



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MERIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESTUDIO Y ACONDICIONAMIENTO DE LA FUENTE DE
ALIMENTACIÓN DEL TRANSFORMADOR DE 100 kV
DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN

www.bdigital.ula.ve

Br. Yohan Jose Arellano Cardenas

Mérida, Agosto 2019



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MÉRIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESTUDIO Y ACONDICIONAMIENTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DEL TRANSFORMADOR DE 100 kV DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Electricista

Br. Yohan José Arellano Cárdenas

Tutor(es): Francisco Vilorio

Maria Angelica Salazar

Mérida, Agosto 2019

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ESTUDIO Y ACONDICIONAMIENTO DE LA FUENTE
DE ALIMENTACIÓN DEL TRANSFORMADOR DE 100
kV DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN**

www.bdigital.ula.ve

Br. Yohan José Arellano Cárdenas

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente Jurado.

Prof. (Ing.)

Prof. (Ing.)

Prof. (Ing. MSc. Francisco Viloría.)

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios por haberme guiado en este camino a lograr las metas trazadas a través de su infinito amor y sabiduría, a mi madre Gisela, mi abuela Hilda, mi hermano Freddy y mi tío Eduardo por su amor y apoyo en todo momento, a mi esposa Genesis por su cariño y ayuda incondicional, a mis tutores Francisco Vilorio y María Angélica por sus consejos y motivación para la culminación de este proyecto y a todas aquellas personas que de alguna u otra forma contribuyeron en este trabajo.

www.bdigital.ula.ve

Yohan José Arellano Cárdenas. Estudio y acondicionamiento de la fuente de alimentación del transformador de 100 kV del laboratorio de alta tensión. Universidad de Los Andes. Tutor(es): Francisco Vilorio, María Angelica Salazar. Agosto 2019

RESUMEN

Los estándares de las industrias y la necesidad de estudios avanzados para conocer el comportamiento de los elementos cuando son sometidos a altas tensiones han dado origen a una evolución continua de las tecnologías que se emplean en estos tipos de pruebas. En el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad de Los Andes se cuenta con una de estas tecnologías específicamente un equipo de pruebas de alta tensión de 100 kV, el cual se encontraba en condiciones inoperativas diezmando a la universidad de poder impartir de manera eficiente la materia de Ingeniería de Alta Tensión, por esta razón el presente trabajo tiene como objetivo hacer un estudio de la fuente de alimentación para el transformador de alta tensión de 100 kV y ejecutar un acondicionamiento de la misma hasta llevarla a condiciones de funcionamiento usando los conocimientos proporcionados por la universidad. En los pasos iniciales se hizo una identificación de las fallas que se presentan y se plantearon y ejecutaron las soluciones adecuadas con los recursos disponibles. Luego, se realizaron las distintas curvas de calibración del aparato para realizar una estimación de la exactitud y precisión de las medidas y finalmente se hicieron pruebas en el laboratorio comprobando de esta forma que el equipo alcanzó las condiciones mínimas de funcionamiento requeridas para poder ejecutar las pruebas de alto voltaje.

Descriptor(es): Fuente de alimentación de alta tensión, equipo de pruebas de alta tensión, reparación de equipos

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	v
INTRODUCCIÓN.....	13

Capítulos	Pp
1. FUENTES DE ALTA TENSIÓN	15
1.1 El Problema	15
1.2 Justificación	16
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo general.....	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.4 Metodología.....	18
1.5 Alcance	20
1.6 Limitaciones	20
2. GENERALIDADES DE LAS FUENTES DE ALTA TENSIÓN.....	21
2.1 Antecedentes.....	21
2.2 Tipos de fuentes de alta tensión.....	21
2.2.1 Generación de altos voltajes de corriente continua.....	22
2.2.2 Generación de altos voltajes de corriente alterna:	30
2.2.3 Generación de altos voltajes de impulso.....	34
2.3 Utilización de las fuentes de alto voltaje.....	38
3. PRINCIPIO GENERAL DEL FUNCIONAMIENTO DE LA FUENTE DE 100 Kv.....	39
3.1 Descripción del equipo	39
3.2 Principios de funcionamiento de las tarjetas integradas en la consola de control.....	43
3.2.1 Tarjeta del circuito controlador del voltímetro	43
3.2.2 Tarjeta del circuito controlador del medidor de corriente	50
3.2.3 Circuito controlador de la tarjeta de disparo de sobretensión/sobrecorriente.....	57
3.3 Operación de la fuente para pruebas de alta tensión.....	63
3.3.1 Precauciones de seguridad	63
3.3.2 Conexiones.....	63
3.3.3 Prueba de alto voltaje.....	65
4. REPARACIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACION DEL TRANSFORMADOR DE 100 kV	67
4.1 Identificación de fallas.....	67
4.2 Solución a las fallas encontradas	68
4.2.1 Fallas en el interruptor del circuito de alto voltaje CB 102.....	68

4.2.2 Fallas en las tarjetas de la consola de control	72
4.2.3 Identificación y conexión de los conductores desconectados.....	91
4.2.4 Generación de alto voltaje a la salida	93
5. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	97
Conclusiones.....	112
Recomendaciones	114
Referencias	116
Anexos	118

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pp
Figura 2.1. Rectificador de media onda con suavizado de voltaje.	23
Figura 2.2. Rectificador bifásico o monofásico de onda completa.	24
Figura 2.3. Circuito doblador de voltaje simple o de Greinacher.	24
Figura 2.4. Circuito multiplicador de voltaje Cockroft-Walton.	25
Figura 2.5. Circuito en cascada con carga, definiciones de ΔV_0 y $2\delta V$	27
Figura 2.6. Circuito típico Cockroft-Walton.	28
Figura 2.7. Circuito rectificador en cascada.	28
Figura 2.8. Generador Van de Graaff.	30
Figura 2.9. Diagrama esquemático de un transformador típico de prueba de corriente alterna.	30
Figura 2.10. Transformador en Cascada Básico de 3 Etapas.	31
Figura 2.11. Circuito equivalente de transformador cargado de una sola etapa.	32
Figura 2.12. Circuitos resonantes en serie para transformadores.	33
Figura 2.13. Onda impulsiva estándar.	34
Figura 2.14. Ondas cortadas.	35
Figura 2.15. Circuitos generadores de impulsos.	36
Figura 2.16. Diagrama esquemático del arreglo del circuito de Marx para un generador de impulsos multietapa.	37
Figura 3.17. Parte Frontal Panel de Control.	39
Figura 3.18. Parte Trasera Panel de Control.	40
Figura 3.19. Panel De Conexiones del Conjunto de Alto Voltaje.	42
Figura 3.20. Conjunto de Alto Voltaje.	42
Figura 3.21. Diagrama de bloques de la tarjeta del voltímetro.	44
Figura 3.22. Diagrama eléctrico de los tres primeros bloques de entradas a la tarjeta.	45
Figura 3.23. Seguidor de tensión (Bloque 4) y Amplificador diferencial o sustractor (Bloque 5).	46
Figura 3.24. Circuito manejador de offset (Bloque 6) y Amplificador no inversor/integrador (Bloque 7).	47
Figura 3.25. Circuito seguidor y retenedor de pico positivo (Bloque 8).	50
Figura 3.26. Bobina del relé K1, de la tarjeta del voltímetro.	50
Figura 3.27. Diagrama de Bloques de la tarjeta del medidor de corriente.	51
Figura 3.28. Protección contra sobretensión (Bloque 1), Circuito divisor de tensión (Bloque 2), Protección contra sobretensión (Bloque 3).	52
Figura 3.29. Amplificador no inversor integrador (Bloque 4).	54
Figura 3.30. Conexión de la bobina del relé K2, al circuito de rango de medición digital.	54

Figura 3.31. Circuito de valor medio absoluto (Bloque 5).....	56
Figura 3.32. Bobina del relé K1 de la tarjeta del medidor de corriente.....	56
Figura 3.33. Circuito seguidor de tensión y puntos de salida de la tarjeta (Bloque 6).....	57
Figura 3.34. Diagrama de bloque de la tarjeta de disparo sobretension/sobrecorriente.....	58
Figura 3.35. Circuito rectificador de onda completa (Bloque 1).....	59
Figura 3.36. Circuito retenedor de disparo de corriente (Bloque 2).....	60
Figura 3.37. Protección contra sobretensión. (Bloque 3) y Circuito retenedor de disparo de voltaje (Bloque 4).....	60
Figura 3.38. Circuito de voltaje de comparación. (Bloque 5).....	61
Figura 3.39. Compuerta OR (Bloque 6) y Circuito manejador de los relés en los puntos de salidas de la tarjeta (Bloque 7).....	62
Figura 3.40. Conexión a tierra para pruebas normales.....	64
Figura 3.41. Conexión a tierra para mediciones por debajo de 3 mA.....	65
Figura 4.42. Vista Superior Interruptor Magnético de 3 polos.....	69
Figura 4.43. Polo del Interruptor con doble bobina o bobina Auxiliar.....	69
Figura 4.44. Polo del interruptor en posición de apagado con suiche auxiliar.....	69
Figura 4.45. Polo del interruptor de doble bobina desarmado.....	70
Figura 4.46. Polo del interruptor sin la carcasa con suiche auxiliar en su ubicación normal....	71
Figura 4.47. Polo del interruptor sin la carcasa con suiche auxiliar desacoplado.....	71
Figura 4.48. Circuito de Alimentación tarjeta del voltímetro.....	74
Figura 4.49. a) Salida rectificador media onda positiva b) Salida rectificador media onda negativa.....	74
Figura 4.50. Voltaje de salida en los puntos +28 V y -28 V del diagrama eléctrico.....	75
Figura 4.51. a) Voltaje de rizado en el punto +28 V b) Voltaje de rizado en el punto -28 V.....	75
Figura 4.52. Relé K1.....	76
Figura 4.53. a) Salida de voltaje en el punto +V(+15) b) Salida de voltaje en el punto -V(-15).....	76
Figura 4.54. a) Voltaje de rizado en el punto +V(+15) b) voltaje de rizado en el punto -V(-15).....	77
Figura 4.55. Circuito de alimentación tarjeta del medidor de corriente.....	77
Figura 4.56. a) salida de rectificador media onda positiva b) salida rectificador media onda negativa.....	78
Figura 4.57. Voltaje de salida en los puntos + 28 V y -28 V del diagrama eléctrico.....	78
Figura 4.58. Bobinas de los relés K1 Y K2.....	79
Figura 4.59. a) Voltaje de rizado en el punto +28 V b) Voltaje de rizado en el punto -28 V.....	80
Figura 4.60. Voltaje de salida en los puntos +15 V y -15 V del diagrama eléctrico.....	80
Figura 4.61. a) Voltaje de rizado en el punto +15 V b) Voltaje de rizado en el punto -15 V.....	81
Figura 4.62. Circuito de alimentación tarjeta de disparo de sobretensión y sobrecorriente.....	81
Figura 4.63. Voltaje de salida en los puntos +28 V y -28 V.....	82
Figura 4.64. a) Voltaje de rizado en el punto +28 V b) Voltaje de rizado en el punto -28 V.....	82
Figura 4.65. Voltajes en los puntos de salida +V(+15) y -V (-15).....	83
Figura 4.66. a) Voltaje de rizado en el punto +15 b) Voltaje de rizado en el punto -15.....	83
Figura 4.67. Voltaje en el punto +6,8 V.....	84
Figura 4.68. Voltaje de rizado en el punto +6,8.....	84
Figura 4.69. Última etapa del circuito controlador del voltímetro sin los amplificadores AR4 Y AR5.....	87

Figura 4.70. Última etapa del circuito controlador del voltímetro solo con la incidencia de AR4.	89
Figura 4.71. Última etapa del circuito controlador del voltímetro solo con la incidencia de AR5.....	89
Figura 4.72. Conductores sin conexión.	91
Figura 4.73. Esquema de conexión del interruptor CB 102 apagado y conexión de los conductores en sus contactos.....	92
Figura 4.74. Diagrama de elementos involucrados en la activación del alto voltaje a la salida.	94
Figura 4.75. Conexión realizada en la salida del sistema de bloqueo J 106.....	95
Figura 4.76. Conexión de los puntos en la salida del cable de instrumentación.	95

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE GRAFICOS

Grafico	Pp
Grafico 5.1. Curva de calibración para el rango de 10 kV.	100
Grafico 5.2. Curva de calibración para el rango de 20 kV..	102
Grafico 5.3. Curva de calibración para el rango de 50 kV..	103
Grafico 5.4. Curva de calibración para el rango de 100 kV.	104
Grafico 5.5. Curva de calibración para el rango de 1,5 mA.	107
Grafico 5.6. Curva de calibración para el rango de 15 mA.	108
Grafico 5.7. Curva de calibración para el rango de 75 mA.	109
Grafico 5.8. Curva de calibración para el rango de 150 mA.	110

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pp
Tabla 4.1. Valores <i>offset</i> amplificador tarjeta del voltímetro	86
Tabla 4.2. Mediciones en AR4, AR5 Y C14 con los bornes 6 y 7 abiertos	88
Tabla 4.3. Mediciones en AR4, AR5 Y C14 con los bornes 6 y 7 cerrados.	88
Tabla 5.4. Datos medidos para el rango de 10 kV.....	99
Tabla 5.5. Datos medidos para el rango de 20 kV.....	102
Tabla 5.6. Datos medidos para el rango de 50 kV.....	103
Tabla 5.7. Datos medidos para el rango de 100 kV.....	104
Tabla 5.8. Errores relativos promedios con respecto a los ideales de cada rango de la tarjeta del voltímetro.	106
Tabla 5.9. Datos medidos para el rango de 1,5 mA.....	106
Tabla 5.10. Datos medidos para el rango de 15 mA.....	107
Tabla 5.11. Datos medidos para el rango de 75 mA.....	108
Tabla 5.12. Datos medidos para el rango de 150 mA.....	109
Tabla 5.13. Errores relativos promedios con respecto a los ideales de cada rango de la tarjeta del medidor de corriente.....	111

www.bdigital.ula.ve

INTRODUCCIÓN

La tecnología en el mundo ha ido evolucionando proporcionalmente con las necesidades y deseos humanos, siendo la ingeniería eléctrica uno de los factores primordiales en esta evolución. La necesidad de la ampliación de los sistemas eléctricos, así como la transmisión de grandes cantidades de energía eléctrica desde lugares remotos fue uno de los primeros problemas que incentivaron la creación de equipos de pruebas de alta tensión, a través de estos se afirma la confiabilidad y el buen funcionamiento de los sistemas eléctricos.

En la Universidad de los Andes la fuente de alimentación del transformador de 100 kV del Laboratorio de Alta Tensión es de suma importancia para los alumnos que decidan cursar la materia electiva de Ingeniería de Alta Tensión, pues se busca, mediante su uso brindarle al estudiante la oportunidad de afianzar sus bases teóricas con una posterior verificación práctica comparativa permitiendo incrementar la capacidad de análisis de los estudiantes a través de esta experiencia práctica, que luego será de utilidad en el ejercicio profesional como ingeniero electricista, de igual manera el equipo puede beneficiar a todos aquellos profesionales o investigadores del gremio de la universidad que quieran desarrollar sus proyectos en esta área de la ingeniería. De acuerdo a lo expresado anteriormente se decide realizar el estudio y adecuación de la fuente de alimentación del transformador de 100 kV puesto que se encuentra averiada y esto no permite que se desarrollen actividades de estudio o investigación normalmente. En este sentido se desarrolla esta tesis de la siguiente manera:

Capítulo 1: Se realiza el planteamiento del problema, se definen el objetivo general y los objetivos específicos, la importancia por la que se realiza esta investigación, la metodología utilizada para el desarrollo de la misma, el alcance y las limitaciones que se tienen para el desarrollo de esta tesis.

Capítulo 2: Se definen conceptos teóricos empleados como base fundamental para el desarrollo de esta investigación y que le permiten al lector comprender el desarrollo del tema.

Capítulo 3: Se muestra la descripción, principios de funcionamiento y operación del equipo.

Capítulo 4: En este apartado se identifican las fallas encontradas, se explican cada una de las pruebas y procedimientos seguidos para dar solución a cada una de ellas.

Capítulo 5: Se muestran las tablas y análisis de las curvas de calibración que se realizaron para comprobar el correcto funcionamiento.

Finalmente se muestran las conclusiones y recomendaciones realizadas.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 1

FUENTES DE ALTA TENSIÓN

La tecnología en el mundo ha ido evolucionando proporcionalmente con las necesidades y deseos humanos, siendo la ingeniería eléctrica uno de los factores primordiales en esta evolución. La necesidad de la ampliación de los sistemas eléctricos, así como la transmisión de grandes cantidades de energía eléctrica desde lugares remotos fue uno de los primeros problemas que incentivaron la creación de equipos de pruebas de alta tensión, a través de estos se afirma la confiabilidad y el buen funcionamiento de los sistemas eléctricos.

1.1 EL PROBLEMA

En la Universidad de Los Andes, específicamente en la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, se dicta la materia electiva denominada Ingeniería de la Alta Tensión, la cual es de gran importancia, pues permite capacitar a los estudiantes de forma integral complementando los conocimientos necesarios para la carrera, además esta materia cuenta con un Laboratorio de Alta Tensión que permite llevar a la práctica los conocimientos teóricos impartidos. El inconveniente que se presenta es que algunos de los equipos del laboratorio se encuentran averiados imposibilitando así las prácticas en dicho laboratorio. La investigación realizada se orienta a ejecutar el diagnóstico de las fallas que presenta el set de pruebas de alta tensión de 50/100 kV serie 681100JA de la marca comercial Biddle propiedad de la compañía Megger, este set de pruebas está conformado por dos piezas, el conjunto alimentador de alto voltaje y la consola de control, conectados entre sí por dos cables de interconexión, dicho set es usado para las pruebas de resistencia o “*hi-pot*” en muestras.

Este equipo no se encuentra en estado operativo pues presenta fallas en distintos circuitos de sus sistemas eléctricos, tales como interruptores magnéticos y circuitos integrados, etc. Estos están ubicados específicamente en la consola de control, la cual contiene los instrumentos y controles requeridos para operar el equipo de pruebas, impidiendo de esta manera la realización de prueba alguna.

Algunas de las causas de este problema probablemente son los numerosos años que estuvo en servicio el equipo alcanzando así su vida útil, la falta de mantenimiento efectivo por parte de técnicos capacitados, el mal manejo del dispositivo, entre otros. Con la finalidad de poner en funcionamiento el equipo los técnicos encargados del laboratorio han intentado realizar varias reparaciones al *set* de pruebas, pero han sido infructuosas estas reparaciones, pues se han visto limitados tanto para la obtención y compra de algunos elementos eléctricos originales que forman parte del equipo debido a las condiciones económicas del país, así como también debido a la falta de un estudio avanzado para la detección de los circuitos dañados.

Ante esta situación, con miras de solventar los problemas operativos antes expuestos y con la necesidad de contar con este equipo en operación se tiene la obligación de estudiar el funcionamiento interno del equipo, y de esta manera proponer y realizar las acciones necesarias usando los medios a nuestra disposición, para llevar el equipo a un estado de funcionamiento operativo.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En el campo de la ingeniería eléctrica y las ciencias aplicadas a la investigación, los equipos de pruebas de alta tensión son requeridos para múltiples aplicaciones, por esta razón se hace indispensable contar con equipos especializados en el área, particularmente en el caso en estudio, la fuente de alimentación de 100 kV del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad de Los Andes ha presentado fallas que se acentuaron a través de los años dejándolo inoperativo, por lo cual las distintas causas de las mismas deben ser afrontadas y de esta manera aplicar las medidas necesarias para su solución.

El *set* de pruebas de 100 kV del Laboratorio de Alta Tensión es importante para la materia de Ingeniería de la Alta tensión, ya que este apoya el proceso de enseñanza de los estudiantes complementando los conocimientos teóricos adquiridos en la asignatura con un soporte experimental práctico que sustente eficazmente estos conocimientos, es bien sabido que la motivación de los estudiantes aumenta debido a las diferentes actividades prácticas, influyendo así en el gusto y agrado por la materia, además también permite desarrollar diferentes proyectos de investigación como se venían haciendo antes de que la fuente se dañara.

Debido a que en estos momentos es difícil acceder al servicio técnico especializado para este tipo de fuentes y comprar repuestos para su reparación, ya que la empresa proveedora del equipo no tiene servicios de mantenimiento disponibles en el país y no se cuenta con los recursos económicos necesarios para su reparación. En el presente trabajo se propone estudiar el principio de funcionamiento del *set* de pruebas, detectar los circuitos averiados, proponer remplazos y/o diseñar los módulos necesarios para sustituir los averiados, usando las herramientas puestas a disposición por parte de la universidad para restablecer el equipo llevándolo a unos valores mínimos de funcionamiento.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Restablecer el funcionamiento de la fuente de alimentación del transformador de 100 kV llevándola a valores mínimos de funcionamiento.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el estudio de la fuente, su principio de funcionamiento, topologías de circuitos y diagnóstico.
- Detectar circuitos averiados.
- Proponer remplazos y/o diseñar nuevos circuitos para reemplazar los circuitos averiados.
- Probar y calibrar la fuente.

1.4 METODOLOGÍA

El tipo de estudio llevado a cabo en el desarrollo de cualquier trabajo de investigación resulta prioritario pues permite definir el criterio o razonamiento que establecerá el camino a seguir para lograr la consecución de los objetivos planteados siempre y cuando este se relacione con el tipo de problema que se desea solucionar.

Siguiendo con este orden de ideas y conociendo los propósitos de la investigación se hace fundamental que el objeto de estudio sea enmarcado primeramente bajo la investigación de tipo descriptiva, ya que la misma está orientada a conocer el estado en que se encuentra actualmente el objeto en estudio, en nuestro caso la fuente de alimentación del transformador de 100 kV del Laboratorio de Alta Tensión, según la definición de [1] “La investigación descriptiva tiene como propósito describir los objetos tal como están funcionando u ocurriendo”.

Por tanto, en el asunto en particular, la palabra describir que indica de forma simple el estudio, viene a ser sinónimo de medir y diagnosticar, por lo que a través de este nivel de investigación se pretenden caracterizar las bases para el desarrollo de la investigación.

Así mismo, por las particularidades que presenta el actual trabajo y conociendo de manera directa los propósitos del estudio en cuestión, esta investigación también se sitúa bajo el tipo aplicada, debido a que está dirigida a la búsqueda de soluciones específicas para la reparación o adecuación de la fuente de alimentación antes mencionada. El tipo de investigación aplicada según el criterio de [2] se define como: “Tipo de investigación pragmática o utilitaria que aprovecha los conocimientos logrados por la investigación básica o teórica para el conocimiento y solución de problemas inmediatos”. Por su parte, [3] plantea que la investigación de tipo aplicada “se ocupa de la solución de problemas prácticos, dentro de la aplicación de la ciencia”.

Dada la aclaración de la definición del tipo de investigación aplicada expuesta a través de estos autores y observando de manera empírica el problema a resolver se deduce fácilmente que el interés de este estudio está centrado en las consecuencias prácticas del mismo, quedando contextualizado correctamente dentro de este tipo de investigación.

Por otra parte, si se toma en cuenta la fuente que origino gran parte de la información o el lugar donde se llevó a cabo la obtención de los datos, esta es de tipo mixta, es decir, es documental debido a que para entender el funcionamiento interno del equipo y los elementos que lo componen se hizo uso de libros referentes al tema y de su respectivo manual de usuario, el cual contiene los planos eléctricos del equipo, los componentes precisos que lo integran, así como sus procedimientos de manejo y operación, además a través del conocimiento exacto de los componentes identificados en el manual, se hizo más fácil ubicar las hojas de datos de cada uno de los elementos electrónicos involucrados para entender de manera individual el funcionamiento de cada uno.

De acuerdo a [4]. La investigación documental “es la que se realiza, como su nombre lo indica, apoyándose en fuentes de carácter documental, esto es, en documentos de cualquier especie”. [2] También expone que es un “Tipo de investigación que recoge información de fuentes documentales secundarias. Hace uso de libros, revistas de investigación, enciclopedias temáticas, documentos escritos, grabados o digitalizados, etc.”

Tomando en cuenta que en esta investigación es necesario tener control sobre las variables que interfieren en el sistema y de esta manera recrear ciertas condiciones de funcionamiento del equipo además conociendo su naturaleza se puede categorizar como una investigación de tipo experimental, a su vez si tenemos presente el ambiente en el que tiene lugar la misma también es de laboratorio pues esta fue realizada en un lugar externo a su lugar natural de operación que contiene las herramientas necesarias para los diferentes análisis llevados a cabo.

Según [4] la investigación experimental “Recibe este nombre la investigación que obtiene su información de la actividad intencional realizada por el investigador y que se encuentra dirigida a modificar la realidad con el propósito de crear el fenómeno mismo que se indaga, y así poder observarlo”. Asimismo [5]. Define la investigación experimental como “un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)”.

1.5 ALCANCE

Se lograra restablecer la fuente de alimentación del transformador de 100 kV a unos valores mínimos de funcionamiento, realizando la reparación parcial del equipo, es decir llevándola a un estado de funcionamiento operativo, en el tiempo estipulado por la Universidad de Los Andes y con los recursos puestos a disposición por la misma.

1.6 LIMITACIONES

- La falta de un registro de mantenimientos realizados al equipo para llevar un control de las reparaciones o fallas registradas.
- La imposibilidad de sustituir componentes averiados que no están en el almacén del laboratorio debido a que no se cuenta con recursos disponibles.
- La falta de los instrumentos adecuados para realizar mediciones, pruebas y calibrar el equipo de forma más precisa.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES DE LAS FUENTES DE ALTA TENSIÓN

2.1 ANTECEDENTES

Torres en su tesis de grado [6] propone el desarrollo de un protocolo de prueba para aisladores usados de 13,8 kV esto con la finalidad de decidir si estos pueden ser reutilizados, esta publicación dedica parte de su contenido a los principales ensayos empleados para lograr un diagnóstico acerca de los aisladores usados, ofreciendo también de esta manera información importante acerca del uso del equipo de alta tensión en estudio y las herramientas necesarias para analizar a través de métodos numéricos, gráficos y estadísticos los datos que se obtienen en los ensayos.

Saavedra [7] en su trabajo de grado titulado “Pruebas de voltaje en aisladores usados en redes de 13.8 kv bajo condiciones climáticas controladas” desarrolla distintas pruebas de voltaje con el propósito de estudiar las características aleatorias de los cambios atmosféricos e identificar patrones de referencia para diferenciar aisladores nuevos de aisladores usados. El aporte que realiza esta publicación a la presente investigación es proporcionar ciertas definiciones acerca del uso de la fuente de alta tensión de 100 kV en ensayos disruptivos a 60 Hz de igual manera ofrece información importante del objetivo con que se realizan estas pruebas y el alcance que pueden tener estas pruebas en los equipos de alta tensión.

Briceño, en su tesis [8] se enfoca en el desarrollo de un modelo para la fuente de impulso y resonante usadas en los laboratorios de alta tensión. La contribución hecha por esta publicación ha sido de gran ayuda para entender el funcionamiento del principio de operación de la fuente en forma general, a su vez explica los principios de generación de altas tensiones de impulso y resonantes así como también sus principales configuraciones circuitales.

2.2 TIPOS DE FUENTES DE ALTA TENSIÓN

2.2.1 GENERACIÓN DE ALTOS VOLTAJES DE CORRIENTE CONTINÚA

La forma más fácil de generar altos voltajes en corriente continua es partiendo de la corriente alterna y luego a través de circuitos rectificadores convertirla en continua. Los circuitos rectificadores que se tratan en este capítulo de forma simplificada son el rectificador de media onda, onda completa y los dobladores de voltaje. Además de estos también se mencionan el generador electrostático y sus principios fundamentales de generación.

1. CIRCUITO RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA Y ONDA COMPLETA

El funcionamiento de este circuito de media onda es simple pues el diodo es empleado para eliminar la parte negativa o positiva de la señal de corriente alterna, en el caso de la Figura 2.1 (a) elimina la parte negativa, obligando al capacitor a cargarse hasta el valor máximo de entrada de la señal $V_{\sim}(t)$ durante el periodo de conducción del diodo D, y se descarga a través de la resistencia R_L durante el periodo en el que deja de conducir esto ocurre cuando el voltaje del transformador es menor al voltaje del capacitor.

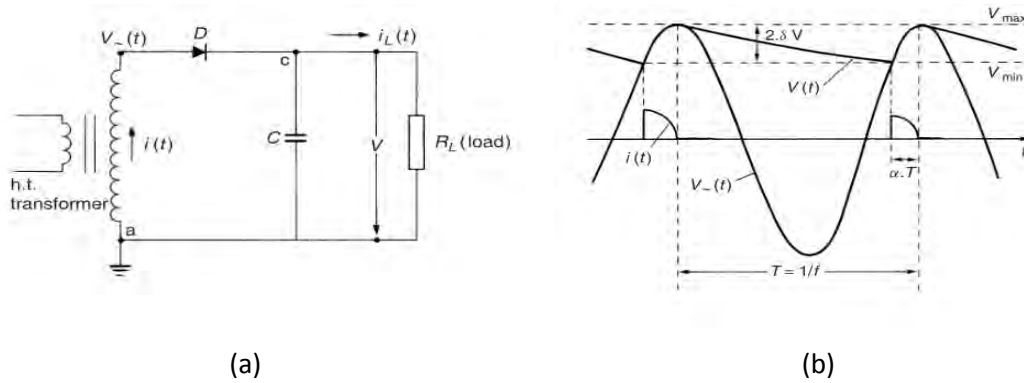


Figura 2.1. Rectificador de media onda con suavizado de voltaje. Fuente [9]

En la Figura 2.1 (b) se muestra la señal de entrada $V_{\sim}(t)$ y la señal resultante luego de la rectificación, esta señal es llamada comúnmente voltaje de rizado, el cálculo simplificado de la magnitud del rizado viene dado por la siguiente ecuación:

$$\delta V = \frac{IT}{2C} = \frac{I}{2fC} \quad (2.1)$$

I es el valor medio de la corriente $i_L(t)$, T el periodo de la señal rectificada, f frecuencia de la señal de entrada (red) y C la capacitancia del circuito. A una alta frecuencia y un valor más grande del capacitor de filtrado, más pequeño será el rizado en la salida de corriente directa [9].

Otro circuito generador de alto voltaje en continua es el rectificador bifásico o monofásico de onda completa como el mostrado en la Figura 2.2. Este trabaja de la siguiente manera, el diodo D1 conduce en el semiciclo positivo de la señal de entrada del transformador y el D2 conduce en el semiciclo negativo. En cada semiciclo se genera un proceso de carga y descarga del condensador igual al expuesto anteriormente pero esta vez el voltaje de rizado tendrá una mayor frecuencia y su amplitud será menor.

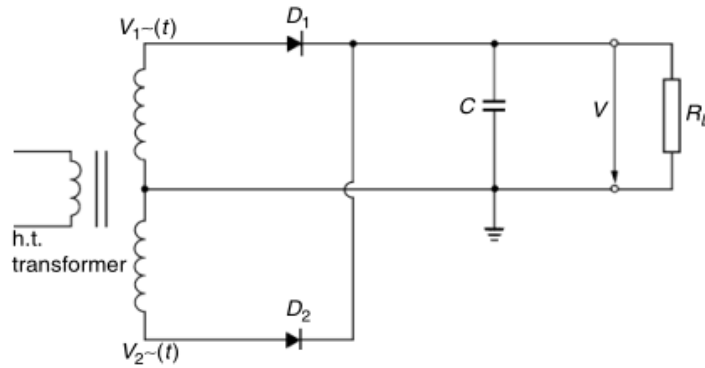


Figura 2.2. Rectificador bifásico o monofásico de onda completa. Fuente: [10]

2. CIRCUITOS EN CASCADA

- Circuito doblador de voltaje simple o de Greinacher

Cuando se requieren altos voltajes en corriente continua, uno de los circuitos básicos más populares es el creado por Greinacher, en la Figura 2.3, se muestra el circuito.

