

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	1 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN		División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Observaciones	Rev.: 1.0

Informe Técnico

Período: Agosto 2013
Marzo 2014

Mantenimiento Preventivo: Reemplazo de la Resistencia de Realimentación de la CASCADA de la Fuente Spellman de 330kV de la Fuente de Iones

Observaciones Previas:

La *Fuente de Alimentación SPELLMAN* de 330kV de la Fuente de Iones es fundamental para la etapa de pre-aceleración de los Iones que luego serán acelerados a la entrada del Acelerador TANDAR. Esta permite inyectar correctamente los Iones generados en la Fuente de Iones, y que los mismos tengan la Energía suficiente para ser enfocados y guiados con la Óptica Electromagnética de la parte de Baja Energía.

La *Estabilidad* de la *Fuente SPELLMAN* es así de gran importancia para lograr haces de iones estables y bien controlados. Dicha estabilidad reposa sobre varios pilares, entre los cuales se pueden citar: el buen estado eléctrico/mecánico de la CASCADA, condiciones ambientales del recinto donde está ubicada controladas, y la resistencia de Realimentación que debe permanecer constante y estable (en lo que respecta a su valor resistivo) en cualquier estadio de operación.

Originalmente la *Resistencia de Realimentación* fue provista como parte de la *Fuente SPELLMAN*. Dicha resistencia cumplía con las condiciones de diseño originales, de buen uso y costumbre, como ser distancias seguras entre superficies metálicas a distinto potencial, recubrimiento aislante para disminuir las pérdidas por corrientes parásitas superficiales, guardas para disminuir el polvo circundante en el área de la resistencia, etc. La misma puede verse en la imagen que acompaña al presente texto para mayor claridad.

En la década de los 90, durante una operación, la *Resistencia de Realimentación* que originalmente estaba instalada en la fuente sufrió un desperfecto eléctrico. Producto de este desperfecto la fuente quedó fuera de servicio. Determinar la causa del problema fue complejo y el diagnóstico fue unánime: fallaban algunos de sus resistores constitutivos y no se podía proceder a la reparación dado que estos no eran accesibles en el mercado local y no se contaba con el equipo necesario para realizar las mediciones necesarias para encontrar con precisión qué parte de la totalidad del sistema estaba impedido de operar correctamente.

En esa oportunidad se convino que sería más práctico implementar una *Resistencia de Realimentación* recurriendo a elementos accesibles en corto plazo y de bajo costo en el mercado local. El trabajo fue exitoso dado que esa puesta a punto siguió funcionando hasta la actualidad, y tan solo demandó procedimientos de limpieza que mejoraran la aislación entre todas sus partes. En el presente informe también se puede observar una imagen de la *Resistencia de Realimentación* existente que data de esa fecha.



Luego de varios años de correcta operación, a pesar de algunos imprevistos que fueron sorteados, el personal Técnico del Acelerador TANDAR entiende que parte de la inestabilidad en el funcionamiento de la Fuente Spellman está asociado a fugas de corriente en algunas partes funcionales de la CASCADA y/o la *Resistencia de Realimentación*. Se realizaron procedimientos de limpieza y mejora eléctrica/mecánica de éstas, pero aún no se alcanzan los resultados esperados. Por tal motivo, y teniendo en cuenta que con el paso del tiempo los materiales expuestos a condiciones de trabajo exigentes (en este caso una diferencia de potencial superior a 300kV) modifican sus características originales (mecánicas, eléctricas, termoelectricas, termomecánicas, etc.) se decidió realizar un nuevo diseño de la *Resistencia de Realimentación* que aumentara su confiabilidad para enfocarnos sobre otros potenciales problemas de la *Fuente SPELLMAN*.

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Ángel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	2 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN		División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Planificación	Rev.: 1.0

Planificación para Resolver el Inconveniente presentado:

Antes de proceder a reemplazar la *Resistencia de Realimentación* que estaba vigente hasta el momento fue necesario estudiar de qué manera la *Fuente SPELLMAN* "toma una muestra" de la tensión de salida y la inyecta sobre la entrada para realizar la realimentación. Esto nos daría una idea del valor de *Resistencia Total* que debería tener el modelo que se procedería a diseñar. Conociendo dicha información, se estaría en condiciones para buscar las opciones que se hallan disponibles en el mercado y de esta forma se determinar la cantidad de Resistencias que formarían parte del *Resistor Total*.

Al tener determinado qué tipo de Resistencia se iba a adquirir para realizar el trabajo, y habiendo observado las dimensiones de espacio disponible para el emplazamiento del Sistema, se deberá proceder a diseñar el montaje de las resistencias para conformar el *Resistor Total de Realimentación*.

En el proceso de diseño se debería intentar modularizar (recurriendo al concepto de usar *Módulos Resistores*, como unidades indivisibles, conformados por un conglomerado de resistencias de igual valor dispuestas en serie) el emplazamiento de las resistencias para lograr un montaje semejante al original, intentando de esta forma que sea de fácil reparación en el futuro.

Los *Módulos Resistores*, se deberán luego ensayar en condiciones lo más próximas al caso más exigente de operación que pueda existir en la *CASCADA* (330kV máximo entre los extremos). Mediante ensayos progresivos se deberán mejorar los montajes, las geometrías y las materiales dieléctricos para alcanzar la aceptación durante los ensayos.

Con los *Módulos Resistivos* aprobados, se deberá montar la *Resistencia Total de Realimentación* y se deberá ensayar el conjunto en las condiciones más severas que se puedan alcanzar dentro del laboratorio. Al momento de ser aprobada se realizará el montaje mecánico dentro del recinto de la *CASCADA*; y para finalizar su instalación el paso siguiente sería realizar el apropiado montaje eléctrico.

Finalmente con la *Fuente SPELLMAN* constituida con la nueva *Resistencia de Realimentación*, se deberá proceder a probarla aumentando progresivamente la tensión de salida. En tanto que el sistema se mantenga estable *estática* y *dinámicamente* se definirá un período de prueba a máxima carga para aprobar definitivamente la modificación.

Finalmente se deberá realizar un *Procedimiento de Calibración y Ajuste*.

Pasos:

- 1- **Análisis del Circuito de Realimentación** de la *Fuente SPELLMAN* de 330kV.
- 2- Realizar los **Cálculos de la Resistencia de Realimentación** necesaria.
- 3- **Buscar en el mercado** qué resistencias de alta tensión se ajustan a los requerimientos del circuito.
- 4- Determinar la **Cantidad de Resistores que mejor ajustan** a los valores Calculados.
- 5- Determinar las **dimensiones máximas** que puede ocupar la *Resistencia de Realimentación* nueva.
- 6- **Diseñar los Módulos Resistores** con márgenes de seguridad para Alta Tensión
- 7- **Diseñar la Resistencia Total** con márgenes de seguridad que no supere los límites prefijados.
- 8- **Montar un Módulo Resistor.**
- 9- **Ensayarlo de un Módulo Resistor** en las condiciones de trabajo más exigentes que deberá soportar.
- 10- **Montar la Resistencia Total de Realimentación**, mecánica y eléctricamente.
- 11- **Ensayar la Resistencia Total de Realimentación**
- 12- **Montar la Resistencia Total de Realimentación en la CASCADA**
- 13- **Ensayos Preliminares y de Aceptación**
- 14- **Calibración Final**

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Ángel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar



CNEA

Gerencia: **GlyA**
Dpto: **Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.**

Categoría
Título

INFORME TÉCNICO
Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA

10/05/2014
3 de 22

Gerencia de Área: **GAlyANN**

División: **Asist. Técnica e Ing.**

Sección:

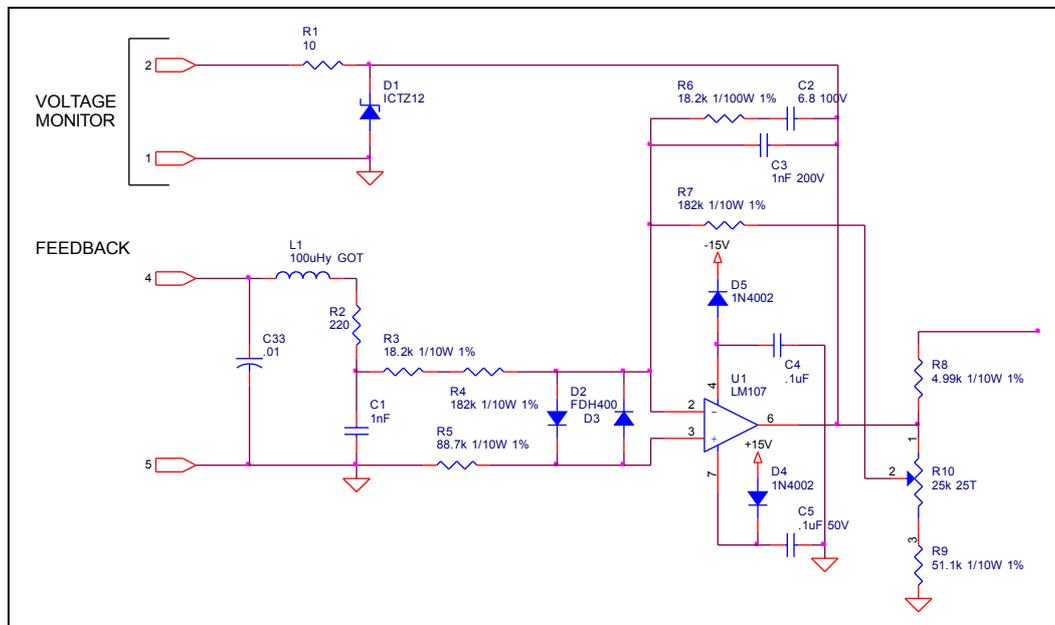
Procedimiento

Rev.: **1.0**

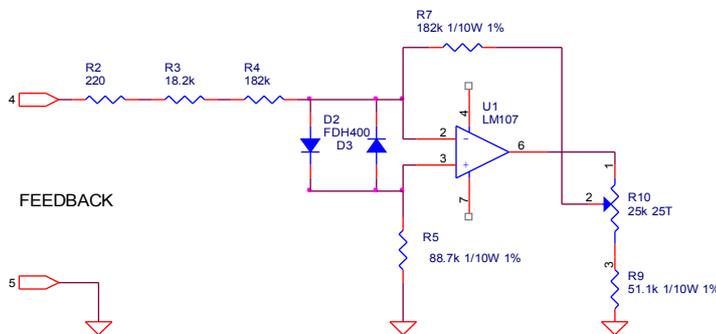
Procedimiento

1) Análisis de Circuito de Realimentación:

