borde.

En tercera instancia se abordan los datos del cianocrilato, expuestos en la tabla y gráfica 7.

Frecuencia	Módulo Impedancia (Ω)	Capacidad medida (F)	Coef. Efecto borde	Capacidad con efecto borde	ϵ_r con ef. Borde
1,00E+06	7,89E+04	2,01764E-12	2,430	4,9029E-12	3,23385
1,51E+08	4,62E+02	2,28004E-12	2,430	5,5405E-12	3,65442
3,01E+08	6,27E+02	8,43014E-13	2,430	2,0485E-12	1,35117
4,51E+08	1,90E+02	1,85386E-12	2,430	4,5049E-12	2,97134
6,01E+08	1,25E+02	2,11200E-12	2,430	5,1322E-12	3,38508
7,51E+08	2,47E+02	8,59389E-13	2,430	2,0883E-12	1,37742
9,01E+08	5,68E+02	3,10856E-13	2,430	7,5539E-13	0,49824
1,08E+09	7,17E+02	2,05446E-13	2,430	4,9924E-13	0,32929
1,23E+09	2,82E+03	4,59357E-14	2,430	1,1162E-13	0,07363
1,35E+09	2,54E+02	4,63480E-13	2,430	1,1263E-12	0,74286
1,50E+09	6,59E+02	1,60847E-13	2,430	3,9086E-13	0,25780
1,65E+09	1,75E+03	5,51843E-14	2,430	1,3410E-13	0,08845
1,80E+09	9,75E+02	9,06731E-14	2,430	2,2034E-13	0,14533
1,95E+09	8,83E+02	9,23673E-14	2,430	2,2445E-13	0,14805
2,10E+09	3,99E+02	1,89700E-13	2,430	4,6097E-13	0,30405
2,25E+09	2,23E+02	3,16899E-13	2,430	7,7007E-13	0,50792
2,40E+09	4,49E+02	1,47526E-13	2,430	3,5849E-13	0,23645
2,55E+09	6,73E+02	9,27728E-14	2,430	2,2544E-13	0,14870
2,70E+09	3,86E+02	1,52592E-13	2,430	3,7080E-13	0,24457
2,85E+09	7,87E+02	7,09435E-14	2,430	1,7239E-13	0,11371
3,00E+09	6,05E+02	8,77598E-14	2,430	2,1326E-13	0,14066

Tabla 7. Cianocrilato.

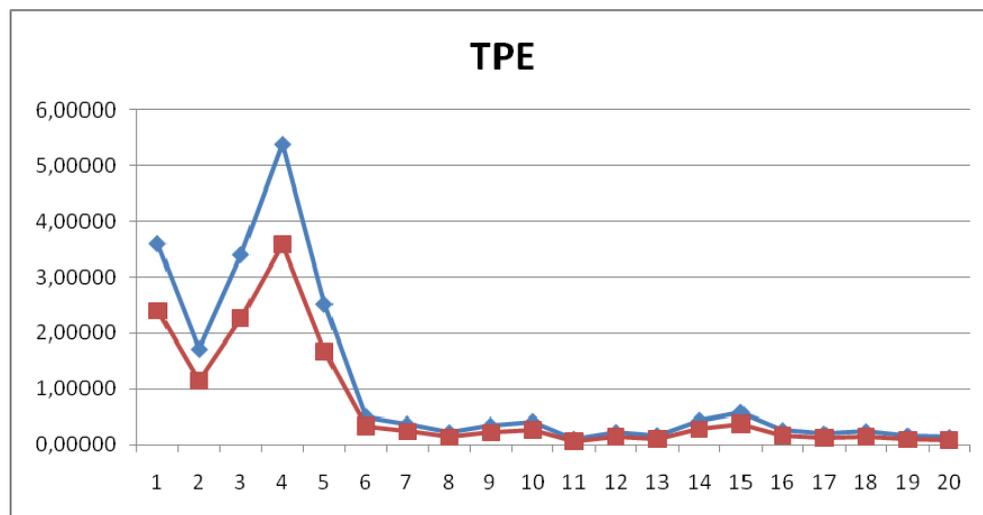


Gráfica 7. Cianocrilato. Azul es corregido. Rojo es sin corregir.

Por último se situarán los datos obtenidos en la tabla 8 por el material TPE, poniendo en la gráfica 8 las dos constantes dieléctricas.

Frecuencia	Módulo Impedancia (Ω)	Capacidad medida (F)	Coef. Efecto borde	Capacidad con efecto borde	ϵ_r con ef. Borde
1,00E+06	3,39E+03	4,69656E-11	1,499	7,0395E-11	9,28615
1,51E+08	5,78E+01	1,82515E-11	1,499	2,7356E-11	3,60874
3,01E+08	6,08E+01	8,70365E-12	1,499	1,3046E-11	1,72091
4,51E+08	2,05E+01	1,72425E-11	1,499	2,5844E-11	3,40923
6,01E+08	9,71E+00	2,72922E-11	1,499	4,0907E-11	5,39627
7,51E+08	1,66E+01	1,27738E-11	1,499	1,9146E-11	2,52567
9,01E+08	6,97E+01	2,53448E-12	1,499	3,7988E-12	0,50112
1,08E+09	7,93E+01	1,85775E-12	1,499	2,7845E-12	0,36732
1,23E+09	1,14E+02	1,13112E-12	1,499	1,6954E-12	0,22365
1,35E+09	6,72E+01	1,75319E-12	1,499	2,6278E-12	0,34665
1,50E+09	5,11E+01	2,07485E-12	1,499	3,1099E-12	0,41024
1,65E+09	1,80E+02	5,36214E-13	1,499	8,0371E-13	0,10602
1,80E+09	7,64E+01	1,15781E-12	1,499	1,7354E-12	0,22892
1,95E+09	9,39E+01	8,69064E-13	1,499	1,3026E-12	0,17183
2,10E+09	3,44E+01	2,20215E-12	1,499	3,3007E-12	0,43541
2,25E+09	2,42E+01	2,92365E-12	1,499	4,3821E-12	0,57807
2,40E+09	5,02E+01	1,32004E-12	1,499	1,9785E-12	0,26100
2,55E+09	6,20E+01	1,00658E-12	1,499	1,5087E-12	0,19902
2,70E+09	4,80E+01	1,22929E-12	1,499	1,8425E-12	0,24306
2,85E+09	6,84E+01	8,16119E-13	1,499	1,2232E-12	0,16137
3,00E+09	7,67E+01	6,91971E-13	1,499	1,0372E-12	0,13682

Tabla 8. TPE.

Gráfica 8. Azul la ϵ_r corregida. Roja la ϵ_r sin corregir.

3.3 – Multímetro MY60

Este aparato de medida se utilizó como comprobante de bajo coste de las medidas aportadas por los analizadores anteriores.

	Capacidad medida (F)	Coef. Efecto borde	Capacidad con efecto borde (F)	ϵ_r con ef. Borde
ABS 100%	4,16E-12	2,113	8,7967E-12	3,86808
ABS 50%	3,3E-12	2,113	6,9715E-12	3,06548
Cianocrilato	1,11E-12	2,430	2,6973E-12	1,779
TPE	65E-12	1,499	9,7426E-11	12,8519



Capítulo 4

CONCLUSIONES Y ESTUDIOS POSTERIORES

4.1 - CONCLUSIONES

Este proyecto de fin de carrera se impulsó debido a la curiosidad por conocer la posible utilidad de ciertos materiales plásticos como el ABS para su utilización en las telecomunicaciones.

Si bien hay dos partes bien diferenciadas, ya que en un principio se iba a limitar a las medidas que se permitían con el analizador de HP, modelo 4192A, se propuso buscar más allá con el análisis hasta los 3 GHz.

Pues bien, los resultados con el analizador de HP son los que podríamos esperar en los estudios previos realizados, por lo que se puede concluir que, si bien el Cianocrilato tiene una constante dieléctrica más alta que algún material cerámico, podría servir bien para utilizarlo como sustrato en algunos tipos de condensadores. Si esto se cumple, teniendo una constante más alta, hace que con el mismo tamaño se puedan alcanzar capacidades más altas que con los cerámicos. Serían un paso intermedio entre condensadores electrolíticos y cerámicos, como hemos dicho.

El ABS ha dado un resultado también cercano a lo que a priori se podía esperar, por lo que existe posibilidad de utilizar este material en su versión maciza (ABS 100%) también como sustrato de capacitancias. Aún con esto, se podría estudiar su posible uso como obstáculo en guías de onda, por ejemplo.

4.2 – ESTUDIOS POSTERIORES

Por falta de tiempo, no se ha podido concretar un análisis más profundo en los materiales, pero se deja para próximos trabajos y estudios.

De momento, ya se ha mostrado interés en realizar un análisis electromagnético, ya con un simulador, para concretar sus posibilidades y utilidades de forma concreta. También se deja propuesto el estudio de otro material muy extendido en la impresión en 3D, como es el PLA. También hay una nueva forma de plásticos para impresión, los plásticos flexibles, como el TPU 92A-1, algo que en este proyecto ni se ha barajado por dificultades de tiempo y de acceso a la tecnología. Esto podría dar otro punto a favor de esta nueva tecnología que es la impresión en 3D.

Capítulo 5

ANEXOS

ANEXO I

5.1 – ANALIZADOR DE IMPEDANCIAS HP 4192A

En esta sección se efectuará una descripción de los controles del analizador de impedancias HP4149A así como de los conectores y se verá el funcionamiento del equipo. Se comenzará describiendo los paneles del equipo y su función para luego describir las características del equipo y cómo se realizan en él las diferentes medidas.

5.1.1 – FUNCIONES DEL PANEL FRONTAL

- Line ON/OFF

Interruptor de encendido

- TriggerLamp

Se ilumina cada vez que el equipo bien externamente, internamente o bien manualmente realiza una medida.

- Display A

Este display muestra el valor de la medida efectuada por el equipo, correspondiente al parámetro seleccionado con las teclas de función.

También muestra los códigos de error y los mensajes, como son los resultados AUTOTEST.

Consta de 4 dígitos y medio, y el máximo valor mostrado es 19999 para las medidas de L y C, y de 12999 para otros parámetros.

- Display B

Muestra el valor de la medida correspondiente al parámetro seleccionado para este display. En el caso de que la medida no pueda ser realizada, se verá el código 0F2 o ---. Cuando el display A se encuentra en el modo A(dBm/dBv) o B(dBm,dBv) este display permanece sin mostrar valor alguno.

Consta de 4 dígitos y medio, el valor máximo mostrado es 18000 para las medidas de fase y 12999 para otros parámetros.

- Test Parameter Data Display (DISPLAY C)

Este indicador actúa de comodín, pues muestra los valores de frecuencia, tensión y nivel del oscilador en extremos del dispositivo a medir. También indica en algunos casos códigos de error y la información relacionada con las funciones de salvado de datos.

- Indicador BiasOn

Este indicador consta de un LED el cual se ilumina cuando se tiene una tensión continua en la salida del analizador.

- Δ/Δ % Tecla e indicadores

Estas funciones (una para el display A y otra para el B) sirven para la medida de desviaciones (Δ) o desviaciones porcentuales ($\Delta\%$).

Δ : Cuando se encuentra activada esta función, lo que se muestra en los displays es la diferencia entre el valor actual de la medida y uno de referencia salvado previamente.

$\Delta\%$: Este caso es el mismo que el anterior, pero se muestra el valor porcentual.

- Canal B (Test Input)

Este canal puede usarse en conjunción con el canal A para la medida de características de transmisión de un determinado dispositivo, en concreto las medidas que se puede realizar a través de este canal son las ganancias (B-A), las de nivel de señal, medidas de fase o de retraso de grupo.

La impedancia de entrada de este canal es de $1M\Omega \pm 2\%$, con una capacidad de entrada de $25pF \pm 5pF$. El máximo voltaje de entrada es de $2V_{rms}$ AC y de $\pm 35V$ DC.

- Canal A (Reference Input)

Este canal puede usarse en conjunción con el canal B para la medida de características de transmisión, las medidas que posibilita este canal son las mismas que el canal B y como se ve, las características del mismo son idénticas.

La impedancia de entrada de este canal es de $1M\Omega \pm 2\%$, con una capacidad de entrada de $25pF \pm 5pF$. El máximo voltaje de entrada es de $2V_{rms}$ AC y de $\pm 35V$ DC.