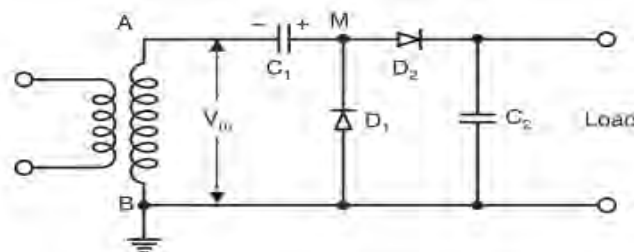


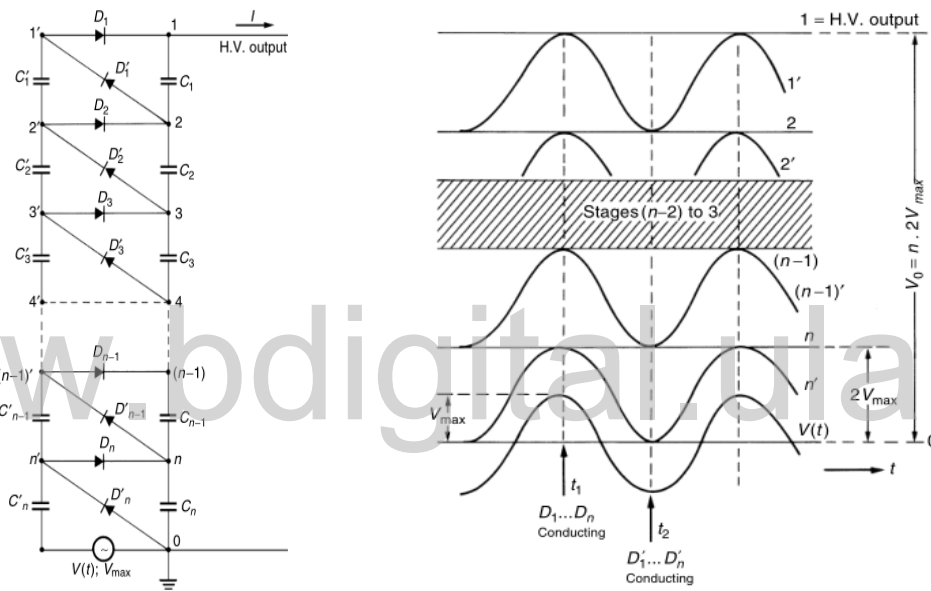
Figura 2.3. Circuito doblador de voltaje simple o de Greinacher. Fuente: [9]

Su funcionamiento es el siguiente, si suponemos que el punto B es más positivo que A, el diodo D1 conduce cargando al capacitor C1 hasta V_{max} con la polaridad que se muestra en la Figura 2.3. Durante el siguiente medio ciclo de la señal, el terminal A conectado al capacitor C1 sube

y toma el valor de V_{max} y por consiguiente el terminal M alcanza un voltaje de $2V_{max}$. De este modo el capacitor C_2 es cargado a $2V_{max}$ a través del diodo D_2 . Cabe destacar que normalmente el voltaje a través de la carga será menor a $2V_{max}$ dependiendo de la constante de tiempo $C_2 \cdot RL$ que maneje el circuito [9].

○ Circuito multiplicador de voltaje Cockroft-Walton

Para demostrar el principio básico de funcionamiento, la Figura 2.4 muestra un circuito monofásico multietapa en cascada del tipo Cockroft-Walton.



(a) Circuito en cascada Cockroft-Walton

(b) Formas de onda de los voltajes en los nodos, sin carga

Figura 2.4. Circuito multiplicador de voltaje Cockroft-Walton. Fuente: [10]

Funcionamiento del circuito sin carga: $I=0$. La sección $0-n'-V(t)$ es un circuito rectificador de media onda en el cual C'_n se carga hasta un voltaje de $+V_{max}$ si $V(t)$ ha alcanzado su potencial mas bajo, $-V_{max}$. En este punto si C_n aun esta sin carga, el rectificador D_n conduce tan pronto como $V(t)$ incrementa, llevando el potencial del punto n' hasta $+2V_{max}$ durante el periodo $T = \frac{1}{f}$, el punto n logra un potencial estable de $+2V_{max}$ si $V(t)$ ha alcanzado su voltaje mas alto $+V_{max}$. La sección compuesta por los elementos entre $n'-n-0$ funciona de igual modo que la

anterior, como un rectificador de media onda, en el que el voltaje a través de D'_n puede ser asumido como una fuente de voltaje de corriente alterna [10].

El capacitor C_n es cargado a través del diodo D_n , pues la corriente que lo carga es provista por el capacitor C'_n y $V(t)$. Por lo tanto, se asume que C'_n no estaba descargado, lo cual no es correcto. Como se toma esto en consideración para el circuito cargado, también se puede asumir que el voltaje a través de C_n no se reduce si el potencial n' oscila entre cero y $+2V_{max}$. Si el potencial de n' , no obstante, es cero, el capacitor C'_{n-1} también es cargado al potencial del punto n , es decir a un voltaje de $+2V_{max}$. La siguiente oscilación del voltaje $V(t)$ desde $-V_{max}$ a $+V_{max}$ forzara al diodo D_{n-1} a conducir, de modo que también C_{n-1} será cargado a un voltaje de $+2V_{max}$ [10].

En la Figura 2.4 (b) el estado de los potenciales en todos los nodos del circuito es representado para la condición sin carga. De esto se puede notar que:

- Los potenciales en los nodos $1', 2' \dots n'$ están oscilando debido al voltaje $V(t)$
- Los potenciales en los nodos $1, 2 \dots n$ permanecen constante tomando como referencia el potencial de tierra.
- Los voltajes a través de todos los capacitores son de tipo corriente directa y la magnitud del voltaje es $2V_{max}$ a través de cada etapa de los capacitores, excepto el capacitor C'_n el cual soporta un voltaje de V_{max} .
- Cada rectificador $D_1, D'_n \dots D_n, D'_n$ es puesto a tensión de $2V_{max}$ o dos veces el voltaje de pico de la señal de alterna.
- La salida de voltaje de alta tensión alcanzara un máximo de voltaje de $2nV_{max}$.

La fuente $V(t)$ está siempre simétricamente cargada, ya que la corriente se retira durante cada medio ciclo (t_1 y t_2 en la Figura 2.4 (b)). La forma de onda no tiene que ser exclusivamente sinusoidal, cada forma de onda simétrica con igual valor de pico positivo y negativo tendrá un buen rendimiento. Como dato adicional los voltajes de entrada de alta frecuencia son usados normalmente [10].

Del funcionamiento del circuito con carga se puede deducir lo siguiente. Si el generador cuenta con alguna carga a su salida a la cual le suministra una corriente I , el alto voltaje a su salida nunca alcanzara el valor $2nV_{max}$. También se encontrará con un efecto de rizado en el voltaje, y por lo tanto se tendrá que lidiar con dos cantidades: la caída de voltaje ΔV_0 y el rizado pico a pico de valor $2\delta V$, el procedimiento de cálculo de estos valores se ha obviado ya que esto no es parte fundamental de esta investigación. El bosquejo en la Figura 2.5 muestra la forma de onda del voltaje de salida y las definiciones de ΔV_0 y $2\delta V$ [10].

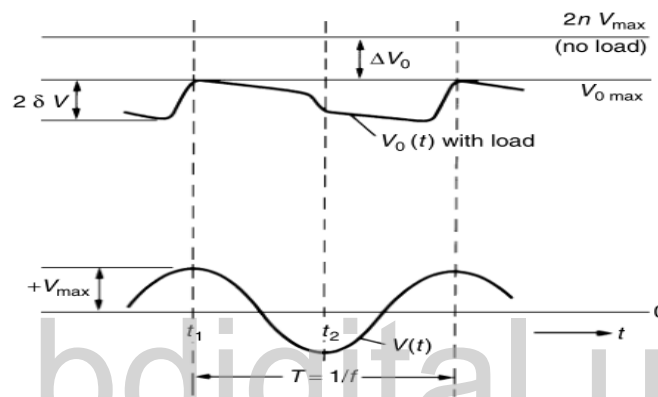


Figura 2.5. Circuito en cascada con carga, definiciones de ΔV_0 y $2\delta V$. Fuente: [10]

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{V_{max} f C}{I}} \quad (2.2)$$

$$\delta V = \frac{I}{fC} \times \frac{n(n+1)}{4} \quad (2.3)$$

$$\Delta V_0 = \frac{I}{fC} \left(\frac{2n^3}{3} + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{6} \right) \quad (2.4)$$

Las ecuaciones (2.2) (2.3) y (2.4) muestran los datos necesarios para conocer los parámetros de un generador Cockroft-Walton con carga. n_{opt} es el valor del número óptimo de etapas. Los generadores en cascada tipo Cockroft-Walton son usados y manufacturados alrededor del mundo en la actualidad. Un circuito típico es el mostrado en la Figura 2.6.

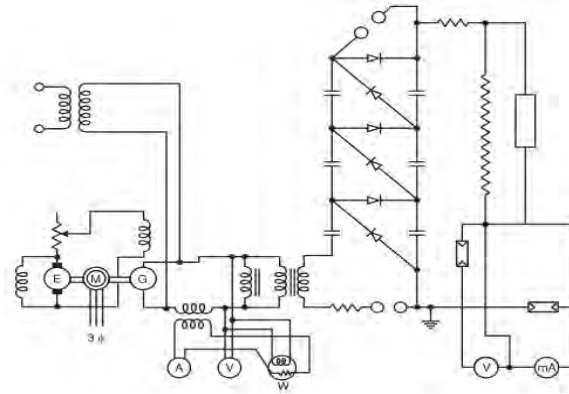


Figura 2.6. Circuito típico Cockroft-Walton. Fuente: [9]

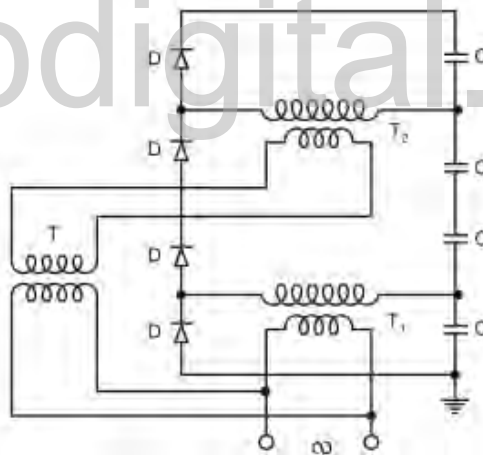


Figura 2.7. Circuito rectificador en cascada. Fuente: [9]

La Figura 2.7 muestra un circuito rectificador en cascada típico, cada etapa consiste de un transformador que alimenta dos rectificadores de media onda. Los capacitores de almacenamiento de estos rectificadores de media onda están conectados en serie, el inductor de alto voltaje de T_1 no puede ser aterrado. Esto significa que el aislamiento principal entre el inductor primario y secundario de T_1 tiene que ser aislado para un voltaje en continua de

magnitud V_{max} , el pico de voltaje de T_1 . Lo mismo es requerido para T_2 también pero esta vez el inductor de alto voltaje está a un voltaje de $3V_{max}$. Sería difícil proveer el aislamiento principal completo en este transformador, un transformador aislado T alimenta T_2 . Las cascadas de cada etapa requerirían así un transformador aislado o separado el cual hace que este tipo de circuito sea menos económico para más de 2 etapas. [9]

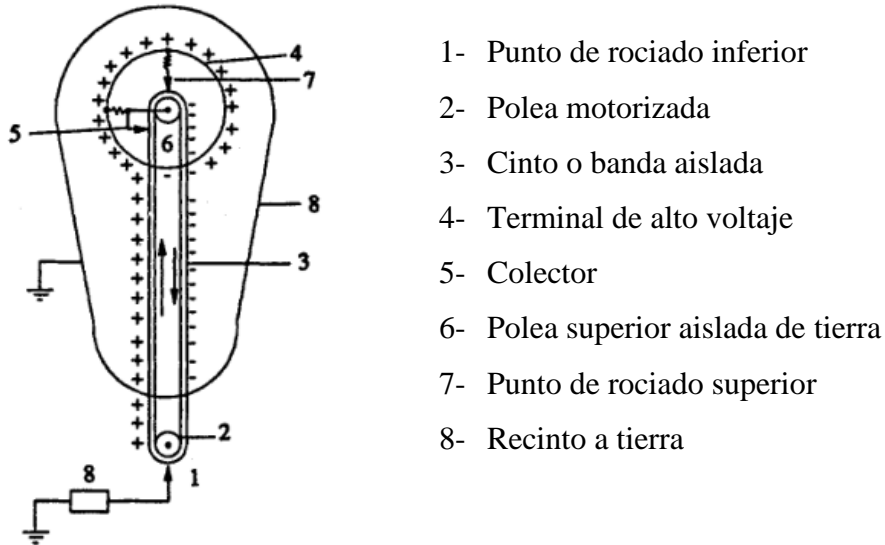
3. GENERADOR ELECTROSTÁTICO GENERADOR DE VAN DE GRAAFF

Uno de los generadores más conocidos en este rango es el generador de Van de Graaff a continuación se explica su funcionamiento básico.

El diagrama esquemático de un generador de Van de Graaff se muestra en la Figura 2.8. Una correa aislante se mueve sobre poleas. La correa o el cinturón, cuyo ancho puede variar de unos pocos centímetros a metros, se mueve a una velocidad de unos 15 a 30 m/s, por medio de un motor conectado a la polea inferior. La parte de la correa cerca de la polea inferior se carga electrostáticamente mediante un dispositivo de excitación.

La unidad de rociado de carga inferior consta de una serie de agujas conectadas a una fuente de corriente continua controlable (10 kV – 100 kV) para mantener la descarga entre los puntos y la correa. La carga se transporta al extremo superior, donde se recoge de la correa mediante los puntos de descarga conectados al interior de un electrodo metálico aislado por el que pasa el cinturón. Como las cargas son transportadas continuamente por la banda, van acumulándose en la esfera, hasta alcanzar el valor de la rigidez dieléctrica del aire. Todo el equipo está encerrado en un tanque de metal aterrado lleno de gases aislantes de buena resistencia dieléctrica, es decir. SF₆, etc.

Para que el potencial del electrodo pueda elevarse a un voltaje relativamente más alto sin descargas corona o para un cierto voltaje, un tamaño más pequeño del equipo servirá. Además, la forma del electrodo de alta tensión debe ser tal que el gradiente de la superficie del campo eléctrico se haga uniforme para reducir las descargas de corona, aunque es deseable evitar la corona por completo [9] [11].



- 1- Punto de rociado inferior
- 2- Polea motorizada
- 3- Cinto o banda aislada
- 4- Terminal de alto voltaje
- 5- Colector
- 6- Polea superior aislada de tierra
- 7- Punto de rociado superior
- 8- Recinto a tierra

Figura 2.8. Generador Van de Graaff. Fuente: [11]

2.2.2 GENERACIÓN DE ALTOS VOLTAJES DE CORRIENTE ALTERNA:

Este es el caso del equipo que se posee en el laboratorio de alta tensión de la Universidad de Los Andes. En los laboratorios de alto voltaje los transformadores de prueba elevan tensión desde un voltaje bajo hasta un nivel de voltaje deseado. La mayoría de las pruebas de laboratorio son monofásicas y el lado de bajo voltaje del transformador es alimentado por medio de un transformador regulador para permitir el ajuste de la magnitud de la salida de alto voltaje. Un arreglo típico para generar altos voltajes en corriente alterna es el mostrado en la Figura 2.9 [12].

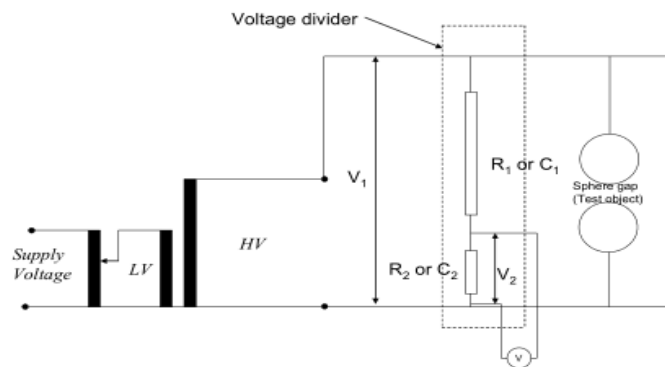


Figura 2.9. Diagrama esquemático de un transformador típico de prueba de corriente alterna. Fuente: [12]

1. TRANSFORMADORES EN CASCADA

Cuando se trata de generar voltajes por arriba de los 300 kV, los transformadores en cascada son una gran ventaja, ya que el peso de todo el equipo puede ser subdividido en unidades separadas y por lo tanto el transporte y construcción del mismo se hace más fácil.

El principio básico de funcionamiento de los transformadores en cascada es ilustrado con el esquema básico mostrado en la Figura 2.10. La alimentación de baja tensión está conectada al devanado primario del transformador I, diseñado para una salida de alto voltaje V en el secundario, como también lo están los otros dos transformadores. El devanado terciario o de excitación del transformador I alimenta el primario del segundo transformador, ambos devanados están dimensionados para soportar el mismo bajo voltaje, el potencial es fijado al alto voltaje V . Los devanados secundarios de ambas unidades están conectados en serie, por lo que un voltaje de $2V$ es producido. La adición de la etapa tres es el mismo análisis por lo que no se considera necesaria la explicación [10].

Cabe destacar que el terminal de bajo voltaje del devanado secundario de cada etapa está conectado a los chasis de los transformadores, el chasis de la etapa I está aterrado. Los chasis de los transformadores de las etapas II y III están a potenciales de V y $2V$ con respecto a tierra respectivamente, por lo tanto, estos deben ser aislados de tierra de forma adecuada [9].

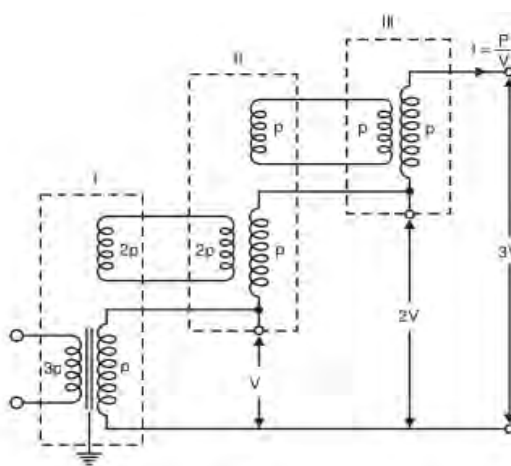


Figura 2.10. Transformador en Cascada Básico de 3 Etapas. Fuente: [9]

La principal desventaja de este tipo de arreglo es que las etapas más bajas de los primarios de los transformadores están cargadas más que las etapas superiores. La carga de los devanados es indicada como P . Para el transformador de tres etapas, la salida total de potencia en VA (Volt-Ampere) será $3VI = 3P$ y, por consiguiente, cada uno de los devanados secundarios soportaran una corriente de $I = P/V$. El devanado primario del transformador de la etapa III está cargado con P así como también el terciario del transformador de la segunda etapa. Luego, el primario del transformador de la segunda etapa sería cargado con $2P$. Siguiendo el mismo análisis el primario de la etapa I tendría $3P$ para complementar cada una de las cargas.

2. CIRCUITOS RESONANTES EN SERIE

En la Figura 2.11 se muestra el circuito equivalente de un transformador cargado de una sola etapa, esto con la intención de conocer de mejor manera el funcionamiento de los transformadores resonantes, normalmente la inductancia L es muy grande comparada con la inductancia del regulador de voltaje, el primario del transformador L_1 y con la inductancia del devanado secundario del transformador L_2 , por lo tanto su efecto *shunt* puede ser omitido. Usualmente la capacitancia de carga es variable y es posible que para cierto valor de la carga se produzca el fenómeno de la resonancia, esto es cuando $\omega(L_1 + L_2) = 1/\omega C$, a la frecuencia de alimentación este efecto puede ser extremadamente peligroso, pues el voltaje instantáneo a través de la muestra de prueba puede alcanzar niveles entre 20 a 40 veces el valor deseado y la corriente solo la limitara la resistencia del circuito, de la misma manera la presencia de armónicos debido a la saturación del núcleo de hierro del transformador puede resultar en resonancia. La frecuencia de los terceros armónicos puede ser desastrosas [9].

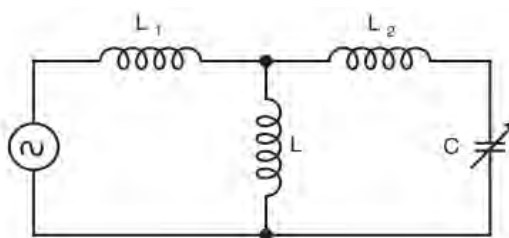


Figura 2.11. Circuito equivalente de transformador cargado de una sola etapa. Fuente: [9]

Con el circuito resonante, la resonancia es controlada en la frecuencia fundamental y por lo tanto no ocurren efectos resonantes no deseados [9].

Algunas de las formas de circuitos resonantes en serie para transformadores es la mostrada en la Figura 2.12, En cada uno de estos la capacitancia C_t representa la capacitancia pura aportada por la carga, una frecuencia de alimentación constante es asumida para estos casos.

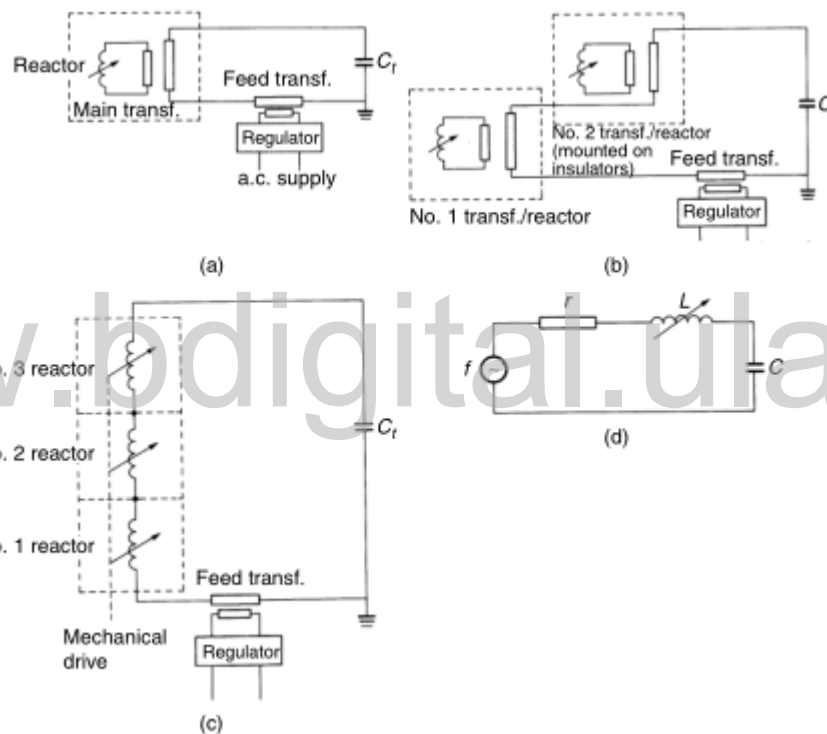


Figura 2.12. Circuitos resonantes en serie para transformadores. Fuente: [10]

- (a) Transformador reactor de una sola etapa.
- (b) Dos o mas unidades en serie.
- (c) Diagrama simplificado de un circuito resonante en serie para unidades de alta tension de reactores en serie.
- (d) Diagrama equivalente de un circuito resonante en serie.

2.2.3 GENERACIÓN DE ALTOS VOLTAJES DE IMPULSO

Un impulso de voltaje, es un voltaje unidireccional el cual sin oscilaciones apreciables aumenta abruptamente a un valor máximo y decrece más o menos rápidamente a cero [9].

La simulación de los efectos de rayos y de conmutaciones relacionados con altas tensiones se realiza principalmente con generadores de impulsos de tensión. En el campo estos impulsos de voltaje pueden tomar diferentes formas, la forma de onda de impulso estándar ha sido definida como se muestra en la Figura 2.13. La definición real es más precisa, pero según los estándares internacionales, para los impulsos de rayos, T_1 es $1.2 \mu\text{s}$ y T_2 es $50 \mu\text{s}$. El impulso de rayo estándar se describe como una onda de $1.2 / 50 \mu\text{s}$, y para el impulso de conmutación estándar o de maniobra es una onda de $250/2500 \mu\text{s}$ [12].

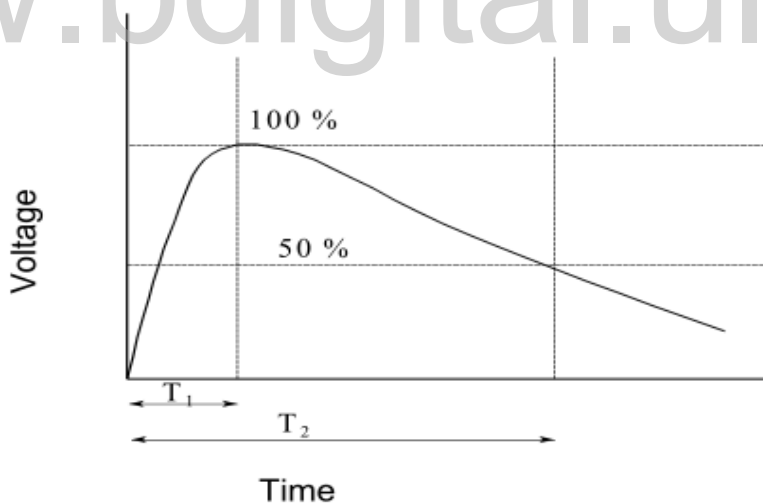
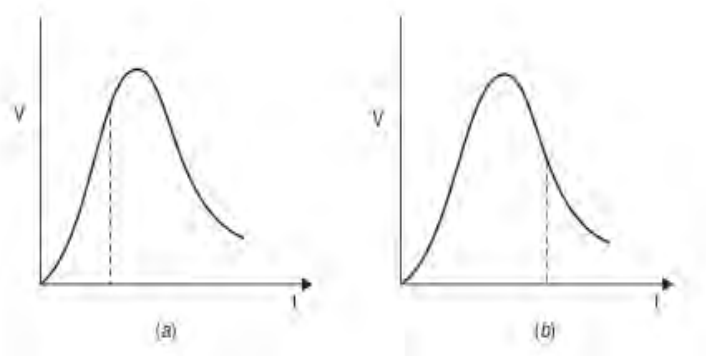


Figura 2.13. Onda impulsiva estándar. Fuente: [12]

Esta forma de onda también puede cortarse por una descarga disruptiva durante las partes de aumento o decaimiento, ya sea intencionalmente por medio de, por ejemplo, una chispa paralela o por una ruptura en el objeto bajo prueba [13].

Si el corte ocurre en la parte frontal la onda es conocida como onda cortada frontal y si ocurre en otro lugar se conoce como onda cortada en la cola o simplemente onda cortada. En la Figura 2.14 se muestran estos cortes.



(a) Onda cortada en la parte frontal (b) Onda cortada en la cola

Figura 2.14. Ondas cortadas. Fuente: [9]

www.bdigital.ula.ve

Si el corte se lleva a cabo en el frente, se especifica por el valor pico correspondiente al valor cortado y su inclinación nominal es la tasa de aumento de la tensión medida entre los puntos donde la tensión es del 10% y el 90%, respectivamente, de la tensión máxima, en el instante del corte. Sin embargo, una onda cortada en la cola se especifica en las líneas de onda completa [9].

1. CIRCUITOS GENERADORES DE VOLTAJES DE IMPULSO

La Figura 2.15 muestra los circuitos básicos más importantes empleados para generar impulsos de voltajes, El circuito que se muestra en la Figura 2.15 (a) se limita solo a los generadores modelo, los generadores comerciales emplean los circuitos que se muestran en las Figura 2.15 (b) a 15 (d).

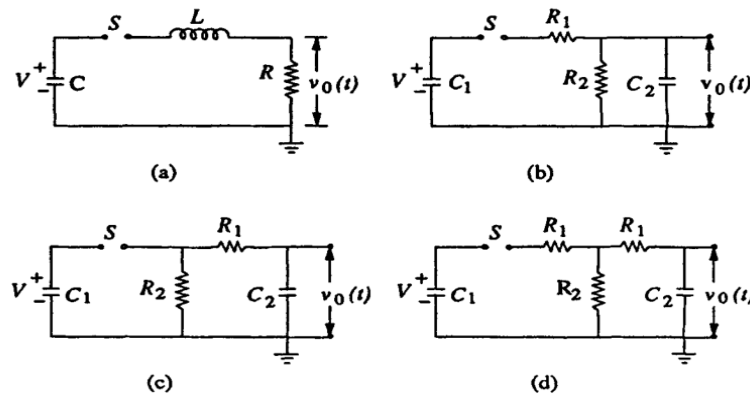


Figura 2.15. Circuitos generadores de impulsos. Fuente: [11]

Para entender el funcionamiento de este tipo de generadores se tomará como referencia el circuito mostrado en la Figura 2.15 (b). Normalmente un capacitor C_1 es cargado desde una fuente de alto voltaje de corriente continua, como el voltaje de CD (Corriente Directa) va aumentando lentamente, la tensión a través del suiche o *spark gap* S se incrementa hasta que el dieléctrico o el aire en este caso se rompen. El capacitor C_1 ahora se descargara en el circuito compuesto por C_2 , R_1 y R_2 . El voltaje $v_0(t)$ que aparece a través del objeto de prueba tiene la forma deseada.

Los componentes C_1 , C_2 , R_1 y R_2 son calculados de manera que los tiempos de subida frontal y de cola sean los requeridos [12].

Los circuitos correspondientes a la Figura 2.15 (b) y 2.15 (c) son ampliamente utilizados y difieren solo en la posición de la resistencia de control R_2 . Cuando R_2 está en el lado de carga (figura b), las dos resistencias forman un divisor de voltaje que reduce la tensión de salida, pero cuando R_2 está en el lado del generador (figura c) esta pérdida particular en el voltaje de salida está ausente [9].

Los cálculos matemáticos y las ecuaciones que rigen este tipo de circuitos pueden ser deducidos fácilmente o extraídos de cualquier bibliografía relacionada con el tema, por lo cual prescindiremos de estos cálculos en este capítulo.

2. CIRCUITO DE MARX O GENERADOR DE IMPULSO MULTITAPPA

En el circuito anterior la capacitancia C_1 debe ser cargada a voltajes por arriba de 200 kV por lo que la construcción del mismo puede resultar muy costosa y el tamaño sería muy grande. Una forma de solucionar este problema es cargar un banco de capacitores en paralelo y luego descargarlos en serie. Este circuito fue originalmente propuesto por Marx, en la actualidad circuitos de Marx modificados son de amplio uso en los generadores de impulso multietapa [14].