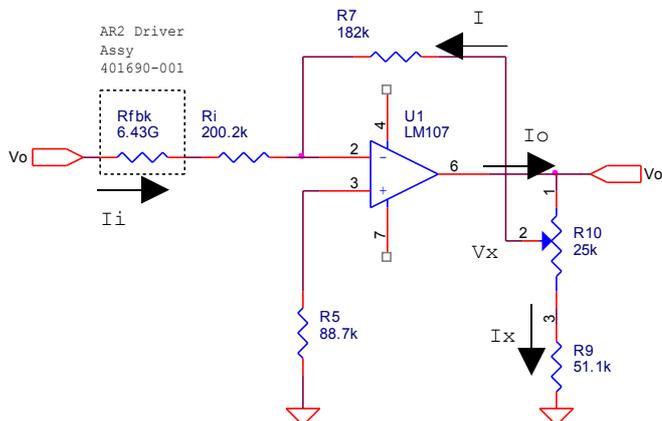
El siguiente es parte del Esquema Circuitual cuyo código es **501078-002 (SCHEMATIC DIAGRAM CONTROL ELECTRONICS KMJHKBNB330)**. El mismo es una representación del circuito de control de la Fuente SPELLMAN de 330kV, a la cuál se le pretende cambiar su *Resistencia de Realimentación*.



Si realizamos un estudio del circuito presentado en corriente continua, se lo podría simplificar de la siguiente manera:



Para Simplificar aún más el esquema circuitual, se unirán todos los valores resistivos que están en serie en una única resistencia. Con el propósito de avanzar en los cálculos del circuito de realimentación, se incluye en el esquema siguiente la *Resistencia de Realimentación*, cuyo reemplazo es el fin del presente proyecto.



$$R_i = R_2 + R_3 + R_4 = 200.2k\Omega$$

$$R'_i = R_{FBK} + R_i = 6.4302002G\Omega$$

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA - CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar



CNEA

Gerencia: **GlyA**
Dpto: **Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.**

Categoría
Título

INFORME TÉCNICO
Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA

10/05/2014
4 de 22

Gerencia de Área: **GAlyANN**

División: **Asist. Técnica e Ing.**

Sección:

Procedimiento

Rev.: **1.0**

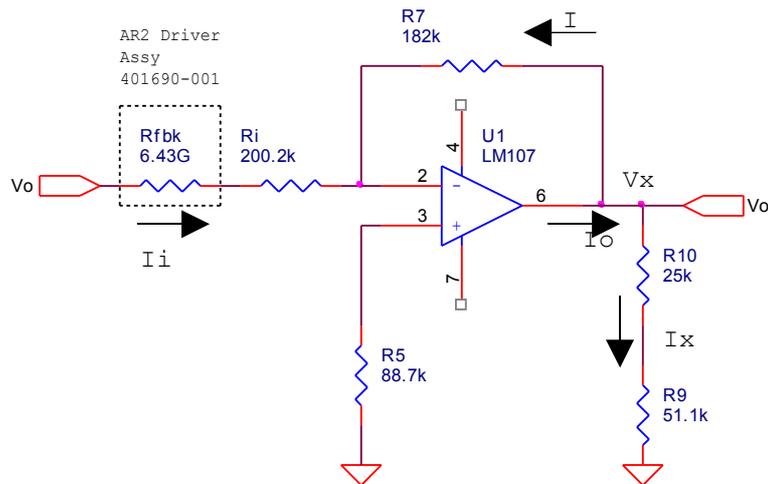
Para comenzar con los planteos más simples al analizar un circuito con Amplificadores Operacionales:

$$I_i = -I \Rightarrow \frac{V_o}{R'_i} = -\frac{V_x}{R_7}$$

Plantear el circuito con la R_{10} partida en dos (debido a que es un potenciómetro y se utiliza el punto medio) dificulta el análisis de la ecuación de la transferencia del circuito (es decir usar $R_{10}n + R_{10}(1-n)$ con $0 \leq n \leq 1$). Por tal motivo es conveniente hacer dos análisis extremos y si fuera necesario estudiar los casos intermedios.

Así es que el circuito, para cuando $n=0$ se presenta de la siguiente manera:

n = 0:



Se puede observar que en este caso el Amplificador Operacional dentro del arreglo circuitual en el que se encuentra conforma un simple *Amplificador de Tensión Inversor*, donde la ecuación que rige para el cálculo de V'_o en función de V_o es la siguiente:

$$\frac{V_o}{R'_i} = -\frac{V_x}{R_7}$$

En este caso $V'_o = V_x$ entonces: $V'_o = -V_o \frac{R_7}{R'_i} = -V_o \frac{R_7}{R_i + R_{FBK}}$

$$V'_o = -V_o \cdot 2.83 \cdot 10^{-5}$$

Este resultado implica que cuando la Salida de la Fuente Spellman de 330kV es MÁXIMA (es decir $V_o = -330kV$) entonces el Voltage Monitor (V'_o) será = 9.34V

Análisis del circuito para cuando $n = 1$. Es decir, para cuando el punto medio del potenciómetro esté totalmente corrido hacia el otro extremo.

n = 1:

$$I_o = I + I_x \qquad I = -I_i = -\frac{V_o}{R'_i} \qquad I_x = \frac{V_x}{R_9} = \frac{1}{R_9} \left(-\frac{V_o}{R'_i} R_7 \right)$$

$$I_o = -\frac{V_o}{R'_i} - V_o \frac{R_7}{R_9 R'_i} = -\frac{V_o}{R'_i} \left(1 + \frac{R_7}{R_9} \right)$$

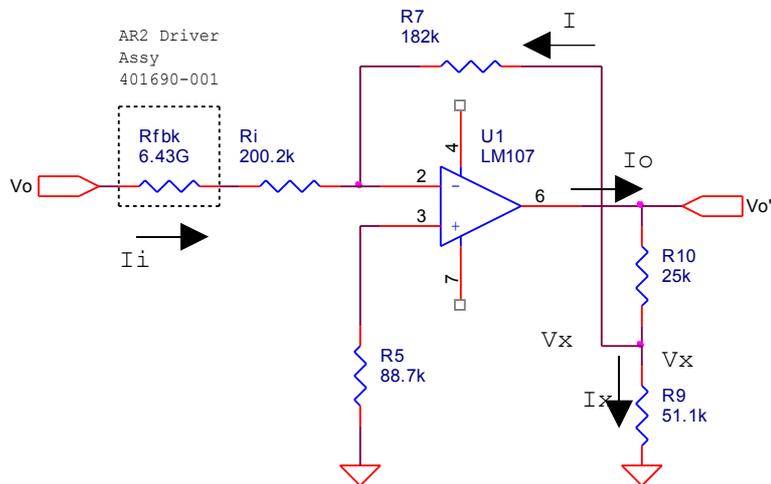
$$V'_o = I_o R_{10} + I_x R_9 \qquad V'_o = -\frac{V_o}{R'_i} \left(1 - \frac{R_7}{R_9} \right) \cdot R_{10} - V_o \frac{R_7}{R_9 R'_i} \cdot R_9$$

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA - CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	5 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN	División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento		Rev.: 1.0

$$V'_o = -\frac{V_o}{R'_i} \left(R_{10} + \frac{R_7}{R_9} R_{10} + R_7 \right) = -\frac{V_o}{R_i + R_{FBK}} \left(R_{10} + \frac{R_7}{R_9} R_{10} + R_7 \right)$$

$$V'_o = -V_o \frac{R_{10}}{R_i + R_{FBK}} \left(1 + R_7 \left(\frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}} \right) \right)$$



$$V'_o = -V_o \cdot 4,604 \cdot 10^{-5}$$

Este resultado implica que cuando la Salida de la Fuente Spellman de 330kV es máxima (es decir $V_o = -330kV$) entonces el Voltage Monitor (V'_o) será = **15.193V**

Al conocer cuál sería el rango de V'_o para los posibles valores del potenciómetro R_{10} , podemos afirmar que habrá un valor de dicho potenciómetro para el cual $V'_o = 10V$ cuando $V_o = -330kV$. Por consiguiente este potenciómetro calibra el rango dinámico que tendrá la salida **Vmonitor**.