Este canal, como se comprobará, suele usarse como referencia para las medidas de ganancia, ver diferencias de fase o retrasos de grupo.

- Conmutador de longitud de cable

Este conmutador sólo tiene significado en medidas de impedancias. Con él se minimizan los errores cuando se utilizan los cables estándar de 1m. En caso de que estos no se usen, este conmutador estará en posición 0.

- Salida OSC

Esta salida corresponde a la salida de un oscilador el cual puede generar una señal de 5Hz a 13MHz, con una componente de continua que puede variar entre -35V y 35V y una amplitud entre $5mV_{rms}$ y $1.1V_{rms}$. Esta señal sirve como entrada de referencia para el canal A y como entrada para el dispositivo bajo prueba conectado al canal B, la impedancia de salida en este terminal es de 50Ω .

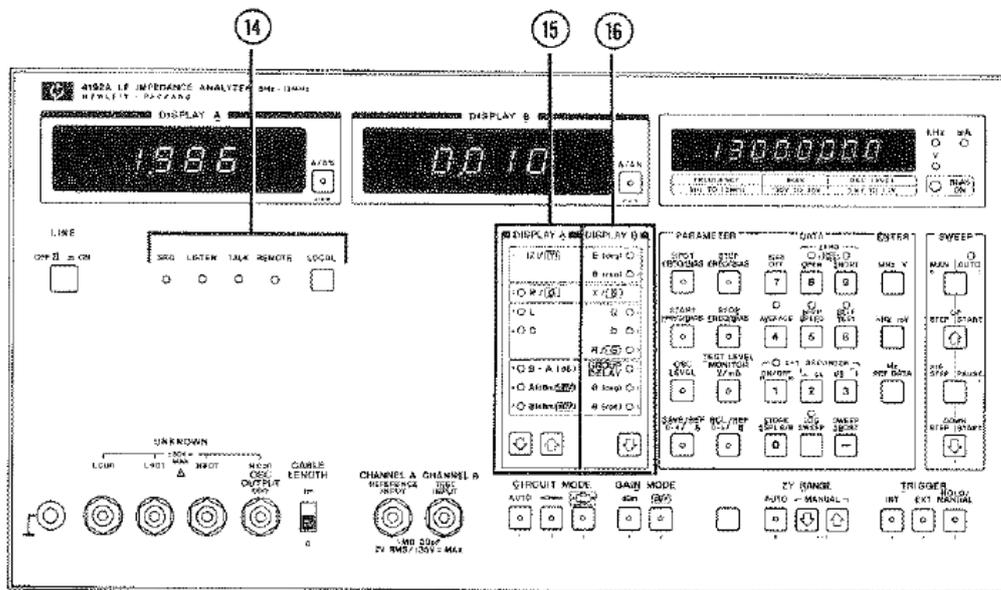
- Terminales UNKNOWN

Estos terminales son usados para la medida de impedancias y fase.

Cuenta con 4 conectores BNC:

- Terminal de alta corriente Hcur.
- Terminal de alto potencial Hpot.
- Terminal de baja corriente Lcur.
- Terminal de bajo potencial Lpot.

- Terminal de tierra
Este se encuentra unido al chasis del equipo



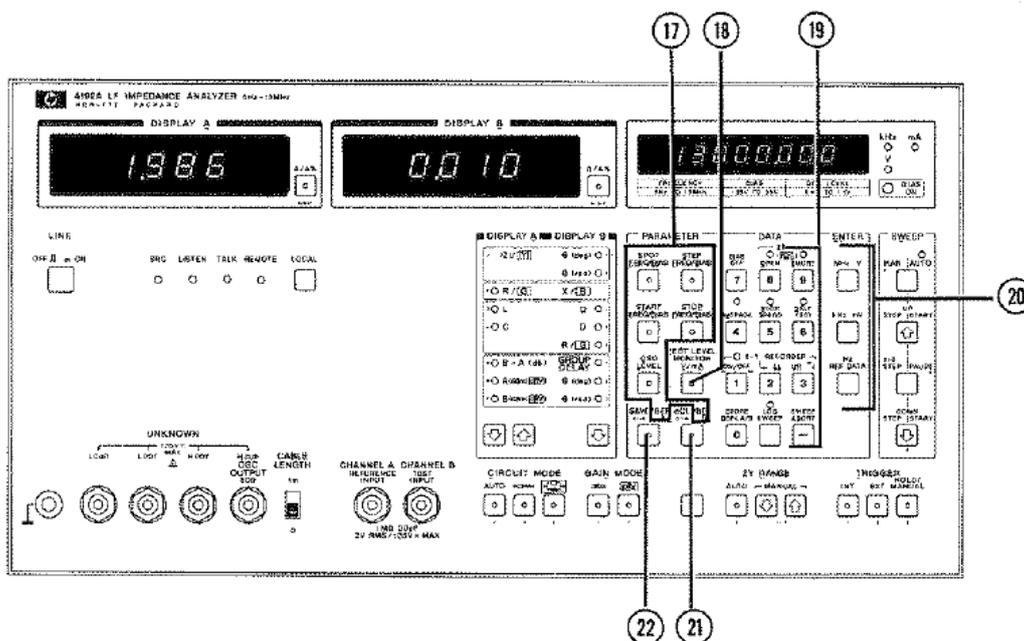
- Indicadores de estado de HP-IB y función LOCAL
Estos 4 LED (SQR, LISTEN, TALK y REMOTE) muestran el estado del equipo cuando está siendo controlado a través de la interfaz HP-IB, la tecla LOCAL es una función que permite al equipo recuperar el control manual cuando está siendo controlado a través de la interfaz HP-IB.
- Teclas de función e indicadores del DISPLAY A
Estas teclas son utilizadas junto con las de CIRCUIT MODE para seleccionar el parámetro a medir en que será mostrado en el DISPLAY A. Los parámetros que se pueden seleccionar son $|Z|/|Y|$, R/G, L, C, B-A(dB), A(dBm/dBv) o B(dBm/dBv). El parámetro seleccionado es indicado con su LED correspondiente.
- Teclas de función e indicadores del DISPLAY B

Estas teclas son utilizadas junto con las de CIRCUIT MODE para seleccionar el parámetro a medir en que será mostrado en el DISPLAY B. Los parámetros que se pueden seleccionar dependen de los seleccionados en el DISPLAY A. El parámetro seleccionado es indicado con su LED correspondiente.

- Parámetros de prueba (DISPLAY C)

Los parámetros que se pueden controlar son los siguientes:

- Spot freq/bias. Para medidas puntuales a una frecuencia/tensión determinadas.
- Stepfreq/bias. Para barridos, indica el incremento de frecuencia/tensión que se realizará para la siguiente medida.
- Startfreq/bias. En barridos, indica la frecuencia/tensión de inicio de barrido.
- Stop freq/bias. En barridos, indica la frecuencia/tensión de fin de barrido.
- OSC LEVEL. Para seleccionar la tensión rms del oscilador interno.
- REF A. Para medidas de desviación y de desviación porcentual, aplica el valor de referencia actual del DISPLAY A.
- REF B. Para medidas de desviación y de desviación porcentual, aplica el valor



de referencia actual del DISPLAY B.

- Función TEST LEVEL MONITOR

Presionando esta tecla es posible hacer que el DISPLAY C muestre la tensión en el dispositivo a medir o la corriente que por él circula.

- Teclas de entrada de datos

Consta de un teclado numérico más unas teclas para introducir las unidades deseadas. El valor introducido se muestra en el DISPLAY C.

- Tecla de entrada de unidades

Estas teclas se utilizan en conjunción con el teclado numérico para la entrada de datos.

MHz, V: Presionando esta tecla tras haber introducido el valor deseado se añaden a dicho valor las unidades deseadas, en este caso, MHz o V.

KHz, mV: Con esta tecla se introducen en KHz o mV.

Hz, REF DATA: Mediante esta tecla se introduce el valor tecleado en Hz o también puede ser utilizada para salvar un valor de referencia que se usaría en las medidas de desviación y desviación porcentual.

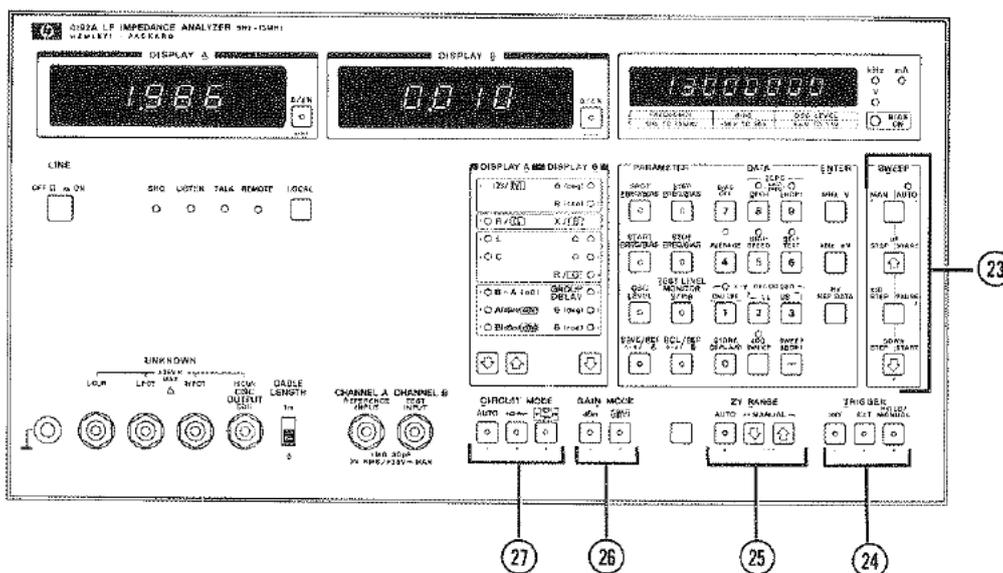
- RCL (Recall)

Esta función es usada por el equipo para restaurar los valores de configuración del mismo salvados mediante las teclas SAVE.

- Tecla SAVE

Mediante esta función es posible salvar el estado actual del equipo, en concreto se salva la configuración del panel de control, los valores de los parámetros de test así como los valores de calibración y los datos de referencia.

El HP4192A está equipado con 5 registros (0→4) de memoria, lo cual permite salvar 5 estados. La memoria de estos registros es de tipo no volátil, de modo que se



pueden recuperar estos estados aunque el equipo se haya desconectado.

- SWEEP control

Esta zona del panel frontal del equipo consta de 4 teclas y un LED, y aquí se encuentran los controles para realizar los barridos, que en el caso de este equipo pueden ser barridos de frecuencia, de tensión o de nivel del oscilador, aunque este último no puede ser considerado en el mismo grupo de los otros dos, ya que ha de hacerse manualmente.

En el caso de realizar un barrido de tensión el indicador BIAS ON ha de estar encendido.

START UP: Presionando esta tecla en el modo AUTO se hace un barrido en frecuencia/bias de forma que se comienza por el valor más pequeño y se va hacia el

mayor. En el modo MAN lo que se produce al presionar esta tecla es un incremento de la frecuencia/tensión a medir.

START DOWN: Presionando esta tecla en el modo AUTO se hace un barrido en frecuencia/bias de forma que se comienza por el valor más grande y se va hacia el menor. En el modo MAN lo que se produce al presionar esta tecla es un decremento de la frecuencia/tensión a medir.

X10 STEP: Presionando esta tecla junto a las de STEP UP/STEP DOWN se hace que el incremento/decremento, respectivamente, se multiplique por 10.

- Trigger

En esta zona se tienen 3 controler con los que se pueden seleccionar el modo de disparo del equipo:

INT: Este control habilita el disparador interno del equipo. La duración de cada medida depende del tipo de medida que se esté analizando, de la frecuencia del oscilador y del modo de velocidad seleccionado (AVERAGE, HIGH SPEED o NORMAL).

- EXT: El disparo es producido por una señal exterior que se debe de conectar a la entrada EXT TRIGGER situada en la parte trasera del equipo.
- HOLD/MANUAL: El disparo del equipo se produce cuando se presiona esta tecla.