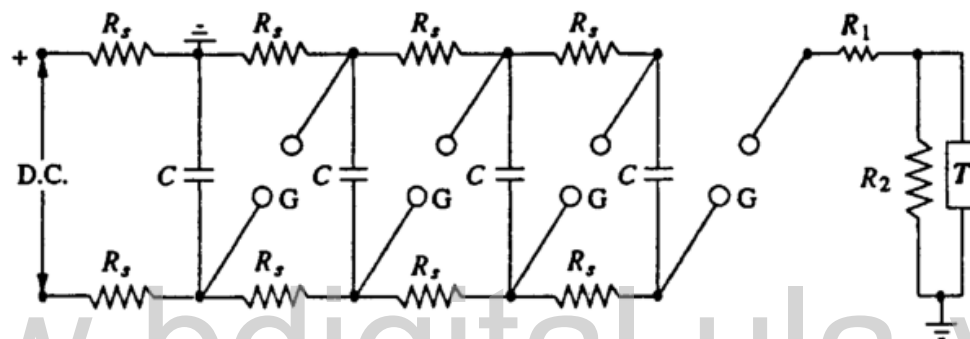


Figura 2.16. Diagrama esquemático del arreglo del circuito de Marx para un generador de impulsos multietapa. Fuente: [11]

El diagrama esquemático del circuito de Marx es mostrado en la Figura 2.16. Usualmente la resistencia R_s es escogida para limitar la corriente de carga entre 50 y 100 mA y la capacitancia C se elige de tal manera que el producto CR_s sea de 10 s a 1 min. El espaciado del *gap* debe ser tal que el voltaje de ruptura del *gap* sea más grande que el voltaje de carga V , así, todas las capacitancias son cargadas al voltaje V en aproximadamente 1 minuto. Cuando el generador de impulsos es descargado, los *gaps* son activados simultáneamente por un medio externo, y de esta forma, todos los capacitores son conectados en serie y descargados en el objeto de prueba T . Existen variaciones de este circuito en las cuales es posible introducir mejoras tales como reducción del espacio ocupado por los capacitores y disminución del costo del equipo [14].

2.3 UTILIZACION DE LAS FUENTES DE ALTO VOLTAJE

El conocimiento acerca de aspectos básicos de los generadores y circuitos es de gran importancia pues estos representan la base o fondo del trabajo en el desarrollo de tecnología de alta tensión. Los altos voltajes ya sean CD, CA (Corriente Alterna), de impulsos y de conmutación son extensivamente usados en física aplicada y altamente requeridos en numerosas aplicaciones. Por ejemplo, los microscopios electrónicos y las unidades de rayos-x requieren altos voltajes de corriente directa del orden de 100 kV o más, precipitadores electrostáticos, aceleradores de partículas en física nuclear, en comunicaciones electrónicas como TV, estaciones de radio, etc., también necesitan altos voltajes CD de unos cuantos kilovolt e incluso megavolt. Además, en investigaciones científicas puras, los altos voltajes CD son empleados para realizar pruebas en equipos involucrados en sistemas de transmisión de alto voltaje de corriente continua, así como también en líneas o cables de potencia de corriente alterna de gran longitud, pues las altas capacitancias de esos cables generarían corrientes mayores si las pruebas se hiciesen con altos voltajes de corriente alterna. Aunque tales pruebas de CD en cables usados en CA son más económicas y convenientes, la validez de estas pueden diferir de las condiciones normales de trabajo a las cuales estarían sometidos los cables [14] [10].

Los altos voltajes de corriente alterna de 1 MV o inclusive más altos son utilizados para pruebas en aparatos de potencia clasificados para el uso en la transmisión de extra alta tensión (sistemas de 400 kV y por encima). Los impulsos de alto voltaje son requeridos para propósitos de pruebas de simulación de sobrevoltajes que ocurren en los sistemas de potencia debido a rayos o aumentos vertiginosos del voltaje debido a conmutaciones. En la ingeniería eléctrica el asunto principal del uso de altos voltajes también está enfocado de gran manera en las pruebas de aislamiento de distintos componentes en los sistemas de potencia para distintos tipos de voltajes, concretamente, altos voltajes con frecuencias de CA diferentes, altas frecuencias, impulsos de conmutación y rayos, por lo tanto, la generación de estos altos voltajes en laboratorios se hace necesaria y esencial [14].

CAPÍTULO 3

PRINCIPIO GENERAL DEL FUNCIONAMIENTO DE LA FUENTE DE 100 kV

3.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

3.1.1 PANEL FRONTAL DE LA CONSOLA DE CONTROL

El equipo en estudio está formado por dos conjuntos, uno es la consola de control y el otro es el conjunto de alto voltaje compuesto por un transformador de 100 kV con una toma intermedia de 50 kV. La consola de control incluye todos los circuitos controles e indicadores requeridos para operar y tomar las medidas del sistema de pruebas, el conjunto de alto voltaje es el encargado de producir la señal que será procesada para su medición [15]. En la Figura 3.17 la referencia esquemática numérica de los componentes del panel frontal de la consola de control es ilustrada:

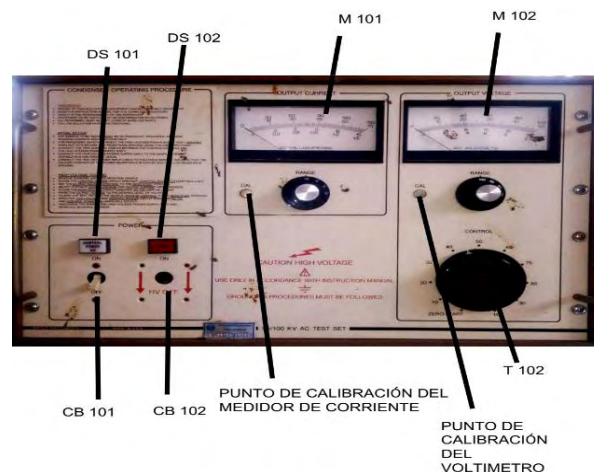


Figura 3.17. Parte Frontal Panel de Control. Fuente: Elaboración propia.

CB 101: Interruptor del circuito de control de potencia. Este interruptor controla la potencia suministrada al panel de control y sus indicadores, cuando este se cierra el indicador (DS 101) se ilumina.

CB 102: Interruptor del circuito de alto voltaje. Este interruptor controla la energía suministrada al primario del transformador (T 201), el cual forma parte del conjunto de alto voltaje

DS 101: Energía en la consola de control activa. Se ilumina cuando el interruptor (CB 101) está cerrado y 120 V de corriente alterna están disponibles para operar el sistema de control

DS 102: Alto Voltaje encendido. Este indicador se ilumina cuando el contactor de alto voltaje (K 102) está cerrado. Alto voltaje debe estar presente en la salida.

M 101: Corriente de salida. Este medidor nos muestra la corriente que está siendo absorbida por la muestra de prueba, el mismo posee un selector que permite escoger los rangos de corriente de 1.5, 15, 75 y 150 mA.

M 102: Voltaje de salida. Este medidor indica el voltaje que está siendo aplicado a la muestra de prueba, tiene un selector para escoger los rangos de medición para 10, 20, 50 y 100 kV.

T 102: Control de voltaje de salida. Es un autotransformador que provee energía al devanado primario del transformador de alto voltaje (T 201) que es parte del conjunto de alto voltaje. El control de voltaje de salida es parte de un sistema de bloqueo que no permite que el contactor (K 102) sea energizado a menos que T 102 se encuentre en la posición inicial de cero.

3.1.2 PANEL TRASERO DE LA CONSOLA DE CONTROL

El panel trasero contiene las conexiones para el ensamblaje de alto voltaje, equipamiento de seguridad y otras conexiones. En la Figura 3.18 se ilustran estas conexiones.

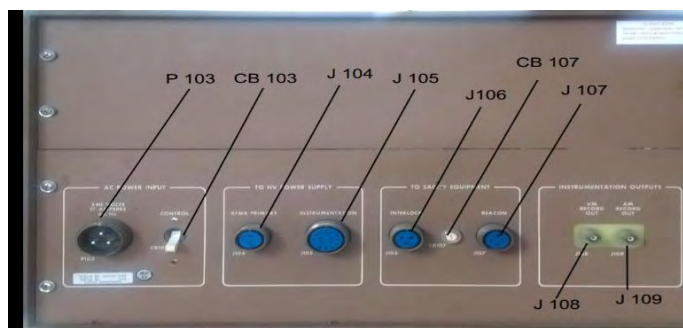


Figura 3.18. Parte Trasera Panel de Control. Fuente: Elaboración propia.

CB 103: Interruptor del circuito de control de la entrada de CA. Este interruptor controla la energía suministrada al transformador reductor (T 101) que alimenta los controles e indicadores de la consola. El interruptor del circuito de control de la entrada de CA es proporcionado para la protección del transformador (T 101) y debería ser dejado en la posición de activo normalmente.

CB 107: Interruptor del circuito de luces de advertencia (faro). Este interruptor alimenta el receptáculo para el faro (J 107)

J 104: Primario del transformador. Este receptáculo acepta el cable de control el cual se conecta con el receptáculo del devanado primario del transformador en el ensamblaje de alto voltaje.

J 105: Instrumentación. Este receptáculo recibe el cable de control el cual se conecta al receptáculo en el panel de conexión del conjunto de alto voltaje.

J 106 y P 106: sistema de bloqueo de seguridad. Este receptáculo ha sido provisto para permitir el uso de un sistema de seguridad en el área de prueba. P 106 es un dispositivo de seguridad que une dos puntos de la consola de control, permitiendo la operación normal del sistema en el caso que el sistema de seguridad de bloqueo no sea usado. Se sugiere al usuario remover el dispositivo de seguridad si se va a conectar a un sistema de bloqueo. El sistema de bloqueo de seguridad debe estar dispuesto de tal manera que el suiche o suiches estén cerrados cuando la puerta o las puertas del área de prueba estén cerradas. Cuando el sistema de seguridad este abierto, el contactor de alto voltaje (K 102) es desenergizado.

J 107 y P 107: Faro. Este receptáculo es provisto para el uso con un sistema de luces de advertencia externo. Provee un voltaje de 120 V, 1 A en los pines B (fase), C (neutro), y A (tierra) siempre y cuando el contactor de alto voltaje (K 102) este energizado.

J 108: Registro de voltaje. Este receptáculo provee una señal en corriente directa desde 0 hasta 5 V proporcionales al fondo escala de cualquiera de los 4 rangos del voltímetro.

J 109: Registro de corriente. Este receptáculo provee una señal en corriente directa desde 0 hasta 5 V proporcionales al fondo escala de cualquiera de los 4 rangos de medida del medidor de corriente.

P 103: Entrada de energía de corriente alterna. Este receptáculo recibe el cable de entrada de energía el cual debería ser conectado al servicio adecuado proporcionado por la compañía de electricidad.

3.1.3 CONJUNTO DE ALTO VOLTAJE

El panel contiene las conexiones que reciben los cables que provienen de la consola de control y los terminales de tierra y guarda. Este panel es mostrado en la Figura 3.19 junto con el conjunto de alto voltaje completo en la Figura 3.20.

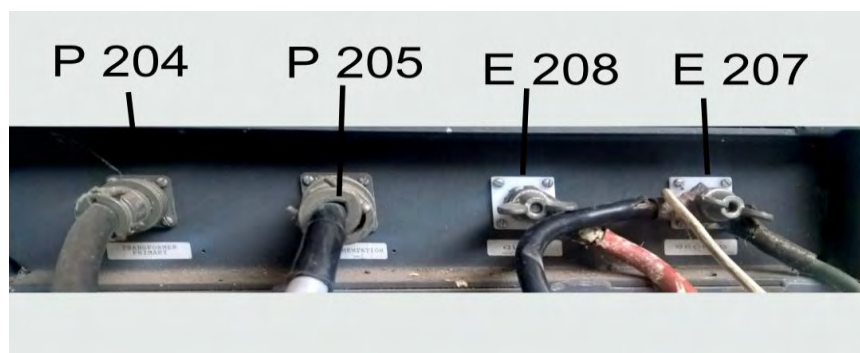


Figura 3.19. Panel De Conexiones del Conjunto de Alto Voltaje. Fuente: Elaboración propia.

www.bdigital.ula.ve



Figura 3.20. Conjunto de Alto Voltaje. Fuente: Elaboración propia.

E 207: Tierra. Este terminal recibe el cable de tierra del conjunto de alto voltaje el cual debe ser conectado a un sistema aterrado con una resistencia a tierra menor a 5Ω .

E 208: Guarda. Este terminal es provisto para que pruebas protegidas sean llevadas a cabo. Cualquier conexión del terminal de guarda a tierra no contribuirá a la medida de corriente indicada en la salida del medidor de corriente (M 101).

P 204: Primario del transformador. Este receptáculo recibe el cable proveniente del receptáculo (J 204) en la consola de control y lo conecta con el devanado primario del transformador de alta tensión (T 201).

P 205: Instrumentación. Este receptáculo conecta la tarjeta que contiene los circuitos de medición en el conjunto de alto voltaje y envía las señales de medida a la consola de control. Este receptáculo recibe el cable de control que se conecta con (J 105) en la parte trasera del panel de control.

Todas las conexiones eléctricas de estos elementos pueden verse con más detalle en las Ilustración 4 y Ilustración 5 del apartado de anexos.

3.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS TARJETAS INTEGRADAS EN LA CONSOLA DE CONTROL

3.2.1 TARJETA DEL CIRCUITO CONTROLADOR DEL VOLTÍMETRO

Todos los elementos que componen el circuito controlador del voltímetro se encuentran ubicados en una tarjeta, para entender el comportamiento de dicho circuito se comienza por agrupar en distintos bloques funcionales por separados cada una de las etapas de las cuales se compone, se hace de esta manera ya que se puede notar que el controlador está formado en su mayoría por configuraciones típicas con amplificadores operacionales y es la forma más factible para entender su funcionamiento. En la Figura 3.21 se muestra el diagrama de bloques de esta tarjeta.

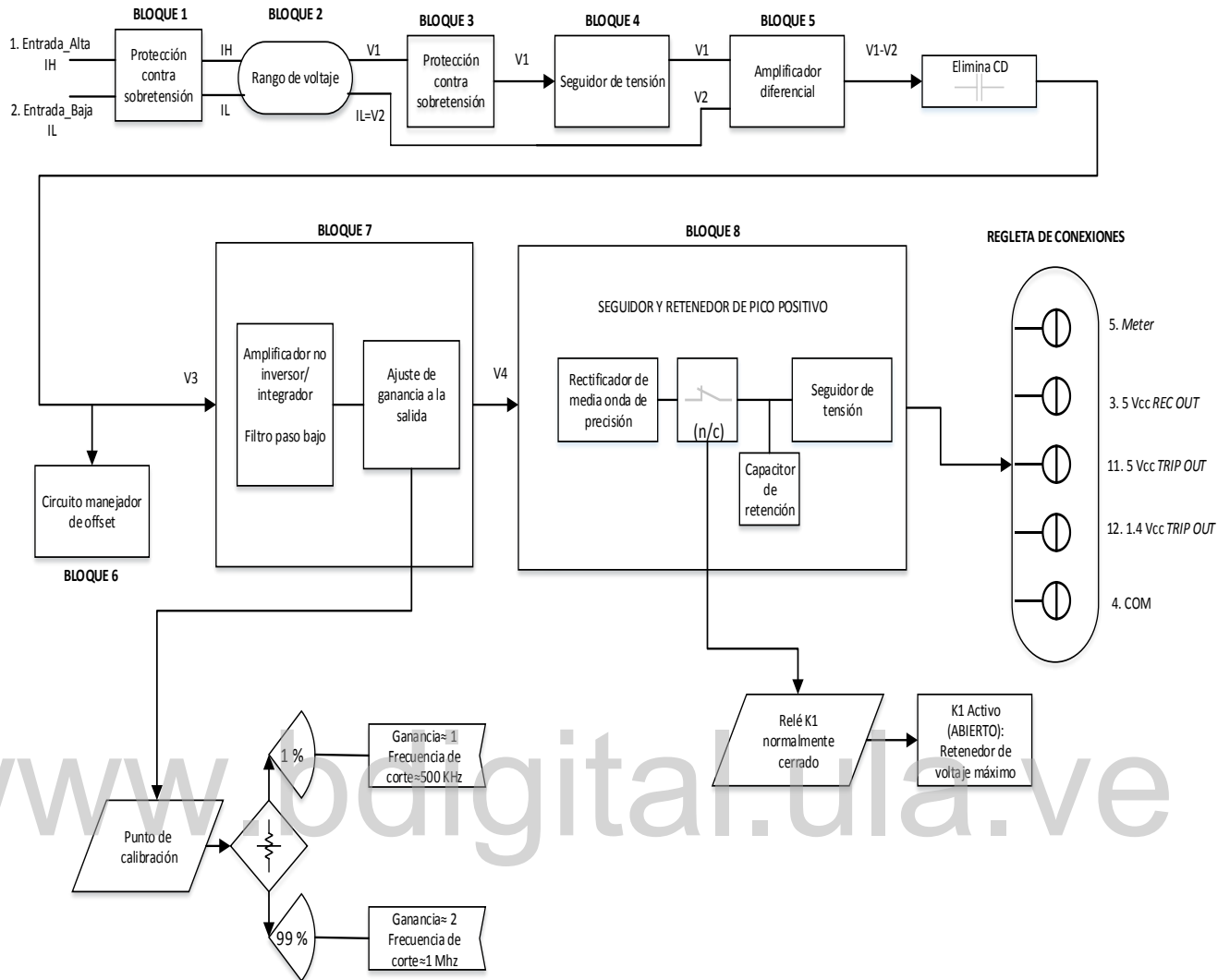


Figura 3.21. Diagrama de bloques de la tarjeta del voltímetro. Fuente Elaboración propia.

Esta tarjeta para trabajar requiere de 5 amplificadores operacionales de los cuales 4 corresponden al integrado LM308H y uno al integrado LM301H, estos están indicados por separados en el diagrama eléctrico con las siglas AR1, AR2, AR3, AR4 Y AR5. El diagrama eléctrico del circuito controlador del voltímetro es mostrado en la Ilustración 1 en la sección de anexos.

En primera instancia es de notar que el circuito estudiado cuenta con dos bornes de entrada los cuales se emplean para recibir la señal y realizar las mediciones correspondientes, uno de estos

es llamado Entrada_Alta y el otro Entrada_Baja, la señal proveniente de estos puntos ingresa a un circuito divisor de tensión el cual es denominado Rango de voltaje, ya que es el que dispondrá los límites de voltaje para los cuales se hará la medición, este circuito cuenta con un conjunto de resistencias que contiene 6 posiciones pero solo las primeras 4 posiciones son usadas, la variación de las posiciones se hace a través de una perilla externa. Antes de este bloque, es decir en el bloque 1, hay un arreglo de diodos zener opuestos, conectados en sus ánodos como punto común y sus cátodos en la zona donde ingresan las señales de entrada, después del bloque divisor de tensión o bloque 2 se encuentra 2 diodos en serie, el ánodo de uno conectado a tensión de alimentación negativa y el cátodo del otro diodo a tensión positiva, la señal que pasa entre ambos está limitada entre estas tensiones, estos arreglos con diodos son usados para proteger los componentes electrónicos contra sobretensiones el primer par de diodos zener a la entrada limita la tensión a 360 V y el segundo par a tensión de alimentación ± 15 V, el diagrama eléctrico de estos 3 bloques es el mostrado en la siguiente figura.

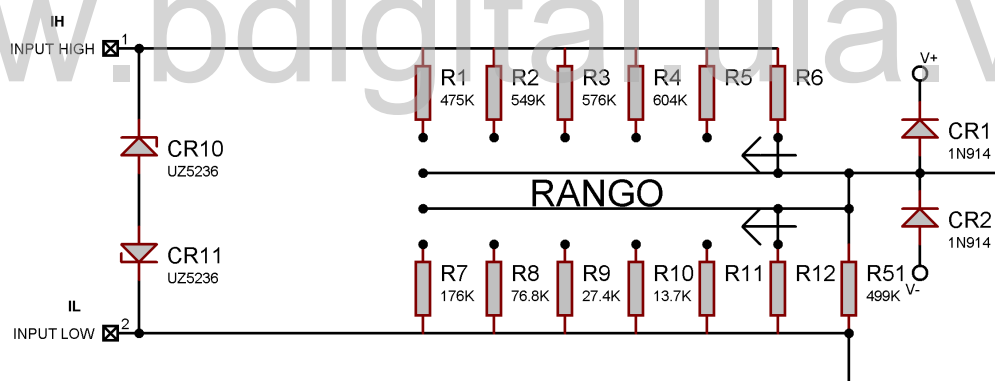


Figura 3.22. Diagrama eléctrico de los tres primeros bloques de entradas a la tarjeta.
Fuente: [15]

A la salida del divisor de tensión y luego de los diodos nombrados, se tiene una señal que ingresará en el cuarto bloque que está conformado por un circuito seguidor de tensión el cual cumplirá con su función como adaptador de impedancias, pues a la salida del amplificador se tendrá la misma señal de entrada pero con una corriente que viene del amplificador y no de la fuente de entrada. La señal de salida de AR1 que es el amplificador operacional usado en el

seguidor de tensión ingresará en el quinto bloque, que presenta una configuración como amplificador diferencial o sustractor, este circuito permite obtener en la salida una tensión igual a la diferencia de las señales aplicadas multiplicada por una ganancia, pero al ser todas las resistencias iguales en este montaje dicha ganancia es la unidad, por lo tanto la salida de este bloque será simplemente la diferencia de la señal proveniente de AR1 con la señal que viene de la Entrada_Baja, el borne de esta entrada está conectado en el conjunto de alto voltaje al punto de guarda (para observar este detalle referirse a la Ilustración 5). En la Figura 3.23 se observa el diagrama eléctrico de los bloques mencionados.

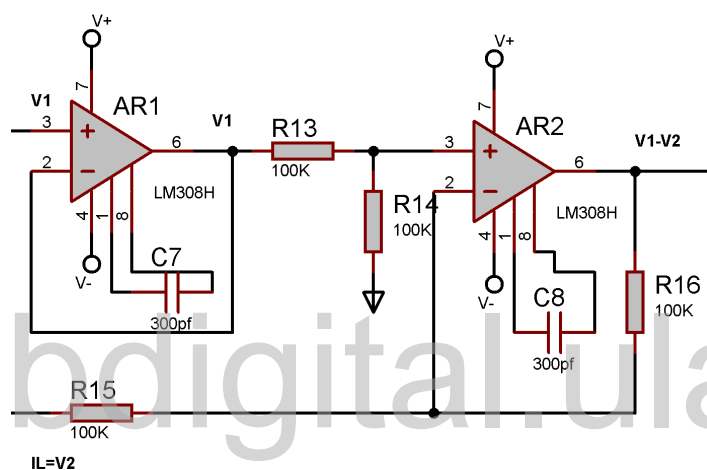


Figura 3.23. Seguidor de tensión (Bloque 4) y Amplificador diferencial o sustractor (Bloque 5).
Fuente: [15]

Antes de la entrada no inversora del amplificador contenido en el bloque 7 se tiene un arreglo con un capacitor y un circuito manejador de *offset* (bloque 6), este capacitor filtra la componente de continua que logre llegar a esa entrada y el circuito manejador de *offset* a través de un potenciómetro, permite controlar la translación de la señal en el eje vertical, por esta misma razón ha sido llamado circuito manejador de *offset*, observando detenidamente el bloque 7 del circuito se puede deducir que esta etapa, está dispuesta con topología de amplificador no inversor integrador y a su vez cumple funciones de filtro paso bajo en un rango de frecuencias establecidos, a la salida del amplificador operacional AR3 se encuentra conectado un potenciómetro que se une en su punto central de variación a una resistencia y un capacitor en paralelo que retroalimenta el circuito con la entrada inversora del mismo y en uno de sus

extremos a otra resistencia que va hacia el punto común del circuito, el objetivo de este potenciómetro a la salida es controlar la variación en la ganancia del bloque, en otras palabras es un punto de calibración de la tarjeta controladora del voltímetro, teniendo un rango de ganancias, cercana a la unidad en la posición 1% y de aproximadamente 2 en la posición 99% del potenciómetro, al mismo tiempo en este rango de variación actúa el filtro paso bajo eliminando las frecuencias espurias que pudiesen aparecer entre 500 kHz y 1 MHz respectivamente de las posiciones extremas del potenciómetro. En la Figura 3.24 se muestra el circuito eléctrico de los bloques expuestos.

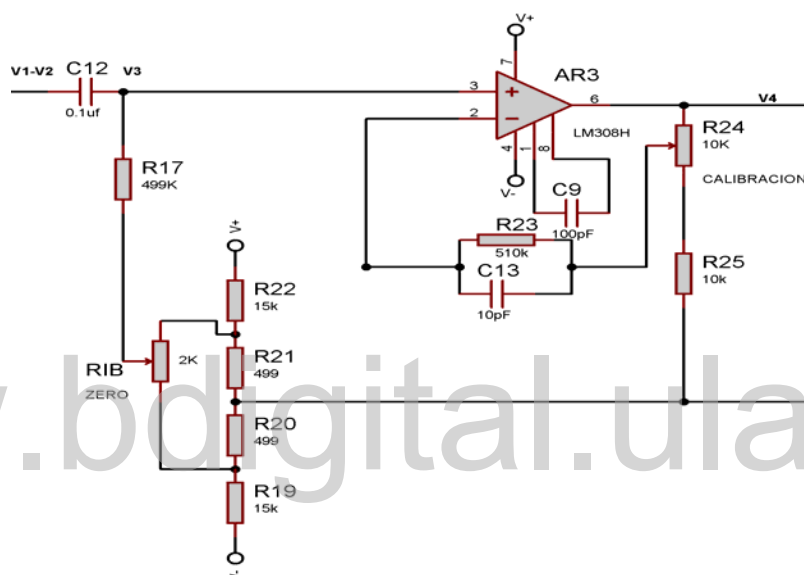


Figura 3.24. Circuito manejador de *offset* (Bloque 6) y Amplificador no inversor/integrador (Bloque 7). Fuente: [15]

De la salida del bloque 7 la señal ya calibrada y amplificada, se aplica a la entrada no inversora del amplificador operacional AR4, que es el amplificador de ingreso al bloque 8, el cual está formado por dos amplificadores operacionales, tres resistencias, dos diodos, un capacitor de retención y los contactos del relé llamado K1 en estado normalmente cerrado, este conjunto de elementos forman lo que conocemos como rectificador de precisión, de manera más concreta es un seguidor y retenedor de pico positivo.

El amplificador operacional AR4 configurado como un rectificador de media onda de precisión, carga al capacitor sólo cuando el voltaje de entrada al bloque excede al voltaje del capacitor. La alta impedancia de entrada del seguidor AR5 no permite que el capacitor se descargue de manera apreciable.

Para analizar el funcionamiento del circuito que conforma este bloque de forma más detallada, empezaremos con la acotación de que cuando la señal de entrada excede al voltaje del capacitor V_c , se polariza directamente el diodo que se encuentra a la salida de AR4, el cual según el plano eléctrico es llamado CR9, este diodo carga al capacitor de retención C14. Siempre que la señal de ingreso sea mayor que V_c , el valor de la carga de C14 se acerca al de la señal de la entrada. Por lo tanto, V_c sigue a la señal de entrada, en tanto que la misma sea mayor que V_c . Cuando esta desciende por debajo de V_c , el diodo que retroalimenta el amplificador AR4 es decir CR3 se activa y CR9 se desactiva, desconectando al capacitor de la salida del amplificador operacional AR4. El diodo CR9 es de tipo de baja fuga, pues de lo contrario el voltaje del capacitor se descargará. Para reducir al mínimo la caída de voltaje, es necesario que el amplificador operacional AR5 requiera corrientes de polarización pequeñas [16].

Por ello, es importante que el amplificador operacional AR5 sea del tipo metal-óxido-semiconductor de óxido metálico (MOS), un amplificador operacional del tipo de efecto de campo bipolar (BIFET) o un amplificador operacional de precisión como el integrado de la serie LM308H que es el usado en este caso [16].

Los LM308H son particularmente adecuados para aplicaciones de alta impedancia de fuente que requieren corrientes de desviación y polarización bajas, así como una baja disipación de potencia. A diferencia de los amplificadores de entrada FET, las corrientes de desviación y polarización del LM308H no cambian significativamente con las variaciones de temperatura [17].

El otro integrado utilizado en las configuraciones de los circuitos con operacionales con el que cuenta esta tarjeta es el LM301H, Este amplificador ofrece muchas características que hacen

que su aplicación sea muy efectiva, entre ellas protección contra sobrecargas en la entrada y salida, sin oscilaciones y compensación con un solo condensador de 30 pF.

Tiene ventajas sobre los amplificadores compensados internamente, porque la compensación de frecuencia se puede adaptar a la aplicación particular, Además, el dispositivo proporciona una mejor precisión y un menor ruido en los circuitos de alta impedancia. Las corrientes de entrada bajas también lo hacen especialmente adecuado para circuitos integradores o temporizadores de intervalo largo, muestreo y circuitos retenedores y generadores de forma de onda de baja frecuencia [18].

Este último bloque de la tarjeta cuenta con los contactos del relé K1, los cuales están en la posición normalmente cerrado, en el momento en que el relé se activa se abren sus contactos, reteniendo a la salida del bloque el último voltaje máximo medido, la bobina del relé se energiza para accionar sus contactos al unir los puntos 6 y 7 en la regleta de conexión de la tarjeta por medio de los contactos K 101B y K 102D de los relés K 101 Y K102, la Figura 3.26 muestra el diagrama eléctrico de la bobina del relé K1.

La regleta de conexiones de la tarjeta controladora de voltaje contiene 12 puntos de conexión en los cuales hay 4 puntos de salida usados con propósitos de medición y control de la señal, el punto 5 de la regleta es el de medición el cual se conecta al instrumento encargado de mostrar las lecturas obtenidas, las salidas 3 y 11 en la tarjeta suministran voltajes de corriente continua de 0 a 5 V proporcionales a la escala completa de cualquiera de los cuatro rangos del voltímetro, la salida 3 es el receptáculo J 108 ubicado en el panel trasero de la consola en el área de instrumentación nombrado (*VM record out*), el terminal de salida 11 proporciona la señal que va hacia la tarjeta controladora de disparo de sobretensión/sobrecorriente y la salida 12 un voltaje de 1.4 V de corriente continua proporcionales a cualquier escala. En la Figura 3.25 se muestra el diagrama eléctrico del bloque 8.