Dado que este trabajo se centra en reemplazar la *Resistencia de Realimentación* de la CASCADA de la Fuente SPELLMAN, sería conveniente estudiar cuál es la tasa de variación que tendrá la relación de V'_o respecto de V_o para el presente circuito de realimentación si varía el valor de R_{FBK} :

Para $n = 0$:

$$V'_o = -V_o \frac{R_7}{R_i + R_{FBK}}$$

$$\frac{\partial V'_o}{\partial R_{FBK}} = -V_o \frac{R_7}{(R_i + R_{FBK})^2} \Rightarrow \Delta V'_o = -V_o \cdot \frac{4.401 \cdot 10^{-15}}{\Omega} \Delta R_{FBK}$$

$$\text{Si } \Delta R_{FBK} / R_{FBK} = 5\% \Rightarrow \Delta V'_o = 0,467V$$

Lo que indica que si la Resistencia de Realimentación varía su valor en un 5% entonces la Señal **Vmonitor** variará 0.467V (prácticamente también un 5% de **Vmonitor** máxima) cuando se tenga máxima tensión de salida.

Luego, para $n = 1$:

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA - CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	6 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN	División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0	

$$V'_o = -V_o \frac{R_{10}}{R_i + R_{FBK}} \left(1 + R_7 \left(\frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}} \right) \right)$$

$$\frac{\partial V'_o}{\partial R_{FBK}} = -V_o \frac{R_{10}}{(R_i + R_{FBK})^2} \left(1 + R_7 \left(\frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}} \right) \right)$$

$$\Delta V'_o = -V_o \frac{R_{10}}{(R_i + R_{FBK})^2} \left(1 + R_7 \left(\frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}} \right) \right) \Delta R_{FBK} = -V_o \cdot \frac{7,16 \cdot 10^{-15}}{\Omega} \Delta R_{FBK}$$

Si $\Delta R_{FBK} / R_{FBK} = 5\% \rightarrow \Delta V'_o = 0,759V$

El caso de $n=1$ es más sensible a las variaciones de R_{FBK} que para $n = 0$.

Las variaciones que se plantean para la R_{FBK} podrían ser producto de la variación en los procesos de fabricación de las mismas, pero en este caso se lo hace en cuanto a la variación que esta podría sufrir conforme se ensucie y/o que la superficies no conductoras que la conforma se degraden y aumenten su conductividad (dado que la tensión máxima a la que estará expuesta será de 330kV).

El cálculo anterior se realizó para dejar en claro la importancia de la estabilidad de la *Resistencia de Realimentación* que se está intentando reemplazar y la razón principal que nos motivó a iniciar este trabajo.

2) Cálculos de la *Resistencia de Realimentación*

Construir una *Resistencia Total* (R_{FBK}) que admita entre sus bornes una diferencia de potencial de por lo menos 330kV cuyo valor sea precisamente 6.43GΩ no es tarea sencilla. De todas formas hemos comprobado que la resistencia R_{10} nos da cierto margen para poder modificar R_{FBK} y aún mantener la relación $V'_o = 10V$ para $V_o = -330kV$. Para ello se investigará cuál es el rango permitido para la *Resistencia de Realimentación* en función del rango del potenciómetro R_{10} .

Para $n = 0$:

$$V'_o = -V_o \frac{R_7}{R_i + R_{FBK}}$$

$$R_{FBK} = \frac{-V_o}{V'_o} R_7 - R_i = 6.006G\Omega$$

Para $n = 1$:

$$V'_o = -V_o \frac{R_{10}}{R_i + R_{FBK}} \left(1 + R_7 \left(\frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}} \right) \right)$$

$$R_{FBK} = \frac{-V_o}{V'_o} R_{10} \left(1 + R_7 \left(\frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}} \right) \right) - R_i$$

$$R_{FBK} = 9.769G\Omega$$

Finalmente el rango admisible para R_{FBK} es el siguiente:

$$6.006G\Omega < R_{FBK} < 9.769G\Omega$$

3) Búsqueda en el Mercado de Resistores para Alta Tensión

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	7 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN	División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento		Rev.: 1.0

#	Modelo	Fabricante	Resistencia	ΔV_{MAX}	P_{MAX}	Observaciones
1	F44	TT electronics	400M Ω	14kV	1.3W	High Voltage Thick Film
2	HS52	Resistors Technology	200M Ω	15kV	3.0W	High Voltage Resistors, axial leaded
3	MOX-F	Ohmite Power MOX	200M Ω	20kV	25W	Precision Power Thick Film High Voltage/High Resistance Tubular
4	MOX 910	Ohmite Super MOX	200M Ω	15kV	3.8W	

4) Cantidad de Resistores que mejor ajustan

Para poder seleccionar adecuadamente el resistor más adecuado entre los 4 modelos posibles, es necesario considerar la corriente que circulará por la *Resistencia de Realimentación* de la CASCADA. Esta corriente se determina sencillamente asumiendo que este resistor conecta la salida de Alta Tensión de la CASCADA contra un potencial de tierra, donde para el caso de $R_{FBK} = 6.43G\Omega$: $I = 330kV / 6.43G\Omega = 51.32\mu A$.

F44:

$$n_r = \frac{R_{FBK}}{R_{F44}} \quad n_{rMAX} = \frac{R_{FBKMAX}}{R_{F44}} = \frac{9.769G\Omega}{400M\Omega} = 24.42 \rightarrow 24R_{F44} = 9.6G\Omega$$

$$I_{MAX} = \frac{330kV}{9.6G\Omega} = 34.375\mu A$$

$$\Delta V_{MAX} = \frac{330kV}{24} = 13.75kV$$

$$Pot_{MAX} = I_{MAX} \Delta V_{MAX} = 0.472W$$

$$n_{rmin} = \frac{R_{FBKmin}}{R_{F44}} = \frac{6.006G\Omega}{400M\Omega} = 15.01 \rightarrow 16R_{F44} = 6.4G\Omega$$

$$I_{MAX} = \frac{330kV}{6.4G\Omega} = 51.56\mu A$$

$$\Delta V_{MAX} = \frac{330kV}{16} = 20.62kV$$

$$Pot_{MAX} = I_{MAX} \Delta V_{MAX} = 1.063W$$

Este modelo de resistor, incluso cuando se usa la mayor cantidad de unidades en serie ($n_r = 24$), la ΔV para cada uno de los elementos está muy próximo al valor máximo admitido. Por esta razón es que **se descarta**.

HS52:

$$n_r = \frac{R_{FBK}}{R_{HS52}} \quad n_{rMAX} = \frac{R_{FBKMAX}}{R_{HS52}} = \frac{9.769G\Omega}{200M\Omega} = 48.845 \rightarrow 48R_{HS52} = 9.6G\Omega$$

$$I_{MAX} = \frac{330kV}{9.6G\Omega} = 34.375\mu A$$

$$\Delta V_{MAX} = \frac{330kV}{48} = 6.875kV$$

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	8 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN	División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0	

$$Pot_{MAX} = I_{MAX} \Delta V_{MAX} = 0.236W$$

$$n_{r\min} = \frac{R_{FBK\min}}{R_{HS52}} = \frac{6.006G\Omega}{200M\Omega} = 30.03 \rightarrow 31R_{HS52} = 6.2G\Omega$$

$$I_{MAX} = \frac{330kV}{6.2G\Omega} = 53.226\mu A$$

$$\Delta V_{MAX} = \frac{330kV}{31} = 10.645kV$$

$$Pot_{MAX} = I_{MAX} \Delta V_{MAX} = 0.566W$$

Este modelo de Resistor en cualquier caso está dentro de los márgenes respecto de sus especificaciones de P_{MAX} y ΔV_{MAX} .

Para los dos otros modelos (*MOX-F* y *MOX910*) dado que sus valores resistivos alcanzan también los $200M\Omega$, tiene la capacidad de disipar aún más cantidad de potencia y simultáneamente admiten mayor ΔV_{MAX} , naturalmente son resistores que también se podrían elegir e incluso pero estarían demasiado sobredimensionados.

Finalmente se ha optado por el modelo HS52.

5) Tamaño Máximo que puede ocupar la nueva Resistencia de Realimentación

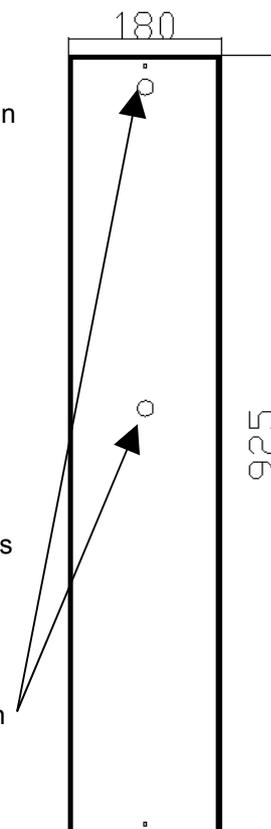
La Resistencia de Realimentación Original de la CASCADA se hallaba instalada dentro de un tubo de acrílico. De todas formas la Resistencia no era más que una Plancha de Acrílico sobre la cuál se encontraban en serie una cantidad de plaquetas en las que se estaban soldadas unas resistencias de $357M\Omega$. Todo el montaje estaba pensado para $330kV$ que como podrían existir entre los bornes extremos del conjunto. (Ver las imágenes indicadas para mejor entendimiento del tema)

El resistor que se instaló como reemplazo del original tubo las mismas dimensiones que la primera, solo que el montaje fue más simple en vistas de que no se utilizó ningún tubo que envolviera la plancha de acrílico.

Para este caso hemos resuelto investigar el espacio realmente disponible para la instalación de la nueva Resistencia de Realimentación. Así fue que hemos determinado que el espacio utilizable tiene el mismo largo que la pieza original, pero con el doble de ancho si fuera necesario. Es decir que se dispone de mayor libertad para lograr ubicar correctamente los resistores, respetando las distancias de seguridad mínimas para evitar rupturas dieléctricas.

Durante el diseño se hará el intento por reducir lo más que se pueda el espacio destinado a la Resistencia de Realimentación.