- ZY Range

Esta función sólo tiene sentido en la medida de impedancias (admitancias), esta consta de 3 teclas con las que se puede seleccionar el rango de la medida de forma manual o dejarlo en modo automático de forma que el equipo elija el rango más adecuado para cada medida.

- GainMode

Esta función sólo tiene sentido en la medida de amplitudes (fases), con estas teclas se seleccionan las unidades apropiadas para la medida de amplitudes absolutas o ganancias:

dBm: Muestra la amplitud absoluta en dBm = $20 \cdot \log(V) + 13.01$

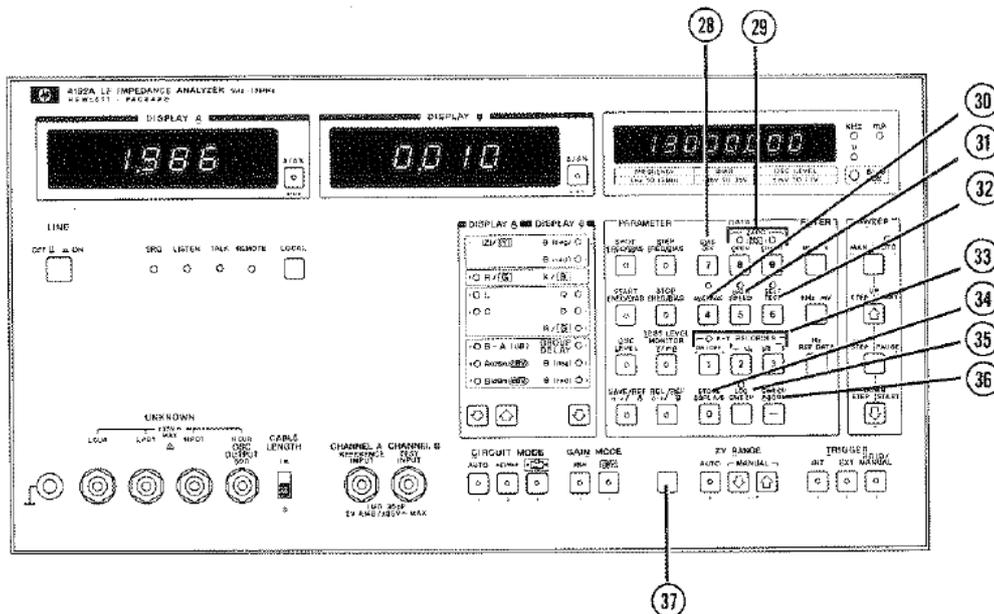
dBV: Muestra la amplitud absoluta en dBV = $20 \cdot \log(V)$

- CircuitMode

Con estos controles se selecciona el modo deseado para la realización de medidas R/G, C o L:

AUTO: El modo automático selecciona el modo de circuito (serie o paralelo) para la realización de la medida actual, cuando el rango ZY supera el valor $1K\Omega(10mS)$ al valor $10K\Omega(1S)$ el modo de circuito cambia de paralelo a modo serie.

- Bias off



Esta tecla permite eliminar la tensión DC aplicada al dispositivo a medir.

- Zero offset

Estos dos controles permiten compensar las impedancias residuales para realizar una medida más exacta a una frecuencia concreta.

- Average

Este modo consta de una tecla y de un indicador luminoso que se enciende cuando está activo, lo cual produce que la exactitud de la medida sea mayor ya que el analizador de impedancias realiza la media de 7 medidas en cada punto.

- High speed

Este modo consta, al igual que el anterior, de una tecla y de un indicador luminoso que se enciende cuando está activo. Se aumenta la velocidad de la medida pero se reduce la precisión.

- Self test

Realiza un autotest

- Log sweep

Este control sirve para realizar barridos de manera logarítmica.

- Sweepabort

Se utiliza para detener los barridos

- Self test (Autotest)

El analizador de impedancias HP4192A está equipado con un sistema automático de diagnóstico, el cual puede ser invocado en cualquier momento para conformar el normal funcionamiento del equipo. En caso de que la prueba transcurriera sin fallos, el

Test Number	Description	Display	
		Pass	Fail
1	All numerical displays and indicator lamps on the front-panel come on and remain on as long as the SELF TEST key is being pressed. Check that all displays and indicator lamps are on.	P-01 *	
2	Checks four RAM's (Random Access Memory).	P-02	E-20, E-21
3	Checks fourteen ROM's (Read Only Memory).	P-03	E-30 ~ E-43
4	Checks that the interrupt signal is present and that it is of the correct frequency.	P-04	E-50, E-51
5	Checks the integrator in the VRD (Vector Ratio Detector) circuit.	P-05	E-61, E-62
6	Checks that the frequency setting of the internal synthesizer is normally done at each decade.	P-06	E-70, E-71, E-72
*P-01 indicates that test 1 has been completed. It does not mean that the instrument has passed test 1. The operator must determine whether the instrument has passed or failed this test.			

DISPLAY A nos mostrará PASS, en caso contrario nos mostrará un código de error de entre los siguientes:

5.1.2 – VALORES INICIALES

Para facilitar la operación, cada vez que el equipo es encendido los controles se colocan en sus valores iniciales, que son estos:

- DISPLAY A|Z|
- DISPLAY B θ (deg)
- Test Parameter Data DisplaySPOT F
- BIASOFF
- ZERO OPEN.....OFF
- ZERO SHORT.....OFF
- AVERAGE.....OFF
- HIGH SPEED.....OFF
- SELF TEST.....OFF
- X-Y RECORDEROFF
- LOG SEPOFF
- SWEEPOFF
- CIRCUIT MODEAUTO
- GAIN MODEdBm
- ZY RANGEAUTO
- TRIGGERINT
- $\Delta/\Delta\%$ OFF
- SPOT FREQ100kHz
- STEP FREQ1kHz
- STOP FREQ13MHz
- START FREQ5Hz
- OSC LEVEL1Vrms
- SPOT BIAS0V
- STEP BIAS1V

- START BIAS	-35V
- STOP BIAS	+35V
- REF A	0
- REF B	0

5.1.3 – DISPLAYS

Como ya se ha indicado, el analizador de impedancias HP4192A dispone de 3 displays identificados por las letras A, B y C (de izquierda a derecha), A y B son los principales mientras el C tiene una función informativa.

En el display A se muestran de una forma directa los valores absolutos de impedancias, admitancias, resistencias, capacidades o inductancias. Además también muestra las medidas de amplitudes de señal o ganancias.

Todos los valores son representados con un máximo de 4 dígitos y medio, siendo el valor máximo 19999 para medidas de inductancias y capacidades y de 12999 para el resto. Para todas las medidas también se nos muestran las unidades apropiadas (mH, pF, etc.). Otra función para el display A es la de mostrar mensajes de error y además la dirección del puerto HP-IB cuando se enciende el equipo.

El display B tiene las mismas características que el A pero en él se muestran los valores correspondientes a medidas de fase, reactancia, susceptancia, factor de disipación, resistencia o conductancia, además de las medidas de nivel de señal.

El display C cumple una función informativa, por ejemplo, al introducir la frecuencia de operación, esta se muestra en este display. Consta de 7 dígitos y medio y también muestra códigos de error.

- Señal de test

El oscilador interno del equipo genera una señal sinusoidal cuyo rango de frecuencias va desde 5Hz hasta los 13MHz, y cuyo nivel de salida se encuentra entre 5mVrms y 1.1Vrms. Esta señal se suministra a través del conector OSC OUTPUT. La frecuencia así como la resolución y precisión se nos muestra en la siguiente tabla.

	Setting Range	Resolution	Setting Accuracy* ¹
Measurement Frequency	5 Hz ~ 10 kHz	1 mHz	Setting Value ±50 ppm.
	10 Hz ~ 100 kHz	10 mHz	
	100 kHz ~ 1 MHz	100 mHz	
	1 MHz ~ 13 MHz	1 Hz	
OSC Output Level* ²	5 mVrms ~ 100 mVrms	1 mVrms	5 Hz ~ 1 MHz: (5 + 10/f)% + 2 mV 1 MHz ~ 13 MHz: (4 + 1.5f)% + 2 mV
	100 mVrms ~ 1.1 Vrms	5 mVrms	5 Hz ~ 1 MHz: (5 + 10/f)% + 10 mV 1 MHz ~ 13 MHz: (4 + 1.5F)% + 10 mV
* ¹ : At 23°C ±5°C.			
* ² : UNKNOWN terminals open (impedance measurements) or terminated with 50Ω (amplitude/phase measurement), f: measurement frequency (Hz), F: measurement frequency (MHz).			

5.1.4 – MODOS DE MEDIDA

Este equipo tiene la posibilidad de seleccionar 3 modos de de medida diferentes:

- NORMAL. Este modo es el definido por defecto.
- HIGH SPEED. Este modo se habilita seleccionando la opción HIGH SPEED, la velocidad de la medida es aproximadamente del doble que en el modo normal. La resolución en este modo se ve reducida y la precisión no está especificada.
- AVERAGE. En este modo la resolución y precisión son mucho mejores que los demás modos. El valor mostrado es el resultado de la media de 7 medidas. El tiempo de medida es unas 10 veces el modo normal.

- Modos de disparo

Es posible elegir entre 3 modos de disparo:

- INTERNO. En este modo la medida es automática y repetitiva, la velocidad depende del tipo de medida y de la frecuencia de medida.
- EXTERNO. El disparo se produce en los flancos de subida de una señal TTL aplicada en el EXT TRIGGER, situado en el panel trasero.
- HOLD/MANUAL. La medida se efectúa cada vez que se presiona una tecla.

- Medidas de desviación

A veces cuando se necesita medir varios componentes similares es más práctico medir la desviación de un componente con respecto a un valor ideal (o un dispositivo similar), para este propósito el analizador de impedancias HP4192A cuenta con una serie de ayudas que nos permiten realizar dicha función.

Las medidas de desviación se pueden efectuar en el DISPLAY A y/o en el DISPLAY B. para la introducción del valor de referencia se puede hacer una medida determinada, o hacerlo mediante teclado. Así también es posible ver los resultados de la desviación de dos formas diferentes, de una forma directa, esto es, nos muestra la diferencia entre el valor de referencia y el medido, o esto mismo pero de forma porcentual.

La fórmula empleada para el cálculo de la desviación es $A-B$, mientras que la empleada en la desviación porcentual es $\frac{A-B}{B}$.

El procedimiento es el siguiente, en primer lugar se ha de estar en el punto de operación que se desea como referencia para la medida, o en su defecto, introducirlo mediante el teclado. Posteriormente se presiona la tecla azul y después el botón REFA o REFB según se desee. Para ver el valor de la desviación se ha de presionar la tecla que se encuentra al lado de cada display.

- Memorización de los parámetros de control

El analizador de impedancias HP4192A está equipado con una memoria del tipo no volátil que consta de 5 registros diferentes a través de cada uno de los cuales es posible salvar o cargar el estado actual de los parámetros de control.

Pueden ser salvadas todas las funciones del panel frontal del equipo a excepción de:

- Estado del puerto HP-IB
- Las medidas actuales en displays A y B
- El control de longitud del cable (CABLE LENGTH)
- El indicador BIAS ON
- El registro SPOT BIAS

Para realizar las funciones de salvado de las condiciones de medida se siguen estos pasos:

Colocar las funciones de control de medida en los valores indicados.

Presionar la tecla SAVE y a continuación el número de registro (0 → 4) en el cual guardar la configuración actual.

Para restaurar los parámetros guardados en un registro, se presiona la tecla RCL seguida del número de registro (0→4) en el que se encuentre la configuración.

El HP4192A está equipado con dos baterías recargables que proporcionan la alimentación necesaria a los registros cuando esté apagado, mientras se cargan automáticamente cuando está operando. Sus especificaciones son:

Tiempo de operación: 3600 horas después de carga completa.

Tiempo de carga: tiempo requerido para la carga completa es 72 horas.

La duración de las baterías es de 5 años.

- Medidas de amplitud y fase

El analizador HP4192A puede realizar también medidas de ganancia fase, retraso de grupo y nivel de amplitud de muchos tipos de circuitos.

Este equipo realiza dos medidas independientes y simultáneas en cada ciclo de medida, estas medidas son clasificadas en dos grupos: DISPLAY A y DISPLAY B funciones, como se puede ver en la siguiente gráfica. En estos tipos de medidas también se puede aplicar la función de medida de desviación vista anteriormente.