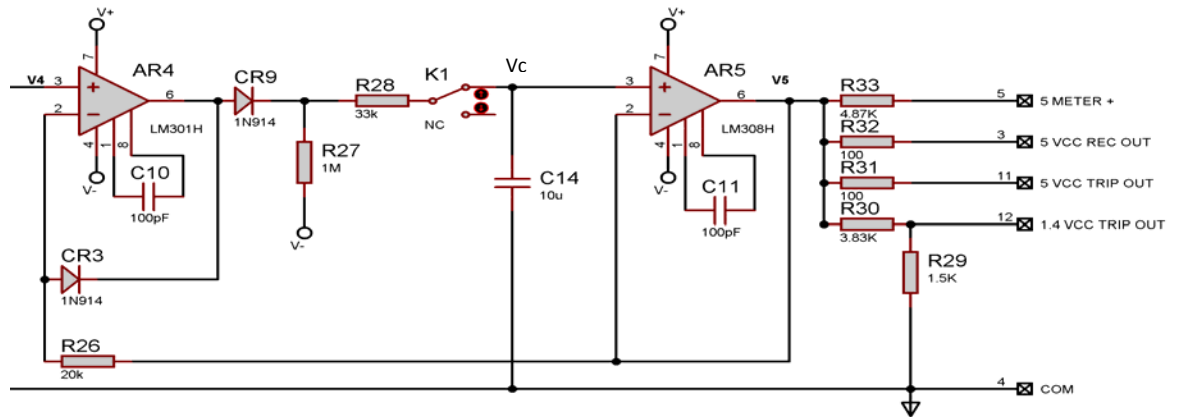


Figura 3.25. Circuito seguidor y retenedor de pico positivo (Bloque 8). Fuente: [15]

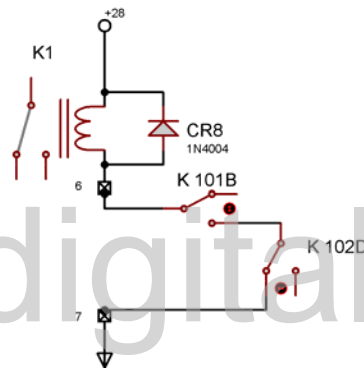


Figura 3.26. Bobina del relé K1, de la tarjeta del voltímetro. Fuente: Elaboración propia

3.2.2 TARJETA DEL CIRCUITO CONTROLADOR DEL MEDIDOR DE CORRIENTE

El diagrama de bloques de la tarjeta controladora del medidor de corriente se puede observar en la Figura 3.27.

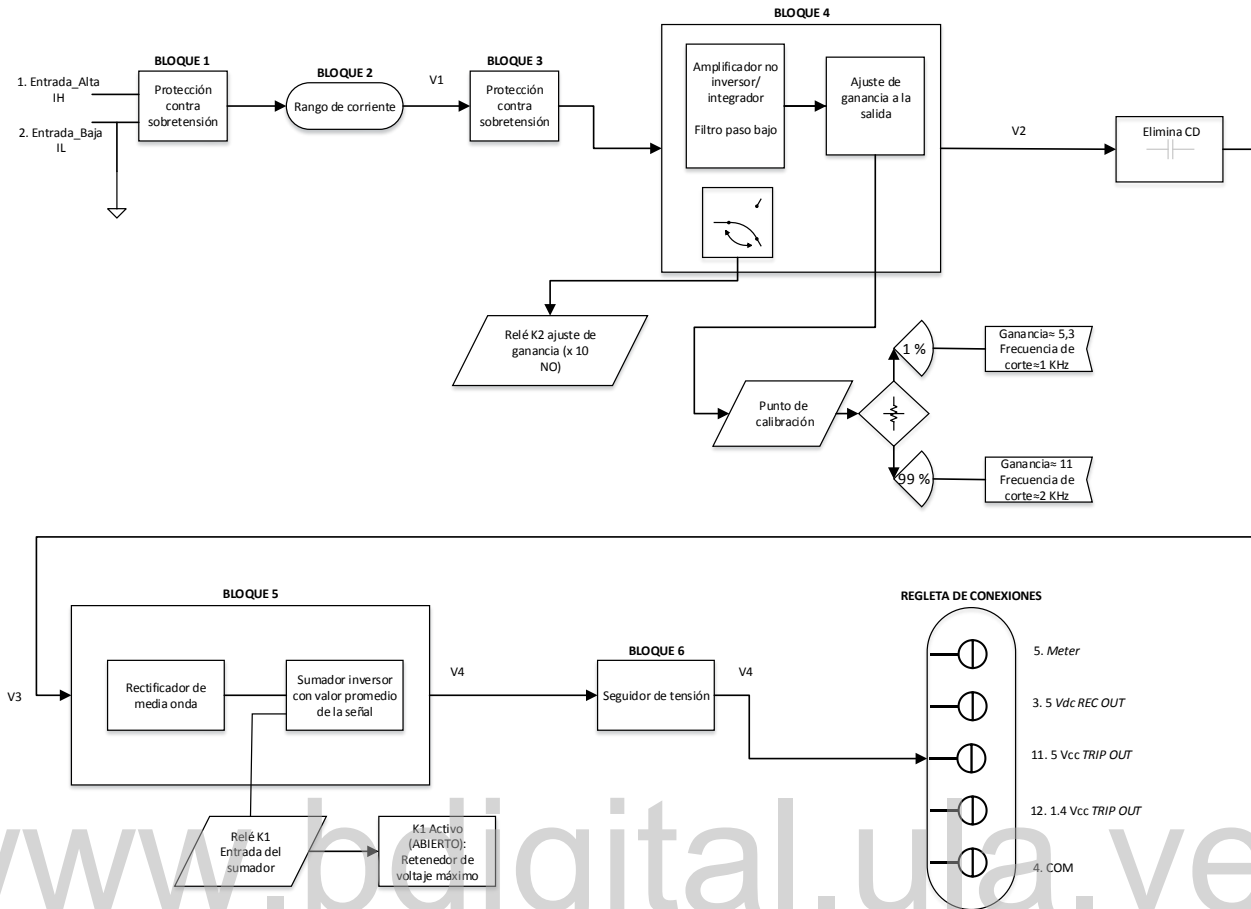


Figura 3.27. Diagrama de Bloques de la tarjeta del medidor de corriente. Fuente: Elaboración propia.

Esta tarjeta se encarga de interpretar los valores de corriente que circulan por el devanado secundario de un transformador de corriente ubicado en el conjunto de alto voltaje del equipo este detalle puede observarse en la Ilustración 5 en la sección de anexos, también cuenta con un punto de calibración y 2 relés que al ser accionados modifican las ganancias en ciertos bloques del circuito en estudio, al igual que la tarjeta anterior esta se encuentra constituida por configuraciones típicas con amplificadores operacionales, ver la Ilustración 2 de anexos para observar el diagrama circuital completo de la tarjeta.

De la misma manera que la tarjeta controladora del voltímetro, la primera etapa de esta tarjeta es similar, para realizar los procesos de medición cuenta con dos señales de entrada, la

Entrada_Alta y la Entrada_Baja, esta última está conectada como punto común del circuito controlador del medidor de corriente, estas dos entradas son las provenientes del devanado secundario del transformador de corriente antes mencionado.

Con la finalidad de proteger y regular la entrada al circuito controlador, se encuentran dispuestos entre los dos puntos de entrada 2 diodos zener UZ5815 en serie y en direcciones contrarias con la finalidad de proteger el circuito contra sobretensiones superiores a ± 360 V, seguido de estos observamos el bloque encargado de establecer los rangos de medida de la corriente, este bloque es simplemente un circuito divisor de tensión colocado entre los dos bornes de entrada, el mismo está conformado por un conjunto de resistencias que establecen cada uno de los rangos de corriente, pero solo las primeras cuatro posiciones de este conjunto son usados en la medición, para variar dicho rango se cuenta con una perilla externa la cual es la que permite ubicarse en cada una de las posiciones.

Antes de entrar a las siguientes etapas de adecuación, amplificación y conversión de señal luego del bloque divisor de tensión, hay par de diodos para protección contra sobretensiones en el rango de la tensión de alimentación de ± 15 V. En la Figura 3.28 se observa en detalle la disposición de los 3 bloques.

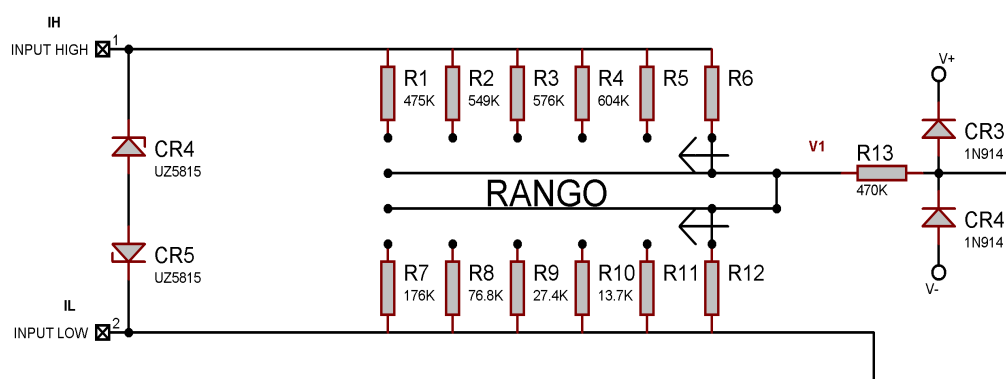


Figura 3.28. Protección contra sobretensión (Bloque 1), Circuito divisor de tensión (Bloque 2), Protección contra sobretensión (Bloque 3). Fuente: [15]

Como es de esperarse los elementos más empleados para realizar cada una de las funciones de las etapas, son los amplificadores operacionales, esta tarjeta para su correcto desempeño dispone de 4 amplificadores operacionales, 2 del modelo LM308H, un LM316AH y un LM201AH, cada uno con sus respectivas siglas (AR1, AR2, AR3, AR4) dadas en el circuito eléctrico mostrado en la Ilustración 2 en la sección de anexos.

El primero de todos los bloques con amplificadores operacionales que contiene al amplificador AR1 es el bloque 4, según el diagrama de la Figura 3.29, se utiliza como amplificador no inversor integrador y al mismo tiempo como filtro paso bajo para eliminar todas las frecuencias espurias dependiendo de la posición en que se encuentra el punto de calibración a la salida de AR1. Su funcionamiento como tal, es básico, pues trabaja como un simple amplificador no inversor, amplificando la señal de entrada pero sin invertirla obteniendo una ganancia preestablecida a la salida, se le ha llamado integrador debido a que acá también cumple funciones de regulación depurando la señal tratada.

El punto de calibración a la salida de AR1 influye en el bloque modificando las ganancias del circuito y el punto de corte del filtro paso bajo como se dijo anteriormente, a través de un potenciómetro. Se obtienen ganancias entre 5.3 para la posición 1% del potenciómetro y 11 para la posición 99% aproximadamente, estas ganancias se consiguen tomando en cuenta la señal de entrada en la patilla no inversora del amplificador y la salida del mismo, así como también las frecuencias entre las cuales varía el punto de corte del filtro paso bajo que están entre 1 kHz y 2 kHz para las posiciones 1% y 99% respectivamente.

Se debe señalar que lo expuesto anteriormente es válido si los contactos del relé denominado K2, que se encuentra conectado en su punto común a tierra y su terminal normalmente abierto con una resistencia de 56.2 k Ω en serie a la entrada inversora del amplificador, está desactivado, o en su condición inicial que es normalmente cerrado.

Al activarse el relé K2 este realiza ajustes en la ganancia total del bloque ocasionando que los valores anteriormente obtenidos entre los puntos extremos del potenciómetro de calibración varíen, multiplicando la ganancia que tiene anterior a su activación por un factor de 10

aproximadamente o de forma un poco más precisa se obtienen ganancias entre 52 para la posición 1% y 109 para la posición 99%, las frecuencias de corte también varían un poco bajando sus valores entre 870 Hz y 1.8 kHz respectivamente.

Cabe destacar que este relé K2 pertenece al circuito de medición digital, opción que es ofrecida por el fabricante pero la cual no disponemos actualmente, la bobina de este relé está conectada con el circuito que establece los rangos y con el control de punto decimal del circuito de medición digital. La Figura 3.30 nos muestra la conexión de la bobina del relé K2.

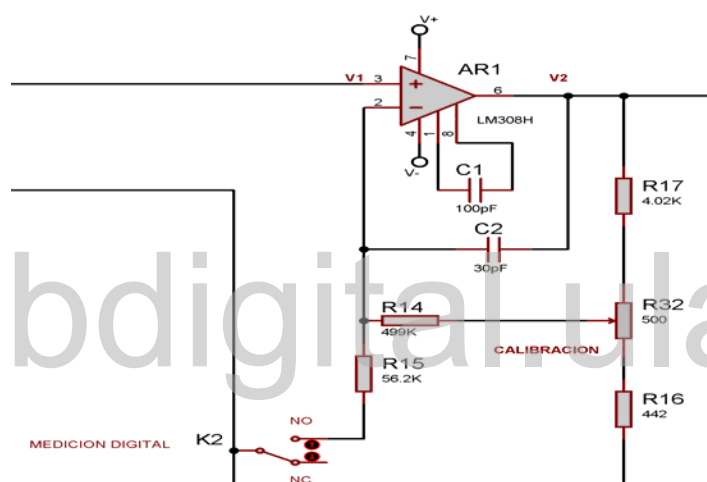


Figura 3.29. Amplificador no inversor integrador (Bloque 4). Fuente: [15]

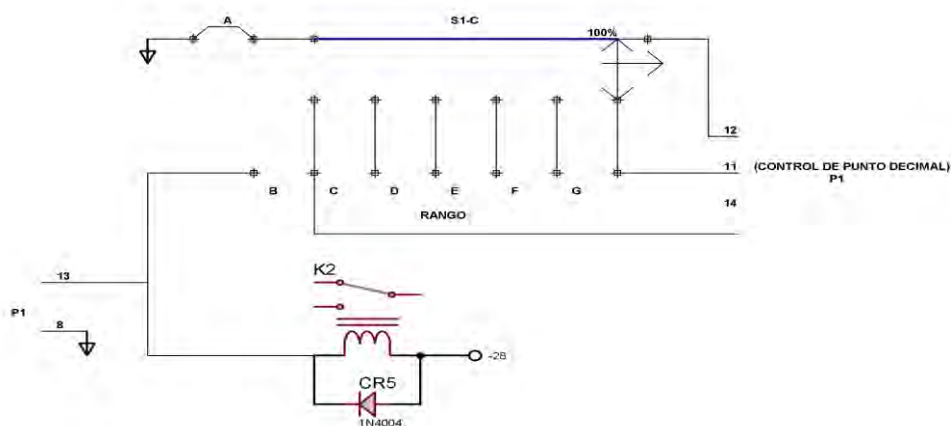


Figura 3.30. Conexión de la bobina del relé K2, al circuito de rango de medición digital. Fuente: [15]

De la salida del bloque 4, mediante un condensador denominado C3, la señal se transfiere al bloque 5 mostrado en la Figura 3.31, por medio del cual se calcula el valor promedio de un voltaje de CA rectificado. Este bloque presenta un diseño con dos amplificadores operacionales ambos formando en conjunto un tipo de circuito denominado convertidor de corriente alterna a corriente directa, este circuito está compuesto por dos configuraciones básicas, la primera etapa cuenta con un circuito rectificador de precisión de media onda de parte positiva, seguido en la siguiente etapa por un sumador inversor.

Estas dos configuraciones circuitales unidas forman lo que se conoce como rectificador de onda completa, también conocido como circuito de valor absoluto, para lograr el voltaje CD requerido la última etapa del bloque presenta un capacitor de baja fuga, y de esta manera se transforma el rectificador de onda completa en el convertidor de CA a CD o circuito de valor medio absoluto.

Para entender mejor la forma de trabajo de esta configuración, se analiza el paso de la señal proveniente del bloque anterior la cual llamaremos V3 a través del bloque 5, inicialmente para las entradas positivas de la señal V3, el circuito rectificador de media onda formado con el amplificador AR2 invierte la señal de entrada, el sumador inversor suma la salida del rectificador con la entrada V3 para dar una salida del circuito $V0=V3$, para las entradas negativas de V3 el rectificador elimina la señal de entrada y el circuito sumador inversor que contiene al amplificador operacional AR3 invierte $-V3$ y la salida V0 del circuito es $+V3$. Por lo tanto la salida V4 del circuito es el valor absoluto de V3, luego el capacitor dispuesto entre la entrada inversora y la salida del sumador inversor se encarga de promediar la salida rectificada [16].

Este bloque de la tarjeta también contiene en sus circuitos un relé K1, los contactos del relé están ubicados entre el circuito rectificador de media onda y la entrada inversora del sumador inversor, este relé se encuentra en estado normalmente cerrado en su posición inicial, al recibir la señal de control la cual es proporcionada al unir los puntos 6 y 7 de la regleta de conexiones de la tarjeta, el relé se activara pasando a su estado normalmente abierto, ejerciendo instantáneamente sus funciones como retenedor de voltaje máximo, es decir cualquier voltaje medido en la salida del bloque, al activarse el relé será retenido. Cabe destacar que a diferencia

de la tarjeta del voltímetro en esta no existe ninguna conexión a través de contactos de relé entre los bornes 6 y 7. En la

Figura 3.32 se observa la bobina del relé K1 de la tarjeta controladora del medidor de corriente.

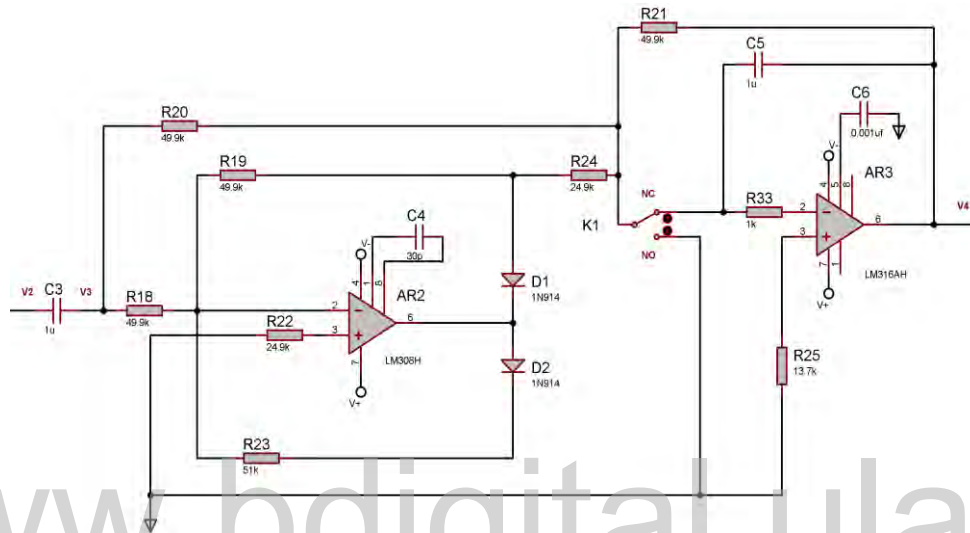


Figura 3.31. Circuito de valor medio absoluto (Bloque 5). Fuente: [15]

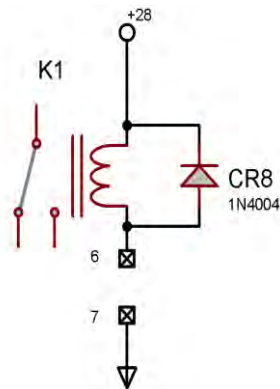


Figura 3.32. Bobina del relé K1 de la tarjeta del medidor de corriente. Fuente: [15]

Para interpretar la señal que se ha venido tratando, esta es llevada a la salida del circuito a través del bloque 6 que es un circuito seguidor de tensión, la tarjeta en estudio de la misma manera que la tarjeta controladora del voltímetro presenta una regleta con 12 puntos de conexión, 4 son salidas usadas para medición y control de la señal, su descripción es la misma que en la tarjeta anterior. En la Figura 3.33 está representado el último bloque de la tarjeta.

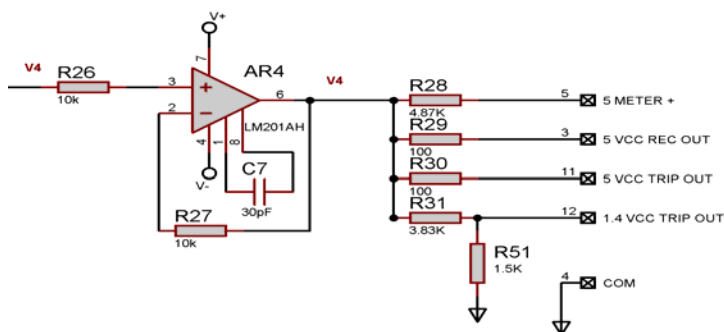


Figura 3.33. Circuito seguidor de tensión y puntos de salida de la tarjeta (Bloque 6). Fuente: [15]

3.2.3 CIRCUITO CONTROLADOR DE LA TARJETA DE DISPARO DE SOBRETENSIÓN/SOBRECORRIENTE

El diagrama de bloques de los circuitos de la tarjeta de sobretensión/sobrecorriente se puede observar en la Figura 3.34.

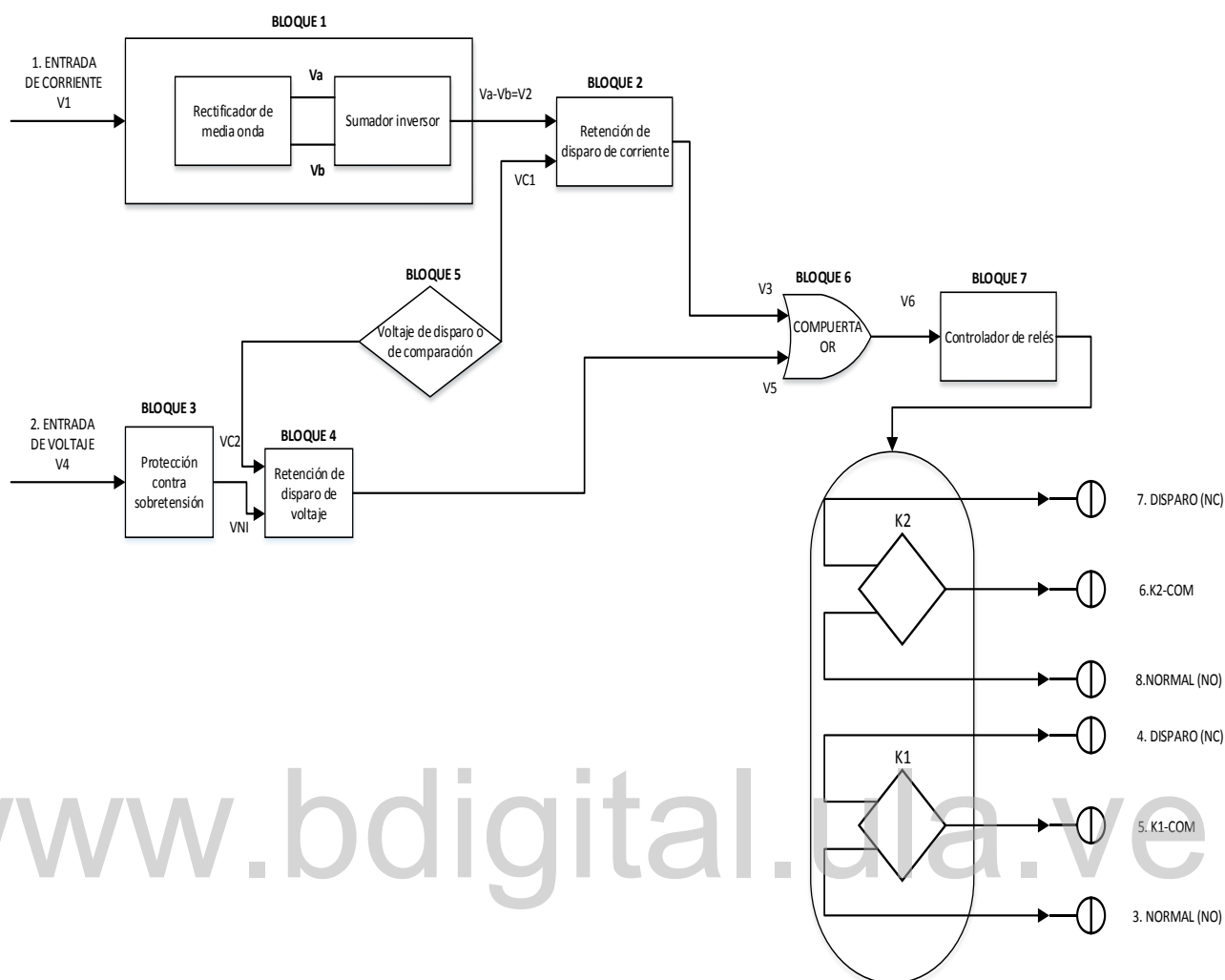


Figura 3.34. Diagrama de bloque de la tarjeta de disparo sobretension/sobrecorriente. Fuente: Elaboración propia.

Esta tarjeta está diseñada para funcionar (abrir el contactor de alto voltaje K 102) siempre que exista una sobretensión o sobrecorriente superior aproximadamente al 110% de cualquier rango de medición. En dicha placa ingresan dos señales de control, una es proveniente de la tarjeta controladora del medidor de corriente, esta viene del pin número 11 en las salidas de la regleta de conexión de terminales de dicha tarjeta, esta salida es denominada disparo, la otra señal procede de la tarjeta controladora del voltímetro, al igual que la otra señal esta también deriva del pin 11 de la regleta de conexión de terminales en la salida de la tarjeta y de igual manera se ha llamado a este pin disparo, pues es su función proporcionar dicha señal de disparo (referirse a la Ilustración 4 para observar estos detalles). Para razonar el funcionamiento en conjunto de

la tarjeta en observación, se verán a continuación los circuitos que recorren ambas señales, cabe destacar que cada uno de los amplificadores operacionales usados en los circuitos son del modelo LM301AH. El esquema circuital completo de la tarjeta de disparo de sobretensión/sobrecorriente se encuentra en la sección de anexos en la Ilustración 3.

La primera señal que se analiza es la proveniente del circuito controlador del medidor de corriente, el primer bloque (Figura 3.35) que se encuentra a su paso es un rectificador de onda completa, este está formado por un rectificador de media onda seguido de un sumador inversor, el rectificador de media onda invierte la parte positiva de la señal de entrada y elimina la parte negativa, luego la señal de entrada es restada con esta señal a través del sumador inversor obteniendo a la salida la onda totalmente rectificificada pero de salida positiva [16].

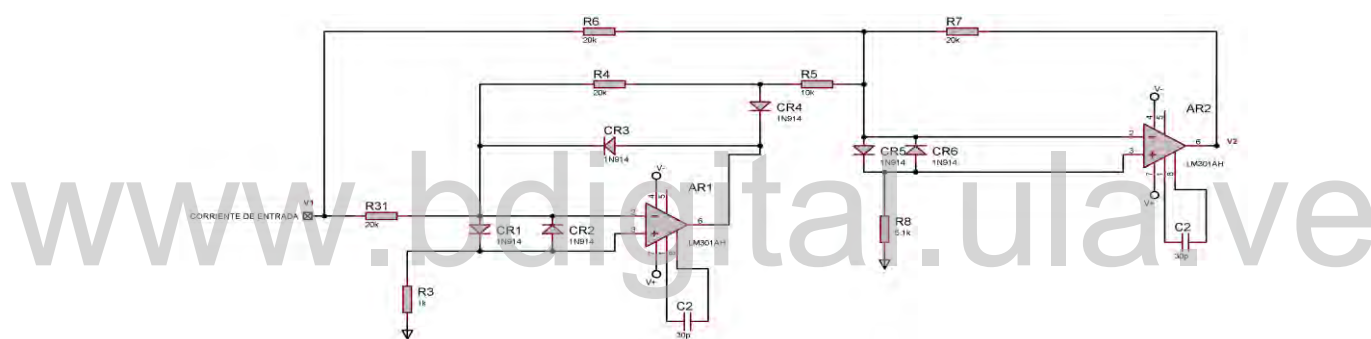


Figura 3.35. Circuito rectificador de onda completa (Bloque 1) Fuente: [15]

De la salida de este bloque la señal continúa e ingresa al bloque 2 (Figura 3.36) que hemos denominado circuito retenedor de disparo de corriente o circuito de retención de disparo, este circuito funciona como un detector de nivel de voltaje es decir al detectarse que la señal de entrada supera el voltaje de comparación en la entrada inversora, el diodo que está dispuesto entre la salida del amplificador operacional AR3 y la entrada no inversora a través de una resistencia, conduce, colocando en la salida el valor de voltaje con que se alimenta el amplificador operacional es decir 15 Vcc (volt en corriente continua), esto se debe a que mientras la señal de entrada no supere el voltaje umbral o de comparación establecido, trabaja como un circuito comparador, luego de dispararse el circuito, ninguna variación en la señal de entrada modificara su valor en la salida, la única forma es resetear el circuito de retención

desconectando su salida y retirando la condición de disparo en la señal de entrada es decir que esta se encuentre por debajo del voltaje de comparación [16].

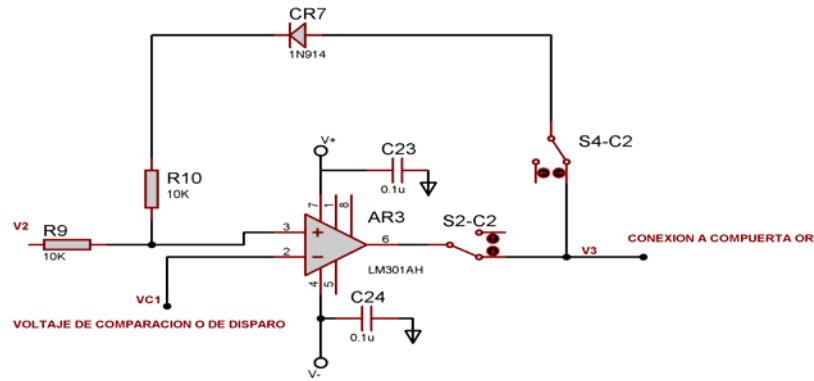


Figura 3.36. Circuito retenedor de disparo de corriente (Bloque 2). Fuente: [15]

La segunda señal que ingresa en esta placa es la proveniente de la tarjeta de control del voltímetro, de la misma manera que la otra señal pero sin pasar por un rectificador de precisión, la señal pasa primero por un circuito de protección contra sobretensiones y luego entra directamente al bloque de retención de disparo de voltaje, cuyo funcionamiento es el mismo que el descrito anteriormente, en la Figura 3.37 se observan estos circuitos.

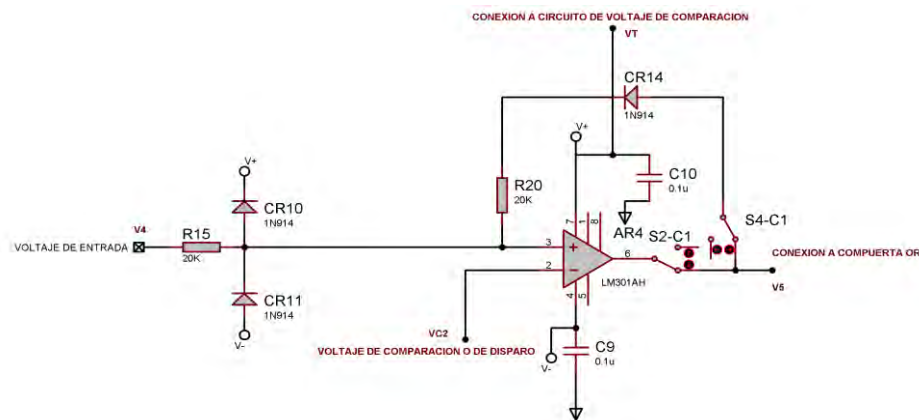


Figura 3.37. Protección contra sobretensión. (Bloque 3) y Circuito retenedor de disparo de voltaje (Bloque 4). Fuente: [15]

Ambos bloques, el de disparo de corriente y el de disparo de voltaje están conectados al mismo voltaje de comparación en la entrada inversora de sus respectivos amplificadores, el cual es dado por un circuito (Figura 3.38) conformado por un arreglo de resistencias diodos y capacitores, el valor del voltaje de comparación es aproximadamente 5.28 V en corriente continua ya que la alimentación de este bloque es continua, también posee una opción llamada visualización de línea roja variable para niveles de disparo de sobretensión y sobrecorriente, pero en nuestro caso no está disponible.

