

Estudio de los factores de disipación de la mica-epoxi en pruebas de calentamiento para placas de circuitos eléctricos

Luis Alberto González José

25 de abril de 2017

1 Abstracto

Se investigó sobre los cambios termodinámicos de una placa de circuitos compuesta de pasta mica-epóxica. En la investigación encontrada, hecha por H. J. Reyno, et al; se usaron 15 muestras que se expusieron a pruebas de resistencia por aumento de voltaje a pasos; “SVET” por sus siglas en inglés. Se hizo con el fin de progresivamente aumentar la temperatura liberada a través de los pasivos y así, analizar los cambios termodinámicos en la placa mica-epóxica. Utilizó sus datos experimentales para analizar la relación voltaje/calor de la resina, considerando también las funciones obtenidas por pérdidas de voltaje.

2 Introducción

La pasta epóxica tiene una gran variedad de usos tanto industriales como comerciales. Tiene la propiedad de ser muy viscosa, por lo que es sencillo aplicarla como base en donde se desee. Ésta se activa con fenol para endurecerse, por lo que obtiene nuevas propiedades mecánicas. Debido a la propiedad aislante que otorga el fenol al activar la resina. Ésta se ha vuelto un gran medio para hacer placas de circuitos. Adicionalmente, el fenol tiene una alta resistividad al calor, por lo que las placas de resina epóxica se han vuelto excelentes para soportar circuitos de alto voltaje, donde los componentes pasivos liberan altas temperaturas.

Conocer éstos cambios termodinámicos en la

placa es importante, para comprender el desgaste por uso que tendrían estas en una planta industrial donde el uso es continuo por muchos días. Un mal funcionamiento de éstas causaría un paro total de trabajo en la planta, lo que costaría una considerable suma de dinero. Es por eso que se desea conocer éste desgaste, para proyectar un tiempo de remplazo de éstas placas.

3 Relacionando el voltaje con estados termodinámicas

Para poner a prueba la duración de la placa, es posible encontrarla por medio de pruebas destructivas o también por medio del factor de disipación de calor que ofrece la placa. Debido a que el calor liberado es proporcional al voltaje aplicado en la placa, tanto en corriente directa como en la alterna.

$$V_{aplicado} \propto Q_{liberado} \quad (1)$$

Para encontrar éste factor, es necesario encontrar los diferenciales que existen al aplicar diferentes voltajes y así analizar los diferenciales de calor que haya, que produce diferentes condiciones de insulación.

$$\therefore dV \propto dQ \quad (2)$$

Para encontrar éstos niveles de insulación, es necesario aplicar la primera y segunda ley de la termodinámica que corresponden a los conceptos de la energía interna, entalpía y entropía. La primera ley establece que el entorno de un objeto afecta su en-

energía interna.

$$\Delta U = Q + W + \dot{m} \quad (3)$$

(Q) transferencia de calor, (W) trabajo transferido, (\dot{m}) masa transferida

en un sistema adiabático, donde no se realiza trabajo

$$\Delta U = 0 \quad (4)$$

El cual no es el caso dado que el sistema no está aislado. Por lo que existen cambios efectivos en el sistema (la placa).

Para el experimento realizado, solo se hicieron cambios de voltaje con la intención de producir cambios en temperatura, por lo que la presión y el volumen son constantes y el concepto de entalpía se toma en cuenta. La segunda ley, establece el uso de la entropía como la medida de energía que no puede ser transformada a mecánica, sino que se expresa como una cantidad de calor por unidad de temperatura.

$$\Delta S_{universo} = \Delta S_{entorno} + \Delta S_{sistema} = 0 \quad (5)$$

Dado que los primeros dos conceptos de la termodinámica consisten en funciones de estado, no es posible medirlas experimentalmente, pero sí es posible medir sus variables y cantidades independientes (temperatura, volumen, presión, etc.); éstas funciones de estado describen el sistema sin importar el proceso o “camino” con el cuál se llegó.