DISPLAY A Function		DISPLAY B Function	
B – A (dB)	Relative Amplitude of the Reference Input and the Test Input	GROUP DELAY	Group Delay in seconds
		θ (deg)	Phase Difference in degrees
		θ (rad)	Phase Difference in radians
A (dBm/dBV)	Absolute Amplitude of the Reference Input		
B (dBm/dBV)	Absolute Amplitude of the Test Input		

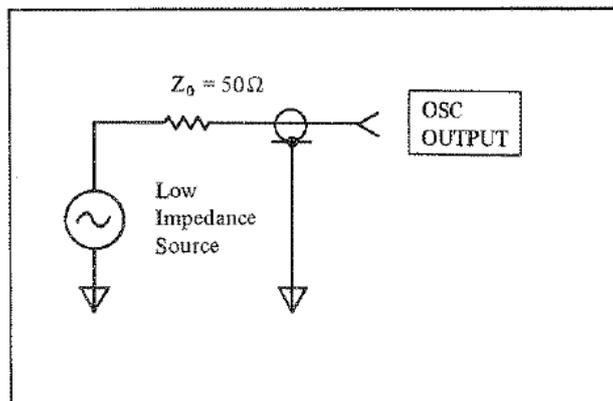
Los rangos de medida del equipo se muestran en la siguiente tabla, así como la resolución, la que se muestra en dicha tabla es para los modos NORMAL y AVERAGE, ya que la resolución cuando el equipo está en modo HIGH SPEED se sitúa en unos valores más bajos que estos:

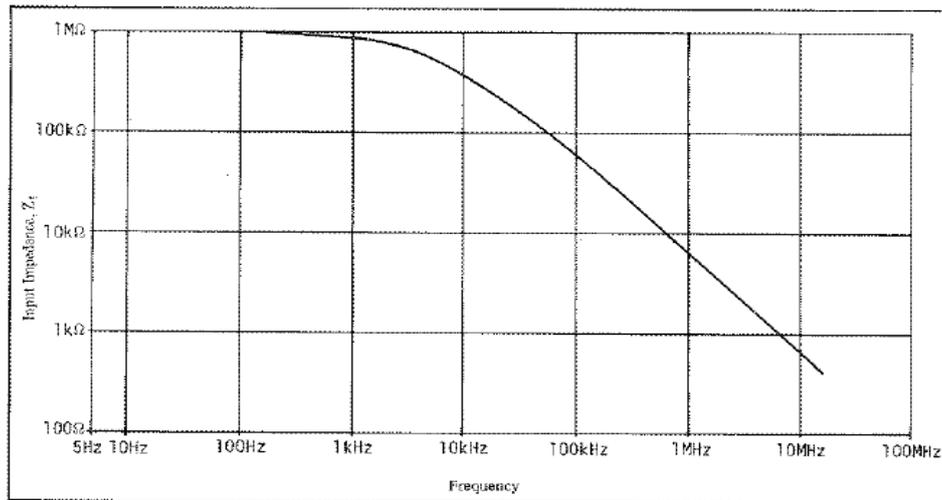
Measurement Function	Measurement Mode	Measurement Frequency (Hz)			
		5 ~ 15	15 ~ 150	150 ~ 400	400 ~ 13M
(B-A) - θ	HIGH SPEED	$\frac{5000}{f} + 100.5 \sim \frac{5000}{f} + 114.5$			113 ~ 127
	NORMAL	$\frac{5000}{f} + 102 \sim \frac{5000}{f} + 116$	$\frac{15000}{f} + 102 \sim \frac{15000}{f} + 116$	202 ~ 216	
	AVERAGE	$\frac{15000}{f} + 102 \sim \frac{15000}{f} + 116$	1102 ~ 1116		
(B-A) - GROUP DELAY*1	HIGH SPEED	$\frac{5000}{f} + 412.5$			425
	NORMAL	$\frac{5000}{f} + 592$	$\frac{15000}{f} + 592$	692	
	AVERAGE	$\frac{15000}{f} + 2399$	3399		
A/B (dBm)	HIGH SPEED	$\frac{5000}{f} + 77.5$			90
	NORMAL	$\frac{5000}{f} + 79$	$\frac{15000}{f} + 79$	179	
	AVERAGE	$\frac{15000}{f} + 80$	1080		
A/B (dBV)	HIGH SPEED	$\frac{5000}{f} + 75.5$			88
	NORMAL	$\frac{5000}{f} + 77$	$\frac{15000}{f} + 77$	177	
	AVERAGE	$\frac{15000}{f} + 78$	1078		
(B - A)*2	HIGH SPEED	$\frac{5000}{f} + 90.5$			103
	NORMAL	$\frac{5000}{f} + 92$	$\frac{15000}{f} + 92$	192	
	AVERAGE	$\frac{15000}{f} + 92$	1092		

Measurement times are typical values in ms, f: measuring frequency (Hz).
 *1: At spot frequency measurement (refer to paragraph 3-63).
 *2: Measurement time for B - A measurements can be shortened by changing the setting of an internal control switch (refer to paragraph 3-139).

- Salida del oscilador

Para las medidas de amplitud/fase, la salida del oscilador puede ser aplicada al divisor de potencia, el cual produce dos señales de salida idénticas pudiendo usar una como referencia y la otra como entrada para el dispositivo que se va a medir. Esta salida consiste en un oscilador de baja impedancia (considerado como cero) y una resistencia en serie de 50Ω.





- Canales A/B

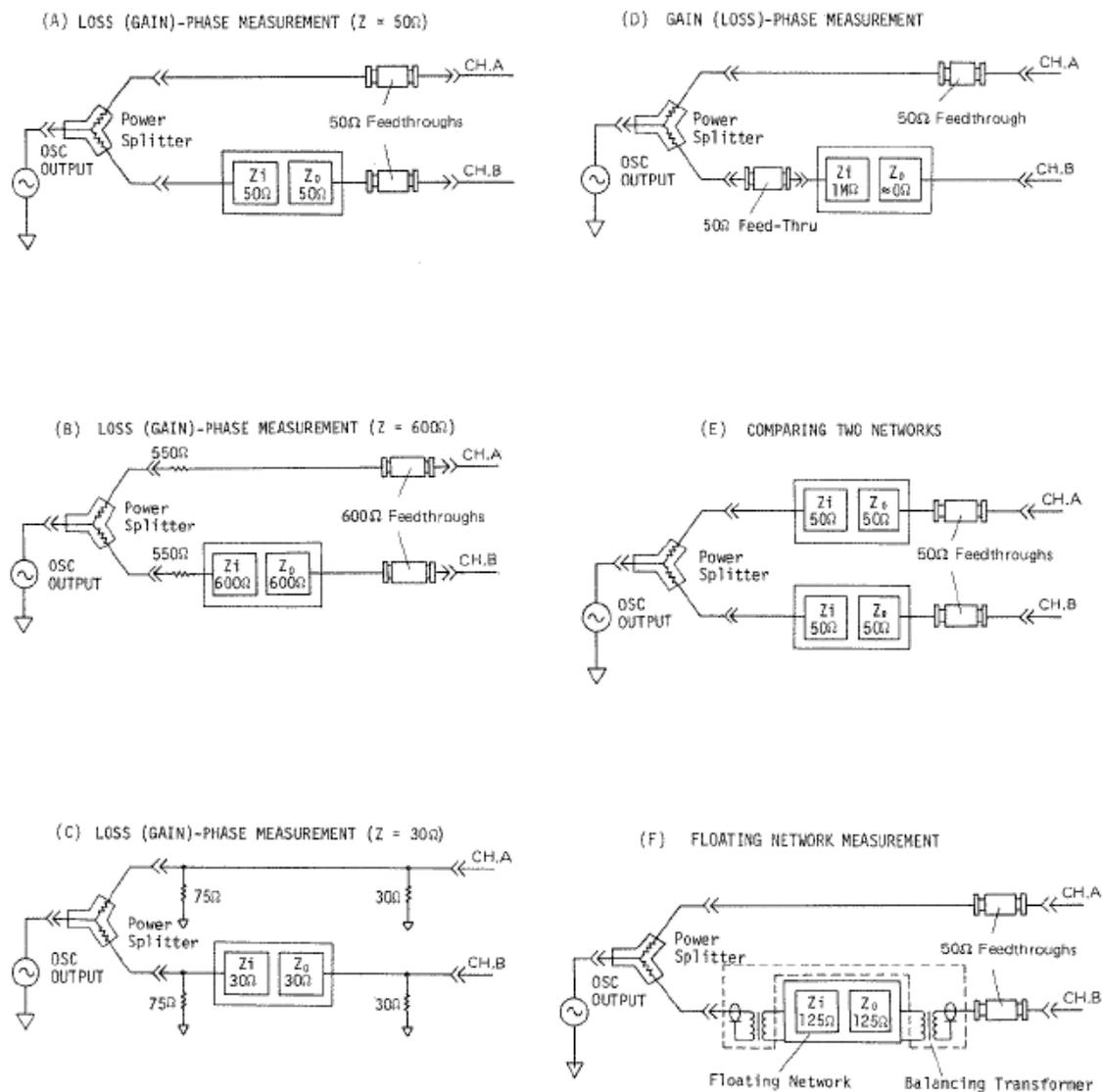
Para las medidas de amplitud y fase se emplean estos dos canales en combinación (si se desea) con la salida del oscilador.

La entrada de cada canal se puede considerar como una combinación de una resistencia de $1\text{M}\Omega$ en paralelo con un condensador de $25\text{pF} \pm 5\text{pF}$. Gracias a esta impedancia de entrada, el efecto de carga sobre el dispositivo a medir es mínimo.

Se ha de tener en cuenta que la impedancia de cada canal (Z_t) va a ser función de la frecuencia a la que se esté operando, ya que al aumentar la frecuencia de la señal, la impedancia de entrada disminuye debido al efecto del condensador, esto se muestra en la siguiente gráfica:

Configuraciones de entrada

A continuación se verán una serie de configuraciones para la medida de amplitud / fase. En ella se encuentran las disposiciones que se deben emplear en diferentes medidas, y cómo combinar los canales A y B con el dispositivo a medir, teniendo especial cuidado en la adaptación de impedancias.



Como se ha visto, la impedancia de salida del oscilador HP4192A es de 50Ω , con esto lo ideal a la hora de aplicar esta señal a un dispositivo a medir, es tener también una impedancia de entrada igual, 50Ω .

- Tiempos de medida

Los tiempos de medida dependen de 3 parámetros, la función de medida, el modo de medida y la frecuencia de operación. En la siguiente tabla se nos muestra el modo de obtener el tiempo de medida para las de amplitud/fase.

Measurement Function	Measurement Mode	Measurement Frequency (Hz)			
		5 ~ 15	15 ~ 150	150 ~ 400	400 ~ 13M
(B-A) - θ	HIGH SPEED	$\frac{5000}{f} + 100.5 \sim \frac{5000}{f} + 114.5$			113 ~ 127
	NORMAL	$\frac{5000}{f} + 102 \sim \frac{5000}{f} + 116$	$\frac{15000}{f} + 102 \sim \frac{15000}{f} + 116$	202 ~ 216	
	AVERAGE	$\frac{15000}{f} + 102 \sim \frac{15000}{f} + 116$	1102 ~ 1116		
(B-A) - GROUP DELAY*1	HIGH SPEED	$\frac{5000}{f} + 412.5$			425
	NORMAL	$\frac{5000}{f} + 592$	$\frac{15000}{f} + 592$	692	
	AVERAGE	$\frac{15000}{f} + 2399$	3399		
A/B (dBm)	HIGH SPEED	$\frac{5000}{f} + 77.5$			90
	NORMAL	$\frac{5000}{f} + 79$	$\frac{15000}{f} + 79$	179	
	AVERAGE	$\frac{15000}{f} + 80$	1080		
A/B (dBV)	HIGH SPEED	$\frac{5000}{f} + 75.5$			88
	NORMAL	$\frac{5000}{f} + 77$	$\frac{15000}{f} + 77$	177	
	AVERAGE	$\frac{15000}{f} + 78$	1078		
(B - A)*2	HIGH SPEED	$\frac{5000}{f} + 90.5$			103
	NORMAL	$\frac{5000}{f} + 92$	$\frac{15000}{f} + 92$	192	
	AVERAGE	$\frac{15000}{f} + 92$	1092		

Measurement times are typical values in ms, f: measuring frequency (Hz).
*1: At spot frequency measurement (refer to paragraph 3-63).
*2: Measurement time for B - A measurements can be shortened by changing the setting of an internal control switch (refer to paragraph 3-139).