Un último detalle: Es fundamental respetar los puntos de amarre de la estructura al total de la CASCADA dado que los agujeros ya han sido practicados en la estructura para sostener a los modelos precedentes. (Las unidades en el dibujo están en mm)



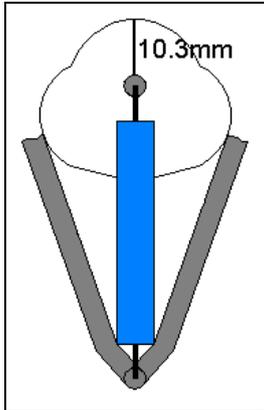
6) Diseño de los Módulos Resistores

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA - CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	9 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN	División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0	

A partir del momento en que se toma la decisión de usar los resistores modelo **HS52**, se asume que será necesario utilizar entre **31** y **48** unidades para alcanzar un valor total que se halle dentro de los márgenes indicados: $6.006G\Omega < R_{FBK} < 9.769G\Omega$.

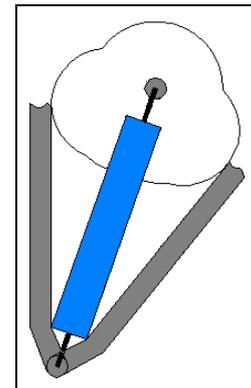
El primer paso es estudiar las distancias mínimas que nos aseguren que no habrá ruptura dieléctrica entre el potencial que tendrá cada parte de la resistencia en cuestión contra las superficies equipotenciales circundantes. Para hacer los cálculos se estimó que dependiendo de la cantidad de unidades que se usarán para alcanzar el valor final del Resistor de



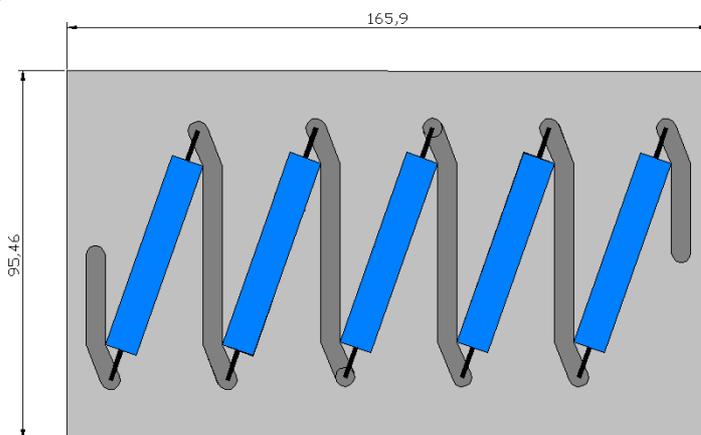
Realimentación, la diferencia de potencial entre los extremos de las resistencias se hallaría dentro de los márgenes: **6,875kV** (para 31 unidades) $< \Delta V < 10,675kV$ (para 48 unidades). Los datos que se hallan por tabla para el aire para condiciones normales de presión y temperatura indican que la *Rigidez Dieléctrica* del mismo es de **3kV/mm**. Sabemos que ese dato se da para ciertas geometrías de cátodo y ánodo que podrían no ser las que tendremos en nuestro montaje. Por tal motivo hemos decidido tomar un valor más conservador de **1kV/mm**. A pesar de este valor conservador, debido a experiencias previas de trabajos con alta tensión, el Equipo Técnico tomó la postura de otorgarle al cálculo un *margin* de un **30% sobre el valor** determinado.

Así mismo, sin saber aún la cantidad de resistores que se alcanzarían a instalar en la superficie que tenemos disponible, a modo de prevención se optó por tomar $\Delta V = 10,3kV$. A partir de esta definición se pueden tomar las separaciones mínimas que deberá tener cada unidad resistora respecto de cualquier otra superficie equipotencial.

En la imagen que acompaña al texto se puede apreciar los márgenes de seguridad utilizados. La resistencia tiene un largo de 52mm y un diámetro de 8mm. Se consideró apropiado tener un ancho de pista de 5mm, el mismo diámetro que también se usó para la isla de las soldaduras de los resistores.



A partir de este punto, se probaron distintas combinaciones para lograr el mejor rendimiento (en cuanto al área utilizada) de la asociación de las unidades resitoras conectadas en serie sin infringir las distancias de seguridad ya convenidas. La disposición más prometedora fue la que se logró haciendo coincidir las pistas con un eje imaginario vertical, quedando de este modo las resistencias instaladas con cierto ángulo (cuyo valor es irrelevante) que se determina al hacer girar el dibujo anteriormente mostrado en sentido horario, usando como eje la isla inferior.



Al tener definida la forma de emplazamiento de los resistores, se estudió cuántos de estos podrían colocarse adyacentemente en serie. Un detalle que se tubo en cuenta fue que por cada resistor que se instalaba en serie con el primero, se debía considerar otro $\Delta V = 10,5kV$ más de diferencia de potencial entre extremos. Esto implica que luego las distancias de seguridad para evitar *Ruptura Dieléctrica* se debían duplicar respecto del primer terminal.

Se llegó a la siguiente conclusión: instalar cinco resistencias en serie, definiendo de esta forma lo que se llamó un **Módulo Resistor**. Lo interesante de este *Módulo Resistor* es que respetando el esquema de montaje descrito, esencialmente alcanza a ocupar prácticamente el

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA - CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

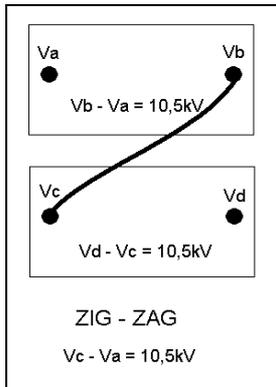
	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	10 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN		División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0

ancho máximo del área indicada como permitida para emplazar la *Resistencia de Realimentación Total*.

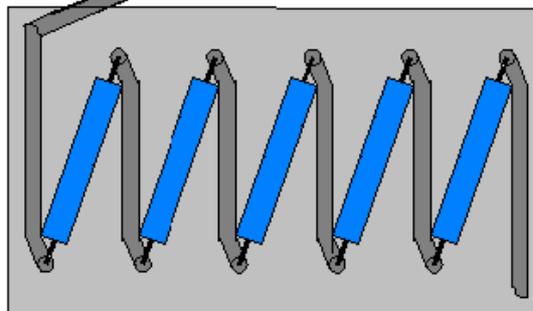
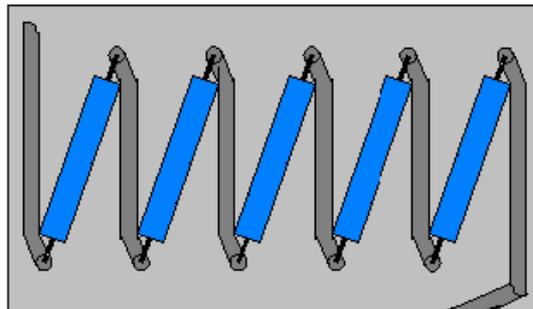
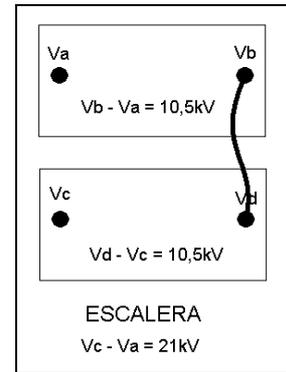
7) Diseño de la *Resistencia Total de Realimentación*

Se procedió a intentar lograr ubicar en el área permitida al menos la cantidad de módulos necesarios para alcanzar el mínimo de 31 resistores HS52. Esto implica que si por cada *Módulo Resistor* tengo cinco resistencias, deberíamos poder instalar al menos siete de estos en el área indicada, y eventualmente menos de diez.

Al *Módulo Resistor*, para lo que resta del diseño, se lo considerará como una única resistencia de valor $1G\Omega$, sobre la cuál existirá entre sus bornes extremos en el peor de los casos $330kV/6 = 55kV$. Esto nos obliga a estudiar los márgenes de seguridad en términos de distancia en el emplazamiento de estos Módulos de la misma manera en que fue hecho para cada resistencia como unidad dentro de estos.



Así como fuera considerado para el distribución e interconexión de los resistores en los *Módulos Resistores*, se recurrió nuevamente a un interconexionado del tipo *ZIG-ZAG* en lugar del tipo *ESCALERA*, dado que en este último, entre los extremos de dos módulos consecutivos se presenta el doble de diferencia de potencial que para el primer caso, obligándonos de esta manera a duplicar la distancia de seguridad entre Módulos adyacentes.



Nota: Las conexiones que se realizan para unir un *Módulo Resistor* con el siguiente se realizarán con cable aunque a modo de esquema se hayan indicado como pistas. A pesar del comentario precedente, es conveniente respetar el recorrido de las pistas indicado. Esto es

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA - CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	11 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN	División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0	

porque en el esquema, el conexionado intermodular pasa exactamente respetando las distancias seguras para evitar Ruptura Dieléctrica.