La ley de conservación de energía nos ayuda a encontrar cantidades de energía que se liberan durante el intercambio con el entorno. Ésto nos ayuda a encontrar cambios en estas cantidades independientes y con estas, encontrar las funciones de estado. Ésto es necesario debido a que las funciones de estado dependen del **cambio**, por lo que se necesitan encontrar los diferenciales de las cantidades independientes. Por ejemplo la energía interna, que depende de un diferencial parcial de temperatura y de volumen

$$\Delta U = \left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)_T dV \quad (6)$$

Afortunadamente, debido a que el volumen se mantiene constante, el cambio de energía producida por el cambio de volumen es igual a cero.

$$\begin{aligned} \therefore \left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)_T dV &= 0 \\ \therefore \Delta U &= K_V dT \end{aligned}$$

El fenol tiene la propiedad de ser dipolar (1.46 ± 0.24 Debye), por lo que permite el flujo del campo eléctrico aún siendo aislante del flujo eléctrico. Esto causa que exista una resistencia y capacitancia natural a través del aislante, por lo que es posible verlo como un resistor y un capacitor. La forma de calcular la pérdida de energía se puede realizar con una prueba de la corriente total que se espera del circuito, y la corriente total obtenida al medirla.

$$\therefore P_{perdido} = VI$$

$$I_{esperado} = \frac{V_{fuente}}{R_{carga}}$$

$$I = I_{esperado} - I_{medido}$$

$$R_{placa} = \frac{V_{fuente}}{I}$$

$$V = IR_{placa}$$

$$\therefore P_{perdido} = \left(\frac{V_{fuente}}{R_{carga}} - I_{medida}\right) \left(\frac{V_{fuente}}{\frac{V_{fuente}}{R_{carga}} - I_{medida}}\right)$$

Con lo que se logra relacionar una pérdida de poder con un incremento de voltaje $\rightarrow V \propto P_{perdida}$ La energía perdida del circuito el cual se transfiere como calor liberado del sistema.

4 Cambio de energía interna

Se sabe que el factor de disipación de calor es proporcional a la temperatura. Esto se debe a que la conductividad del material aumenta con la temperatura hasta alcanzar un cierto límite. Estos cambios en su conductividad causan un cambio en la estructura molecular de la mica-epoxi, causando cambios irreversibles a través del tiempo. Esto, por consiguiente,

permite estimar un tiempo para que la estructura molecular cambie tal que llegue a un punto donde permita una transferencia de calor que supera las especificaciones permitidas para trabajar.

Al saber que el cambio de energía interna será dada únicamente por una transferencia de calor entre el sistema y el entorno,

$$\Delta U = Q \quad \dot{m} = 0 \quad W = 0$$

es posible relacionar

$$\Delta U = mL_E \Delta T \quad (7)$$

donde (ΔT), es la diferencia de temperatura entre el sistema y el entorno), (m) es la masa y (L_E) es la transferencia calorífica.

Tomando en cuenta ésta última ecuación, se puede exponer el circuito a un voltaje para liberar calor y así observar qué cantidad de energía interna libera. Aumentando los valores de voltaje cambiará los valores de la energía interna liberada, así pudiendo encontrar el desgaste en la placa.

5 Datos obtenidos

A continuación se cita cómo el experimento fue llevado a cabo, describiendo cómo compusieron lo que representaría la placa, y qué pasos hicieron para obtener las temperaturas que el instrumento leyó. En el artículo, se lee:

Se utilizaron 15 muestras para la prueba de resistencia por voltaje a pasos (SVET). Cada muestra se diseñó con una barra de aluminio de un largo de 60cm. Se recubrió con una capa de resina mica-epóxica, y encima, otra capa con tiras que empezaban a la mitad de la anterior, para garantizar que no hubiera espacios dejados. Después de poner 10 capas, se puso una capa de fibra de vidrio para dar soporte mecánico al tubo. Se removió el exceso de resina con la presión de la última fibra. En el área central, con

un largo de 20 cm, se puso una capa semiconductiva para asegurar homogeneidad del potencial aplicado (con esto, se refieren a aplicar un voltaje equivalente invariable entre cada muestra); finalmente se usaron 10cm de lado a lado, una capa de asbesto para aplicar el tratamiento del potencial gradiente (el nodo donde se aplicaría el voltaje).