- Medida de impedancias

El analizador de impedancias HP4192A puede medir precisamente los parámetros de impedancia de un determinado circuito o componente a una frecuencia, un nivel de señal y una tensión continua determinadas. Los rangos de estos parámetros son:

Frecuencia: 5Hz a 13MHz

Nivel de oscilador: 5mVrms a 1.1 Vrms

Tensión continua de salida: -35V a 35V.

Con este equipo es posible automatizar los barridos tanto en frecuencia como en tensión continua de salida, mientras que en el nivel de señal de salida se ha realizarlo a mano.

El HP4192 realiza simultáneamente dos medidas independientes en cada ciclo de medida, esta combinación representa características resistivas y reactivas del elemento. Las funciones de medida son:

- Para el DISPLAY A:

Impedancia / Admitancia absolutas

Resistencia / Conductancia

Capacidad

Inductancia

- Para el DISPLAY B:

Fase en grados y radianes

Reactancia / Susceptancia
Factor de calidad
Resistencia / Conductancia

El analizador dispone de dos maneras de seleccionar rango de medida, una automática, controlada por el propio analizador de impedancias, y otra manual sobre la que es posible actuar. Dependiendo del rango de medida, la precisión en ésta cambia. Cuando se encuentra en el modo automático se selecciona el rango óptimo de operación, si el circuito de medida es saturado excediendo el límite superior de medida (120% de la escala total), se selecciona automáticamente el rango superior, de forma análoga sucede cuando el valor de medida desciende por debajo del límite inferior (11% de la escala total) el analizador cambia al rango de medida inmediatamente inferior.

Para la medida de impedancias el analizador dispone de cuatro terminales denominados Hpot (Alto potencial), Lpot (Bajo potencial), Hcur (Alta corriente) y Lcur (Baja corriente). La configuración correcta para la medida de impedancias consistiría en unir los terminales de Lcur y de Hcur y los de Hpot y de Lpot, de forma que con estos cuatro conectores el analizador puede medir los vectores corriente y voltaje a través del dispositivo a medir y con esto generar la información que se nos pide.

Al lado de los cuatro conectores se encuentra un interruptor, el cual tiene dos posiciones, de forma que permite que el analizador tenga en cuenta la longitud del cable que se está usando para las medidas.

A su vez es posible ver en el display C los valores actuales de corriente a través del dispositivo a medir y de tensión, para ello debe ser accionado la tecla TEST LEVEL MONITOR en combinación con el botón azul.

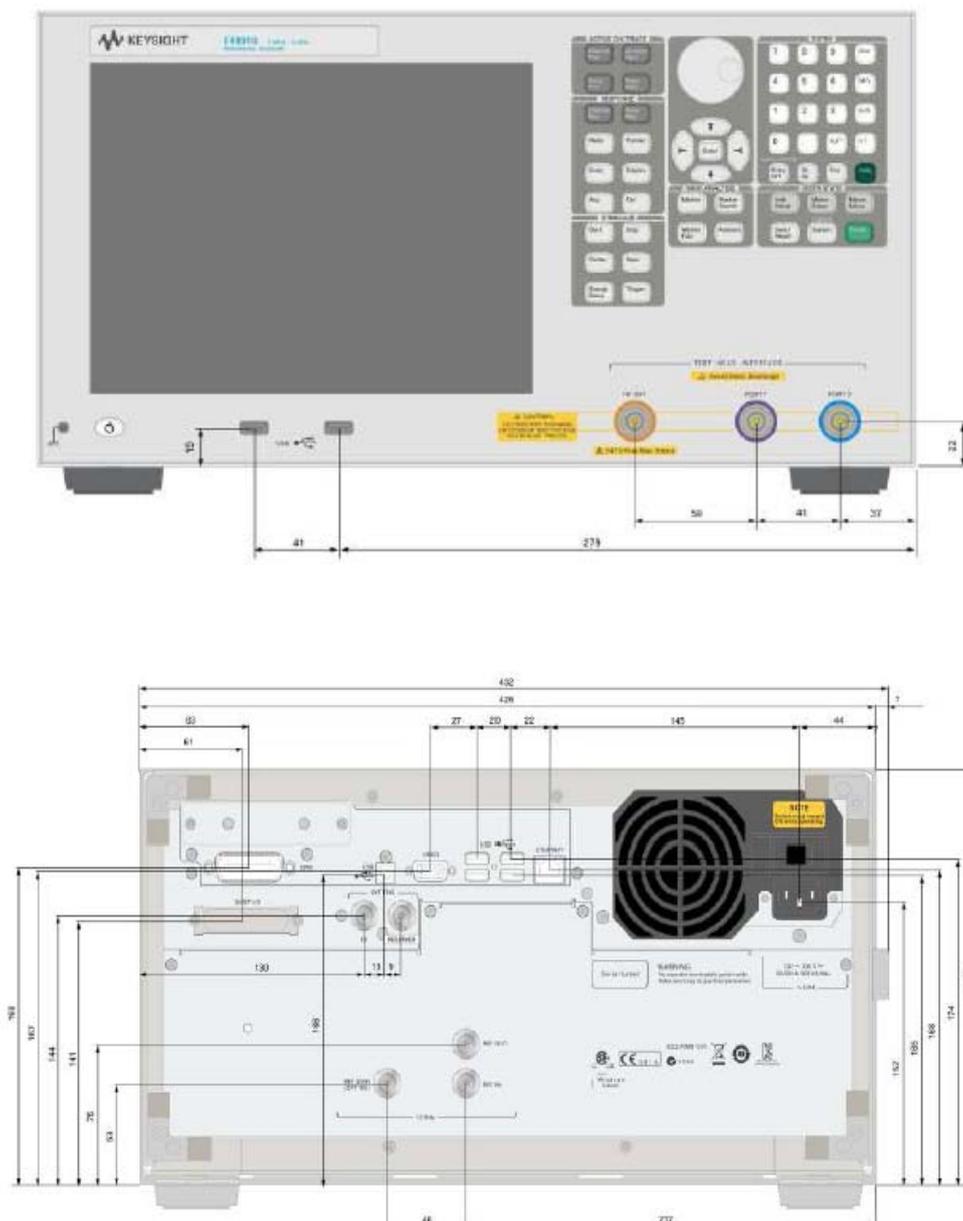
ANEXO II

5.2 – ANALIZADOR DE IMPEDANCIAS KEYSIGHT E5991B

En esta sección se efectuará una descripción de los controles del analizador de impedancias E4991B de Keysight, así como de los conectores y se mostrará el funcionamiento del equipo. Se comenzará describiendo los paneles del equipo y su función para luego describir las características del equipo y cómo se realizan en él las diferentes medidas.

Este analizador tiene un gran abanico de opciones, por lo que nos centraremos en lo que se ha utilizado exclusivamente.

Paneles frontal y trasero



5.2.1 – PARÁMETROS Y RANGO DE MEDIDAS

- Parámetros que se pueden medir con el analizador de impedancias E5991B:

$|Z|$, $|Y|$, Ls , Lp , Cs , Cp , $Rs(R)$, Rp , X , G , B , D , Q , θz ,
 θy , $|\Gamma|$, Γx , Γy , θr , Vac , Iac

- Rangos de medida ($|Z|$)

Las impedancias que pueden leer, en módulo, vandesde 120m Ω hasta 52 k Ω .

En ciertas condiciones, trabaja con una precisión en la medida menor al 10%.

Estas condiciones son:

Trabajar a una frecuencia de 1 MHz.

Modo de medida Average (media) con un factor de puntos mayor de 8.

El nivel del oscilador está a -3 dBm o a -13 dBm.

La temperatura a la que está sometido se sitúa en 23 °C \pm 5 °C, esto es, entre 21,85 °C y 24,15 °C.

- Características de la fuente

Frecuencia

Rango:

1MHz – 3GHz (opción 300)

1MHz – 1GHz (opción 100)

1MHz – 500MHz (opción 050)

Resolución: 1MHz

Precisión:

Sin Opción E4991B-1E5:

± 10 ppm (23 °C \pm 5 °C)

± 20 ppm (5 °C a 40 °C)

Con opción E4991B – 1E5:

± 1 ppm (5 °C a 40 °C)

Estabilidad:

Con opción E4991B – 1E5:

± 0.5 ppm/año (5 °C a 40 °C) (typical)

- Nivel del oscilador

En lo que al rango se puede decir que la potencia con una carga en el test port de 50 Ω va desde -40 dBm a 1dBm. La corriente en cortocircuito en el mismo puerto se mueve entre 0.0894 mArmsy 10 mArms. En cuanto al rango del voltaje, con circuito abierto en el test port, oscila entre los 4.47 mVrms y los 502mVrms.

Ahora se va a conocer la resolución y la precisión en las medidas.

La resolución es de 0.1dB cuando las unidades seleccionadas son mV o mA para voltaje y corriente respectivamente. La precisión se separa entre mayores y menores de 1GHz. Todas estas características están asociadas a una carga en el test port de 50 Ω .

Para una frecuencia menor o igual a 1GHz, la precisión es de ± 2 dB a una temperatura ambiente de $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Para una frecuencia mayor a 1 GHz será de ± 3 dB a $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ también.

Con la opción 010 del test head, la precisión a frecuencias menores o iguales a 1GHz está entre -3dB y 2dB, como antes se ha dicho, a una temperatura de $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Cuando la frecuencia es mayor a 1GHz, esta precisión empeora, llegando a -4dB y a 3dB.

Impedancia de salida

Cuenta con una Impedancia de salida nominal de $50\ \Omega$.

- DC Bias (Opción E4991B-001)

Primero se tratará el voltaje.

Rango: $\pm 40\text{ V}$

Resolución: 1 mV

Impedancia de salida (serie): $15\ \Omega$ (típica).

La precisión sigue una sencilla fórmula:

$\pm\{0.05\% + 5\text{ mV} + (|I_{dc}[\text{mA}]| \times 20\ \Omega)\}$ ($23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$).

Rango de límite de corriente: de 1 mA a 100 mA .

Resolución límite de corriente: $2\ \mu\text{A}$.

Precisión límite de corriente: $\pm 4\%$ (5 °C a 40 °C , típica)

Ahora toca describir la corriente DC de bias.

Rango: 0 a 100 mA .

Resolución: $2\ \mu\text{A}$.

Impedancia de salida (derivación): $20\text{ k}\Omega$ mínimo (típica)

Precisión:

$\pm\{0.2\% + 20\ \mu\text{A} + (|V_{dc}[\text{V}]|/10\text{ k}\Omega)\}$ ($23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$)

Rango límite voltaje: de 0.3 V a 40 V .

Resolución límite voltaje: 1 mV .

Precisión límite voltaje: $\pm (2\% + 20\text{ mV} + |I_{dc}| \times 20\ \Omega)$

(5 °C a 40 °C , typical)

En lo que respecta al monitor, a continuación se detallan sus características.

Parámetros del monitor: Voltaje y corriente

Precisión en voltaje del monitor:

$\pm \{0.2\% + 10\text{ mV} + (|I_{dc}[\text{mA}]| \times 2\ \Omega)\}$ ($23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, típica)

Precisión en corriente del monitor:

$\pm \{0.2\% + 25\ \mu\text{A} + (|V_{dc}[\text{V}]|/40\text{ k}\ \Omega)\}$ ($23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, típica)

- Características de barrido

Se puede elegir entre diferentes condiciones de barrido, en frecuencia se puede de forma lineal o logarítmica, en el nivel del oscilador en voltaje, corriente o potencia, en lo que al DC bias respecta se puede hacer barrido en voltaje o corriente, y en DC bias logarítmica también se puede en voltaje y corriente.

Los barridos se pueden definir como start/stop, indicando los límites del barrido. También se puede realizar situando el centro del barrido y dando su extensión. Los datos de barrido pueden ser continuo o individual. Este analizador nos permite hacer barridos tanto hacia arriba como hacia abajo. A lo largo del barrido, se pueden seleccionar entre 2 y 1601 puntos de medida. Hay diferentes tipos de tiempo de retraso, lo hay de punto, retraso de barrido y retraso de segmento. En estos barridos, el retraso está delimitado entre 0 y 30 segundos.