Con el interconexionado de los *Módulos Resistores* definido, se puede estimar qué cantidad de estos Módulos pueden ser instalados a lo largo del área permitida (925mm máximo). Se observa que la cantidad es **6 Módulos**. Esta cantidad no es la mínima requerida, sin embargo a pesar de que este valor no es el mínimo estimado, repasando los cálculos se puede observar que:

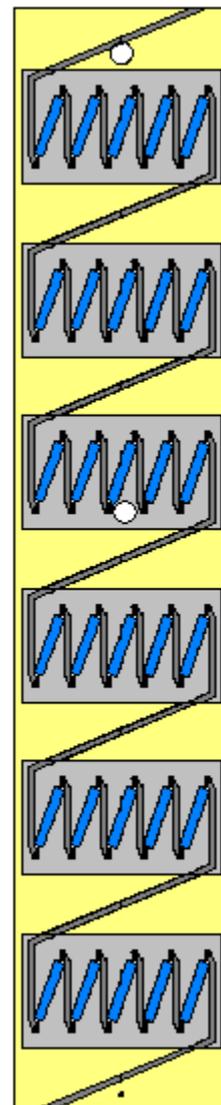
$$n_{r \min} = \frac{R_{FBK \min}}{R_{HS52}} = \frac{6.006G\Omega}{200M\Omega} = 30.03 \rightarrow 31R_{HS52} = 6.2G\Omega$$

Luego se cae en la cuenta de que en realidad con **30** Resistores HS52 el valor de $R_{FBK} = 6G\Omega$. Si bien no es lo esperado, no es un valor que no se pueda aceptar. Más adelante se *intentará modificar los valores del circuito de realimentación tal que admita esta nueva Resistencia de Realimentación*. Sin embargo, se debe tener presente que el problema podría ser un tanto más importante si se tuviera el inconveniente de que todas las resistencias elegidas para conformar la *Resistencia Total de Realimentación* tuvieran un valor inferior al nominal según la tolerancia de las mismas (5%), en cuyo caso de $6G\Omega$ pasaríamos a tener $5.7G\Omega$.

8) Montaje de un Módulo Resistor

Con el diseño terminado, se procedió a armar un *Módulo Resistor* con las dimensiones y el trazado de las pistas indicado. Como sustrato para contener las cinco resistencias HS52 se eligió **FR4** (placa virgen comercial). Las mismas debieron ser llevadas a medida dado que comercialmente es posible adquirir placas de fibra de vidrio de $20 \times 10 \text{cm}^2$.

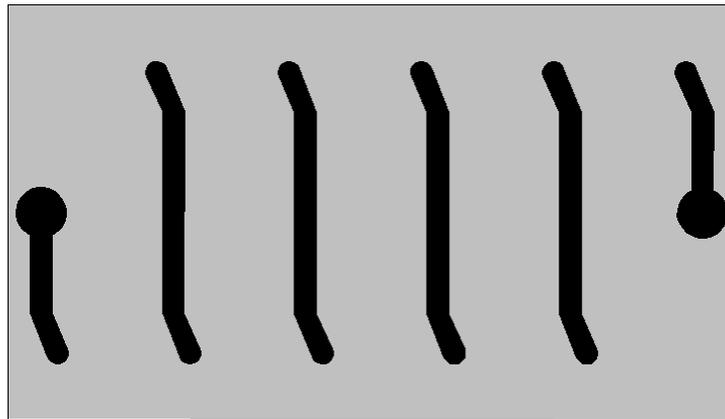
Para transferir el diseño de las pistas e islas al cobre de la placa se optó por el método de transferencia por calor. Se imprimió con sobrecarga de toner (de impresora láser comercial) sobre una hoja de papel satinado el dibujo deseado. Luego aplicando calor con una superficie bien plana y de temperatura pareja (se utilizó una plancha comercial de ropa) durante 1,5min aproximadamente hasta notar que la transferencia fue efectiva observando que el toner quedó fijado a la superficie del cobre. Era importante no sobrecalentar al Cu del FR4 dado que este podría sufrir demasiada fatiga y despegarse del sustrato.



NOTA: Se ensayaron otros procedimientos de transferencia para lograr tener el dibujo deseado en el cobre de la placa de fibra de vidrio. Entre ellos se pueden nombrar: *Transferencia por luz ultravioleta sobre una película fotosensible, con posterior revelado. Este método es significativamente más costoso que el elegido por el Equipo Técnico, y la mejora en la definición de las pistas no justificaba el aumento del costo. Otro método ensayado fue el de serigrafía. Este método presentaba un deterioro notable en la definición de los bordes. Es necesario hacer notar que la máscara usada no era de buena calidad, lo cual conllevó a la merma de la definición buscada. El hecho de que hubiera imperfecciones en la definición de los bordes de las pistas y/o islas, dado que trabajaremos con muy alta tensión, es absolutamente prohibitivo. En los bordes con mala definición existen una gran cantidad de puntas micrométricas o milimétricas. En estas puntas se produce un importantísimo efecto punta que consecuentemente disminuiría el valor resistivo del Módulo Resistivo. (Hablares más adelante sobre este mismo efecto en otras partes del diseño)*

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA - CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	12 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN		División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0



Al tener transferido finalmente el diseño de las pistas y de las islas sobre el cobre de la placa de FR4, el método que se usó para eliminar el Cu sobrante fue sumergir la placa en *Cloruro Férrico* ($FeCl_3$). Este método es bien conocido para lograr realizar placas en volúmenes pequeños y de bajo costo.

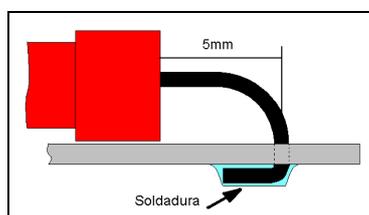
Esta solución no es toxica, ni demanda recaudos relevantes para su uso, pero resulta conveniente evitar el contacto con la piel.



Al quedar sólo el Cu que estaba cubierto por el toner transferido por calor, se limpia exhaustivamente la placa con agua para retirar los restos que pudieran quedar de Cloruro Férrico. Luego, dado que la cobertura de toner no permite realizar las soldaduras necesarias para la instalación de las resistencias, se procedió a remover los restos de este producto también de modo de tener la superficie del Cu totalmente desnuda y limpia.

Mecanizado de la placa: el mismo consiste en practicarle a la misma los agujeros indicados para que se puedan enhebrar las patas de los cinco resistores que en la misma serán instalados. Además de estos diez agujeros, deberán practicarse otros dos, los cuales serán utilizados para el amarre mecánico de la placa de FR4 con la plancha de acrílico sobre la que se montará los seis *Módulos Resistores*. Al mismo tiempo, estos puntos de amarre con la plancha de acrílico serán los puntos para realizar la interconexión entre los distintos *Módulos* dispuestos en serie.

Los pasos de mecanizado indicados anteriormente fueron llevados a cabo con sencillez haciendo uso de una agujeradora de banco común. Un detalle que debe ser mencionado es que se intentó mejorar el perfil de las pistas, a pesar de que el acabado luego del proceso de remoción del Cu sobrante fue bueno, siempre con el objetivo de disminuir, en cuanto estuviera a nuestro alcance, el efecto punta.



El siguiente paso fue montar los resistores en la placa de FR4. Como primera medida se procedió de igual forma que para el montaje estándar de cualquier componente para *true hole*. Desde el comienzo del diseño se había previsto que al cabo de 5mm de largo las patas de los resistores describieran un giro de 90° de modo que pudieran atravesar la placa y ser soldadas del lado del Cu. Este criterio de diseño estuvo basado en dos razones: No cargar la pata del Resistor mecánicamente con radios de giro muy cerrados, y simultáneamente disminuir lo más posible el efecto punta que pudiera estar asociado a un ángulo cerrado en el giro de la pata.

9) Ensayo del *Módulo Resistor*

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	13 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN		División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0

Se implementó un banco de pruebas específico dado que los módulos desarrollados debían soportar una tensión entre extremos de al menos 55kV. Debíamos ser capaces de poder imprimirle a estos una tensión igual o levemente superior a esta. Por otro lado, la fuente de alta tensión que fuera capaz de proveer este nivel de tensión, debería ser capaz de hacerlo

sobre con una corriente $I = \frac{330kV}{30 \times 200M\Omega} = 55\mu A$ para la Resistencia Total de Realimentación,

pero que se traduce para un módulo como: $I = \frac{55kV}{5 \times 200M\Omega} = 55\mu A$

Entre las Fuentes de Alta Tensión con que cuenta el Laboratorio de Electrónica, la que mejor se ajustaba a las necesidades del ensayo era la Fuente **GLASSMAN PS/MK60PO1.2**. Esta fuente alcanza los 60kV y es capaz de entregar sobre esa tensión una corriente máxima de 1.2mA, que es más que suficiente para nuestro caso.

Se decidió usar a la propia fuente como *Medidor de Corriente y Tensión de Salida* (aplicadas directamente sobre el *Módulo Resistor* como carga), dado que nos provee de dos lecturas analógicas que van de 0 a 10V proporcionales a estos valores. De esta forma se determinaría el valor de la resistencia del *Módulo Resistor* de forma indirecta, realizando el cociente entre la tensión aplicada mediante la fuente dividido la corriente que esta entrega a la carga a dicha tensión.

Este método elegido tiene errores de medición importantes, más severos son teniendo en cuenta que se desconoce la calibración de las lecturas de Corriente y Tensión de Salida de la *Fuente Glassman*. A pesar de ello, y dado que el propósito del Proyecto no es tanto lograr una buena medición sino alcanzar un *Módulo Resistor* que sea capaz de soportar los valores de tensión calculados sin incurrir en *Ruptura Dieléctrica*, se pasó por alto este asunto. En resumen: El proyecto enfrenta problemas más difíciles de resolver que una medición con error del 5%.

Se procedió a realizar el SetUp de Medición correspondiente y apropiado dado que alcanzaríamos trabajaríamos con tensiones superiores a los 50kV. Es importante hacer notar que cualquier pérdida de corriente que no fuera la que circula por el *Módulo* ensayado, modificaría el *Valor de Resistencia Calculado* dado que como se dijo, el método para determinar su valor implica que la corriente medida de salida de la fuente circula únicamente por el *Módulo* bajo ensayo.