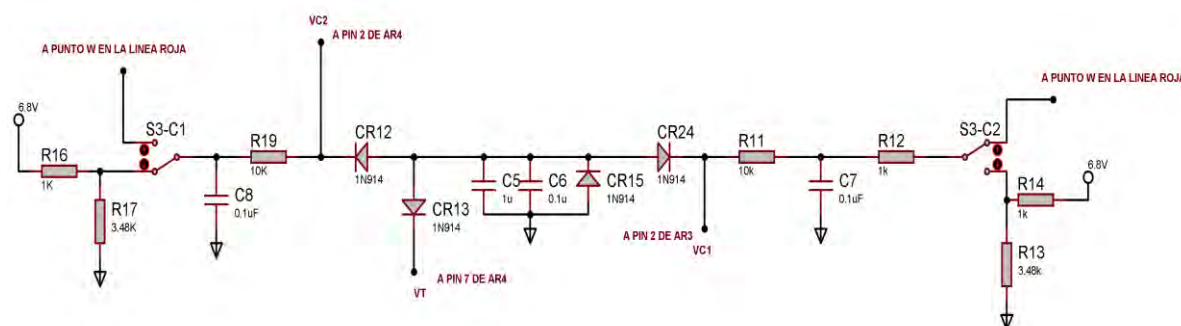


Figura 3.38. Circuito de voltaje de comparación. (Bloque 5). Fuente: [15]

Luego las salidas de los dos bloques de retención de disparo ingresan a una compuerta *OR*, esta compuerta está diseñada usando la simplicidad de la lógica de diodos, en este tipo de compuerta el nivel de voltaje será un 1 lógico si en una o en ambas entradas circula corriente por los diodos, el valor del 1 lógico en este circuito es el valor que arrojan a la salida los amplificadores implementados como retenedores de disparo, este valor es aproximadamente el valor de alimentación de dichos amplificadores que es 15 Vcc.

Esta compuerta activará o desactivará los relés K1 Y K2 a través del circuito controlador de los relés, este bloque tiene un funcionamiento básico, pues en su interior la parte que realiza el trabajo de activación es un transistor PNP 2N2907A, este se encontrará en estado de saturación mientras que en la compuerta *OR* exista un 0 lógico o en otras palabras que ninguno de los diodos este conduciendo, en este estado el transistor deja pasar toda la corriente entre el emisor y el colector manteniendo energizadas las bobinas de los relés K1 y K2 y colocando sus contactos simultáneamente en la posición normal o normalmente abierto.

Pero en el caso de que se produzca un cambio en la compuerta OR, es decir, aparezca a la salida de esta compuerta un 1 lógico el transistor cambiará su estado, pasando a su región de corte, en esta región el transistor no deja circular corriente entre el emisor y el colector cortando de esta manera la alimentación a las bobinas de los relés y en consecuencia desactivando así sus terminales. La Figura 3.39 esboza el circuito explicado.

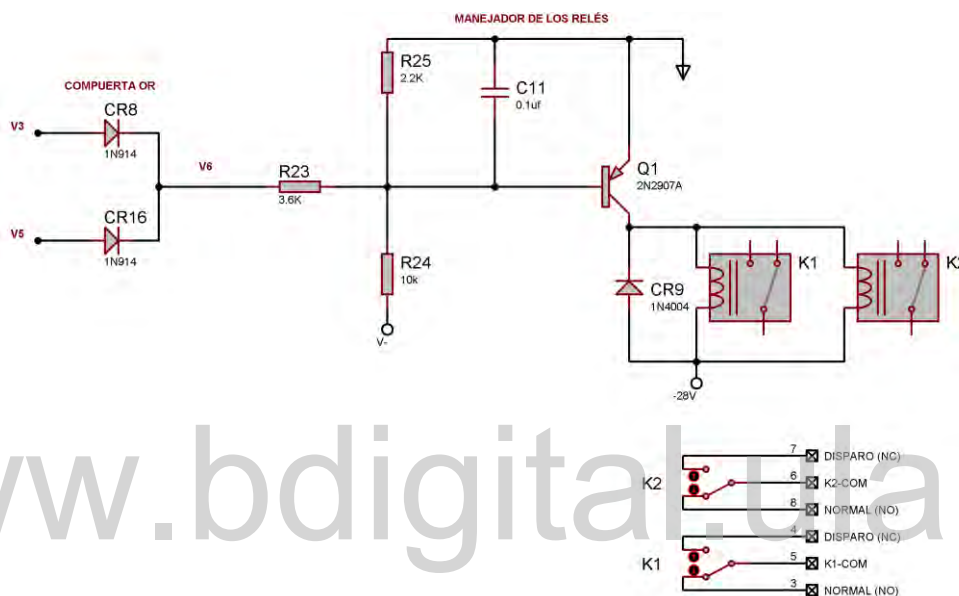


Figura 3.39. Compuerta OR (Bloque 6) y Circuito manejador de los relés en los puntos de salidas de la tarjeta (Bloque 7). Fuente: [15]

Internamente esta tarjeta contiene en algunos de sus circuitos una serie de microsiches los cuales realizan ciertas funciones, las cuales se describen a continuación:

- S1-C1 selector de voltaje
- S1-C2 selector de voltaje
- S2-C1 inhabilitador de disparo de voltaje
- S2-C2 inhabilitador de disparo de corriente
- S3-C1 habilitador de voltaje de línea roja
- S3-C2 habilitador de corriente de línea roja
- S4-C1 inhabilitador del seguro de disparo de voltaje
- S4-C2 inhabilitador del seguro de disparo de corriente

3.3 OPERACIÓN DE LA FUENTE PARA PRUEBAS DE ALTA TENSIÓN

3.3.1 PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

La salida de voltaje de este conjunto de prueba puede ser letal. Al igual que con cualquier equipo de alto voltaje, se debe tener precaución en todo momento y se deben seguir todos los procedimientos de seguridad. Asegúrese de que la muestra esté desenergizada y sea segura antes de realizar las conexiones. Asegúrese de que ninguna persona pueda entrar en contacto con el terminal de salida AV (Alto Voltaje) o cualquier material energizado. Se recomienda el uso de barreras protectoras. Ubique la consola de control en un área lo más seca posible.

Asegúrese de que se mantengan espacios adecuados entre los conductores energizados y la tierra para evitar el efecto de arco eléctrico. Dichos arcos eléctricos accidentales pueden ser un peligro para la seguridad o dañar el equipo que se está probando [15].

3.3.2 CONEXIONES

1. Normal

Conecte la tuerca de mariposa de tierra del conjunto AV a una conexión a tierra segura y de baja resistencia (menos de 5Ω) utilizando el cable de tierra de 25 pies que se suministra con el equipo de prueba. También se debe conectar una varilla de puesta a tierra de seguridad (muy recomendada pero no suministrada) a esta misma resistencia baja. Conecte la tuerca de tierra del conjunto AV al terminal de tierra de la muestra de prueba. Consulte la Figura 3.40.

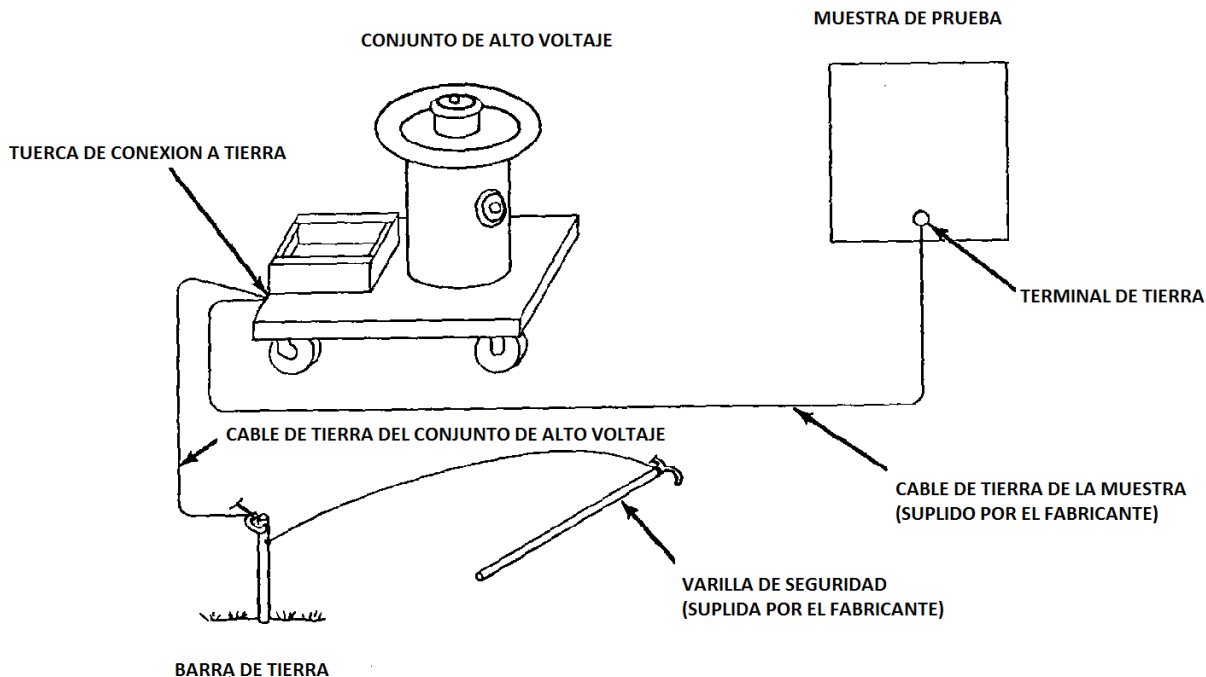


Figura 3.40. Conexión a tierra para pruebas normales. Fuente: [15]

2. Uso del circuito de guarda para mediciones de corriente de salida por debajo de 3 mA.

Las mediciones de corriente de salida se vuelven difíciles por debajo de 3 mA debido principalmente a la corriente capacitiva parásita del conjunto de AV. Para eliminar efectivamente la medición de esta corriente capacitiva parásita, el conjunto de AV se protege de la siguiente manera:

- Conecte la tuerca de guarda del conjunto AV a una conexión a tierra segura y de baja resistencia (menos de 5Ω) utilizando el cable de tierra de 25 pies que se suministra con el equipo de prueba. También se debe conectar una varilla de puesta a tierra de seguridad (muy recomendada pero no suministrada) a esta misma tierra de baja resistencia.
- Conecte la tuerca de tierra del conjunto AV al terminal de tierra de la muestra de prueba.

NOTA: Para obtener mediciones precisas de la corriente de salida, la muestra de prueba debe estar aislada de tierra. El epoxy fenólico o de vidrio (con un espesor mínimo de 1/16") son dos materiales posibles para aislar la muestra de prueba de tierra. Consulte la Figura 3.41.

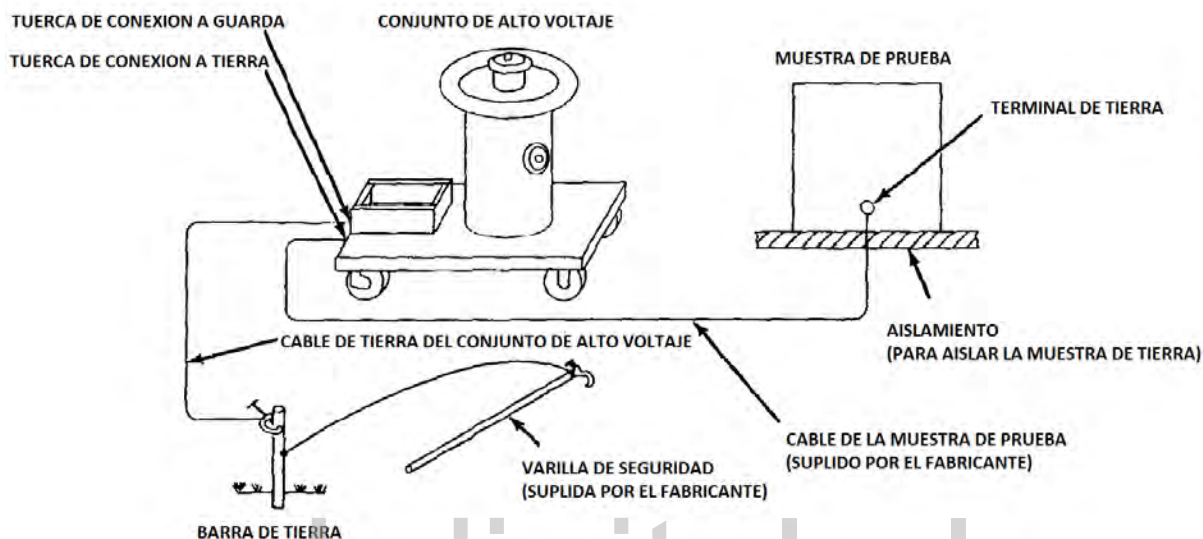


Figura 3.41. Conexión a tierra para mediciones por debajo de 3 mA. Fuente: [15]

3.3.3 PRUEBA DE ALTO VOLTAJE

1. Remover todas las conexiones de seguridad y puestas a tierra de la muestra y el conjunto de AV.
2. Verificar que el interruptor del circuito del control de entrada de alimentación (CB 103) ubicado en el panel posterior de la consola este cerrado.
3. Cierre el interruptor del circuito de alimentación de control (CB 101), la luz de control en la lámpara (DS 101) ahora se encenderá.
4. Control de voltaje manual (estándar): gire el control de voltaje de salida (T 102) totalmente hacia la izquierda hasta posición de inicio cero.
5. Seleccione los rangos de medida de corriente de salida (M 101) y voltaje de salida (M 102) adecuados.

6. Cierre el interruptor del circuito de alto voltaje (CB 102), la luz de control de AV en la lámpara (DS 102) ahora se encenderá.

NOTA: (Peligro), el equipo de pruebas ahora es capaz de producir alto voltaje en la salida.

7. Aumente la tensión de salida lentamente hasta el nivel deseado, girando el control de voltaje de salida (T 102) en sentido horario.
8. Para finalizar la prueba:
 - Gire el control de voltaje de salida (T 102) totalmente en contra de las agujas del reloj hasta la posición del cero inicial.
 - Abra el interruptor del circuito de alto voltaje (CB 102) y el circuito de alimentación de control (CB 101).
 - Aterrizar los terminales de H.V (50 kV y 100 kV) usando la varilla tierra.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 4

REPARACIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACION DEL TRANSFORMADOR DE 100 kV

En este capítulo se describe de forma detallada los pasos seguidos para lograr el acondicionamiento de la fuente de alimentación del transformador de alta tensión a un nivel óptimo de funcionamiento, se muestran los procedimientos realizados para la detección de las fallas, fotografías de las señales analizadas y las reparaciones llevadas a cabo.

4.1 IDENTIFICACIÓN DE FALLAS

Durante esta fase del proyecto se llevó a cabo el proceso de recolección de datos e información acerca del equipo, además de la identificación precisa de las distintas fallas que se presentaban en él. En primer lugar se hizo una inspección generalizada del equipo realizando observaciones y a través de entrevistas al personal técnico del laboratorio y profesores que habían tenido en algún momento algún contacto con el equipo.

Al conocer el funcionamiento y tener algunos indicios de las averías a través de las entrevistas y observación general, se procedió a realizar una serie de pruebas controladas en la condición actual del equipo con la finalidad de conocer de manera más precisa los problemas que afectaban a la fuente de alta tensión.

La prueba controlada inicial consistió en el encendido y en el intento de generar alto voltaje a la salida, probando cada uno de los sistemas involucrados en el mismo, todo esto se ejecutó siguiendo las distintas normas de seguridad y procedimientos expuestos en la sección 3.3.

Al final de estas revisiones y pruebas se pudo constatar que el equipo presentaba los siguientes problemas:

- Fallas en el interruptor del circuito de alto voltaje CB 102.
- Numerosos cables desconectados.
- Imposibilidad de tomar cualquier tipo de medida debido a falla en las tarjetas encargadas de la medición, pues estas al activar el control de voltaje de salida (T 102) la aguja de medida del voltímetro se iba a fondo escala.
- Incapacidad de producir alto voltaje a la salida.

4.2 SOLUCIÓN A LAS FALLAS ENCONTRADAS

4.2.1 FALLAS EN EL INTERRUPTOR DEL CIRCUITO DE ALTO VOLTAJE CB 102

Esta es una de las primeras fallas encontradas en la consola de control de la fuente de alta tensión, este dispositivo es un interruptor de circuito magnético de 3 polos del modelo UPG-211-2REC4-4949-3 de la marca AIRPAX. Este dispositivo de tres polos consiste de tres unidades individuales ensambladas entre sí a través de un sistema mecánico que actúa como un conjunto simultáneamente, un solo suiche o palanca opera los tres polos, dos de las unidades cuentan con un suiche auxiliar y la tercera con una bobina de activación auxiliar.

El interruptor está diseñado para soportar una corriente nominal de 20 A y 250 V CA en cada uno de sus polos principales, 10 A y 250 V CA en los suiches auxiliares y 3 A Y 120 V CA en su bobina auxiliar. En las siguientes figuras se muestra su configuración y esquemas circuitales [19].

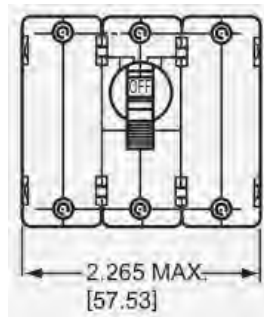


Figura 4.42. Vista Superior Interruptor Magnético de 3 polos. Fuente: [19]

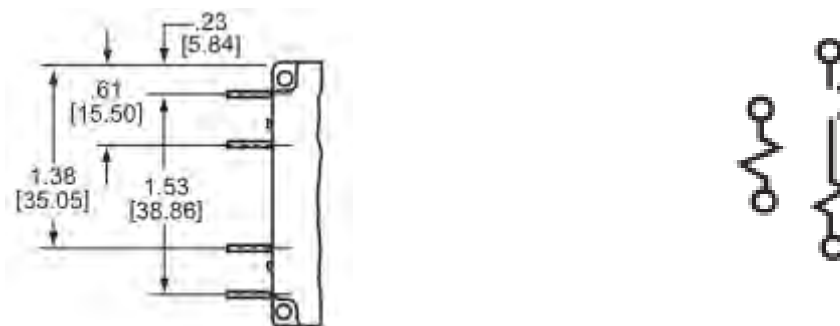


Figura 4.43. Polo del Interruptor con doble bobina o bobina Auxiliar. Fuente: [19]



Figura 4.44. Polo del interruptor en posición de apagado con suiche auxiliar. Fuente: [19]

El problema que presentaba este dispositivo era que no se enclavaba correctamente al pasar la palanca del interruptor, ocasionando que sus contactos no se cierran. Según datos aportados por su fabricante este tipo de dispositivos tienen una vida útil de 10000 operaciones a corriente y voltaje nominal o 50 operaciones con corrientes de 600% en CA o 1000% en CC por encima de

la corriente nominal y con voltaje nominal seguido de 6000 operaciones a voltaje y corriente nominal [19].

Normalmente ante este tipo de averías la acción recomendada es la sustitución del interruptor por uno nuevo pues debido a su antigüedad es evidente que su tiempo de vida útil ha terminado, aunque se cuenta con la disponibilidad del mismo en el mercado, este no pudo ser sustituido debido a la falta de recursos económicos y al alto costo de la unidad, por lo que para dar solución al problema se optó por la reparación del mismo, hasta colocarlo en condiciones funcionales.

Para iniciar el proceso de reparación de este dispositivo se procedió a la apertura de su carcasa con la finalidad de observar y descubrir el problema que presentaba en sus partes internas tanto mecánicas como eléctricas, se logró constatar que el mal funcionamiento del mismo provenía principalmente de 3 fallas:

- La primera era la ruptura de una pieza bastante pequeña del ensamblaje mecánico de uno de los tres polos, específicamente el polo que presenta la bobina auxiliar. En la Figura 4.45 se observa este polo del interruptor sin su cubierta.



Figura 4.45. Polo del interruptor de doble bobina desarmado. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la figura, este polo consta de 4 contactos, de los cuales 2 son de la bobina principal y el par de contactos internos de la bobina auxiliar, como se dijo anteriormente este polo presentó una pieza partida, se intentó hacer una sustitución de la pieza pero esta era muy

pequeña y difícil de rearmar en el mecanismo por lo cual no se pudo realizar ninguna reparación en este polo, al final se extrajo todo el mecanismo y se selló sin el mismo.

- La segunda y tercera falla eran la misma, pues en ambos polos los contactos internos se encontraban sulfatados y corroídos, producto del uso y de las chispas que se originan en su activación y desactivación. En la Figura 4.46 y la Figura 4.47 se muestra el mecanismo interno de estos 2 polos.



Figura 4.46. Polo del interruptor sin la carcasa con suiche auxiliar en su ubicación normal.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.47. Polo del interruptor sin la carcasa con suiche auxiliar desacoplado. Fuente: Elaboración propia.

En las figuras se puede observar que estos dos polos están compuestos por un devanado principal y un suiche auxiliar, el devanado ejerce su función de protección ante corrientes superiores para las cuales fue diseñado (20 A), mientras el suiche forma parte integral de este conjunto multipolar, aislado eléctricamente del circuito de protección, el suiche trabaja en unísono con los contactos principales de los polos es decir, los contactos del suiche se activarán o desactivarán dependiendo de la posición del interruptor, en otras palabras este provee información a una locación remota acerca del estado en que se encuentra el interruptor (encendido/apagado).

El primer paso para dar solución a este tipo de falla fue lijar y limpiar de manera profunda los contactos sulfatados y posteriormente enclavar el interruptor en posición de activado para comprobar la continuidad entre los contactos de los polos, confirmando de esta manera su correcto funcionamiento.

Al haber finalizado las actividades de reparación, se selló el interruptor en su carcasa quedando de esta manera 2 polos reparados de los 3 disponibles que tenía anteriormente el interruptor, el polo del interruptor que no pudo ser reparado es el que contiene la bobina auxiliar. De este modo solo quedaron corregidas las fallas que evitaban tanto el enclavamiento de los 4 contactos así como la falla que no permitía la conducción de corriente a través de las bobinas principales de los polos que contenían los suiches auxiliares.

4.2.2 FALLAS EN LAS TARJETAS DE LA CONSOLA DE CONTROL

Debido a que toda señal proveniente del conjunto de alto voltaje así como la activación del mismo es procesada por la consola de control, fue primordial darle solución a los problemas presentados en ella. Otro de los problemas que presentaba la consola de control era que al activar el control de voltaje de salida T 102 la aguja del medidor de voltaje en cualquier escala de medición se desplazaba al fondo de la escala.

Con la finalidad de conocer de manera precisa el origen del mal funcionamiento de la consola de control se realizó un análisis de cada uno de los circuitos que componen las tarjetas. Como se mencionó en el capítulo anterior estas tarjetas están compuestas por circuitos que cumplen funciones preestablecidas cada uno, por lo que haciendo uso de diagramas de bloques y simulaciones para cada tarjeta se realizó el estudio de manera más ordenada.

Además cabe destacar que estas tarjetas han pasado por diversas reparaciones a manos de los técnicos en años anteriores, por lo que es de suponer que han sufrido modificaciones que si no se han realizado correctamente pueden estar afectando de manera directa el funcionamiento del equipo.

- **ANÁLISIS DE LAS TARJETAS**

- 1. VERIFICACIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE CADA TARJETA**

Cada tarjeta de la consola de control cuenta con un circuito de alimentación propia que se encarga de proporcionar el voltaje en corriente continua que necesite cualquier elemento de las tarjetas. El estudio se inició por la inspección del correcto funcionamiento de este circuito. Se realizaron varias medidas en distintos puntos específicos de cada circuito para comprobar su correcto funcionamiento.

- **Tarjeta Controladora del Voltímetro**

En la Figura 4.48 Se observa el diagrama eléctrico del circuito de alimentación de la tarjeta del voltímetro.

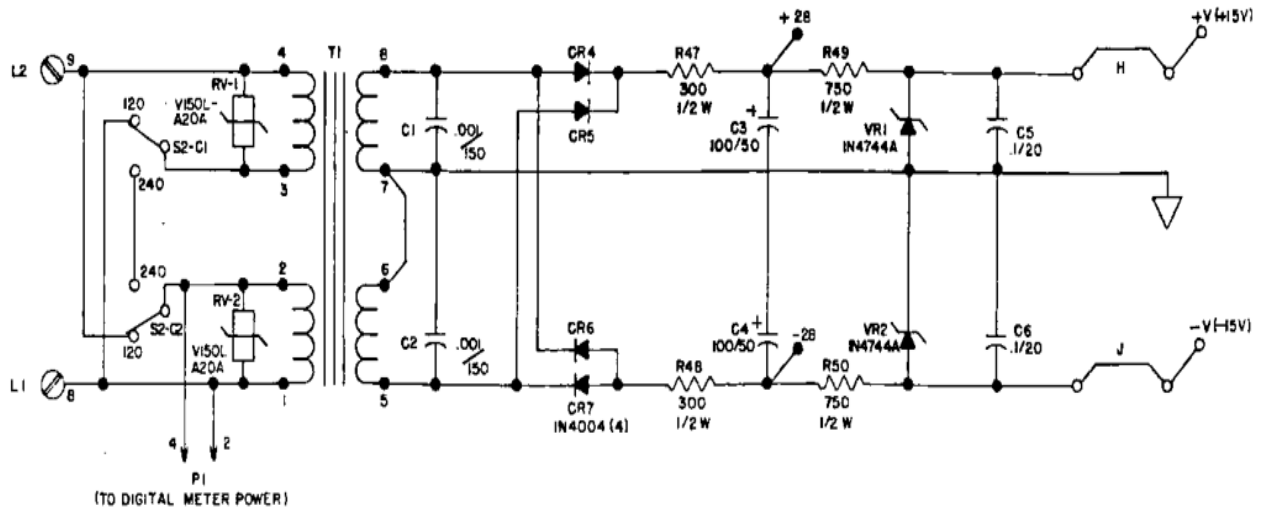
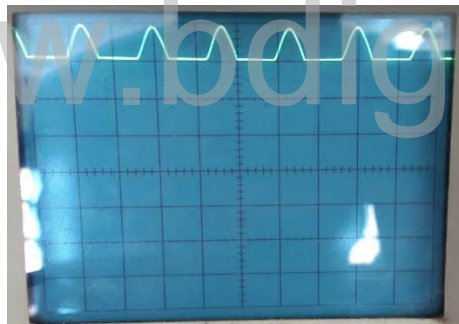


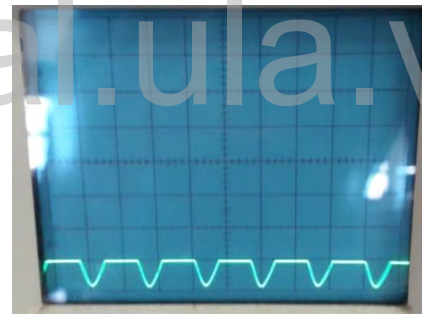
Figura 4.48. Circuito de Alimentación tarjeta del voltímetro. Fuente: [15]

Medidas realizadas en la fuente de alimentación de la Tarjeta Controladora de Voltímetro:

- a. Salida positiva y negativa puente rectificador:



(a)



(b)

Figura 4.49. a) Salida rectificador media onda positiva b) Salida rectificador media onda negativa. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.49 se pueden observar las señales de salida del puente rectificador la imagen a) corresponde a la medida en el punto donde se unen los cátodos de los diodos CR4 Y CR5 y la imagen b) es la observación realizada en el punto donde se unen los ánodos de los diodos CR6 y CR7, en ambas imágenes las observaciones fueron tomadas por un osciloscopio GW Instek gos-620 en la escala de 5 V/div (volt/división).

- b. Voltaje en los puntos de salida de ± 28 V no regulados

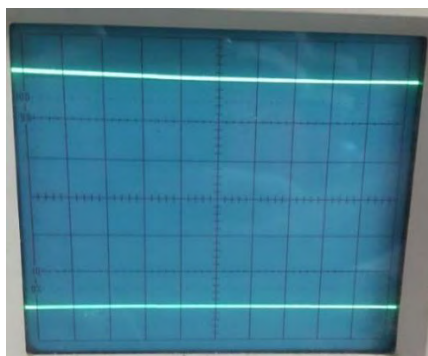
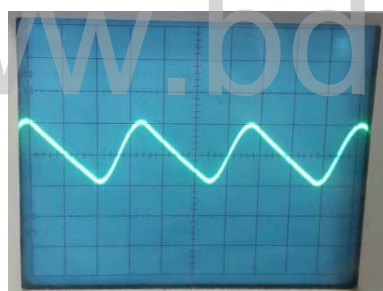
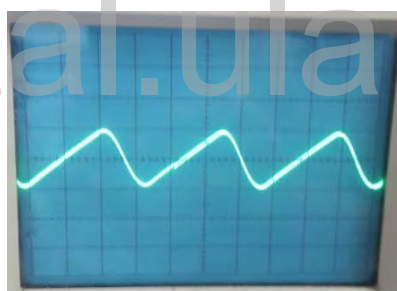


Figura 4.50. Voltaje de salida en los puntos +28 V y -28 V del diagrama eléctrico. Fuente: Elaboración propia

En estos puntos el voltaje de la señal en continua debería ser de +28 V y -28 V, en la Figura 4.50 se puede observar que esto no se cumple pues el voltaje en ambos es más bajo aproximadamente 15 V en el punto de +28 V y -15 V en el punto de -28 V esta medida es tomada en la escala de 5 V/div. El voltaje de rizado de estos 2 puntos es mostrado en la Figura 4.51.



(a)



(b)

Figura 4.51. a) Voltaje de rizado en el punto +28 V b) Voltaje de rizado en el punto -28 V. Fuente: Elaboración propia.

El voltaje de rizado de ambos puntos fue medido en el osciloscopio en la escala de 10 mV/div (milivolt/división), las señales fueron llevadas al origen para observar de mejor manera la medida de voltaje de rizado, como se nota en las figuras ambas presentan un voltaje de rizado de 20 mV. En estos puntos en particular se debe destacar que existe una diferencia grande entre el voltaje que debería existir según el circuito mostrado por el fabricante y el medido. Esto se debe a que el transformador no está proporcionando la tensión necesaria. A pesar de este inconveniente se comprobó que esta alimentación de +28 Vcc en esta tarjeta solo es utilizada

para alimentar la bobina del relé K1 (Figura 4.52) ubicado en la última etapa del circuito, la cual con el voltaje medido de +15 Vcc trabaja correctamente.