- Funciones soportadas en medida

Corrección de error

Dispone de calibración y compensación

Calibración en abierto/corto/carga: conectar los estándares de abierto, corto o carga al plano de referencia deseado y medir los datos de calibración de cada especie. El plano de referencia se llama plano de referencia de calibración.

Calibración de Capacidad de bajas pérdidas: conectar el estándar específico (condensador de bajas pérdidas) en el plano de referencia de calibración y medir así los datos de calibración.

Compensación de la extensión del puerto: cuando un dispositivo está conectado a un terminal que se extiende desde el plano de referencia de calibración, establece la longitud eléctrica entre calibración y el contacto del dispositivo. El E4991B cuenta con modelos para esta compensación, o también se puede introducir vía teclado por el usuario.

Compensación de abierto/corto: cuando un dispositivo está conectado a un terminal que se extiende desde el plano de referencia, proponer circuitos abiertos o en corto en el contacto del dispositivo, así se mide cada tipo de dato de compensación

Modo de frecuencia fija: en el dispositivo de medida, calibración o compensación se aplica a cada punto de medida mediante interpolación. Incluso si se cambian las condiciones de barrido, no es necesario volver a tomar datos de calibración/compensación.

Modo de frecuencia definida por el usuario: obtener los datos de calibración/compensación a la misma frecuencia, tal como se utiliza en la medida real de un dispositivo, está determinado por la configuración del barrido. Cada conjunto de datos de calibración/compensación se aplica a cada medida en la misma frecuencia. Si se cambia la configuración del barrido, se vuelve a tomar datos de calibración/compensación.

- Disparo

Interno, externo (conector de disparo externo), bus (GPIB/LAN/USB), manual (tecla frontal).

- Promedio

Tipos: promedio puntual, promedio de barrido.

Rango: ambos tipos van de 1 a 999 (enteros).

- Display

LCD display:

Su tamaño es de 10.4 pulgadas TFT color tipo LCD.

Cuenta con un gran display XGA con una resolución de 1024 x 768.

- Número de trazas:
 - Trazas de datos: 4 por canal (máximo).
 - Trazas de memoria: 4 trazas por canal (máximo).
- Las operaciones que se pueden realizar con estas trazas son:

La suma de datos y memoria, la resta, el producto y el cociente entre datos y memoria, aplicar cierto offset, y se las puede introducir en un editor de ecuaciones.

Los formatos en los que se pueden representar los números tienen dos puntos de vista, escalares y complejos. Los escalares pueden representarse con un eje Y lineal o logarítmico. Los complejos, tales como impedancias (Z), admitancias (Y), permitividad relativa (ϵ_r) permeabilidad relativa (μ_r), sus diferentes representaciones serían polar y complejo; en cambio, el coeficiente de reflexión (Γ) puede representarse en polar, complejo, Smith o admitancia.

Otra función del display es que cada canal de medida tiene una ventana con estímulos independientes. Se pueden mostrar 4 ventanas (canales) como máximo.

- Marcadores

Número de marcadores: 10 marcadores por traza. Marcador de referencia disponible para operaciones con la delta.

Búsqueda de marcadores: valor máximo, valor mínimo, múltiplo, multiobjetivo, pico, pico izquierda, pico derecha, objetivo, objetivo izquierda, objetivo derecha y parámetros de anchura con los valores definidos de ancho de banda por el usuario.

Búsqueda de pista: realiza la búsqueda en cada barrido.

Rango de búsqueda: definible por usuario.

- Análisis circuitos equivalentes

Modelo de circuitos:

Cuenta con 4 modelos de 3 componentes y con 3 modelos de 4 componentes.

Tipos de análisis:

Se puede hacer el cálculo de los parámetros de circuito equivalente, y también el cálculo de las características frecuenciales de simulación.

Test de límite de línea

Sus tests aparecen en el display para paso/fallo. Sus límites deben ser cualquier combinación de líneas horizontales/inclinadas y puntos discretos.

- Interfaces

GPIB

24-pin D-sub (tipo D-24), hembra. Es compatible con el estándar IEEE-488.

Este estándar es utilizado para casos en los que el ruido eléctrico es relativamente bajo.

Interfaz LAN

10/100/1000 Base T Ethernet, configuración de 8 pines; autoselectivo entre los dos rangos de datos.

USB puerto host

Bus jack serie universal. Configuración tipo A; hembra; ofrece conexión para ratón, teclado, impresora o una memoria USB.

Puerto Interfaz USB (USBTMC)

Bus jack serie universal, configuración tipo B (4 contactos por línea); hembra; ofrece conexión para un PC externo; compatible con USBTMC-USB488 y USB 2.0.LA

USB Test and Measurement Class (TMC) es la interfaz que comunica sobre USB, cumpliendo con los estándares IEE 288.1 y 488.2.

Intefaz de manejo

Centronics de 36 pines hembra

Terminal de medida

Tipo de conector: conector de 7mm.

Características generales

Condiciones ambientales

Condiciones de operación

La Temperatura debe estar entre los 5° y los 40°.

Humedad: entre 20% y el 80% en una temperatura menos de 29° (sin condensación).

Altitud: desde 0m a 2km.

Vibraciones: 0.21Grms, de 5Hz a 500Hz.

Tiempo de calentamiento: 30mins.

OPCIÓN E4991B-002 PARA MEDIDAS EN MATERIALES

- Parámetros de medida

Parámetros de permitividad: $|\epsilon_r|, \epsilon_r', \epsilon_r'', \tan\delta$.

Parámetros de permeabilidad: $|\mu_r|, \mu_r', \mu_r'', \tan\delta$.

- Rango de frecuencias

Con Keysight Technologies Inc 16453A entre 1MHz y 1GHz (típica).

Con keysight Technologies 16454A entre 1MHz y 1GHz (típica).

- Precisión en las medidas

Precisión típica en medidas de parámetros de permitividad:

Precisión en ϵ_r'

$$\pm \left[5 + \left(10 + \frac{0.1}{f} \right) \frac{t}{\epsilon_{r'm}'} + 0.25 \frac{\epsilon_{r'm}'}{t} + \frac{100}{\left| 1 - \left[\frac{13}{f \sqrt{\epsilon_{r'm}'}} \right]^2 \right|} \right] \quad [\%]$$

(at $\tan\delta < 0.1$)

Precisión en tangente de pérdidas de ϵ_r ($\Delta \tan \delta$):

$\pm(E_a + E_b)$ (con $\tan \delta < 0.1$). Donde,

E_a (para una frecuencia menor que 1GHz) =

$$0.002 + \frac{0.001}{f} \cdot \frac{t}{\epsilon'_{rm}} + 0.004f + \frac{0.1}{\left| 1 - \left(\frac{13}{f \sqrt{\epsilon'_{rm}}} \right)^2 \right|}$$

$$E_b = \left[\frac{\Delta \epsilon'_{rm}}{\epsilon'_{rm}} \cdot \frac{1}{100} + \epsilon'_{rm} \frac{0.002}{t} \right] \tan \delta$$

f = frecuencia de medida en GHz.

t = espesor del material estudiado en mm.

ϵ'_{rm} = valor medido de ϵ'_r .

$\tan \delta$ = valor medido de la tangente de pérdidas dieléctricas.

Precisión típica en medidas de parámetros de permeabilidad:

$$4 + \frac{0.02}{f} \times \frac{25}{F \mu'_{rm}} + F \mu'_{rm} \left(1 + \frac{15}{F \mu'_{rm}} \right)^2 f^2 [\%]$$

(at $\tan \delta < 0.1$)

Precisión en tangente de pérdidas de μ_r ($\Delta \tan \delta$):

$\pm(E_a + E_b)$ (con $\tan \delta < 0.1$)

Donde,

$$E_a = 0.002 + \frac{0.001}{F \mu'_{rm} f} + 0.004f$$

$$E_b = \frac{\Delta \mu'_{rm}}{\mu'_{rm}} \cdot \frac{\tan \delta}{100}$$

f = frecuencia de medida en GHz.

F = en mm.

h = altura del material en estudio en mm.

b = diámetro interno del material en estudio en mm.

c = diámetro externo del material en estudio en mm.

μ'_{rm} = valor medido de μ'_r .

$\tan \delta$ = valor medido de la tangente de pérdidas

ANEXO III**5.3 – MATERIALES UTILIZADOS**

En la foto de la figura 5 se muestran las cuatro piezas estudiadas.



Figura 5.



Figura 6. ABS 50%.

En este apartado se pasa a describir los materiales plásticos que han sido sometidos a prueba en este proyecto. Aunque no hay mucha documentación sobre los 3 diferentes compuestos, el ABS cuenta con un uso muy extendido, por lo que está más documentado, y es el material principal de estudio en este proyecto.

En la imagen de al lado, la figura 6, se enseña la rejilla que se forma al imprimir el ABS al 50% de densidad.

5.3.1 – ABS

El ABS es el nombre dado a una familia de termoplásticos. Se le llama plástico de ingeniería, debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes, como son las polioleofinas (polietileno, polipropileno). El acrónimo deriva de los tres monómeros utilizados para producirlo: acrilonitrilo, butadieno y estireno. Por estar constituido por tres monómeros diferentes se lo denomina terpolímero (copolímero compuesto de tres bloques). Hay tres procesos comerciales para la manufactura del ABS: por emulsión, masa o suspensión-masa. Las propiedades físicas del plástico ABS varían con el método de manufactura pero lo hace más con la composición. En general el proceso por emulsión se usa para hacer materiales de resistencias de alto impacto y el proceso de masa es preferido para materiales con menos resistencia al impacto.

Las partes que están fabricadas del material ABS deben estar marcadas de acuerdo con la norma ISO 11469 (DIN 58840):



Los bloques de acrilonitrilo proporcionan rigidez, resistencia a ataques químicos y estabilidad a alta temperatura así como dureza.

Los bloques de butadieno, que es un elastómero, proporcionan tenacidad a cualquier temperatura. Esto es especialmente interesante para ambientes fríos, en los cuales otros plásticos se vuelven quebradizos.

El bloque de estireno aporta resistencia mecánica y rigidez.

Esta mezcla de propiedades, llamada sinergia, indica que el producto final contiene mejores propiedades que la suma de ellos.

Aunque este producto tenía buenas propiedades comparado con otros materiales disponibles en aquellos años, tenía varias deficiencias entre las que se puede contar una mala capacidad para ser procesado así como también una falta de homogeneidad.

Para mejorar sus propiedades se fueron incorporando modificaciones en el proceso. El más exitoso de estos consistió en la polimerización del acrilonitrilo-estireno en presencia del caucho. El caucho en un principio tenía un alto contenido en acrilonitrilo y fueron reemplazados por otros con bajo contenido como el polibutadieno, el caucho natural, el caucho estireno butadieno y elastómeros acrílicos.

En la actualidad el ABS se produce, preponderantemente, por medio de la polimerización del estireno y el acrilonitrilo en presencia de polibutadieno, quedando como producto una estructura de polibutadieno, conteniendo cadenas de SAN (estireno acrilonitrilo) injertados en él.

Las tres formas de producción del ABS a partir del tipo de polimerización:

- Por emulsión:

El proceso de emulsión para hacer ABS se viene practicando desde principios de los años 50's. Sus ventajas son la capacidad de producir ABS con un amplio rango de

composiciones, especialmente con mayores contenidos en caucho que las que se puede lograr con otros métodos. La mezcla de los componentes y la transferencia del calor de reacción en una polimerización en emulsión es lograda con mayor facilidad debido a la baja viscosidad y las buenas propiedades térmicas del agua.

Los requerimientos de energía son generalmente más grandes que para otros procesos debido a la energía usada para la recuperación del polímero. El proceso además tiene un gran gasto en tratamiento de aguas residuales de proceso por la cantidad de agua usada.