Esto no es menor, dado que al aumentar la tensión, es muy factible que se rompa el dieléctrico del aire, ocasionando efluvios, muchas veces invisibles en ambientes iluminados, que degeneran las lecturas. Por tales motivos, antes de validar algún ensayo se procuraron mediadas para minimizar los efluvios, principalmente en el sector de conexión de la salida de alta tensión de la fuente.

NOTA: *Antes de proceder con el ensayo, para evitar encontrar inconvenientes al aplicar Altas Tensiones (superiores a 5kV) sobre los Módulos Resistores, se usó un Medidor de Aislación (Meguer) KYORITSU 3125. De esta forma, aplicando 5kV con dicho instrumento (si bien 5kV no es más que el 10% de la Tensión que se aspira a aplicar efectivamente para aprobar el Módulo) era suficiente para detectar si el mismo tiene problemas de aislación elementales. El ensayo arrojó el siguiente Resultado: $R_{MÓDULO\ RESISTOR} = 1.001G\Omega$.*

Con el *Módulo Resistor* aprobado con el *Meguer*, se pasó a la prueba con la *Fuente Glassman* (El cable que se uso para la Alta Tensión fue el **RG58**). El procedimiento fue aumentar progresivamente la tensión aplicada, al tiempo que se tomaban los valores de tensión y corriente de salida de la fuente de alta tensión usada para el ensayo. En "tiempo real" se intentaba ir calculando el cociente V/I para verificar que, a la tensión de prueba, la relación indicada no cambiaba, es decir, que se mantenía en $1G\Omega$. Si debido a algún incremento en la tensión aplicada se percibía que la corriente aumentaba desproporcionadamente, entonces el procedimiento era bajar levemente la tensión hasta alcanzar una relación V/I tal que satisficiera lo esperado respecto del *Módulo*.

Lo observado fue que cada vez que la corriente aumentaba en desproporción, no era sencillo alcanzar los valores correctos nuevamente. Esto daba la pauta de que una vez que algún dieléctrico constitutivo del sistema (el sustrato FR4, el Aire, etc.) sufría *Ruptura Dieléctrica*, este no se reponía fácilmente, y el decremento de la tensión aplicada debía ser mayor que el incremento que condujera a la *Ruptura* indicada.

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	14 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN		División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0

Luego de recuperar la relación V/I esperada, se volvía a aumentar la tensión con incrementos más pequeños, intentando detectar el valor de tensión específica que provocaba la *Ruptura Dieléctrica* en el *Módulo Resistor*. Este procedimiento se repetía varias veces para detectar si la *Tensión de Ruptura Dieléctrica* se mantenía en un mismo valor para cada ensayo. Esto no ocurría así: las tensiones sufrían corrimientos (aumentos y decrementos) entre cada ensayo.

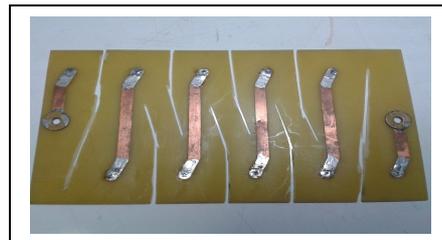
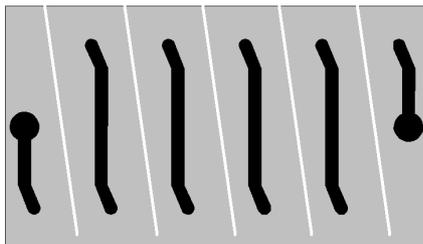
Cuando se alcanzaba la *Ruptura Dieléctrica*, en tanto que el valor de corriente que entregaba la *Fuente de Alimentación de Alta Tensión* no aumentara exponencialmente, ni se acercara a la máxima corriente que esta es capaz de entregar (1.2mA), entonces se mantenía al sistema en esta condición (aumento de corriente desproporcionado) esperando que tal vez de esta manera se lograr algún tipo de limpieza de los vértices por repulsión culombiana.

Luego de varios intentos sobre un mismo módulo se llegó a la conclusión de que para el diseño implementado, al superar los 35kV aproximadamente, la relación V/I disminuía hasta valores de 700M Ω . Este resultado era inadmisibles.

Se pusieron en marcha varias propuestas para mejorar el resultado que se esperaba para el *Módulo Resistor*. Se tomaron como guía las técnicas de montaje para alta tensión:

1- *Ranuras* en el Sustrato:

Dado que las separaciones de los materiales estaba sobredimensionada desde el propio diseño, se convino que el problema podía estar asociado a algún tipo de *conducción superficial* que se diera sobre el Sustrato (FR4). Por tal motivo se practicaron cortes al sustrato en las áreas existentes entre las resistencias, cuidado de no dañar las pistas.



El procedimiento no alcanzó los resultados esperados, y por otro lado este procedimiento fue destructivo, por lo que el *Módulo Resistor* al que se le aplicaron las ranuras fue desestimado y se debió montar un segundo *Módulo* par continuar con las tareas de mejora de la relación V/I .

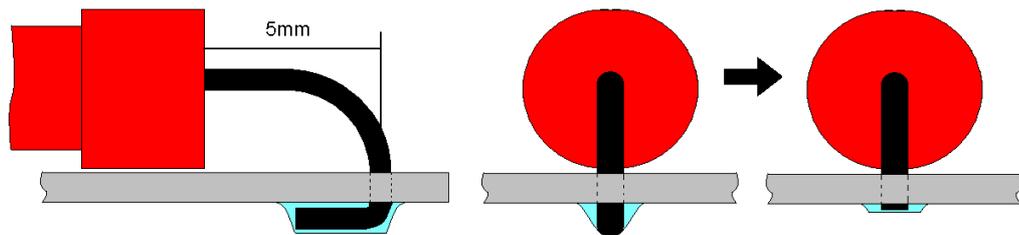
2- *Modificación de las Soldaduras* de las Resistencias:

Para disminuir las corrientes espurias que debían existir en algún lugar del sistema, se determinó que el procedimiento de soldadura que se había empleado no era del todo adecuado. Esto estaba asociado a la forma en que quedaba terminada la soldadura. Es decir, se había tomado la precaución de darle el doblé con mayor ángulo posible a la pata de la resistencia antes de atravesar la placa de FR4, pero no se habían tomado recaudos en la forma de la soldadura. Originalmente se había considerado prudente generar un dobles de la pata de la resistencia del lado del Cu y que la pata reposara sobre la pista de modo de minimizar las puntas que originaría un corte (de alicate) sobre la pata metálica; de todas formas cualquier imperfección sería "absorbida" por el estaño de la soldadura.

A pesar de esta primera aproximación, en función de los resultados y de no haber detectado exactamente dónde estaba alojada la fuente del problema, se propuso corregir las soldaduras y realizarlas de la forma tradicional pero con mecanizado posterior: Luego de practicar el corte de la pata del componente del lado del Cu, horizontal al plano del sustrato, se realizó la soldadura con la técnica habitual. Una vez soldada la pata del componente se realizó un pulido de la superficie de forma mecánica, intentando con ello disminuir lo más posible las puntas metálicas en las inmediaciones de la soldadura.

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	15 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN	División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0	



3- Recubrimiento con *Resina Dieléctrica* para Alta Tensión:

Otra técnica que se conoce en el Área de Alta Tensión es aislación de superficies, ya sean metálicas o dieléctricas, con un producto tipo *Resina*, que es muy buen aislante. Las resinas tienen la particularidad de que, a la temperatura adecuada, disminuye su viscosidad logrando que estas fluyan incluso en hendiduras pequeñas. (Estos procedimientos son muy comunes en transformadores de alta tensión, para mejorar la aislación entre espiras de los bobinados)



Las *Resinas* se proveen como dos productos que deben ser mezclados para alcanzar las características indicadas por manual (*Resina Líquida + Endurecedor*). Las proporciones de la mezcla deben ajustarse a las necesidades del usuario. El trabajo con resina demanda un proceso de Curado, que se realiza a temperatura constante y controlada. Idealmente se debería utilizar un *Autoclave*; de esta manera las burbujas de aire que pudieran existir o ser envueltas por la propia resina serían extraídas por el vacío durante el proceso.



La aplicación de la *Resina* tuvo algunos inconvenientes. El procedimiento y otros detalles están descriptos en el **ANEXO I: Aislación de placas módulo resistor por medio de resina epoxi de dos componentes.**

El principal problema que se suscitó fue que no se tuvieron en cuenta las tensiones mecánicas que aparecerían sobre la *Placa de FR4* durante el proceso de alta temperatura. Estas tensiones mecánicas doblaron a las placas, las cuales no pudieron volver a su forma original luego de ser enfriadas dado que la *Resina* ya estaba curada y había copiado la forma curva. Este asunto nos obligó a observar el corrimiento de los puntos de amarre mecánico sobre la plancha de acrílico. A pesar de lo comentado, los corrimientos fueron mínimos, razón por la que no fue necesario corregir el diseño.