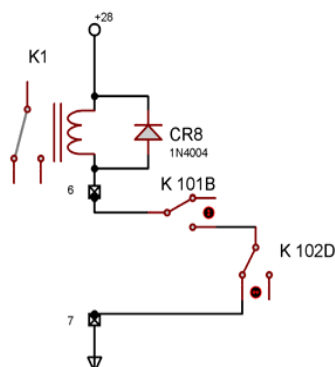
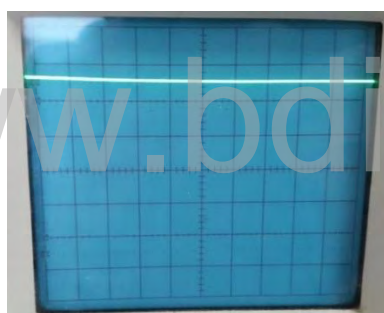
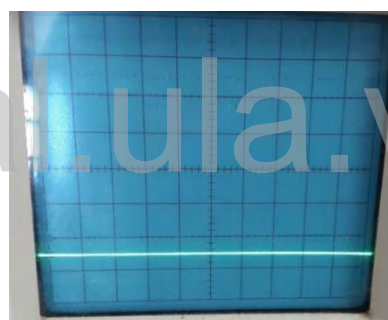


Figura 4.52. Relé K1. Fuente: Elaboración propia.

c. Voltajes en los puntos de salida +V(+15) y -V (-15)



(a)



(b)

Figura 4.53. a) Salida de voltaje en el punto +V(+15) b) Salida de voltaje en el punto -V(-15). Fuente: Elaboración propia.

El voltaje en estos puntos según el diagrama eléctrico proporcionado por el fabricante debe ser de ± 15 Vcc, las imágenes de la Figura 4.53 muestran que el voltaje en esos puntos es un poco menor al estipulado, teniendo valores de 12,6 Vcc para el punto positivo y -12,6 Vcc para el negativo. Estos dos puntos de alimentación principalmente son los encargados de polarizar los distintos amplificadores operacionales que componen las etapas de la tarjeta encargada de la medición del voltímetro. Aunque en estos puntos el voltaje es un poco menor al estipulado por el fabricante cumple correctamente con su función de polarización de los circuitos, esta reducción del voltaje al igual que en el caso anterior se debe principalmente al transformador de alimentación y al desgaste de los componentes electrónicos que integran el circuito rectificador.

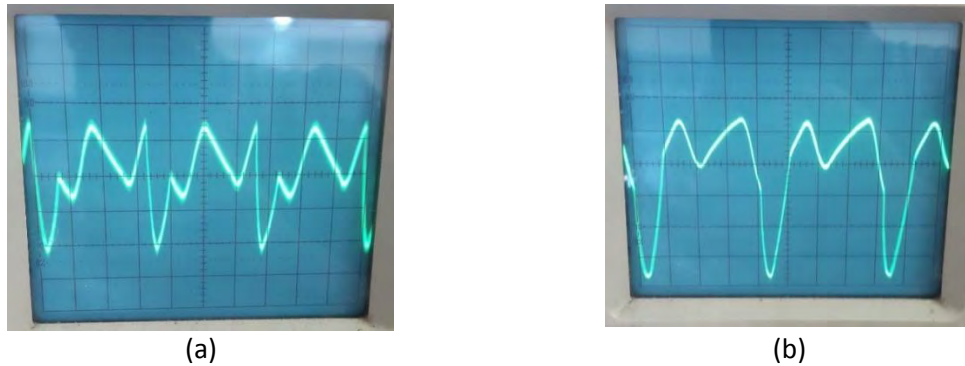


Figura 4.54. a) Voltaje de rizado en el punto +V(+15) b) voltaje de rizado en el punto -V(-15).
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.54 muestra los voltajes de rizado en ambos puntos, como se puede notar las formas de onda que presenta el voltaje de rizado en los puntos +15 V y -15 V son un poco distintas a las que debería presentar normalmente, esto es debido a que los diodos zener VR1 Y VR2 encargados de la regulación del voltaje a la salida están defectuosos y contribuyen a la disminución del voltaje y a las formas de onda mostradas.

○ Tarjeta Controladora del Medidor de Corriente:

La Figura 4.55 muestra el diagrama eléctrico del circuito de alimentación de la tarjeta del medidor de corriente.

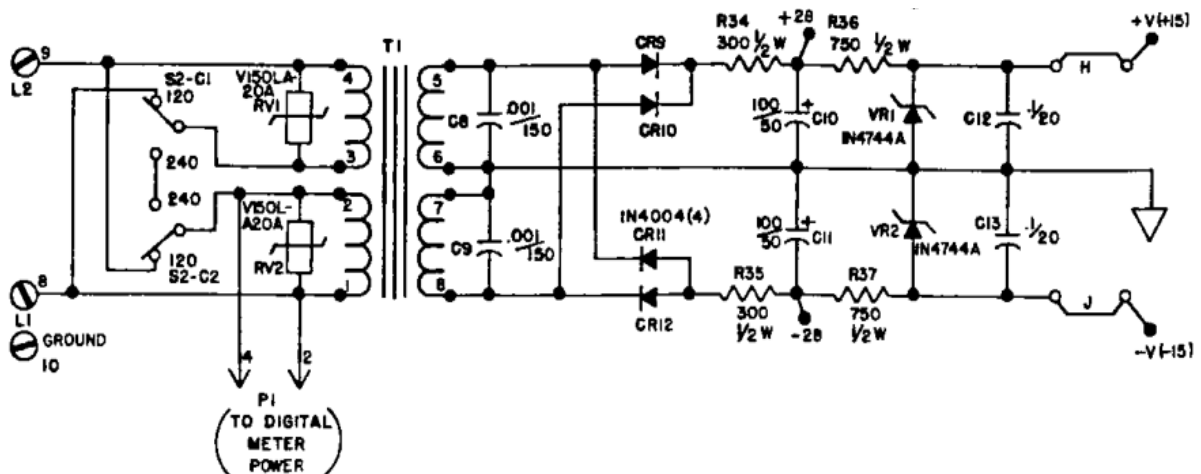


Figura 4.55. Circuito de alimentación tarjeta del medidor de corriente. Fuente: [5]

Medidas realizadas en la Tarjeta controladora del Medidor de Corriente:

- a. Salida positiva y Negativa puente Rectificador

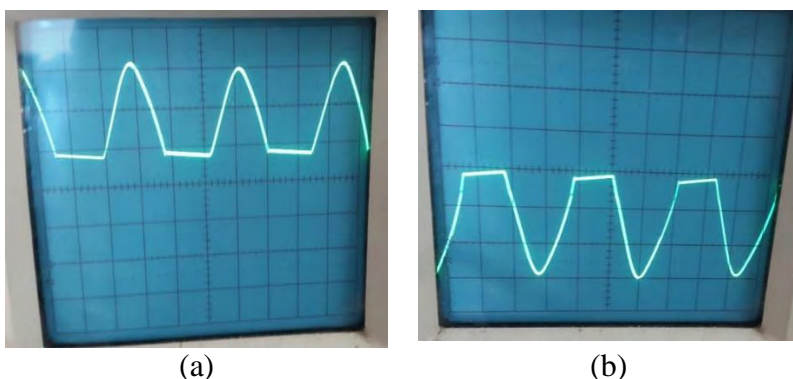


Figura 4.56. a) salida de rectificador media onda positiva b) salida rectificador media onda negativa. Fuente: Elaboración propia.

Las señales mostradas en la Figura 4.56 corresponden a las medidas tomadas en la unión de los cátodos de los diodos CR9 y CR10 y en la unión de los ánodos de los diodos CR11 Y CR12, ambas en la escala de 5 V/div, el valor cero de referencia del osciloscopio fue trasladado hasta -20 V en la señal de salida de media onda positiva y a +20 V en la señal de media onda negativa, con la finalidad de poder observar ambas señales ya que sobrepasaban el rango de la escala máxima del osciloscopio.

- b. Voltajes en los puntos de salida ± 28 V no regulados

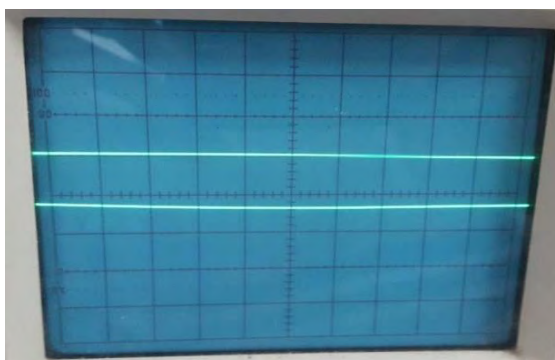


Figura 4.57. Voltaje de salida en los puntos + 28 V y -28 V del diagrama eléctrico. Fuente: Elaboración Propia.

La salida requerida en estos puntos es de ± 28 V de corriente continua, para poder observar estas medidas en el osciloscopio se corrió el punto de referencia de medida hasta los +20 V para la

señal negativa y hasta los -20 V para la señal positiva. Las medidas realizadas son las que se ven en la Figura 4.57 la señal superior corresponde a la señal positiva y tiene un valor de 25 V y la inferior al punto de salida negativo con un valor de 22 V , las dos señales se encuentran en la escala de 5 V/div . Al igual que en el circuito de alimentación de la tarjeta del voltímetro esta presenta una reducción del voltaje comparado con el que debería tener en esos puntos según el diagrama. Como se dijo anteriormente la causa de esta disminución se debe al transformador del circuito alimentador de la tarjeta de corriente añadiéndole que los diodos del circuito rectificador, los capacitores y resistencias han cumplido con su vida útil requiriéndose un cambio de los mismos. Al fijarse en el diagrama eléctrico de la tarjeta (referirse a la sección de anexos Ilustración 2) cabe destacar que estos puntos son los encargados de alimentar las bobinas de los relés K1 y K2 de la tarjeta del medidor de corriente, pero según el nivel de voltaje medido en el osciloscopio trabajan con normalidad no presentando ningún inconveniente.

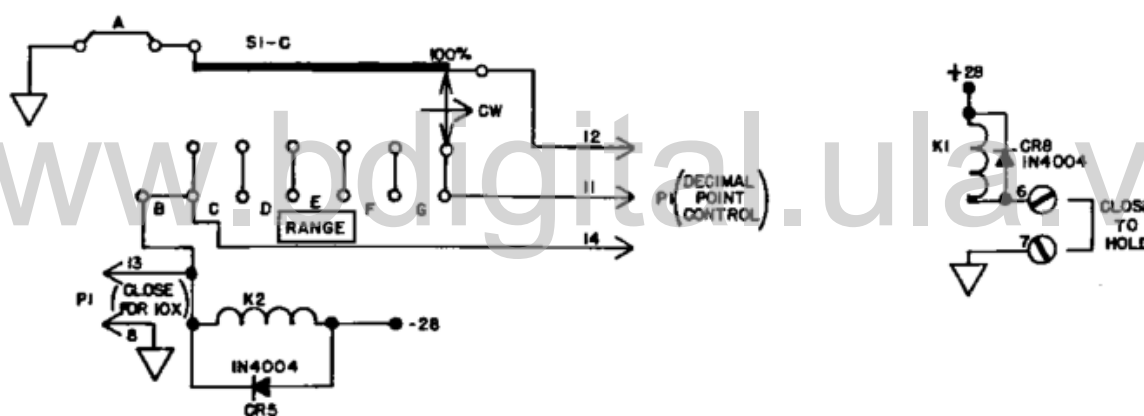


Figura 4.58. Bobinas de los relés K1 Y K2- Fuente: [15].

La bobina del relé K2 es activada cuando el punto decimal de control del circuito digital de medición está disponible pero en este caso el equipo no tiene esa función, pues esta es opcional por lo que este siempre estará en su condición inicial, la bobina del relé K1 se encuentra en la antepenúltima etapa del circuito de la tarjeta y se comprobó su funcionamiento al nivel del voltaje medido uniendo los pines 6 y 7 que se muestran en la Figura 4.58.

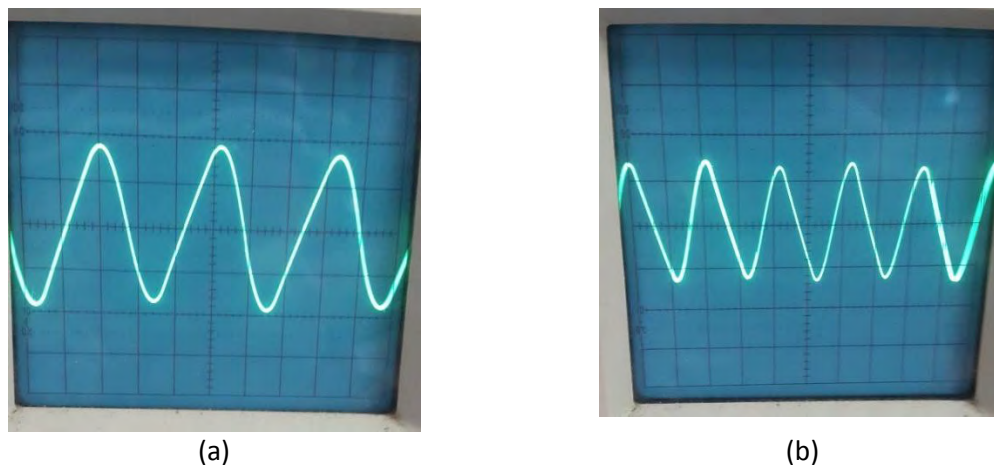


Figura 4.59. a) Voltaje de rizado en el punto +28 V b) Voltaje de rizado en el punto -28 V. Fuente: Elaboración propia.

Los voltajes de rizado mostrados en la Figura 4.59 son medidos en la escala de 0,2 V/div, el rizado en estos puntos es un poco alto y podría ser disminuido sustituyendo los capacitores de suavizado C10 Y C11.

c. Voltajes en los puntos de salida +V(+15) y -V (-15)

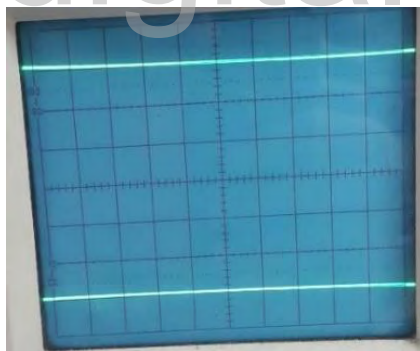


Figura 4.60. Voltaje de salida en los puntos +15 V y -15 V del diagrama eléctrico. Fuente: Elaboración propia.

El voltaje medido con el osciloscopio es el correcto pues coincide con el valor indicado en el diagrama, la escala en la cual se encuentran es la de 5 V/div, la señal de continua superior mostrada en la Figura 4.60 equivale a + 15 V y la inferior al punto -15 V coincidiendo ambas con el valor especificado. La forma de onda del voltaje de rizado en estos puntos es la mostrada en la Figura 4.61.

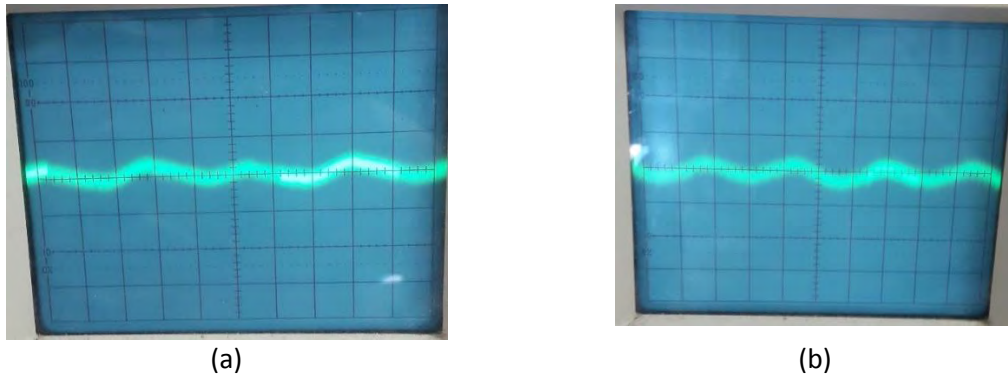


Figura 4.61. a) Voltaje de rizado en el punto +15 V b) Voltaje de rizado en el punto -15 V.
Fuente: Elaboración propia.

El voltaje de rizado en estos puntos está bastante suavizado esto se debe al correcto funcionamiento de los capacitores de suavizado y a la buena regulación del voltaje hecha por los diodos zener a la salida, ambas medidas están en la escala de 10 mV/div y como se puede observar el voltaje de rizado es de un par de milivolt en los dos puntos medidos.

○ **Tarjeta de disparo de sobretensión y sobrecorriente:**

El esquema eléctrico del circuito alimentador de la tarjeta de disparo de sobretensión y sobrecorriente es el mostrado en la Figura 4.62.

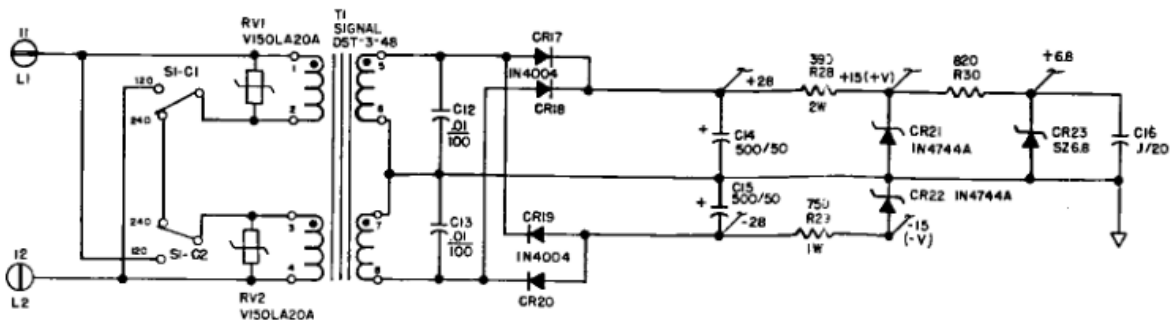


Figura 4.62. Circuito de alimentación tarjeta de disparo de sobretensión y sobrecorriente.
Fuente: [15]

Medidas realizadas en la Tarjeta disparo de sobrecorriente y sobrevoltaje:

- a. Voltajes en los puntos ± 28 V no regulados

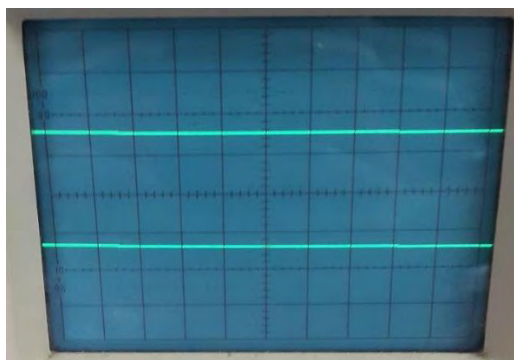
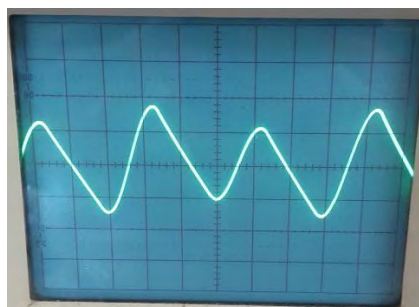


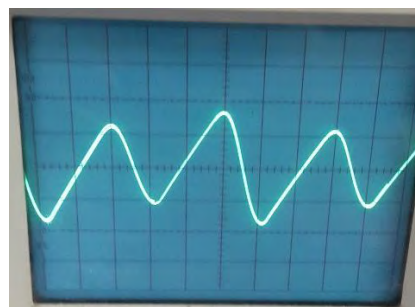
Figura 4.63. Voltaje de salida en los puntos +28 V y -28 V. Fuente: Elaboración propia.

Para poder observar estas medidas en el osciloscopio la señal de referencia o cero se encuentra en -20 V para la salida +28 V y +20 V para la salida negativa -28, la escala usada es de 5 V/div, las medidas tomadas fueron 27,5 Vcc para la señal en el punto +28 y 27 Vcc para la señal en el punto indicado en el diagrama como -28, como se ve en la Figura 4.63 los valores medidos son bastantes cercanos a los valores indicados por el fabricante, estas salidas de voltaje alimentan las bobinas de los relés K1 y K2 ubicados en el bloque de la tarjeta encargado de manejar la activación de los relés (para observar este detalle ver la Ilustración 3 en la sección anexos).

www.bdigital.ula.ve



(a)



(b)

Figura 4.64. a) Voltaje de rizado en el punto +28 V b) Voltaje de rizado en el punto -28 V. Fuente: Elaboración propia.

La escala usada para medir los voltajes de rizado de la Figura 4.64 es la de 0,1 V/div, como se ve en las imágenes la Figura 4.64 (a). Tiene un voltaje de rizado de aproximadamente 0,37 V y la Figura 4.64 (b). Un voltaje de rizado aproximado de 0,36 V.

- b. Voltajes en los puntos de salida +V(+15) y -V (-15)

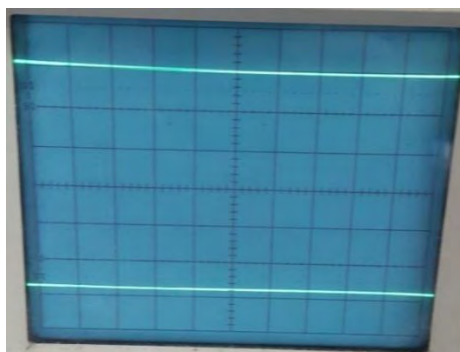
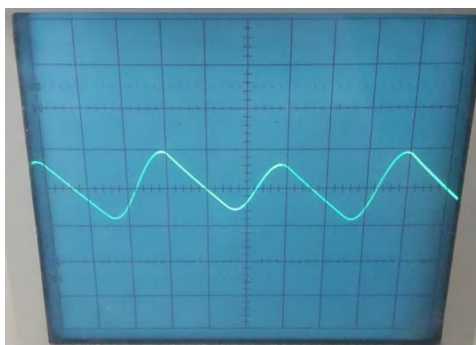
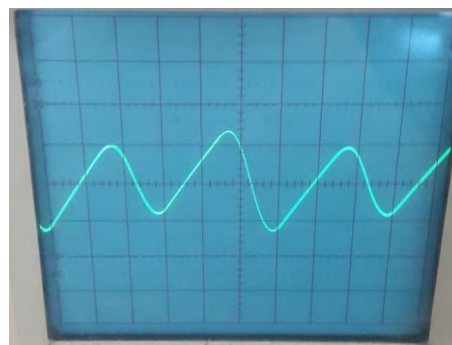


Figura 4.65. Voltajes en los puntos de salida +V(+15) y -V (-15). Fuente: Elaboración propia.

El voltaje medido en la salida +15 V del diagrama es el que se observa en la parte superior de la Figura 4.65 este tiene un valor de 15 Vcc en el osciloscopio y el voltaje en la parte inferior que es el referente a la salida -15 V tiene un valor de 13,8 Vcc aproximadamente, ambos voltajes son cercanos a los indicados por el manual del fabricante, estos voltajes son utilizados para la polarización de los amplificadores operacionales de esta tarjeta y un par de diodos limitadores de voltaje.



(a)



(b)

Figura 4.66. a) Voltaje de rizado en el punto +15 b) Voltaje de rizado en el punto -15. Fuente: Elaboración Propia.

La escala de voltaje usada en el osciloscopio para ambas medidas es de 0,1 V/div el voltaje de rizado pico a pico en el punto +15 es de 0,2 V y 0,28 V en el punto -15, ambos valores se encuentran dentro de un rango aceptable. La Figura 4.66 muestra estas medidas.

- c. Voltaje en el punto +6,8 V

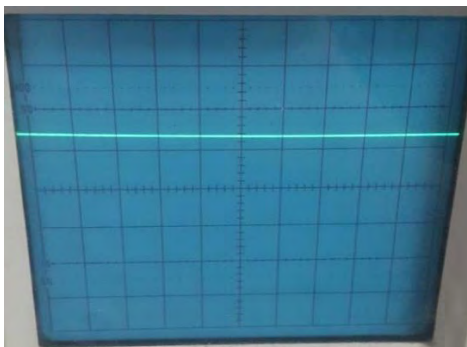


Figura 4.67. Voltaje en el punto +6,8 V. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.67 se muestra la medida del voltaje en corriente continua del punto +6,8 V la cual coincide con el número indicado en el diagrama, la escala en la cual fue tomada la misma es la de 5 V/div.



Figura 4.68. Voltaje de rizado en el punto +6,8. Fuente: Elaboración propia.

La escala en la que se encuentra la medida realizada al voltaje de rizado es de 0,5 V/div, se puede observar en la Figura 4.68 que el mismo es bastante bajo dando muestra que el suavizado y la regulación de la señal es buena, este voltaje se encarga de suplir al bloque de la tarjeta encargado de establecer el voltaje de disparo o de comparación.

2. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS TARJETAS

Durante este proceso ya conociendo el funcionamiento de los circuitos que integran cada tarjeta y habiendo simulado y esquematizado en bloques las etapas que componen las mismas, se

procedió a la verificación del correcto funcionamiento de las etapas a través de diversas pruebas. Por medio de estas se fueron deduciendo sistemáticamente los circuitos involucrados en la falla para luego proceder de manera específica en su solución.

Para realizar estas pruebas se utilizó un generador de voltaje de corriente alterna y continua Harrison 6920B de la marca HP (Hewlett Packard), un multímetro digital Víctor 70D y un osciloscopio Gw Instek Gos-620.

○ **Pruebas de tratamiento de la señal:**

Procedimiento realizado para cada tarjeta:

- Se conectó el generador de señales en las entradas de cada tarjeta, se usó una señal de corriente alterna cuidando de no llevar el medidor de voltaje o de corriente hasta fondo escala dependiendo de la tarjeta analizada.
- Se conectó el osciloscopio en las entradas y salidas de cada etapa y se observó el comportamiento.
- Se compararon los resultados teóricos de funcionamiento de cada etapa con los medidos.

Al finalizar esta prueba se observó que cada etapa de las tarjetas cumplía con su funcionamiento normal para el que fueron diseñadas, pero se debe destacar que esta prueba fue hecha sin activar el control de voltaje de salida T 102, pues al activar este la aguja del medidor de voltaje se iba a fondo de escala.

Al hacer las mismas medidas con T 102 activado se observó que las etapas de las tarjetas trabajaban normalmente, pero el voltaje en el último bloque del circuito de la tarjeta del voltímetro subía lentamente hasta superar el valor máximo del voltaje de fondo escala, por lo tanto se dedujo que esta falla provenía de alguno de los componentes de esta tarjeta. Para comprender de mejor manera que ocurría se enfocó la atención en esta última etapa y se observó que la misma cuenta con un contacto del relé K1 normalmente cerrado, este se abre si los pines 6 y 7 de la tarjeta del voltímetro se unen a través de los contactos de los relés K 101 y K 102 específicamente los contactos K 101B Y K 102D como se dijo en la sección 3.2.1, de esta

manera y conociendo que esta última etapa funciona como circuito retenedor, el voltaje a la salida debería ser el último observado, es decir la aguja del medidor de voltaje debería permanecer estática en el punto de la escala en el cual se activa el relé K1, pero como se dijo anteriormente esto no ocurría.

○ **Pruebas de *offset*:**

Estas pruebas se realizaron para comprobar que el voltaje *offset* de los amplificadores no estuviese afectando de manera significativa los circuitos de la tarjeta del voltímetro que es la tarjeta en la cual se prevé está el desperfecto. El primer paso para realizar estas mediciones fue aterrizar las entradas de la tarjeta del voltímetro, es decir los bornes de conexión 1 y 2, y posteriormente se midieron los voltajes de entrada y salida en cada amplificador operacional.

En la siguiente tabla se muestran los valores de voltaje en continua medidos

Tabla 4.1. Valores *offset* Amplificador Tarjeta del Voltímetro

AMPLIFICADOR	PINES	VOLTAJE CD(mV)
AR1	Pin 3 (Entrada no inversora)	0,4
	Pin 2 (Entrada inversora)	0,42
	Pin 6 (Salida)	0,4
AR2	Pin 3 (Entrada no inversora)	0,2
	Pin 2 (Entrada inversora)	0,2
	PIN 6 (Salida)	1,5
AR3	Pin 3 (Entrada no inversora)	4,9
	Pin 2 (Entrada inversora)	4,9
	PIN 6 (Salida)	8,2
AR4	Pin 3 (Entrada no inversora)	8,2
	Pin 2 (Entrada inversora)	82
	PIN 6 (Salida)	362
AR5	Pin 3 (Entrada no inversora)	72,2
	Pin 2 (Entrada inversora)	72,2
	PIN 6 (Salida)	72,2

Como se muestra en la tabla los valores más altos de voltaje de *offset* se observan en los últimos 2 amplificadores de la tarjeta, a pesar de no tener ningún tipo de señal a la entrada. Esto indicó de antemano que en este último bloque del circuito podría encontrarse el problema.

De igual manera se hicieron medidas uniendo los bornes 6 y 7 de la tarjeta los cuales como se dijo anteriormente activan el relé K1, todos los amplificadores conservaron sus valores en sus pines excepto AR4 Y AR5 en los cuales el voltaje en sus pines subió lentamente y en la salida de AR5 por arriba del máximo de la escala en la que se encontraba.

Para descartar que alguna posible unión o corte de pistas en la tarjeta estuviese ocasionando esta variación de voltaje se hizo una revisión visual con el uso de una lupa y se siguieron cada una de las pistas que componen la tarjeta no encontrando ninguna anomalía en esta.

○ **Pruebas en el último bloque de la tarjeta del voltímetro:**

En este punto ya se conocía por las pruebas anteriores que la falla se encontraba en algún componente del último bloque de la tarjeta del voltímetro, por lo que se hicieron mediciones de voltaje extrayendo los amplificadores AR4 y AR5. En la Figura 4.69 se muestra como queda el circuito después de extraer estos componentes.

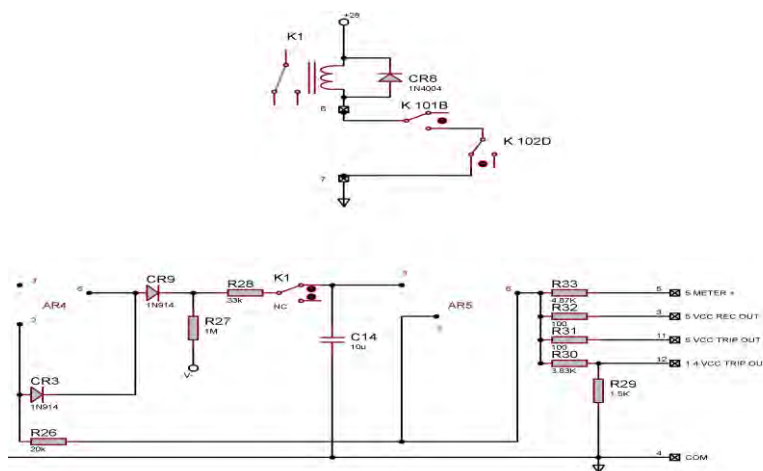


Figura 4.69. Última etapa del circuito controlador del voltímetro sin los amplificadores AR4 Y AR5. Fuente: Elaboración propia.

Con la finalidad de descartar que el problema fuese debido al capacitor C14 que es el único componente que puede almacenar y descargar energía en este circuito, y a su vez por otro lado comprobar que ningún otro punto de esta etapa tuviese alguna conexión errónea se realizaron mediciones de voltaje en corriente continua tanto con los bornes 6 y 7 unidos como abiertos en el capacitor C14 y en los puntos en los cuales van los pines 2, 3 y 6 de los amplificadores operacionales.

Tabla 4.2. Mediciones en AR4, AR5 Y C14 con los bornes 6 y 7 abiertos

ELEMENTO	PIN O PUNTO DE MEDICION	VOLTAJE (V)
AR4	3	-0,015
	2	-0,317
	6	-0,714
AR5	3	-1,105
	2	-0,067
	6	-0,067
CAPACITOR (C14)	C14	-1,105

Tabla 4.3. Mediciones en AR4, AR5 Y C14 con los bornes 6 y 7 cerrados.