- Por masa:

El proceso de masa ABS fue originalmente adaptado del proceso para obtener poliestireno. Este proceso tiene dos ventajas inherentes sobre la polimerización por suspensión y por emulsión. Una es que el agua residual de tratamiento es mínima y otra es el ahorro de energía por evitar la etapa de separación y secado de la resina del agua de proceso. Otra ventaja es que produce ABS poco pigmentado, incluso algo traslucido, lo que reduce la concentración de colorantes necesarios. Generalmente es más eficiente a modificaciones por impacto que el realizado por emulsión, sin embargo, la cantidad de caucho que se puede incorporar está limitada por limitaciones del proceso respecto a la viscosidad. El brillo superficial es menor debido a que las partículas de caucho son mayores.

- Por suspensión-masa:

La morfología y propiedades de la suspensión son similares a aquellas que se obtienen el proceso de polimerización en masa pero con las ventajas de la técnica en emulsión respecto a la baja viscosidad y la capacidad del agua de remover el calor.

- Propiedades

Los materiales de ABS tienen importantes propiedades en ingeniería, como buena resistencia mecánica y al impacto combinado con facilidad para el procesado.

La resistencia al impacto de los plásticos ABS se ve incrementada al aumentar el porcentaje de contenido en butadieno pero disminuyen entonces las propiedades de resistencia a la tensión y disminuye la temperatura de deformación por calor.

El amplio rango de propiedades que exhibe el ABS es debido a las propiedades que presentan cada uno de sus componentes.

El acrilonitrilo proporciona:

- Resistencia térmica
- Resistencia química
- Resistencia a la fatiga
- Dureza y rigidez

El butadieno proporciona:

- Ductilidad a baja temperatura
- Resistencia al impacto

Resistencia a la fusión

El estireno proporciona:

Facilidad de procesado (fluidez)

Brillo

Dureza y rigidez

Excepto en películas delgadas, es opaco y puede ser de color oscuro o marfil y se puede pigmentar en la mayoría de los colores. La mayoría de los plásticos ABS son no tóxicos e incoloros. Pueden ser extruidos, moldeados por inyección, soplado y prensado. Generalmente los grados de bajo impacto son los que más fácil se procesan. Los de alto impacto son más dificultosos porque al tener un mayor contenido en caucho los hace más viscosos. A pesar de que no son altamente inflamables, mantienen la combustión. Hay algunos tipos autoextinguibles para cuando se requiere algún producto incombustible, otra solución consiste en aplicar algún retardante de llama.

Dentro de una variedad de termoplásticos el ABS es importante por sus balanceadas propiedades. El ABS se destaca por combinar dos propiedades muy importantes como son la resistencia a la tensión y la resistencia al impacto en un mismo material, además de ser un material liviano.

- Propiedades cualitativas:

Cuenta con una resistencia a la abrasión alta.

Respecto a su permeabilidad, todos los grados son considerados impermeables al agua, pero ligeramente permeables al vapor.

Relativo a la fricción, no los degradan los aceites, son recomendables para cojinetes sometidos a cargas y velocidades moderadas.

Su estabilidad dimensional es una de sus características más sobresalientes, lo que permite emplearla en partes de tolerancia dimensional cerrada. La baja capacidad de absorción de la resina y su resistencia a los fluidos fríos, contribuyen a su estabilidad dimensional.

En cuanto a la pigmentación, la mayoría de estas resinas se pueden pigmentar aunque requieren equipo especial.

Facilidad de unión: Se unen fácilmente entre sí y con materiales plásticos de otros grupos mediante cementos y adhesivos.

Posee una capacidad de absorción baja.

En las propiedades ambientales, su exposición prolongada al sol produce una capa delgada quebradiza, causando un cambio de color y reduciendo el brillo de la superficie y la resistencia a la flexión. La pigmentación en negro provee mayor resistencia a la intemperie.

Su resistencia química es generalmente buena aunque depende del grado de la resina, de la concentración química, temperatura y esfuerzos sobre las partes. En general no son afectadas por el agua, sales inorgánicas, álcalis y por muchos ácidos. Son solubles en ésteres, acetona, aldehídos y en algunos hidrocarburos clorados.

Se adaptan bien a las operaciones secundarias de formado. Cuando se calientan, los perfiles extruidos, se pueden doblar y estampar.

Posee una buena facilidad de maquinado, ya que sus características son similares a las de los metales no ferrosos, se pueden barrenar, fresar, tornearse, aserrar y troquelar.

En su acabado superficial, pueden ser acabados mediante metalizado al vacío y electroplateado.

La resistencia a la fatigase presenta para cargas cíclicas o permanentes mayores a 0.7 Kg mm².

Hablando de la recocida, se mantiene 5° C por encima de la temperatura de distorsión durante 2 a 4 h.

- Propiedades mecánicas a 23°C medidos mediante métodos ASTM:

Resistencia al impacto, prueba Izod por el método D2546:

ABS de alto impacto: 375-640J / m
 ABS de impacto medio: 215-375J / m
 ABS de bajo impacto: 105-215J / m
 ABS resistente al calor: 105-320J / m

Resistencia a la tensión por el método D638:

ABS de alto impacto: 3,3 - 4,2 Kg / mm²
 ABS de impacto medio: 4,2-4,9 Kg / mm²
 ABS de bajo impacto: 4,2-5,3 Kg / mm²
 ABS resistente al calor: 4,2-5,3Kg / mm²

Elongación mediante el método D638:

ABS de alto impacto: 15-70 %
 ABS de impacto medio: 10-50 %
 ABS de bajo impacto: 5-30 %
 ABS resistente al calor: 5-20 %

Módulo de tensión por el método D638:

ABS de alto impacto: 173-214
 ABS de impacto medio: 214-255
 ABS de bajo impacto: 214-265
 ABS resistente al calor: 214-265

Dureza con el método D785:

ABS de alto impacto: 88-90HRC (Rockwell)
 ABS de impacto medio: 95-105HRC (Rockwell)
 ABS de bajo impacto: 105-110HRC (Rockwell)
 ABS resistente al calor: 105-110HRC (Rockwell)

Peso específico mediante el método D792:

ABS de alto impacto: 1,02-1,04
 ABS de impacto medio: 1,04-1,05
 ABS de bajo impacto: 1,05-1,07
 ABS resistente al calor: 1,04-1,06

- Propiedades térmicas:

Coefficiente de expansión térmica con el método D696:

ABS de alto impacto: 9,5-11,0 10⁵ cm / cm* °C
 ABS de impacto medio: 7,0-8,8 10⁵ cm / cm* °C
 ABS de bajo impacto: 7,0-8,2 10⁵ cm / cm* °C
 ABS resistente al calor: 6,5-9,3 10⁵ cm / cm* °C

Distorsión por calor por el método D648:

ABS de alto impacto: 93-99°C a 18,4 Kg /cm²
 ABS de impacto medio: 96-102°C a 18,4 Kg /cm²
 ABS de bajo impacto: 96-104°C a 18,4 Kg /cm²
 ABS resistente al calor: 102-112°C a 18,4 Kg /cm²

- Usos y aplicaciones

Piezas de automóviles (tableros, parachoques, etc.). El ABS se caracteriza por ser un material muy fuerte y liviano, lo suficientemente fuerte como para ser utilizado en la fabricación de piezas para automóviles. El empleo de plásticos como ABS hace menos pesados a los coches, lo que se traduce en una menor utilización de combustible.

5.3.2 – CIANOACRILATO

El cianoacrilato es el nombre genérico de una familia de adhesivos de acción rápida con usos industriales, médicos y electrodomésticos. Estos incluyen metilo 2-cianoacrilato, etil-2-cianoacrilato, n-butilcianoacrilato de 2-octilo y cianoacrilato. El Octilcianoacrilato fue desarrollado para hacer frente a problemas de toxicidad y reducir la irritación de la piel y reacciones alérgicas. Los adhesivos de cianoacrilato se conocen a veces como cola instantánea.

- Propiedades

En su forma líquida, se compone de monómeros de cianoacrilato. El Metil-2-cianoacrilato tiene un peso molecular igual a 111,1, un punto de inflamación de 79 °C, y una densidad de 1,1 g/ml. El Etil 2-cianoacrilato tiene un peso molecular igual a 125 y un punto de inflamación > 75 °C. Para facilitar la fácil manipulación, un adhesivo de cianoacrilato se formula con frecuencia con un ingrediente, tal como sílice de pirólisis para que sea más viscoso. Recientemente, las formulaciones están disponibles con aditivos para aumentar la resistencia a la cizalladura. Estos aditivos pueden incluir caucho.

En general, cianoacrilato es una resina acrílica que polimeriza rápidamente en presencia de agua, formando cadenas largas y fuertes, que unen las superficies adheridas entre sí. Debido a la presencia de humedad provoca que el pegamento se estabilice, la exposición a niveles normales de humedad en el aire hace que se cree una fina piel rápidamente, lo que ralentiza la reacción. Debido a esto el cianoacrilato se aplica en finas capas, para asegurar que la reacción transcurre rápidamente y se realice una fuerte unión en un tiempo razonable.

- Usos

El pegamento de cianoacrilato tiene una resistencia al cizallamiento bajo, lo cual también ha llevado a su uso como un adhesivo temporal en los casos en que la pieza puede ser fácilmente cizallado en un momento posterior. Los ejemplos comunes incluyen el montaje de una pieza de trabajo a un bloque de pegamento de sacrificio en un torno, y apretando los pernos y tornillos.

La capacidad del pegamento de cianoacrilato para resistir el agua lo ha hecho popular entre los aficionados a los acuarios marinos de corales. Las ramas cortadas de corales duros tales como Acropora se pueden pegar a un trozo de roca viva o Milliput para permitir que el nuevo fragmento crezca hacia fuera. Sin embargo, como una clase de adhesivos, cianoacrilatos tradicionales se clasifican como "débil" en resistencia tanto a la humedad como al calor a pesar de la inclusión de anhídrido ftálico, contrarresta. En la mayoría de los casos, el adhesivo de cianoacrilato estándar no se une bien con vidrio liso, aunque se puede utilizar como un enlace rápido y temporal antes de la aplicación de un adhesivo para vidrio adecuado o de cianoacrilato formulado específicamente para su uso en el vidrio. Una unión adhesiva mecánica puede estar formada alrededor de

estera de fibra de vidrio o tejido para reforzar las articulaciones o para la fabricación de piezas pequeñas.

Se puede utilizar como pegamento de secado rápido y acabado brillante. El uso de aceite sirve para controlar la velocidad de secado. Algunos escaladores utilizan cianoacrilato para reparar daños en la piel de sus manos. Del mismo modo, los músicos cuyo instrumento es de cuerda, pueden formar capas protectoras del dedo con cianoacrilatos.

- Los problemas de seguridad, Toxicidad

Los vapores de cianoacrilato son una forma vaporizada del monómero de cianoacrilato, que irritan las membranas sensibles de los ojos, nariz y garganta. Se polimerizan inmediatamente a causa de la humedad en las membranas y se vuelven inertes. Estos riesgos pueden ser minimizados mediante su uso en lugares bien ventilados. Alrededor del 5% de la población puede llegar a sensibilizarse con su humo después de someterse a una exposición repetida, dando lugar a síntomas similares a la gripe. También puede actuar como un irritante de la piel y puede causar una reacción alérgica. La ACGIH, la American Conference of Government Industrial Hygienists en sus siglas en inglés, asigna un límite de exposición umbral de 200 partes por mil millones. En raras ocasiones, la inhalación puede provocar asma. No hay ninguna medida singular para combatir la toxicidad en todos los adhesivos de cianoacrilato, ya que hay una amplia variedad de adhesivos que contienen diversas formulaciones de cianoacrilato.

El Programa de Toxicología Nacional de Estados Unidos y el del Reino Unido de Salud y Seguridad han concluido que el uso de cianoacrilato de etilo es seguro y que el estudio adicional es necesario. El Cianoacrilato de 2-octilo se degrada mucho más lentamente debido a su espina dorsal orgánica, que retarda la degradación del adhesivo lo suficiente como para permanecer por debajo del umbral de toxicidad establecido. Debido a los problemas de toxicidad del cianoacrilato de etilo, se aconseja el uso de cianoacrilato de 2-octilo en suturas.

5.3.3 – TPE

Los Elastómeros Termoplásticos (TPEs) se distinguen por sus buenas propiedades de resistencia mecánica, elasticidad y posibilidad de proceso conjuntamente con plásticos técnicos. Su formulación a base de resinas de copolímeros da lugar a materiales con características termoplásticas y elastoméricas al mismo tiempo. Los elastómeros termoplásticos combinan las ventajas típicas de las gomas y de los materiales plásticos. Por su estructura y comportamiento los elastómeros termoplásticos se ubican entre los plásticos (termoplásticos) y el caucho (elastómero).