Al momento de tomar la decisión de usar la *Resina Dieléctrica*, se debió reforzar y engrosar las soldaduras de conexión de los *Módulos Resistores* con el resto del circuito. La razón fue la siguiente: Al recubrir todo el *Módulo Resistor* con la *Resina* indicada, no quedaban puntos desnudos de acceso eléctrico al *Módulo*, incluso quedaban recubiertos los dos puntos extremos. Una forma de solucionarlo hubiera sido puliendo con la herramienta adecuada la zona de los terminales. Esto hubiera traído dos inconvenientes primordiales. El primero es que al alcanzar al Cu, muy probablemente con la herramienta de pulido dañaríamos el *Módulo Resistor*, quedando obsoleto y/o poco confiable (la capa de Cu en el FR4 es de algunas decenas de micrones). El otro tema es que la conexión eléctrica del *Módulo* quedaría "sumida en un pozo" rodeada de *Resina*. Luego a la hora de realizar la conexión, probablemente las superficies de los terminales no apoyarían adecuadamente con las superficies eléctricas de los *Módulos*, quedando una conexión mediocre y poco confiable. Esto traería posiblemente efluvios en el sector, que se traducirían en una merma del valor total resistivo del sistema; o al menos tendríamos un valor oscilante, lo cuál haría que la realimentación de la *Fuente SPELLMAN* fuera inestable, por ende lo sería también su salida.

Se puso en práctica la siguiente solución: Se soldó una *arandela* comercial de bronce (de 1mm de espesor), que es el mismo material que se había elegido para el armado de la plancha de acrílico. Estas arandelas se soldaron sobre los dos puntos de conexión del

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA - CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	16 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN	División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0	

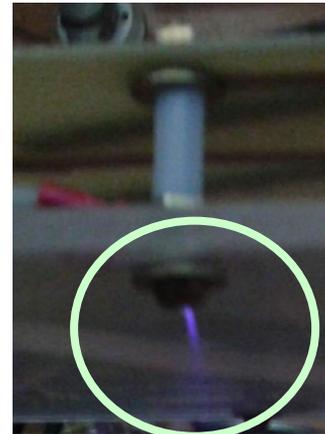
Módulo Resistor. Con este agregado puesto en práctica se contaba con una región donde a la hora de realizar el pulido (remoción de la *Resina Dieléctrica*), se lo podía practicar sin correr el riesgo de dañar al Cu de la placa. Por otro lado, habiendo realizado experiencias previas, se conocía que por el método de aplicación, el espesor de *Resina* que se conseguía no era superior al de la arandela. Con esto también se resolvía que la conexión eléctrica no quedaría en un pozo rodeada de *Resina*.



Como corolario del proceso de *Recubrimiento con Resina*, se logró mayor estabilidad en el comportamiento del *Módulo Resistor* en cuanto al cociente *V/I*. Sin embargo no se logró que el *Módulo* alcance un valor cercano a $1G\Omega$ con tensiones superiores a los 42kV.

Frente a estos hechos y con la certeza de que había efluvios notables dado que los mismos se oían con claridad al momento de acercarnos a los 40kV, se procedió de la siguiente forma: Se montó el banco de pruebas para los *Módulos* en un ambiente que se pudiera oscurecer por completo. De esta manera, al escuchar los efluvios, estos podían ser vistos en tanto hubiera oscuridad total.

Encontrar los efluvios era fundamental para entender de dónde provenían las pérdidas de corriente que empeoraban la relación *V/I*.



Se detectaron las siguientes las siguientes *fuentes de efluvi*o:

- Tornillería de Bronce de amarre mecánico
- Terminales pre-aislados
- Codos de las patas de las Resistencias al girar 90° y atravesar la plaqueta

Tornillería de Bronce:

Se procedió a reemplazar los tornillos metálicos de bronce por los propios de **nylon**. Este cambio resolvió por completo este problema, pero nos obligó a admitir un montaje mecánico más pobre que el que se había concebido originalmente. Esto se debe a que naturalmente los tornillos nuevos no soportan el mismo *torque* al momento del ajuste.



Terminales Pre-aislados:

Para el cableado que une los distintos *Módulos Resistores* se emplearon terminales pre-aislados (conectores metálicos con recubrimiento de plástico semirígido). Originalmente se pensó que estos no traerían inconvenientes puesto que son utilizados en diversas áreas. Sin embargo se detectó que estos terminales eran una gran fuente de efluvios eléctricos. Por tal razón, fueron reemplazados por terminales desnudos.



Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	17 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN		División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0



Los terminales desnudos, en lugar de ser utilizados de forma estándar (prensándolos con la herramienta adecuada), se decidió rellenar su interior completamente de estaño. De esta manera se buscaba eliminar cualquier terminación en punta. Luego se los recubría doblemente con termocontraíble.

Para evitar efecto punta se procuraron redondear los bordes extremos de los terminales desnudos.

Codos de las patas de las resistencias:

El problema con las patas de las resistencias fue que no se lograron recubrir adecuadamente con la *Resina Dieléctrica*. La razón fue que, a pesar de que se aplicaron varias capas de resina, debido a la fluidez de esta, no lograba acumularse correctamente sobre las patas de los resistores, quedando en la mayoría de los casos con partes metálicas descubiertas.



Entre las distintas posibilidades que se presentaron para solucionar este problema, la que finalmente se implementó y funcionó fue recubrir las patas con pegamento en barra marca *Suprabond*.



10) Montaje de la Resistencia Total de Realimentación

A partir del momento en que se logró un montaje y configuración de *Módulo Resistor* que tuviera el valor que se había previsto por diseño, y que ofreciera la confianza necesaria para ser parte del sistema *Resistencia Total de Realimentación*, se construyeron y montaron los otros cinco *Módulos* faltante. Todos ellos fueron ensayados rigurosamente antes de ser aprobados para el montaje.

Varios de los inconvenientes del montaje total fueron indicados en la sección anterior, dado que para ensayar los *Módulos Resistores* se debió recurrir a los métodos de cableado que luego se implementaron para el montaje total de la *Resistencia de Realimentación* dado que estos habían demostrado ser exitosos bajo las condiciones de trabajo ensayadas.

Cabe indicar sólo dos aspectos notables:

- 1- El cableado intermodular fue realizado respetando los trazados indicados en el diseño original. No se presentaron fallas.
- 2- Para mantener los *Módulos* fijos sobre la plancha de acrílico se usaría tornillería de nylon, sin embargo, en lugar de utilizar tuercas de geometría estándar (exagonal de caras planas), se resolvió que sería más adecuado usar tuercas de geometría esférica. Este aspecto fue muy discutido cuando se optó por ferretería del tipo metálica (bronce en nuestro caso), para cuando se migró al material nylon esta discusión comenzó a



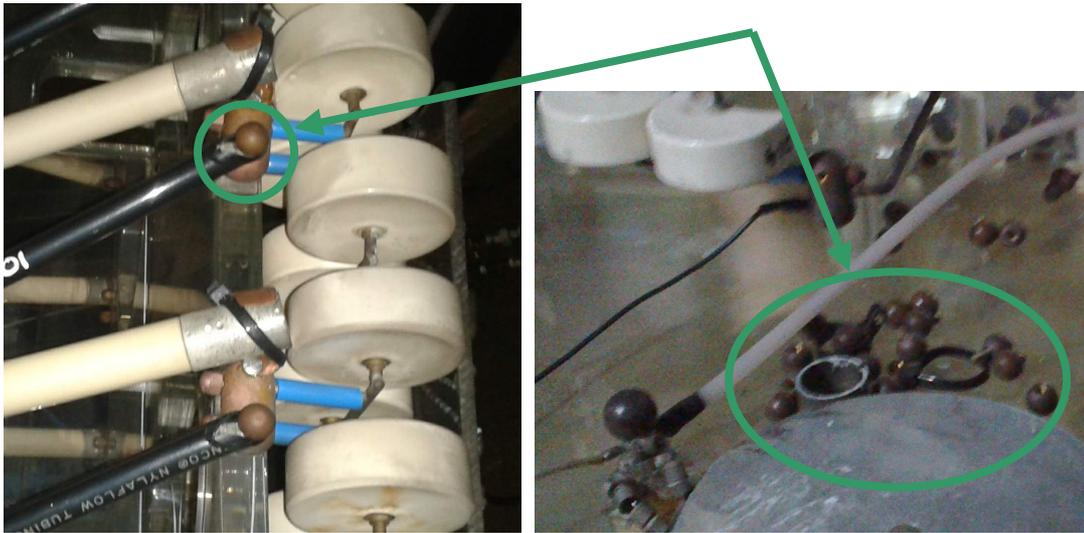
Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	18 de 22
Gerencia de Área: GAlYANN	División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0	

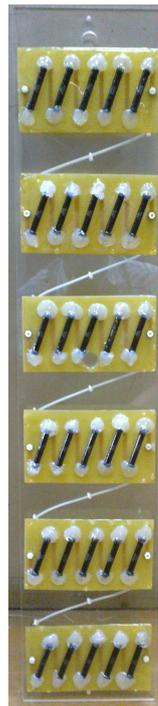
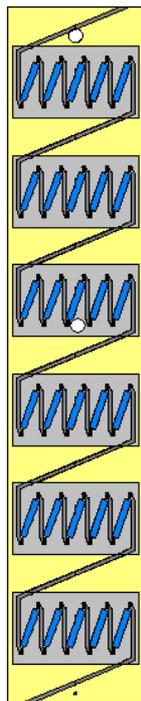
perder relevancia. Sin embargo se mantuvo esta indicación para el montaje con ferretería dieléctrica (nylon).



Esta decisión estaba fundada en que al momento de revisar el montaje de la CASCADA, donde sería finalmente emplazada la *Resistencia de Realimentación Total*, todos los montajes estaban terminados en este tipo de rosca; cuyo motivo es que esta geometría presenta una única punta de gran radio, reduciendo el efecto punta.