Para aplicar el SVET, las muestras se sometieron a estrés térmico y eléctrico. Se aplicó una corriente de 300A en serie a través de todo el aluminio, esto elevando la temperatura en el tubo que irradió en el conducto eléctrico de la muestra. La temperatura medida fue de 90°C, usando una cámara termográfica.

Para el estrés eléctrico, se usó un transformador de 2kVA de poder con un voltaje de hasta 50kV. El montaje de las muestras fue hecho en dos cerámicos aislantes. En la parte superior de los dieléctricos, se pusieron 2 placas de aluminio que servirían como electrodos de alto voltaje que daban soporte mecánico a las muestras. La diferencia de voltaje fue aplicado entre las placas que estaban en contacto con el semiconductor y la barra de aluminio. Los voltajes fueron de 12, 15 16 y 21 kV con un tiempo de prueba de 300 horas cada una para cada nivel de voltaje.

Antes de empezar SVET y para cada prueba de 300h, se hicieron las medidas del factor de disipación utilizando las diferentes medidas de temperatura. Las medidas fueron hechas después de cortar la energía de las muestras, dejando que se enfriaran por 1 hora.

El factor de disipación fue hecho con 7 temperaturas de 20 hasta 140 °C con incrementos de 20°C. Se utilizó un resistor embebido en el aluminio para poder controlar el flujo de corriente utilizado en el tubo.

La temperatura de control se mantuvo a 1°C menor a la de prueba como especificado en IEEE estándar No. 1043.

Se utilizó equipo que permite factores de disipación de hasta 10kV. Una vez alcanzado la temperatura deseada, se esperó 16 minutos para que la temperatura fuera homogénea en el aislante y se hizo la prueba con 2kV.

Se representa el factor de disipación como una función de temperatura para todas las 15 muestras, representadas por una distribución normal. La primera tabla muestra el promedio, la desviación estándar y los porcentuales 0.05 y 0.95 de la prueba de los factores de disipación para los 2kV, antes de realizar los ciclos de estrés termo-eléctrico. En éste punto, la pérdida dieléctrica se relaciona directamente con la conductividad y polarización perdida del material, no con las descargas parciales

La figura 1 muestra el comportamiento de las muestras condicionadas a la prueba del factor de disipación para la mezcla epóxica. La curva está extrapolada para el eje - X para encontrar la temperatura en la cual el material cambia de estado. Una variación en la temperatura de transición se observa en el rango entre 70 y 90°C. (Reyno, et al. 2014)

La tabla y figura 1 muestran los resultado correspondientes a las pruebas de 2kV.

En la tabla y figura 2, se muestran las pruebas del ciclo de estrés termo-eléctrico. Evidentemente, gracias a las altas resistividades del dieléctrico otorgadas por el fenol al mezclarse con la mica-epoxi, las 15 muestras soportaron el estrés de 90°C por 600 horas, e igualmente, soportaron los 12kV y 15kV por 300 horas para cada voltaje.

Es notable que existe un fenómeno donde su temperatura de transición está entre los 80°C y 100°C.

Esto se debe a que para cada cambio de voltaje, se dejó enfriar por 1 hora, lo que causa que se establezca la temperatura, por lo que no es un cambio gradual perfecto. Sin embargo, este imperfecto era necesario para mostrar el cambio independiente que causaba cada cambio de voltaje.