Mientras que la mayoría de los elastómeros son termoestables, los termoplásticos se utilizan en el moldeo por inyección. Los elastómeros termoplásticos combinan las ventajas típicas de las gomas y de los materiales plásticos. La diferencia principal entre los elastómeros termoestables y los elastómeros termoplásticos es el grado de entrecruzamiento en las estructuras de las cadenas moleculares del producto. De hecho, el entrecruzamiento es un factor estructural crítico que contribuye a que el material adquiera altas propiedades elásticas. Mientras que en los polímeros termoestables está

formado por enlaces covalentes creados durante el proceso de la vulcanización, en los elastómeros termoplásticos se forman a partir de enlaces electrostáticos o de enlaces por puente de hidrógeno y ocurre solamente en una de las fases del material. Los elastómeros termoplásticos son por lo tanto de flujo libre y configurables.

El uso de TPEs ofrece innumerables ventajas:

- Termoplástico de fácil procesamiento
- Ciclos cortos
- Bajo consumo de energía
- Estabilidad térmica con condiciones de proceso de amplio espectro.
- Procesamiento múltiple y económico
- Utilizables para bi-inyección, sobremoldeo o insertos
- 100% reciclable
- Posibilidad de diferentes acabados y coloreables.

TPS

Un TPE basado en los copolímeros de bloque estirénicos es conocido como un TPS. A su vez, un TPS puede ser además clasificado en SEBS, SBS, SEPS y SEPS-V en función del tipo de resina que contenga. KRAIBURG TPE produce principalmente componentes SEBS (estireno-etileno-butileno-estireno). En este compuesto, los bloques de estireno forman las uniones físicas, siendo el la cadena de etilen-butilen la que proporciona las características elásticas. Gracias a una adecuada formulación y combinación en el desarrollo del producto, los SEBSs pueden presentar diferentes características, destacando principalmente su gran versatilidad para la bi-inyección o sobremoldeo con materiales plásticos.

ANEXO IV

3.4 – LA IMPRESIÓN EN 3D

La impresión 3D es una de las grandes tendencias de los últimos años en el terreno de la tecnología. De hecho, se está viendo poco a poco como salen al mercado de consumo distintos modelos de impresora 3D que se pueden comprar tanto a través de Internet como en grandes almacenes, incluso hay modelos autoabastecidos, es decir, se realizan con piezas imprimibles por ella misma. Sin embargo, la impresión 3D tiene mucho más detrás de lo que parece en primera instancia. Existen tres tecnologías principales a la hora de hablar de impresoras 3D, se verán por encima, así también se mostrará qué tipo de piezas y acabados se pueden conseguir con ellas.

- Impresión 3D vs modelado tradicional

Las impresoras 3D forman parte de lo que se conocen como procesos de fabricación aditiva. Estos procesos son aquellos que permiten fabricar un objeto desde cero donde las máquinas van añadiendo material hasta conformar la pieza final.

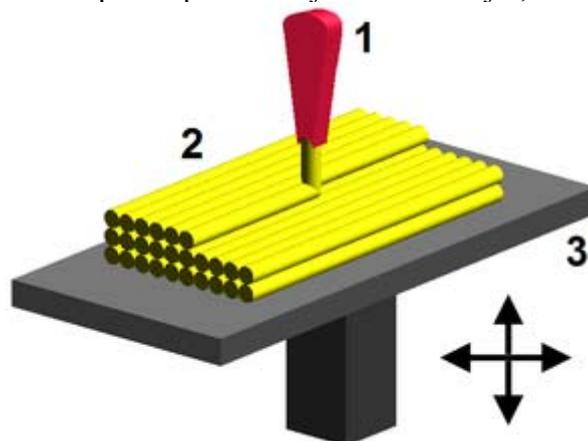
En la fabricación tradicional como puede ser el mecanizado mediante torno de control numérico se parte de un bloque de material sobre el que se empiezan a realizar operaciones quitando capas hasta dejar la pieza que se quiere obtener.

Los procesos aditivos incluyen, entre otros, todas las tecnologías de Prototipado Rápido (Rapid Prototyping) con métodos como la impresión 3D: FDM, FFF, Estereolitografía (SLA) o el Sinterizado Selectivo Láser (SLS).

Todos los procesos de fabricación aditiva tienen en común el hecho de que pueden generar geometrías muy complejas de una forma muy rápida. En todos los casos, los objetos presentan una textura material de capas muy finas, casi imperceptibles.

- Tecnologías de deposición de material plástico

La tecnología que ha popularizado este método de impresión de figuras y piezas en 3D ha sido la que se conoce como FusionDepositionModeling (FDM) que fue inventada y patentada a finales de los años 80 por Scott Crump quien la empezó a comercializar a través de la empresa que fundó junto a su mujer, Stratasys.



1. Extrusor / 2. Material depositado / 3. Soporte

Es una tecnología que permite conseguir piezas utilizando plástico ABS (similar al material de los juguetes Lego) o bien PLA (un polímero biodegradable que se produce desde un material orgánico).

La gran mayoría de las impresoras 3D personales utiliza tecnología FDM

La tecnología FDM estaba protegida por patente, por lo que nació una tecnología que en esencia es similar, Fused Filament Fabrication (FFF) que se han visto en impresoras como RepRap.

La impresión con esta tecnología comienza desde la capa inferior, creando una superficie en la base para poder separar la pieza. Se utiliza un fino hilo de plástico que pasa por el extrusor que es, en resumen, un dispositivo que calienta el material hasta el punto de fusión. En ese momento el plástico va depositándose en la posición correspondiente de la capa que se está imprimiendo.

Tras ser depositado en su lugar, el material se enfría y solidifica, una vez acabada esa capa, se desplaza verticalmente una pequeña distancia para comenzar la siguiente capa. Según la pieza a fabricar es posible que se necesiten varios soportes, llamados andamios, que se eliminan a posteriori.

- Tecnologías impresión 3D con láser

Continuando con las tecnologías de impresión en 3D, ahora toca hablar sobre dos tecnologías que utilizan el láser, son las tecnologías Estereolitografía (SLA) y Selective Laser Sintering (SLS). Con estas tecnologías se consigue una mayor precisión de las piezas impresas y un ahorro en tiempo de impresión.

La tecnología SLA o estereolitografía nació antes que la tecnología FDM y FFF de la mano de Charles Hull quien también fundó la empresa 3D Systems. Esta compañía fue la primera en poner a la venta lo que hoy se conoce como impresora 3D.

Una impresora de SLA tiene un funcionamiento también capa a capa pero a diferencia del método anterior en esta ocasión se parte de una base que se va sumergiendo (o sacando) capa a capa en un baño de resina fotocurable. El láser de luz ultravioleta activa la curación de la resina líquida, solidificándola. En ese momento la base se desplaza hacia abajo para que el láser vuelva a ejercer su acción.

Con este método se consiguen figuras con gran detalle aunque, al igual que el método posterior, desperdicia cierta cantidad de material según qué piezas si se necesitan fabricar soportes que se eliminan a posteriori.

Y para finalizar os se presenta la tecnología SLS o Sinterización Selectiva Láser. Esta tecnología nació en la Universidad de Texas en los años 80 también y pese a tener ciertas similitudes con la tecnología SLA en concepto, permite utilizar un gran número de materiales. A diferencia de la impresión vía SLA que hace uso de un baño de un polímero líquido fotocurable se utiliza material en polvo (poliestireno, materiales cerámicos, cristal, nylon y materiales metálicos). El láser impacta en el polvo y primero funde el material, para que inmediatamente después se solidifique (sinterizado).

Todo el material en polvo que no se sinteriza sigue situado donde estaba inicialmente y sirve de soporte para las piezas, principal ventaja frente a las tecnologías anteriores. Una vez finalizada la pieza ese material puede ser retirado y reutilizado para la impresión de próximas piezas.

Otras tecnologías de impresión 3D

Ya he comentado los procesos de impresión 3D más populares pero no son los únicos, existen otros métodos menos utilizados a día de hoy. Esto no quiere decir que en el futuro no se pueda ver como se popularizan.

La primera de ellas es Poly Jetphotopolymer, desarrollada por Objet (más tarde adquirida por Stratasys) y que se asemeja a la manera en la que las impresoras de tinta depositan la tinta. Un fotopolímero líquido se expulsa y entonces se solidifica gracias a una luz ultravioleta. Tal y como sucede con el resto de tecnologías 3D la impresión se realiza capa a capa.

En teoría esta tecnología permitiría hacer uso de distintos materiales y colores de manera simultánea capa a capa.

Otra de las tecnologías de impresión 3D es Syringe Extrusion que no es más que un sistema de impresión que hace uso de cualquier tipo de material en formato cremoso o viscoso y se hace uso de un extrusor a modo de manga pastelera / jeringuilla, situando el material en la posición adecuada.

Según el material utilizado se requerirá que el extrusor caliente (ABS) o no (silicona).

Ahora vienen otros métodos que son, en gran mayoría, modificaciones de los anteriores pero que merece la pena mencionar. Primeramente viene el Selective Laser Melting (SLM) que es similar a SLS pero que derrite el material en polvo en lugar de sólo fundirlo a baja temperatura.

Este proceso SLM es equivalente a Electron Beam Melting (EBM) que utiliza un haz de electrones en lugar de un láser UV para derretir el polvo.

Y para finalizar también existe el Laminated Object Manufacturing (LOM), donde distintas capas de material (papel adhesivo, plástico o láminas de metal) son situadas una encima de otra y se pegan con resina/pegamento y son cortadas con la forma apropiada con láser. Este proceso recuerda en parte al modo de fabricación de la fibra de carbono.

Como se puede ver se cuenta con numerosas tecnologías disponibles para imprimir en 3D. Es un mercado en plena expansión y muy joven por lo que no se puede tener una idea clara sobre qué rumbo seguirá.

BIBLIOGRAFÍA

ABS: <http://plastics.ulprospector.com/es/generics/1/c/t/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-properties-processing>

https://es.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrilo_butadieno_estireno

TPE: <http://www.kraiburg-tpe.com/es/products/thermoplastic-elastomers>

Cianocrilato: <http://lasaludfamiliar.com/caja-de-cerebro/conocimiento-7010.html>

HP 4991A: manual de instrucciones y data sheet oficial.

Proyecto sobre el analizador de impedancias HP 4992A realizado con anterioridad por Rubén García Rodríguez.

Keysight E5991B: manual de instrucciones y data sheet oficial.

www.keysight.com

Impresión 3D: www.bq.com

www.arkolab.es

<http://www.siliconweek.es/workspace/impresion-3d-que-materiales-usar-y-donde-comprarlos-50135>

Condensadores:

http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_electrico/dielectrico/dielectrico.htm

<http://www.areatecnologia.com/electricidad/condensador.html>

https://es.wikipedia.org/wiki/Condensador_el%C3%A9ctrico

http://unicrom.com/Tut_ClasifCapaci.asp

Trabajos anteriores de José María Zamanillo.

Efecto borde:

H. B. Palmer, "Capacitance of a parallel-plate capacitor by the Schwartz-Christoffel transformation," *Trans. AIEE*, Vol. 56, pp. 363, March 1927.

R. S. Elliott, "Electromagnetics(book)," pp. 182-189, 1966.

W. H. Chang, "Analytic IC-metal-line capacitance formulas," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-24, pp. 608-611, 1976; also vol. MTT-25, p. 712, 1977.

C. P. Yuan and T. N. Trick, "A simple formula for the estimation of the capacitance of two-dimensional interconnects in VLSI circuits," *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. EDL-3, pp. 391-393, 1982.

T. Sakurai and K. Tamaru, "Simple formulas for two- and three-dimensional capacitances," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-30, pp. 183-185, 1983.

N. Van de Meijs and J. T. Fokkema, "VLSI circuit reconstruction from mask topology," *Integration*, Vol. 2, pp. 85-119, 1984.

H. Yang, "Microgyroscope and microdynamics," *Ph. D. Dissertation*, December, 2000.

M. H. Bao, "Handbook of sensors and actuators," Vol. 8, pp. 144-145, 2001.