ELEMENTO	PIN O PUNTO DE MEDICION	VOLTAJE (V)
AR4	3	-0,013
	2	-0,312
	6	-0,706
AR5	3	Descarga desde (-1,105)
	2	-0,066
	6	-0,066
CAPACITOR (C14)	C14	Descarga desde (-1,105)

En las tablas 4.2 y 4.3 se muestran los valores de las medidas tomadas con los bornes 6 y 7 abiertos y cerrados, al observar estos valores se comprobó de manera efectiva que el problema del aumento del voltaje a la salida y como consecuencia el desplazamiento de la aguja de medición a fondo de escala al activar el control de voltaje T 102 no proviene de ninguna falla ocasionada por el capacitor u otro elemento distinto a los amplificadores operacionales, con K1 abierto las medidas en C14 se mantienen pero al medir se empieza a descargar por la conexión del multímetro demostrando así que este trabaja de manera correcta, por lo tanto la única manera posible que ocurriese la falla antes mencionada es que alguno de los dos amplificadores

operacionales estuviese trabajando de manera incorrecta. Para resolver finalmente este problema se probó nuevamente la última etapa de la tarjeta pero esta vez con solo uno de los amplificadores operando en su posición normal.

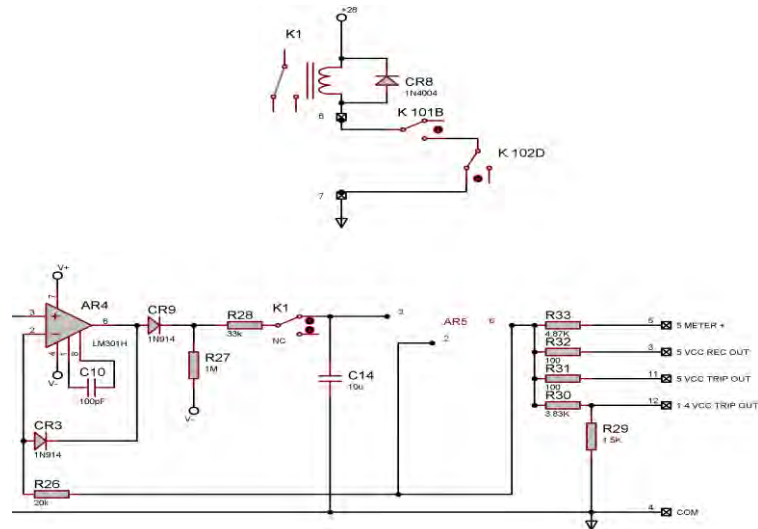


Figura 4.70. Última etapa del circuito controlador del voltímetro solo con la incidencia de AR4.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.70 se observa como quedó el circuito al retirar AR5, para este se realizaron medidas para el contacto K1 abierto es decir 6 y 7 unidos y para el contacto K1 cerrado o que es lo mismo 6 y 7 sin conectar, como nuestro objetivo era observar su comportamiento al abrir K1 se realizó la medición constatando que no ocurría ninguna variación extraña o subida de voltaje en sus pines.

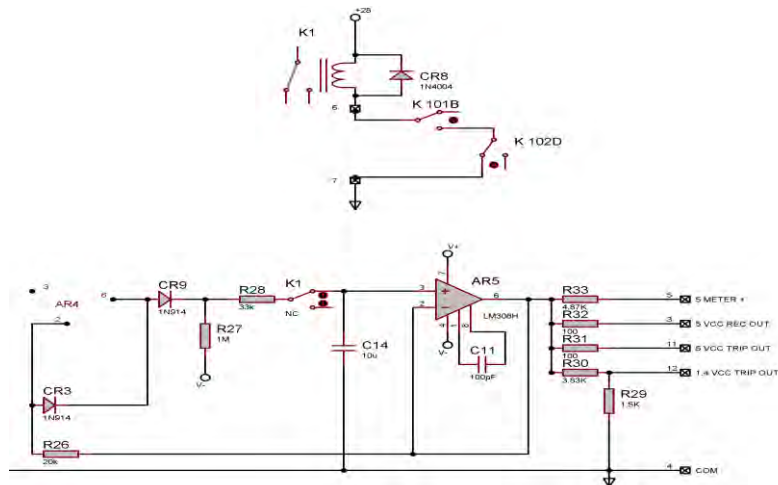


Figura 4.71. Última etapa del circuito controlador del voltímetro solo con la incidencia de AR5.

Fuente: Elaboración propia.

Al medir solo la participación del amplificador AR5 en el circuito (Figura 4.71) se observó que al activar el relé K1 y pasar de normalmente cerrado a abierto el contacto ubicado en el circuito, el voltaje en el pin 3 de AR5 el cual es el mismo punto al cual está conectado el capacitor C14, subía lentamente hasta llegar al voltaje máximo en las salidas de la tarjeta, mostrando así que la falla en el equipo es producto de este amplificador AR5.

El amplificador operacional AR5 es un chip LM308H de la compañía LINEAR TECHNOLOGY, estos amplificadores son diseñados especialmente para aplicaciones de precisión que requieren altas impedancias en su entrada, valores de voltajes *offset* y corrientes de polarización bajas, además con variaciones de temperaturas no se modifican sustancialmente los valores de *offset* y de polarización, como se comprobó en las pruebas anteriores este último chip presenta fallas, pues sufre de un aumento de voltaje repentino en su salida sin tener ningún tipo de excitación o aumento de voltaje en la entrada, esto ocurre simplemente al cambiar el estado en que se encuentra el contacto K1 que al abrirse deja solo conectado a la entrada el capacitor C14, el cual al no haber circulación de corriente por la entrada no inversora del amplificador debería retener el voltaje y este ser mostrado a la salida pues este último amplificador está configurado en una topología de seguidor de tensión. Esta falla se debe probablemente a corrientes parasitas que se crean ocasionando un aumento del voltaje *offset* y por lo tanto una amplificación del mismo a la salida.

La solución para este problema es rápido pues simplemente se sustituye el amplificador operacional averiado por uno del mismo modelo y la misma marca, pero este modelo específicamente no se encontraba disponible en el almacén del laboratorio por lo que se probaron otros modelos de amplificadores nuevos y de características similares al original, pero los resultados no fueron satisfactorios pues la falla seguía ocurriendo.

Ante esta situación y observando que 3 de los 4 amplificadores de las etapas anteriores son del modelo LM308H se ensayó sacando cada uno de ellos y colocándolos en la última etapa, de los cuales el amplificador ubicado en la segunda etapa ofreció el mejor funcionamiento, a pesar de que el amplificador de la última etapa identificado como AR5 al trabajar en la configuración de retenedor y seguidor de voltaje producía la falla, al examinar su funcionamiento en la segunda

etapa como circuito diferencial o sustractor este trabajaba de manera óptima sin producir ningún tipo de variación considerable en los voltajes o alteración en la medida a la salida de las tarjetas. Por lo tanto la solución a esta falla fue simplemente el cambio de posición del amplificador AR2 por AR5.

4.2.3 IDENTIFICACIÓN Y CONEXIÓN DE LOS CONDUCTORES DESCONECTADOS

Debido a la manipulación de los técnicos del laboratorio y a los numerosos intentos de reparar el equipo, algunas de las conexiones con el interruptor de alto voltaje CB 102 el cual se encontraba originalmente averiado, estaban desconectadas, y los técnicos en el lugar no poseían información acerca de sus conexiones iniciales.



Figura 4.72. Conductores sin conexión. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.72 se pueden observar los conductores que se encuentran desconectados, para identificar primeramente la ubicación correcta de cada uno se detalló el color que identificaba cada conductor y se verifico que ninguno de los mismos hubiese sido sustituido o modificado anteriormente, para una mejor comprensión de su ubicación se ordenaron en 2 grupos:

MAYOR CALIBRE:

- Rojo
- Marrón
- Blanco/Rojo
- Naranja
- Blanco/Azul
- Gris

MENOR CALIBRE:

- Blanco/Marrón
- Marrón
- Blanco/Negro
- Blanco

La ubicación de los conductores se logró conocer de manera sencilla observando el plano eléctrico disponible en el manual del equipo, pues este contiene la identificación por colores de cada uno de los conductores que integran la consola de control de la fuente. Los conductores de mayor calibre están ubicados en los devanados principales de cada polo del interruptor CB 102 y los conductores de menor calibre en los suiches auxiliares y en la bobina auxiliar del dispositivo.

En la Figura 4.73, se esboza la ubicación correcta de los conductores en el interruptor CB 102.

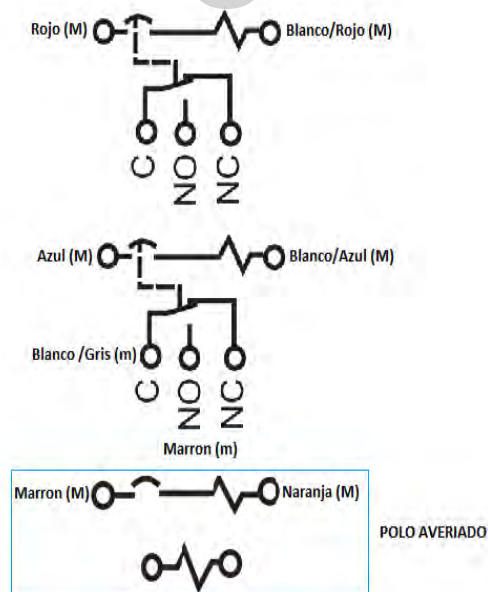


Figura 4.73. Esquema de conexión del interruptor CB 102 apagado y conexión de los conductores en sus contactos. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.73 se presenta el esquema de conexión del interruptor CB 102 en posición de apagado, los nombres de los colores con la letra mayúscula (M) al lado son los conductores de mayor calibre mientras que los de la letra minúscula (m) los de menor calibre, además como se observa en la figura el ultimo polo del circuito está enmarcado dentro de un recuadro, indicando que este es el polo que no logro ser reparado.

La bobina principal de este polo está ubicada después de la toma central del autotransformador pues esta bobina es la que ofrece protección y une el autotransformador con el devanado primario del transformador de alto voltaje, estos detalles mencionados se pueden observar en la Ilustración 4 en el apartado de anexos. Los dos conductores que van conectados en la bobina principal de este polo, se unieron de forma directa para poder activar el equipo al pasar la palanca del interruptor. Los dos conductores restantes Blanco/Marrón (m) y Blanco (m) se dejaron al aire pero aislados del resto, pues en el plano eléctrico del equipo no se especificaba su conexión pero es de suponer que estos iban conectados en la bobina auxiliar del polo averiado, ocasionando que el equipo no retenga el voltaje para valores inferiores a 20 kV cuando ocurren rompimientos en la muestra de prueba y por lo tanto el equipo queda funcionando de forma peligrosa pues le hace falta esta protección.

4.2.4 GENERACIÓN DE ALTO VOLTAJE A LA SALIDA

El equipo antes de empezar con las reparaciones era incapaz de producir alto voltaje a la salida, en las pruebas exploratorias realizadas con los técnicos inicialmente se intentó generar tensión a la salida pero esto no ocurrió a pesar de que se conectaron con un fusible de protección los conductores encargados de alimentar el autotransformador.

En este punto del proyecto el interruptor magnético CB 102 ya ha sido reacondicionado y puesto en condiciones aceptables de funcionamiento por lo que se reconecto y se realizaron pruebas de encendido para comprobar que los indicadores de luz en la consola de control trabajaran correctamente.

A continuación en la Figura 4.74 se muestra el diagrama eléctrico de los elementos de la consola de control involucrados en el proceso para activar la generación de alto voltaje a la salida.

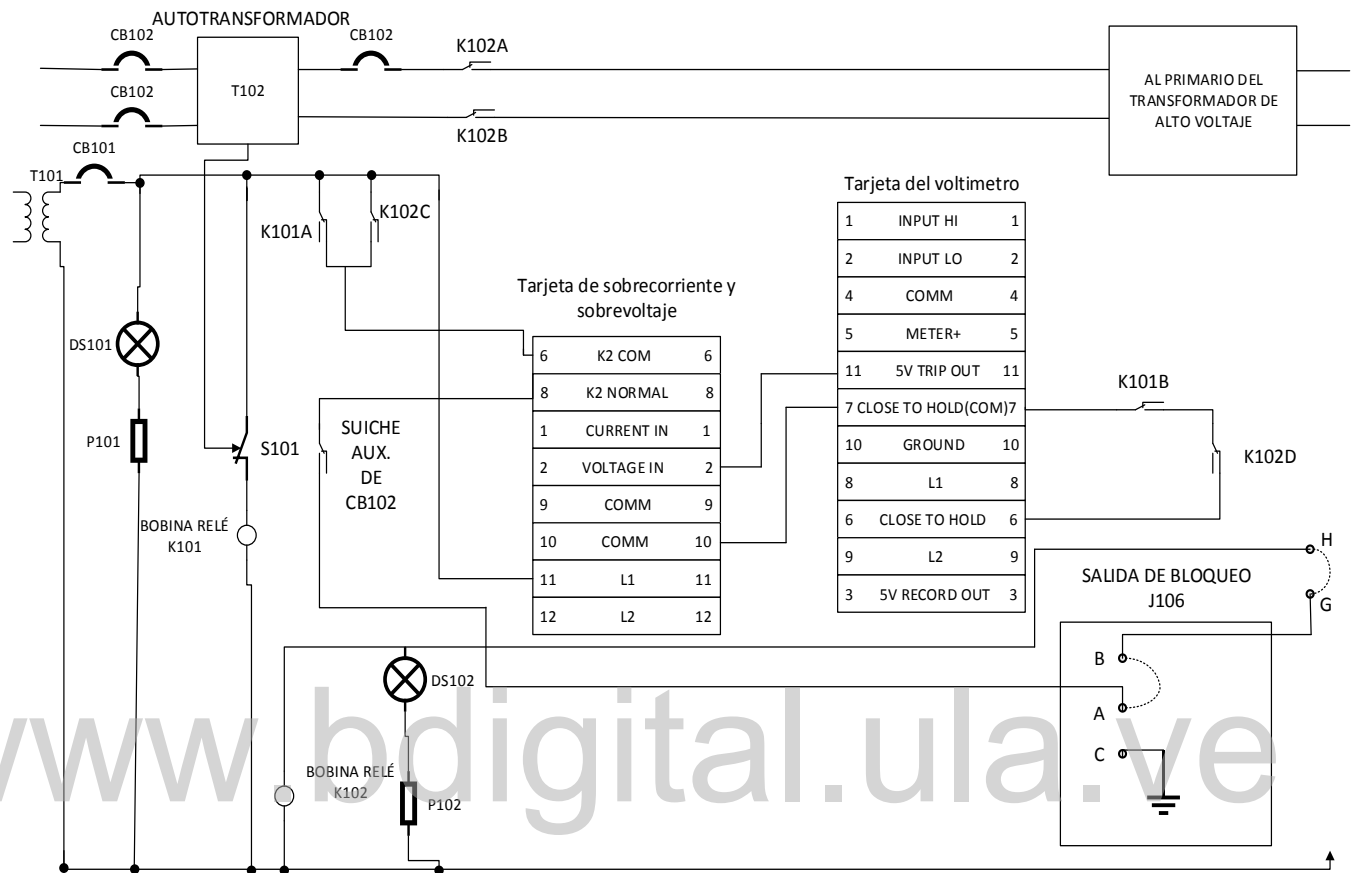


Figura 4.74. Diagrama de elementos involucrados en la activación del alto voltaje a la salida.
Fuente: Elaboración propia.

Durante las primeras pruebas de encendido el indicador que muestra que el equipo está en condiciones de producir alto voltaje a la salida DS 102 no se encendía, por lo que se tuvo que realizar el esquema de la Figura 4.74 para comprender mejor el proceso, estas pruebas fueron realizadas sin tener ningún tipo de conexión entre la consola de control y el conjunto de alto voltaje.

Al verificar el diagrama de la figura se logró detectar que la consola de control posee una salida en su parte trasera para la conexión de un sistema de bloqueo, pero en este caso no se cuenta con este sistema, el fabricante del equipo normalmente proporciona un *jumper* o tapa de seguridad que une dos puntos en esa salida, pero la consola de control tampoco tenía este *jumper*,

por lo que para poder activar el indicador de alto voltaje a la salida fue necesario unirlos con un conductor manualmente. En el esquema anterior se puede observar claramente la conexión realizada entre los puntos A Y B de la salida J 106.

La Figura 4.75 muestra de forma precisa la conexión que debe hacerse para poder activar el indicador de alto voltaje y así permita la generación de alto voltaje.

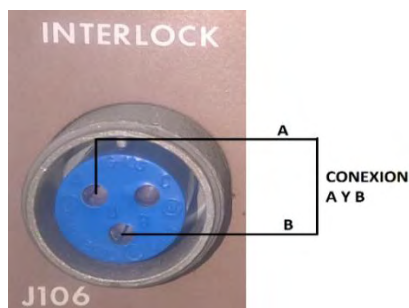


Figura 4.75. Conexión realizada en la salida del sistema de bloqueo J 106. Fuente: Elaboración propia.

También se debe comentar que para poder realizar estas pruebas se tuvo que realizar una conexión de dos puntos en la salida del cable de instrumentación en la consola de control, ya que estos puntos se encuentran eléctricamente conectados del lado del conjunto de alto voltaje y el equipo al estar separado de este no posee esta conexión, de igual manera hay que señalar que estos dos puntos están conectados en serie con los puntos A y B de la salida J 106, por lo cual es evidente que intervienen en la activación del indicador de alto voltaje, en la Figura 4.76 se muestra la conexión realizada manualmente en el lado de la consola de control.

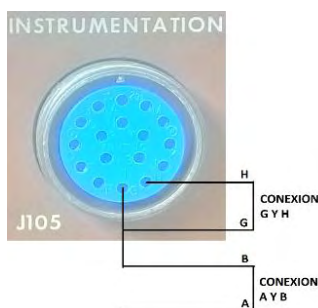


Figura 4.76. Conexión de los puntos en la salida del cable de instrumentación. Fuente Elaboración propia.

Habiendo realizado estas dos conexiones se realizó nuevamente la prueba siguiendo los pasos a continuación:

- Teniendo el interruptor CB 103 activo que es el encargado de activar o desactivar la energía de los indicadores y controles de la consola de control y el control del voltaje de salida en la posición de cero, se procedió a activar CB 101 al instante se enciende DS 101 indicando que los controles y tarjetas de la consola están energizadas.
- El siguiente paso fue activar el interruptor CB 102 este al activarse cierra las conexiones de sus tres polos y de su suiche auxiliar energizando de esta manera la bobina del relé K 102, al estar energizado K 102 cada uno de sus contactos cambian de posición conectando de esta manera a través de los contactos K102A Y K102B el autotransformador a los terminales del devanado primario del transformador de alto voltaje, en este momento el indicador DS 102 está encendido señalando que ya es posible generar alto voltaje a la salida.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 5

CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

Considerando que a esta altura del proyecto el equipo ya se encuentra en condiciones de producir alto voltaje a la salida, se prosiguió con la realización de las curvas de calibración del voltímetro y amperímetro integrados del equipo, con el fin de observar de manera precisa si los valores a la salida de los medidores eran confiables y no se estaban obteniendo lecturas erróneas.

Según el manual del fabricante el procedimiento propuesto a seguir para la calibración del equipo es el siguiente:

Para la salida del medidor de voltaje, se coloca un kilovoltímetro entre el terminal de 100 kV y tierra en el conjunto de alto voltaje, se siguen los procedimientos especificados por el fabricante para el encendido de la consola, luego se ubica el rango del voltaje en 100 kV. Se remueve el pequeño tapón que cubre el punto de calibración ubicado debajo del medidor del voltaje de salida para obtener acceso al mismo. Posteriormente si se han seguido todos los pasos para tener alto voltaje a la salida se sube el voltaje hasta $\frac{2}{3}$ del fondo escala del panel del medidor del voltaje de salida y se ajusta a través del punto de calibración la salida comparándola con lo mostrado por el kilovoltímetro para compensar cualquier discrepancia [15].

Para la salida del medidor de corriente no es necesario energizar el conjunto de alto voltaje, pues simplemente se conecta un amperímetro de alta precisión entre tierra y guarda en el conjunto de alto voltaje de la fuente y una fuente de corriente en serie con el transformador de corriente ubicado en el conjunto de alto voltaje. Luego se cierra el interruptor del circuito de potencia de la consola de control (CB 101), se fija el rango de la corriente de salida en 150 mA, se remueve

la tapa que cubre el punto marcado como CAL ubicado debajo del panel del medidor de corriente de salida para obtener acceso al punto de calibración. Se energiza la fuente de corriente y se incrementa la misma hasta que alcance 2/3 del fondo escala en el panel del medidor de corriente, se ajusta a través del punto de calibración comparando la medida mostrada en el panel de la consola con la medida expuesta por el amperímetro [15].

Para la tarjeta de sobretension y sobrecorriente el fabricante indica que no es necesaria la calibración pues esta está diseñada para operar siempre y cuando exista una condición de sobrecorriente o sobretension mayor a 110% de cualquier rango de medida usado [15].

En vista de que en el laboratorio no se contaba con un kilovoltmetro de alta precisión necesario para hacer la comparación con las medidas del voltímetro de la fuente, se siguió un proceso grafico para conocer la efectividad de las medidas y hacer las comparaciones correspondientes. Al revisar los esquemas y configuraciones electrónicos aportados en el manual del equipo se observó que el valor del voltaje en el fondo de escala a la salida en la última etapa de las tarjetas del voltímetro y del amperímetro antes de los bornes de conexión de salida es de 5 V, también se pudo ver que los galvanómetros de los medidores poseían una corriente de fondo de escala de 1 mA y la resistencia entre la salida de la última etapa y el borne 5 en el que se conecta el galvanómetro es de 4,87 k Ω al conocer esto se puede deducir que el voltaje en el borne numero 5 tiene un valor de 130 mV para el fondo de escala de cualquier rango de ambas tarjetas. Para ver el diagrama de esta última etapa del circuito referirse a la Ilustración 1 o la Ilustración 2 en los anexos. En la siguiente ecuación se muestra el cálculo realizado para conocer el valor de voltaje en el borne 5.

$$\frac{5V - V_s}{4,87 \text{ k}\Omega} = 1 \text{ mA}; \text{ despejando } V_s \text{ y resolviendo nos queda } V_s = 130 \text{ mV.} \quad (5.5)$$

Este voltaje obtenido es usado para construir las rectas de calibración de valor real con las cuales se compararan cada una de las medidas tomadas en los distintos rangos de medición de cada tarjeta.

- **Procedimiento para la realización de las curvas de calibración:**

Se conectó a las entradas de la tarjeta un generador de corriente alterna entre los bornes 1 y 2 esto con la finalidad de simular la señal que debía ser procesada para la medición. También se conectó un multímetro entre el borne número 5 y tierra ya que este borne es el que envía la señal al medidor de voltaje del panel de control, posteriormente se tomaron 10 medidas en cada escala. Este procedimiento se siguió para ambas tarjetas. A continuación se presentan las tablas y los gráficos con los valores de las curvas de calibración para las 4 escalas de cada tarjeta.

1. Curvas de calibración tarjeta del controlador del voltímetro

En las siguientes tablas y curvas se presentan los valores medidos y las curvas de calibración utilizadas para comparar el valor real con el valor medido en la tarjeta controladora del voltímetro. Los valores medidos son (V_s) que es el voltaje en el borne de salida número 5 de la tarjeta, (V_e) que es el voltaje de entrada entre los pines 1 y 2 de la tarjeta y el valor medido y el valor real es el valor correspondiente a V_s en el panel del voltímetro de la tarjeta.

Tabla 5.4. Datos medidos para el rango de 10 kV.

MEDIDA S N	V_e (CA) V	V_s (CD) mV	VALOR MEDIDO (CA) kV	VALOR REAL (CA) kV	ERROR RELATIVO %
1	0,93	7,1	0,50	0,55	8,45%
2	2,72	21,7	1,50	1,67	10,14%
3	3,57	28,5	2,00	2,19	8,77%
4	5,05	41,2	2,90	3,17	8,50%
5	6,5	54	3,80	4,15	8,52%
6	8,5	71	5,00	5,46	8,45%
7	10,52	88,2	6,20	6,78	8,62%
8	12,74	106,8	7,50	8,22	8,71%
9	15,53	124	8,80	9,54	7,74%
10	19,25	138,8	10,00	10,68	6,34%
				ERROR PROMEDIO	8,42%

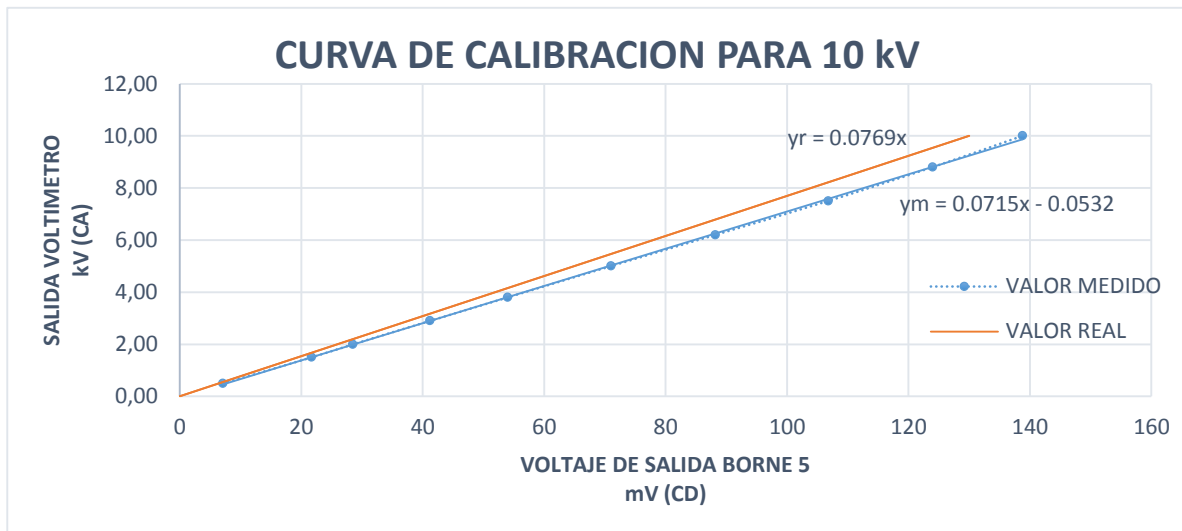


Gráfico 5.1. Curva de calibración para el rango de 10 kV. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el Gráfico 5.1 se encuentran expresadas las dos rectas de tendencia tanto para los valores medidos como para los valores reales, realizando la comparación de estas dos rectas se pueden obtener los valores reales de medición para cada escala específica, el razonamiento seguido para obtener dichos valores reales se muestra a continuación:

La recta que muestra el valor real de la medición viene expresada según el Gráfico 5.1 por la ecuación siguiente:

$$y_r = 0,0769 \cdot x \quad (5.6)$$

La recta de tendencia para los valores medidos tiene la siguiente expresión:

$$y_m = 0,0715 \cdot x - 0,0532 \quad (5.7)$$

Como queremos conocer el valor real de una medición y sabiendo que el valor de x en las rectas corresponde al valor de entrada en mV, despejamos x de la ecuación 5.6 y la sustituimos en la ecuación 5.7 y nos queda:

$$y_m = \frac{0,0715}{0,0769} \cdot y_r - 0,0532$$

al despejarse y_r resulta

$$y_r = 1,0755 \cdot y_m + 0,0572 \quad (5.8)$$

La ecuación 5.8 nos da la relación entre el valor que se muestra en el panel del voltímetro y el valor real medido, es decir con esta ecuación se puede conocer la desviación que tiene el valor real del medido. Por ejemplo:

Si en el medidor del voltímetro se tiene una medida de 10 kV el valor real de esta medición será:

Sustituyendo el valor de 10 kV en la ecuación 5.8

$$y_r = 1,0755 \cdot 10000 + 0,0572$$

$$y_r = 10755 = 10,75 \text{ kV}$$

Este valor obtenido viene a ser el valor real medido por el voltímetro de la tarjeta. El procedimiento para la obtención de la ecuación 5.8 se debe seguir para cada una de las escalas de medición del voltímetro y del amperímetro.

Tabla 5.5. Datos medidos para el rango de 20 kV.

MEDID AS n	Ve (CA) V	Vs (CD) mV	VALOR MEDIDO (CA) kV	VALOR REAL (CA) kV	ERROR RELATIVO %
1	1,14	5,7	0,8	0,88	8,77%
2	5,10	21,5	3	3,31	9,30%
3	10,09	42,8	6	6,58	8,88%
4	13,45	56,9	8	8,75	8,61%
5	16,77	71,1	10	10,94	8,58%
6	21,30	88,2	12,4	13,57	8,62%
7	23,07	99,9	14	15,37	8,91%
8	26,86	112,3	15,8	17,28	8,55%
9	30,51	126,6	18	19,48	7,58%
10	34,69	139,3	20	21,43	6,68%
ERROR PROMEDIO					8,45%

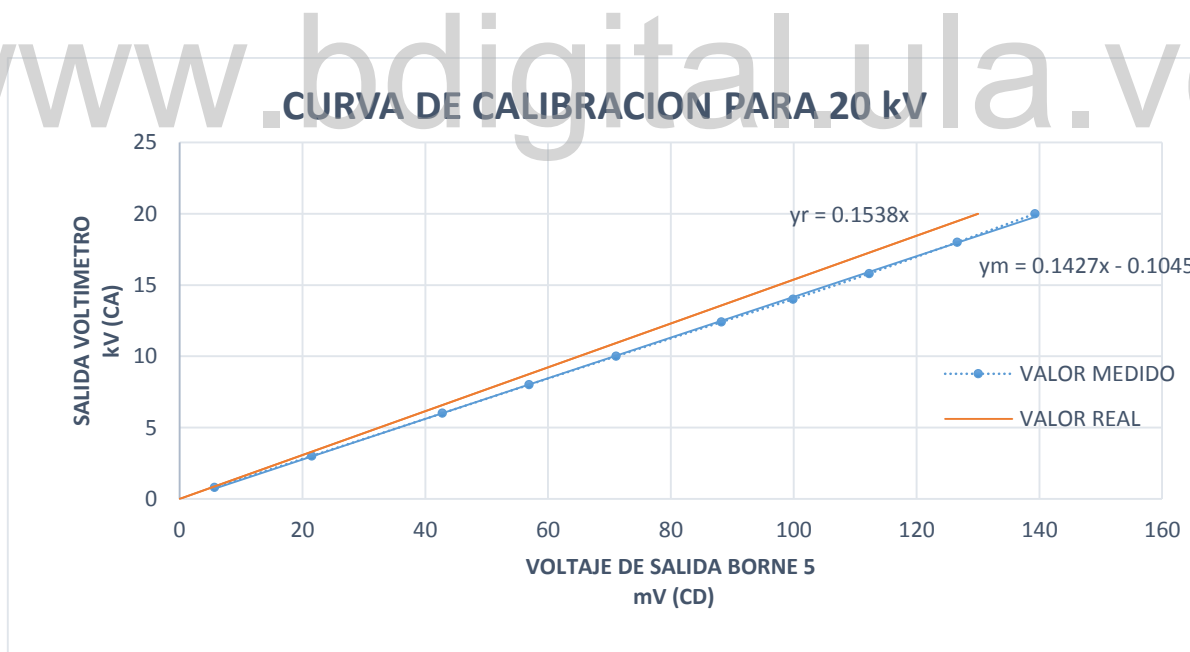


Gráfico 5.2. Curva de calibración para el rango de 20 kV. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación para el cálculo del valor de voltaje real en el rango de 20 kV es la siguiente:

$$yr = 1,0777 \cdot ym + 0,1126 \quad (5.9)$$

Tabla 5.6. Datos medidos para el rango de 50 kV.