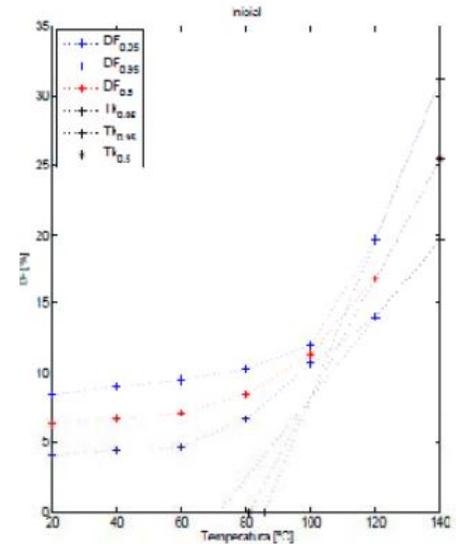


Fig 1. Initial estimate of glass transition temperature of all samples

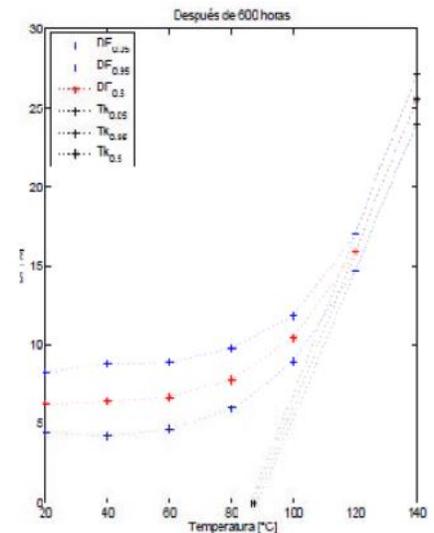


Fig 2. Estimation of glass transition temperature of all samples after being subjected to a thermal and electrical aging for 600 hours

Percentiles	Dielectric losses [%]						
	20[°C]	40[°C]	60[°C]	80[°C]	100[°C]	120[°C]	140[°C]
5	4,05	4,38	4,64	6,65	10,66	13,95	19,7
50	6,25	6,7	7,1	8,47	11,32	16,82	25,45
95	8,46	9,02	9,49	10,29	11,98	19,7	31,2
S	1,34	1,41	1,48	1,11	0,4	1,75	3,5

Table 1. Initial Normal distribution of all samples subjected to the dissipation factor test

Percentiles	Dielectric losses [%]						
	20[°C]	40[°C]	60[°C]	80[°C]	100[°C]	120[°C]	140[°C]
5	4,45	4,21	4,61	5,95	9,05	14,74	24,06
50	6,38	6,56	6,8	7,89	10,45	15,9	25,6
95	8,32	8,91	8,98	9,83	11,84	17,06	27,14
S	1,18	1,43	1,33	1,18	0,85	0,7	0,94

Table 2. Normal distribution of all samples subjected to the dissipation factor test after being subjected to a thermal and electrical aging for 600 hours

Efectivamente, es notable que alrededor de los 70°C y los 90°C, se pierde la linealidad de la resina y empieza a haber un aumento exponencial en su pérdida de cualidad dieléctrica. Mostrando así, una aproximación de condición de energía interna en la que empieza a cambiar su estructura molecular.

Es importante notar que la estructura molecular del fenol mezclado con el epoxi otorga resistencia al calor mucho más altas que la mezcla del epoxi activado con ácidos, aceites u alcoholes; como mostrado en la investigación “Durabilidad de tratamiento a maderas con aceite-epoxi modificada y Alkoxcilina para pruebas de campo”, de Panov, et al, 2015. Aquí se mostró el rendimiento de la resina en maderas alrededor de varios meses, y aunque no mostraron la resistencia térmica, sí es notable que hay un decaimiento de la resina de menor tiempo con condiciones de muy poco estrés.

A continuación se muestran las gráficas de las 3 muestras que los investigadores eligieron. Las gráficas muestran el cambio en el porcentaje del factor de disipación a través del tiempo. Se muestra el rango de trabajo experimental, que es de 20°C hasta 140°. En este rango, es permisible la transición donde las muestras pierden su cualidad de dieléctrico.