Resistencia Total de Realimentación FINAL:



Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	19 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN		División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0

11) Ensayo de la *Resistencia Total de Realimentación*

Se procedió a ensayar la *Resistencia Total de Realimentación*, frente a esta tarea nos encontramos con el siguiente impedimento: La resistencia estaría sometida a una diferencia de potencial entre bornes extremos de 330kV (para el caso más severo). En el laboratorio no se cuenta con ningún equipo ni sistema que sea capaz de proveernos de semejante voltaje. A pesar de ello, rememorando los procedimientos aplicados al comenzar con los ensayos de los *Módulos Resistores*, se recurrió al *Medidor de Aislación (Meguer)* que es capaz de aplicar 5kV (1.5% de 330kV). Al tener la *Resistencia Total* aprobada por el *Medidor de Aislación*, se procedió con la prueba más exigente que se podía alcanzar con los equipos existentes en el Laboratorio de Electrónica: se aplicaron 60kV (18% de 330kV) con la *Fuente Glassman* usada para ensayar los *Módulos*.

Finalmente: se determinó que la resistencia total alcanzaba un valor de **5.8GΩ** (96.5% del valor mínimo admitido). Este valor es menor que los 6GΩ esperados el cual ya se encontraba por debajo de los 6.006GΩ, que era el mínimo valor permitido para R_{FBK} . Sin embargo esta diferencia se puede solucionar corrigiendo algunos de los valores de las Resistencias que forman parte del lazo completo de *realimentación* que se halla dentro del equipo (Fuente Spellman de 330kV).

12) Montaje de la *Resistencia Total de Realimentación*

La *Resistencia de Realimentación Total* se montó exactamente en el lugar donde se hallaba el modelo anterior que había estado en funcionamiento. La única salvedad es que el nuevo modelo tiene el doble de ancho, situación que ya se conocía desde el comienzo y que fuera parte del marco de diseño.

Se utilizaron, como estaba previsto, los dos tornillos de nylon que sujetaban al acrílico del modelo anterior, y se fijaron las uniones eléctricas de los extremos de la *Resistencia Total de Realimentación* de la misma forma que se hacía anteriormente.



13) Ensayos Preliminares y Aceptación

La *Fuente SPELLMAN* de 330kV fue probada progresivamente desde un 30% de fondo de escala (100kV) hasta alcanzar valores superiores al 60% de fondo de escala (200kV) que es el rango de uso



habitual. En todos los casos la estabilidad de los valores alcanzados de tensión de salida era superior al 1%, que es la resolución del instrumento de lectura de la *Sala de Control* del Acelerador TANDAR. La rapidez de la Fuente para alcanzar los valores que se indicaban desde el Control de la misma era notablemente superior a la detectado con la configuración anterior (es decir la *versión anterior* de la *Resistencia de Realimentación*). Se dejó la fuente en funcionamiento continuo durante más de 48hs, en donde no se percibió cambio en el valor de tensión que se había fijado.

De todas formas, la prueba determinante para considerar al trabajo como exitoso fue pasar un haz conocido por los Operadores, tal que pudieran verificar que los valores leídos de tensión de la *Fuente SPELLMAN* coincidían con los rangos necesarios para tal tarea. Este proceso fue ejecutado para un haz de Oxígeno y otras variantes.

A pesar de haber pasado los ensayos de aceptación indicados, es conveniente estimar qué error podría haber de cálculo a la hora de leer la tensión que existe en los terminales de la *Fuente SPELLMAN* con la nueva *Resistencia de Realimentación*.

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Angel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	20 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN	División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Procedimiento	Rev.: 1.0	

$$R_{FBK} = 5.8G\Omega$$

n = 0:

$$V'_{o} = -V_{o} \frac{R_7}{R'_i} = -V_{o} \frac{R_7}{R_i + R_{FBK}} = -V_{o} \cdot 3,138 \cdot 10^{-5}$$

Recordar que con $R_{FBK} = 6.43G\Omega$: $V'_{o} = -V_{o} \cdot 2,83 \cdot 10^{-5}$

$$\frac{V'_{o} (R_{FBK} = 5.8G\Omega)}{V'_{o} (R_{FBK} = 6.43G\Omega)} = 1.109$$

n = 1:

$$V'_{o} = -V_{o} \frac{R_{10}}{R_i + R_{FBK}} \left(1 + R_7 \left(\frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}} \right) \right) = -V_{o} \cdot 5,104 \cdot 10^{-5}$$

Recordar que con $R_{FBK} = 6.43G\Omega$: $V'_{o} = -V_{o} \cdot 4,604 \cdot 10^{-5}$

$$\frac{V'_{o} (R_{FBK} = 5.8G\Omega)}{V'_{o} (R_{FBK} = 6.43G\Omega)} = 1.109$$

Con el cambio de *Resistencia de Realimentación*, se tendría en cualquier caso (desde n=0 hasta n=1) un error de lectura próximo al 11%, que se traduce en 36kV.

14) Calibración Final

Se propone modificar R_7 para bajar la ganancia de $3.138 \cdot 10^{-5}$ a $2.83 \cdot 10^{-5}$

$$R_7 = 2,83 \cdot 10^{-5} (R_i + R_{FBK}) = 164.146k\Omega \rightarrow 150k\Omega$$

Ahora para n=1, el valor de la ganancia es:

$$V'_{o} = -V_{o} \frac{R_{10}}{R_i + R_{FBK}} \left(1 + R_7 \left(\frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_{10}} \right) \right) = -V_{o} \cdot 4,282 \cdot 10^{-5}$$

Se verifica que con este cambio de valor de $R_7 = 150k\Omega$, se logra ajustar la realimentación de la Fuente SPELLMAN para admitir la nueva $R_{FBK} = 5.8G\Omega$

14) Calibración:

Como último paso para finalizar el *Cambio de Resistencia de Realimentación de la CASCADA*, se debe proceder a la Calibración de la misma. El Laboratorio de Electrónica cuenta con una *Punta de Alta Tensión* que admite un rango de trabajo hasta 30kV. Por tal motivo se realizará la calibración de la fuente hasta dicha tensión (9% de 330kV) y dado que el comportamiento de la fuente se acepta como lineal, por lo que se asumirá que está totalmente calibrada para todo el rango de salida. A tales fines se deberá ajustar el potenciómetro R_{10} hasta que $V_{monitor}$ al medir 30kV sea de 0.9V

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Ángel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	21 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN	División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	Personal		Rev.: 1.0

Personal Involucrado en las Tareas descriptas en el presente Informe Técnico:

- Omar Professi (Div: Ac. TANDAR – Dpto: Ac. TANDAR, Asistencia Técnica e Ing.)
- Juan Carlos Donaire (Div: Ac. TANDAR – Dpto: Ac. TANDAR, Asistencia Técnica e Ing.)
- Matías Acuña (Div: Ac. TANDAR – Dpto: Ac. TANDAR, Asistencia Técnica e Ing.)
- Gabriel Redelico (Div: Asist. Tec., Ing.– Dpto: Ac. TANDAR, Asistencia Técnica e Ing.)
- Gerardo Godoy (Div: Asist. Tec., Ing.– Dpto: Ac. TANDAR, Asistencia Técnica e Ing.)
- Julio Lafranchi (Div: Asist. Tec., Ing.– Dpto: Ac. TANDAR, Asistencia Técnica e Ing.)
- Gabriel Molinaro (Div: Asist. Tec., Ing.– Dpto: Ac. TANDAR, Asistencia Técnica e Ing.)

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Ángel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar

	CNEA	Gerencia: GlyA	Categoría	INFORME TÉCNICO	10/05/2014
		Dpto: Ac. TANDAR, Asist. Técnica e Ing.	Título	Reemplazo de Resist. de Realim. CASCADA	22 de 22
Gerencia de Área: GAlyANN		División: Asist. Técnica e Ing.	Sección:	ANEXO I	Rev.: 1.0

ANEXO I: Aislación de placas módulo resistor por medio de *Resina Epoxi* de dos componentes.

Se utilizaron los siguientes productos de la empresa **HUNTSMAN** provistos por la firma *Carmas Composites* (www.carmas.com.ar):

- **Araldite CY 236** (Resina Epoxi Líquida modificada basada en Bisfenol-A)
- **Endurecedor XB 5979** (un Líquido Endurecedor de base amina)

- Preparación de la Resina

A temperatura ambiente, se mezclaron una parte de Endurecedor (10ml) por cada tres de Araldite (30ml) hasta conseguir una solución homogénea. Esta cantidad es suficiente para ser aplicada en una de las caras de la placa (de superficie 9,5cm x 16,5cm). *Se recomienda utilizar material de laboratorio descartable y no de vidrio para la medición de la proporción y mezcla, como así también elementos de protección personal ya que debida a la naturaleza de la resina y su viscosidad (similar a la miel) puede ser irritante para la piel y su remoción es costosa una vez que comienza a curar.*

- Aplicación sobre el *Módulo Resistor*

Se vertió la solución directamente sobre la cara de la placa que se intentaba aislar, para luego mediante inclinaciones sucesivas y alternadas de esta lograr la mayor impregnación y homogenización posible sobre la superficie.

- Curado de la *Resina*

En horno a una temperatura entre 120°C y 130°C durante aproximadamente media hora (entre 30' y 45' dependiendo del estado de viscosidad y espesor de *Resina* deseada)

- Observaciones y recomendaciones

- 1) Limpiar con alcohol isopropílico la superficie a tratar
- 2) Dado que la *Resina* es un producto especificado para ser aplicado por el *método de goteo* en devanados de máquinas eléctricas, y se vuelve más fluida al calentarse durante el inicio del curado, es recomendable apoyar la placa por el centro para alejarla un poco de la base del lugar donde se procede al curado. De esta forma se evita que se adhiera a causa de los posibles goteos por los laterales y/o agujeros que se le hubieran practicado.

Autor/es	Lugar	Tel:	e-mail
Redelico, Gabriel Ángel	GlyA – CAC - CNEA	6772-7087	redelico@tandar.cnea.gov.ar