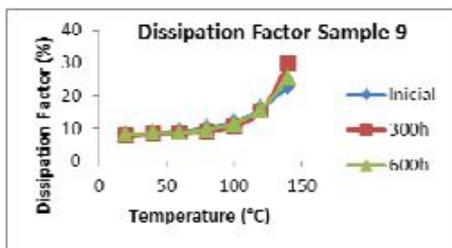


Fig 3. Graph of dissipation factor initial and after being aged for 300 hours and 600 hours of the sample 9

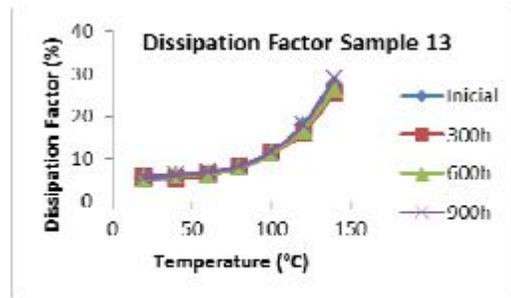


Fig 4. Graph of dissipation factor initial and after being aged for 300 hours, 600 hours and 900 hours of the sample 13

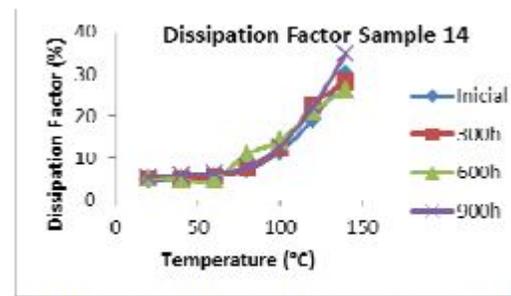


Fig 5. Graph of dissipation factor initial and after being aged for 300 hours, 600 hours and 900 hours of the sample 14

Dados estos datos, es posible proyectar en la ecuación 10, $\Delta U = mL_E\Delta T$ el factor de disipación con un voltaje más típico de trabajo.

A continuación se muestra una proyección del factor de disipación alrededor un tiempo mucho mayor, donde los investigadores usaron como base los datos experimentales de estas muestras. Las muestras 9, 13 y 14 trabajaron con un valor respectivo de 18, 15 y 12 kV. Por lo que es evidente su cambio de factor de disipación alrededor del tiempo.

Es notable que a menores voltajes de trabajo, el factor de disipación toma más tiempo para alcanzar un factor malo de disipación. En la gráfica mostrada por los investigadores, “ K_V ” es la cantidad representada por “ $m * L_E$ ” de la ecuación 10.

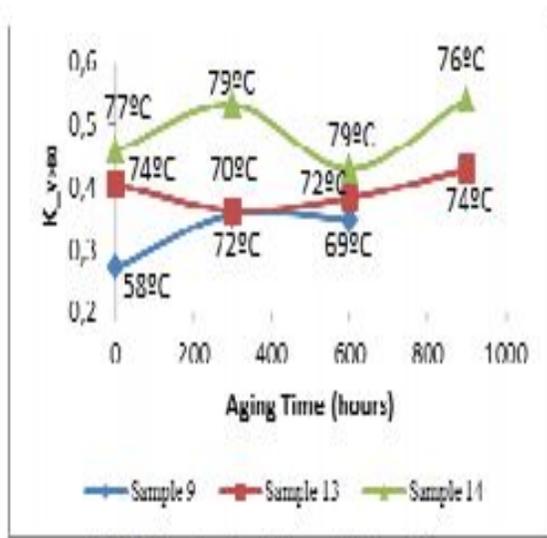


Fig 6. Graph of calorific coefficient $K_{V>80}$

Con esto, si se pone un límite del factor de disipación deseado en la práctica, podemos obtener tiempos efectivos de trabajo de la placa, antes de considerarla inservible.

6 Conclusiones

Para éste experimento realizado por Reyno, y otros en 2014. Se utilizaron cantidades termodinámicas para simplificar el complejo funcionamiento en circuitos de máquinas giratorias para trabajos mecánicos-eléctricos.

Su enfoque fue encontrar el punto aproximado de transición donde se empieza a perder rápidamente factor de disipación. Es evidente que existen temperaturas de transición donde se “descomponen” las propiedades resistivas de la mica-epoxi, aunque afortunadamente, éste sistema en el experimento, fue de una disipación natural de calor, al aire libre. En la práctica, para las placas de circuitos donde se trabaja con altos voltajes, es simple conectar un disipador de calor con un ventilador para disipar fácilmente la temperatura al exterior, así reduciendo la temperaturas alcanzadas y pudiendo alcanzar un mayor efectivo tiempo de trabajo.

Es insigne la duración de la pasta por su alcance de altas temperaturas y voltajes. Es notable que antes de que sea necesario remplazar la pasta con otra, se va a llegar a una situación donde se tengan que remplazar los componentes pasivos del circuito como resistores, capacitores e inductores. Por lo que se concluye que es más económico remplazar la placa con sus circuitos completamente. La durabilidad de la resina es suficientemente grande para superar casi todos los componentes del circuito mismo.

Adicionalmente, se puede mejorar la admitancia de los cables conductivos utilizados, para así reducir el factor de eficiencia del poder en el circuito. Como se comprobó en la ecuación 8, que relaciona el poder perdido con el voltaje aplicado de la fuente, es importante la resistencia de la carga de los pasivos adicionales como la resina epóxica (que mencionado en la primera página, se puede ver como un pequeño resistor en serie o en paralelo con un capacitor) y los cables mismos.

Para mejorar el rendimiento del factor de disipación de una placa, es posible encontrar una mezcla con un dieléctrico aún mayor que la mezcla de epoxi con fenol. Encontrando una mejor, disminuirá directamente la pérdida de voltaje y por ende, de poder, que causará temperaturas menores de trabajo. Hay que ser cuidadoso porque es posible que aunque tenga un mejor dieléctrico, su estructura molecular sea más débil que la del fenol, causando una deformación a menores temperaturas. Por lo que es importante que esa mezcla aislante también pueda tener una alta resistencia al calor y altas temperaturas por un largo tiempo. Sugiero un componente que sea similar a la espuma de poliuretano, que ofrece un gran aislamiento y una excelente resistencia al calor. Replicar éste experimento con ésta espuma u otro similar, podrá reflejar si su tiempo de trabajo con las mismas condiciones de voltaje, será mejor.

7 Referencias

1. H. J. Reyno; F. J. Amórtegui. (5-8 de diciembre de 2014). Thermodynamic study of compound Mica — Epoxy Resin based on dissipation factor tests — Internal energy. Power India International Conference (PIICON), 2014 6th IEEE, 6, 1-5. DOI:10.1109/POWERI.2014.7117628
2. Dimistri Panov; Nasko Terziev. (Marzo 2015). Durability of epoxi-oil modified and alkoxyxilane treated wood in field testing. BioResources, 10, 1-10. DOI:10.15376/biores.10.2.2479-2491
3. J. H. Lisperguer; P. H. Bécker. (2005). Análisis Térmico y Propiedades Adhesivas de Resinas Fenol-Resorcinol-Formaldehído. Información Tecnológica, 16, 27-31. DOI: 10.4067/S0718-07642005000600005
4. M. Farahani; H. Borsi; E. Gockenbach; M. Kaufhold. (19-22 de septiembre de 2004). Investigations on characteristic parameters to evaluate the condition of the insulation system for high voltage rotating machines. Conference Record of the 2004 IEE International Symposium on Electrical Insulation, 1, 1-4. DOI: 10.1109/ELINSL.2004.1380418
5. Christiane Sales Reis de Souza; José Maria Fernandes Marlet; Andreza de Moura Cardoso; Mirabel Cerqueira Rezende. (19 de enero de 2016). Study of the thermal behavior of carbon/epoxy laminates exposed to multiple thermal cycles. Polímeros, 26, 1-8. DOI: 10.4067/S0718-07642005000600005
6. Ing. Jesús Antonio Baez Moreno, (Marzo 2017). Power and Effective Power, Circuits II course, Lecturas presentadas en ITESM, Mty.
7. Dr. José Antonio Sánchez Fernández, (Enero-Abril 2017). Curso de Termodinámica. Lecturas presentadas en ITESM, Mty.
8. Equipo editorial de Miliarium Aureum, S.L.. (2008). PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y AISLANTES. 23 de abril de 2017, de Miliarium.com Sitio web: <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>