MEDID AS n	Ve (CA) V	Vs (CD) mV	VALOR MEDIDO (CA) kV	VALOR REAL (CA) kV	ERROR RELATIVO %
1	2.55	4.6	1.5	1.77	15.22%
2	13.22	21.3	7.5	8.19	8.45%
3	26.40	42.9	15	16.50	9.09%
4	37.46	62.5	22	24.04	8.48%
5	46.57	78.3	27.5	30.12	8.68%
6	54.93	93	32.5	35.77	9.14%
7	60.70	103.7	36.5	39.88	8.49%
8	66.20	113.1	40	43.50	8.05%
9	72.20	122.7	43.5	47.19	7.82%
10	86.90	138.6	50	53.31	6.20%
ERROR PROMEDIO					8.96%

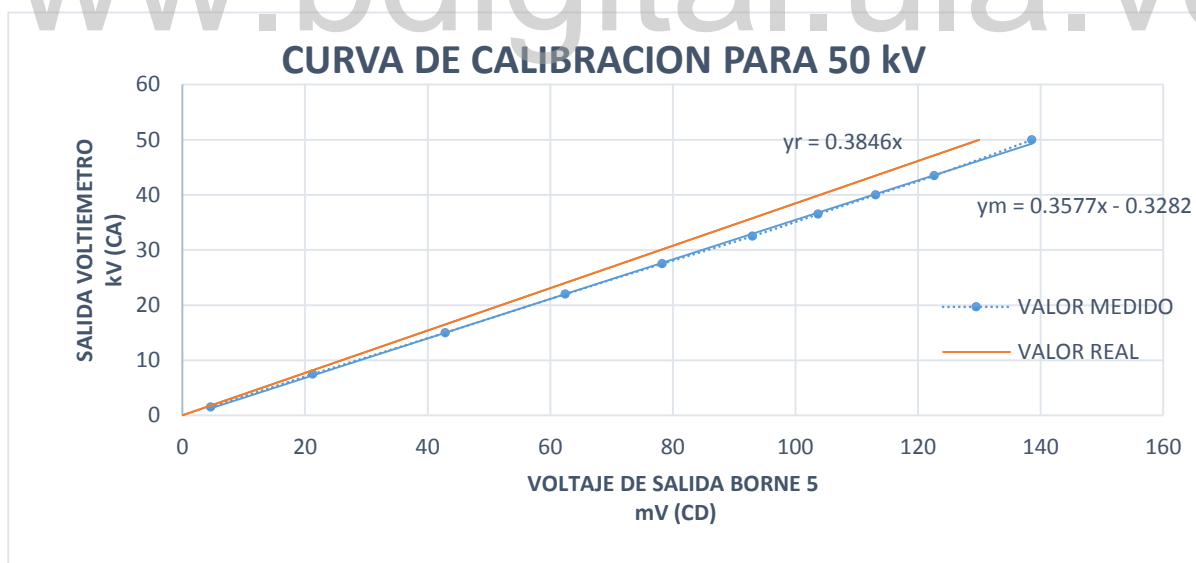


Gráfico 5.3. Curva de calibración para el rango de 50 kV. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación para el cálculo del valor de voltaje real en el rango de 50 kV es la siguiente:

$$y_r = 1,0752 \cdot y_m + 0,3528 \quad (5.10)$$

Tabla 5.7. Datos medidos para el rango de 100 kV

MEDID AS n	Ve (CA) V	Vs (CD) mV	VALOR MEDIDO (CA) kV	VALOR REAL (CA) kV	ERROR RELATIVO %
1	4,41	4,4	3	3,38	11,36%
2	26,08	21,4	15	16,46	8,88%
3	51,64	42,6	30	32,77	8,45%
4	67,40	56,8	40	43,69	8,45%
5	86,40	71,3	50	54,85	8,84%
6	95,20	78,5	55	60,38	8,92%
7	109,20	92,9	65	71,46	9,04%
8	132,60	113,6	80	87,38	8,45%
9	150,60	126,7	90	97,46	7,66%
10	172,00	138,8	100	106,77	6,34%
ERROR PROMEDIO					8,64%

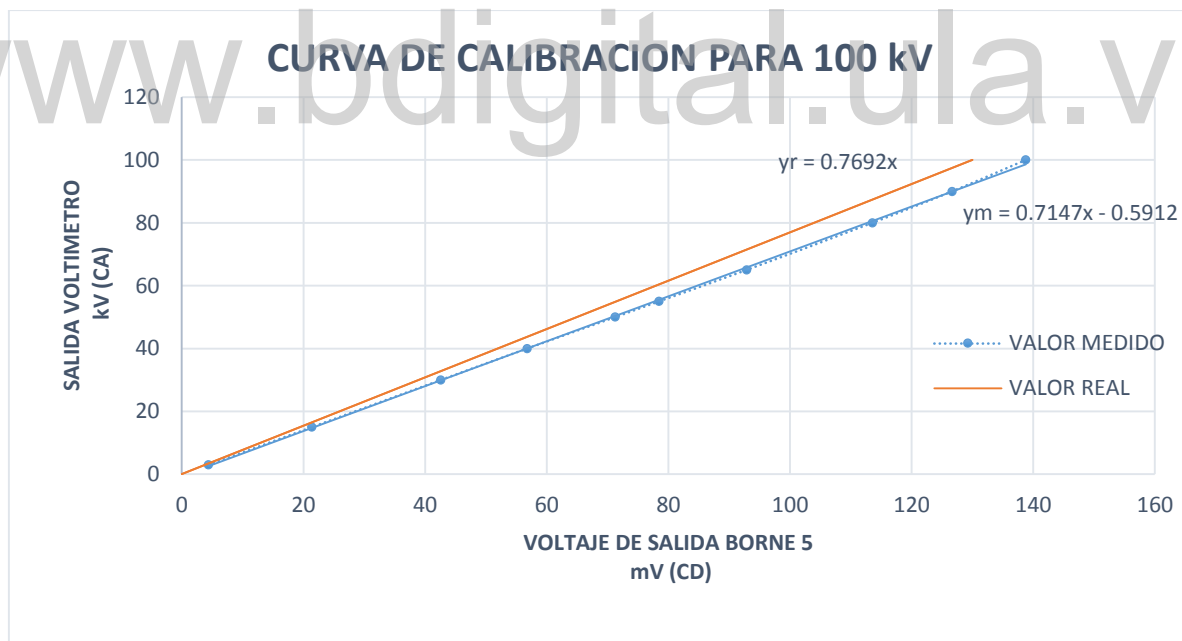


Gráfico 5.4. Curva de calibración para el rango de 100 kV. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación para el cálculo del valor de voltaje real en el rango de 100 kV es la siguiente:

$$yr = 1,0762 \cdot ym + 0,6362 \quad (5.11)$$

Como se puede observar en las curvas mostradas en las figuras anteriores, se hace una comparación entre el valor ideal del voltímetro de la tarjeta que es graficado como una función lineal la cual es expresada por su ecuación de la recta y el valor medido el cual se obtuvo a través del voltaje V_s , como se dijo anteriormente es el voltaje medido con un multímetro digital en el borne 5 de la tarjeta, a través de este valor V_s se obtuvo la ecuación de la recta aproximada para cada escala. En las curvas realizadas para cada rango se ve claramente que la tarjeta del voltímetro presenta una desviación con respecto al valor ideal, esta desviación es llamada error de multiplicación, este error se caracteriza por hacer que todas las medidas aumenten o disminuyan progresivamente en relación a la recta representativa ideal, en nuestro caso nos encontramos ante un error de multiplicación negativo. De igual manera se observó a través de las curvas de calibración que el equipo presenta un error de tipo cero es decir posee una desviación en el origen. Se intentaron solucionar estos errores variando la ganancia del circuito a través del punto de calibración pero se distorsionaban los valores en las demás escalas de manera que las medidas se distanciaban aún más de la recta ideal. Como dato importante se debe decir que el equipo presenta solo un punto de calibración general y no para cada una de las escalas esto imposibilita calibrar de manera ideal el circuito.

Otro dato que hay que recordar es que en esta tarjeta se hizo un cambio en los amplificadores, esto modifica de manera significativa la calibración del equipo pues todo el circuito viene específicamente diseñado para trabajar en armonía con los dispositivos de fábrica y cualquier cambio en el mismo se verá reflejado en la calibración del aparato. Además se tuvo que seguir trabajando con el amplificador desgastado porque no se contaba con uno de las mismas características. Gracias a los valores extraídos de las curvas se pudo obtener información acerca del promedio de error relativo de cada rango de la tarjeta del voltímetro con respecto a los valores ideales. En la Tabla 5.8 se muestran estos valores.

Tabla 5.8. Errores relativos promedios con respecto a los ideales de cada rango de la tarjeta del voltímetro.

ERRORES RELATIVOS TARJETA DEL VOLTIMETRO

RANGO (kV)	ERROR PROMEDIO (%)
10	8,42%
20	8,45%
50	8,96%
100	8,64%

Los errores de precisión especificados por el fabricante con el aparato en condiciones normales son de $\pm 2\%$ en la escala de 100 kV y $\pm 3\%$ para el resto de las escalas.

2. Curvas de calibración tarjeta del controlador de corriente

En esta tarjeta se ejecutaron las tareas de medición y de cálculo siguiendo el mismo procedimiento mostrado en la anterior, la única diferencia es que en esta la salida en las curvas de calibración es los ampere vistos en el panel de medición de la tarjeta, mientras que en la anterior eran los kilovolt.

Tabla 5.9. Datos medidos para el rango de 1,5 mA.

MEDIDAS n	Ve (CA) mV	Vs (CD) mV	VALOR MEDIDO (CA) mA	VALOR REAL (CA) mA	ERROR RELATIVO %
1	5.10	8.7	0.1	0.10	0.38%
2	14.20	26.9	0.3	0.31	3.35%
3	23.60	45.3	0.5	0.52	4.34%
4	28.20	54.3	0.6	0.63	4.24%
5	35.20	68	0.74	0.78	5.69%
6	40.70	78.7	0.86	0.91	5.29%
7	47.50	91.9	1	1.06	5.69%
8	52.20	101	1.1	1.17	5.61%
9	63.30	123	1.34	1.42	5.58%
10	70.70	137.1	1.5	1.58	5.18%
				ERROR PROMEDIO	4.54%

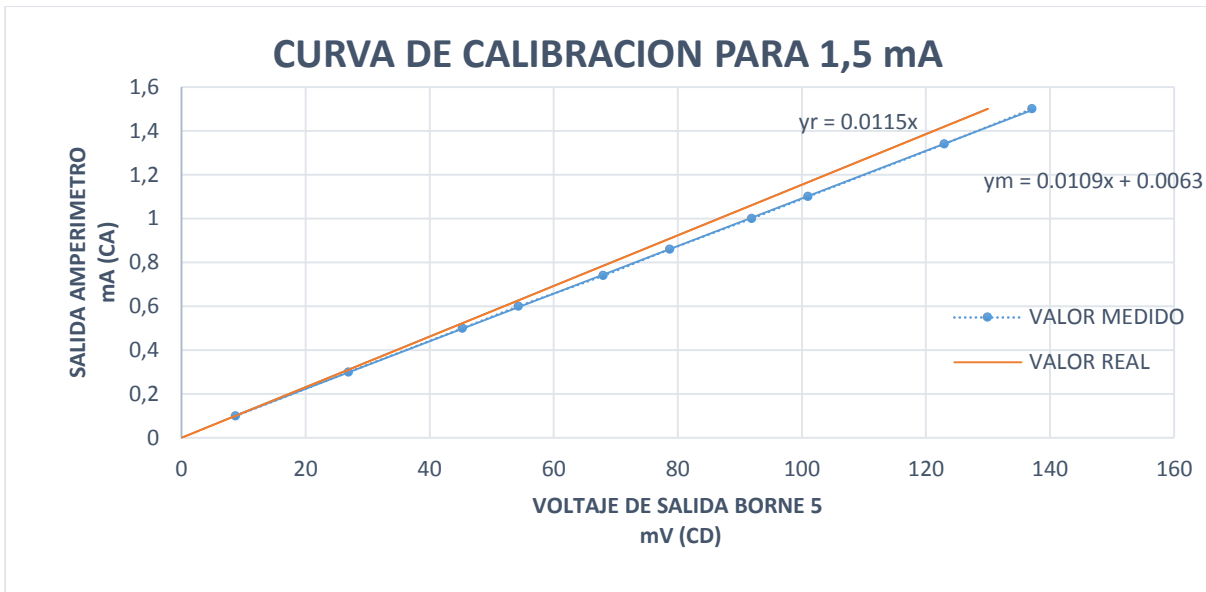


Gráfico 5.5. Curva de calibración para el rango de 1,5 mA. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación para el cálculo del valor de corriente real en el rango de 1,5 mA es la siguiente:

$$y_r = 1,0550 \cdot y_m - 0,0066 \tag{5.12}$$

Tabla 5.10. Datos medidos para el rango de 15 mA.

MEDIDAS n	Ve (CA) mV	Vs (CC) mV	VALOR MEDIDO (CA) mA	VALOR REAL (CA) mA	ERROR RELATIVO %
1	70,80	13,4	1,5	1,55	2,99%
2	143,50	27,2	3	3,14	4,41%
3	211,00	40	4,4	4,62	4,67%
4	286,90	54,5	6	6,29	4,59%
5	346,20	65,8	7,2	7,59	5,17%
6	435,00	82,5	9	9,52	5,45%
7	483,90	91,9	10	10,60	5,69%
8	530,60	100,9	11	11,64	5,52%
9	623,00	119,3	13	13,77	5,56%
10	715,00	137	15	15,81	5,11%
				ERROR PROMEDIO	4,92%

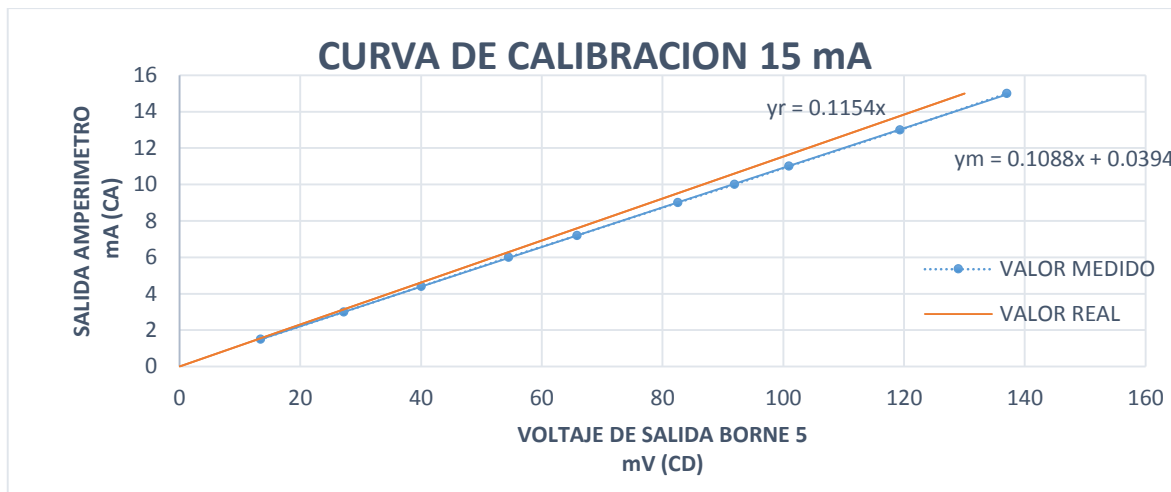


Gráfico 5.6. Curva de calibración para el rango de 15 mA. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación para el cálculo del valor de corriente real en el rango de 15 mA es la siguiente:

$$y_r = 1,0606 \cdot y_m - 0,0417 \quad (5.13)$$

Tabla 5.11. Datos medidos para el rango de 75 mA.

MEDID AS n	Ve (CA) V	Vs (CC) mV	VALOR MEDIDO (CA) mA	VALOR REAL (CA) mA	ERROR RELATIVO %
1	0,22	8,5	5	4,90	1,96%
2	0,72	27	15	15,58	3,70%
3	0,96	36,5	20	21,06	5,02%
4	1,43	54,2	30	31,27	4,06%
5	1,79	67,7	37	39,06	5,27%
6	2,19	82,9	45	47,83	5,91%
7	2,52	95,4	52	55,04	5,52%
8	2,91	110,1	60	63,52	5,54%
9	3,15	118,9	65	68,60	5,24%
10	3,63	137,1	75	79,10	5,18%
				ERROR PROMEDIO	4,74%

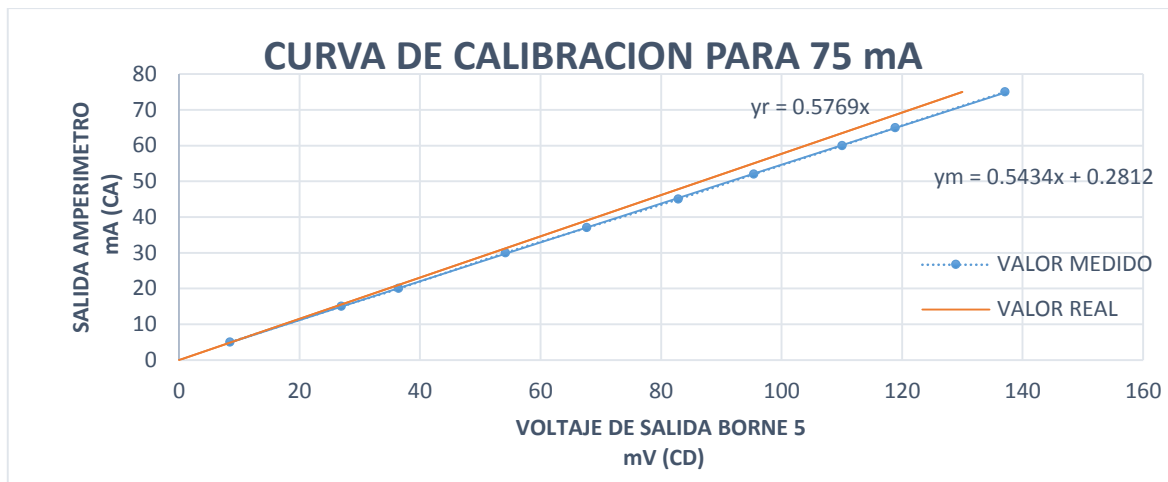


Gráfico 5.7. Curva de calibración para el rango de 75 mA. Fuente: Elaboración propia

La ecuación para el cálculo del valor de corriente real en el rango de 15 mA es la siguiente:

$$y_r = 1,0616 \cdot y_m - 0,2985 \quad (5.14)$$

Tabla 5.12. Datos medidos para el rango de 150 mA

MEDID AS n	Ve (CA) V	Vs (CC) mV	VALOR MEDIDO (CA) mA	VALOR REAL (CA) mA	ERROR RELATIVO %
1	0,25	4,7	6	5,42	10,64%
2	1,13	21,5	24	24,81	3,26%
3	1,44	27,5	30	31,73	5,45%
4	2,10	39,9	44	46,04	4,43%
5	2,87	54,6	60	63,00	4,76%
6	3,67	69,6	76	80,31	5,36%
7	4,37	83	90	95,77	6,02%
8	5,03	95,2	104	109,85	5,32%
9	5,80	110,1	120	127,04	5,54%
10	7,18	137,1	150	158,19	5,18%
				ERROR PROMEDIO	5,60%

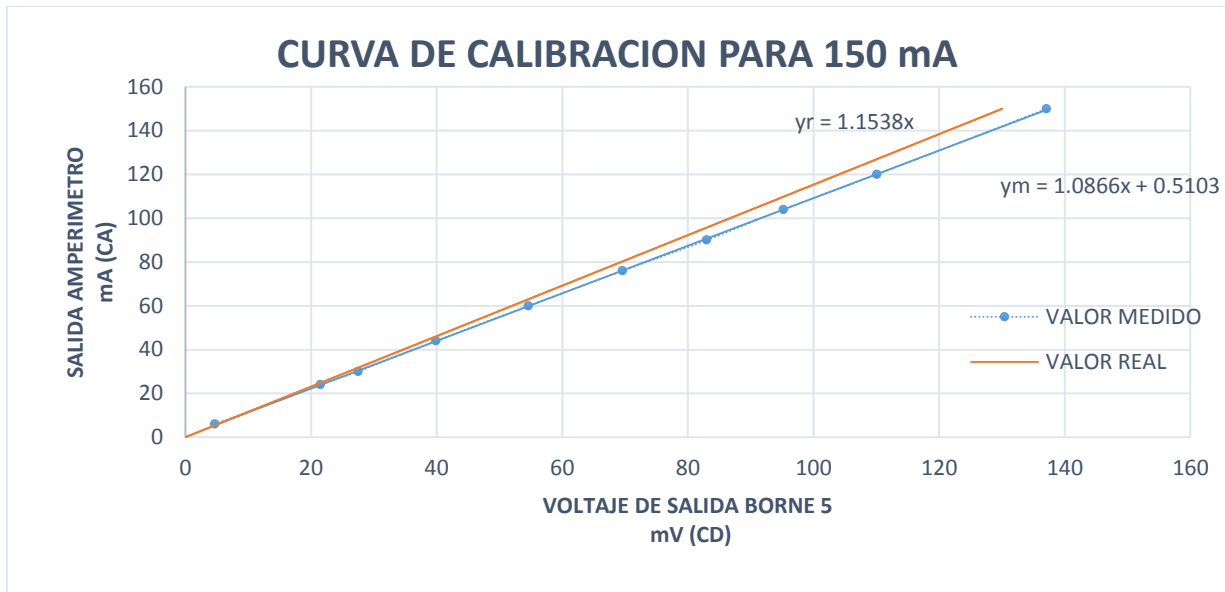


Gráfico 5.8. Curva de calibración para el rango de 150 mA. Fuente: Elaboración propia.

La ecuación para el cálculo del valor de corriente real en el rango de 150 mA es la siguiente:

$$y_r = 1,0618 \cdot y_m - 0,5418 \quad (5.15)$$

Se puede notar en cada una de las curvas de calibración de esta tarjeta que la inclinación de la recta con los valores medidos con respecto a la línea de valor ideal disminuye un poco comparada con la de la tarjeta del voltímetro, aunque aún presenta los errores de multiplicación y de cero de manera notable.

Al igual que la tarjeta anterior, también presenta un solo punto de calibración no permitiendo hacer una calibración individual de las escalas en la que trabaja sino una de forma general, hay que mencionar que la opción de medición digital de este equipo si posee calibración individual de escalas. Según el fabricante este aparato posee un error de precisión de $\pm 2\%$ para la escala de 150 mA y $\pm 3\%$ para las demás escalas.

Haciendo uso de las ecuaciones de las rectas de los valores ideales de medidas, se obtuvieron los errores relativos para cada rango de medida. La Tabla 5.13 muestra los errores relativos promedio de cada escala o rango.

Tabla 5.13. Errores relativos promedios con respecto a los ideales de cada rango de la tarjeta del medidor de corriente

ERRORES RELATIVOS TARJETA DEL MEDIDOR
DE CORRIENTE

RANGO (mA)	ERROR PPROMEDIO (%)
1,5	4,54%
15	4,92%
75	4,74%
150	5,60%

www.bdigital.ula.ve

CONCLUSIONES

- Se ha estudiado y reestablecido a condiciones de funcionamiento operativo la fuente de alimentación del transformador de 100 kV, la cual está especialmente diseñada para realizar pruebas de alto voltaje o de resistencia al alto voltaje todo esto haciendo uso de los recursos disponibles en los almacenes del laboratorio.
- Tal como se pudo ver en el capítulo 4 en la sección 4.2.1 el equipo presentaba una avería en el interruptor del modelo UPG-211-2REC4-4949-3 de la marca Airpax, estos interruptores son diseñados siguiendo las especificaciones indicadas por el comprador, su adquisición es costosa, además solo fue posible reparar 2 de los tres polos disponibles en el dispositivo haciendo con esto que su funcionalidad en el equipo se vea disminuida y el grado de protección al generador se vea comprometido.
- Este tipo de fuentes de alto voltaje que han cumplido con su vida útil, normalmente empiezan a tener numerosos problemas tales como el desgaste en sus elementos electrónicos o pérdida de la calibración en sus instrumentos de medición, esto también es debido a la falta de un plan de mantenimiento constante.
- Se confirmó que la avería que hacía que la aguja del medidor de voltaje se fuese al fondo de escala al activar el control de variación de voltaje de salida, era producto de un amplificador operacional en mal funcionamiento ubicado al final de la última etapa de la tarjeta manejadora del voltímetro, por lo que se deduce que este al estar desgastado. Y al no soportar cambios rápidos en sus entradas producía corrientes parasitas que aumentaban el voltaje de *offset* de esa etapa amplificadora.
- Según las curvas de calibración estudiadas el equipo presenta errores de calibración tanto de ganancia como de cero en todas las escalas en las tarjetas de medida de corriente y voltaje pero es un poco mayor en la tarjeta del voltímetro, esto se debe a que el divisor de tensión de entrada de las tarjetas está descalibrado. y a que las resistencias y componentes electrónicos que integran estas tarjetas están deteriorados y han variado sus valores originales, este equipo en particular cuenta tan solo con un punto de calibración general por tarjeta, por lo que se puede

decir que aunque poseen este punto de calibración, cualquier cambio mínimo o avería en cualquier componente del sistema de medición de cualquiera de las tarjetas afectara de manera directa la calibración del equipo pues estas están diseñadas y calibradas de fábrica.

- Al finalizar todo el proceso de reparación del equipo se probó realizando distintas pruebas en las diferentes escalas constatándose así su funcionamiento.
- El equipo en estudio es un agregado de gran importancia para los conocimientos de todo estudiante que decida formarse en el área de la Ingeniería de Alta Tensión, pues a través de las distintas pruebas e investigaciones que pueden ser llevadas a cabo con este dispositivo se pueden acompañar los conceptos estudiados en el aula de clase, obteniendo como resultado de esta combinación una formación teórica-práctica efectiva.

www.bdigital.ula.ve

RECOMENDACIONES

- Puesto que el interruptor magnético CB 102 de 3 polos UPG-211-2REC4-4949-3 no fue sustituido sino que se acondicionó temporalmente, se recomienda lo más antes posible realizar la sustitución del mismo pues en cualquier momento puede presentar fallas nuevamente dejando el circuito de activación de la alta tensión sin la capacidad de ser encendido y a su vez sin las protecciones contra sobrecorrientes necesarias.
- Al igual que en el circuito del interruptor CB 102 se deben hacer sustituciones en los circuitos de alimentación de cada tarjeta cambiando los capacitores y verificando los diodos rectificadores y la correcta regulación de los diodos zener, pues como se vio en las pruebas realizadas en la sección 4.2.2, algunos voltajes de alimentación se encuentran por debajo del especificado y presentan voltajes de rizado distorsionados que afectan su funcionamiento normal.
- Aunque el cambio realizado en el amplificador operacional en la tarjeta controladora del voltímetro solucionó el problema de la deriva de la aguja hasta el fondo de las escalas, se recomienda sustituir el amplificador operacional ubicado actualmente en la posición de AR2, pues el cambio realizado fue el amplificador denominado AR5 por el denominado AR2. Es de gran importancia que este sea del mismo modelo que el que se encuentra averiado, el modelo de este es LM308H referirse a la Ilustración 1 en anexos.
- Realizar la calibración del equipo usando los espinterómetros con los que se dispone en el laboratorio.
- Se recomienda a la hora de realizar cualquier medida para mayor exactitud revisar las ecuaciones de calibración obtenidas para cada escala expuestas en el capítulo 5.

- Se recomienda al personal técnico encargado del laboratorio realizar un plan de mantenimiento al equipo, con la finalidad de mantener su integridad y condiciones de operatividad.
- Es importante conocer las medidas de seguridad y la forma de operación de la fuente de alimentación debido a que un mal manejo del mismo puede ocasionar daños tanto a la persona como al aparato.
- Es importante mencionar que el equipo pudo haber sido dejado en mejores condiciones al terminar este proyecto y no simplemente en sus condiciones mínimas de funcionamiento, pero debido a las limitaciones económicas y al no poder sustituir por partes nuevas los elementos afectados, se implementaron las mejores soluciones disponibles.
- Solo para voltajes mayores a 20 kV aproximadamente el voltaje del disparo es retenido en el panel del voltímetro, para valores menores no funciona, esto es debido a que el polo del interruptor CB102 que contiene un suiche auxiliar no pudo ser reparado y este participa en este mecanismo de retención.

REFERENCIAS

- [1] C. Espinoza Montes, Metodología de investigación tecnológica, Huancayo: Imagen Grafica SAC, 2010.
- [2] H. Sanchez Carlessi, C. Reyes Romero y K. Mejia Saenz, Manual de terminos en investigación científica, tecnológica y humanística, Lima: Universidad Ricardo Palma, Vicerrectorado de Investigación, 2018.
- [3] V. M. Niño Rojas, Metodología de la investigación, Diseño y ejecución, Bogotá: Ediciones de la U, 2011.
- [4] D. S. Behar Rivero, Metodología de la investigación, Shalom, 2008.
- [5] F. G. Arias, EL Proyecto de investigación, Séptima ed., Caracas: Episteme, 2016.
- [6] L. Torres, «Desarrollo de protocolo de prueba para aisladores usados de 13,8 kV,» Merida, 2004.
- [7] L. Saavedra, «Pruebas de voltaje en aisladores usados en redes de 13,8 kV bajo condiciones climáticas controladas,» Merida, 2006.
- [8] M. Briceño, «Fuente resonante y de impulso para laboratorio de alta tensión,» Merida, 2016.
- [9] C. Wadhwa, High voltage engineering, Second ed., New Delhi: New Age International (P) Ltd, Publishers, 2007.
- [10] E. Kuffel, W. Zaengl y J. Kuffel, High Voltage engineering, Fundamentals, Second ed., Butterworth-Heinemann, 2000.
- [11] M. Naidu y V. Kamaraju, High Voltage engineering, Second ed., McGraw-Hill, 1996.
- [12] J. Holtzhausen y W. Vosloo, High Voltage engineering practice and theory.
- [13] The Institution of Engineering and Technology, Lightning Protection, Londres: The Institution of Engineering and Technology, 2010.
- [14] D. Kind, An introduction to High-Voltage experimental technique: Textbook for electrical engineers, Vieweg, 1978.
- [15] Megger, Biddle Instruments, Instruction Manual AVTM681100ja for 50/100 kV ac Test Set Catalog No. 681100 Series, Megger, 1984.
- [16] R. F. Coughlin y F. F. Driscoll, Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Nahuacalpan de Juárez: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S.A., 1993.

[17] LINEAR TECHNOLOGY, Operational Amplifiers LM108A/LM308A/LM108/LM308.

[18] TEXAS INSTRUMENTS, Operational amplifiers LM101A-N/LM201A-N/LM301A-N, 2013.

[19] AIRPAX, APG/UPG/IPG Series.

www.bdigital.ula.ve

ANEXOS
www.bdigital.ula.ve

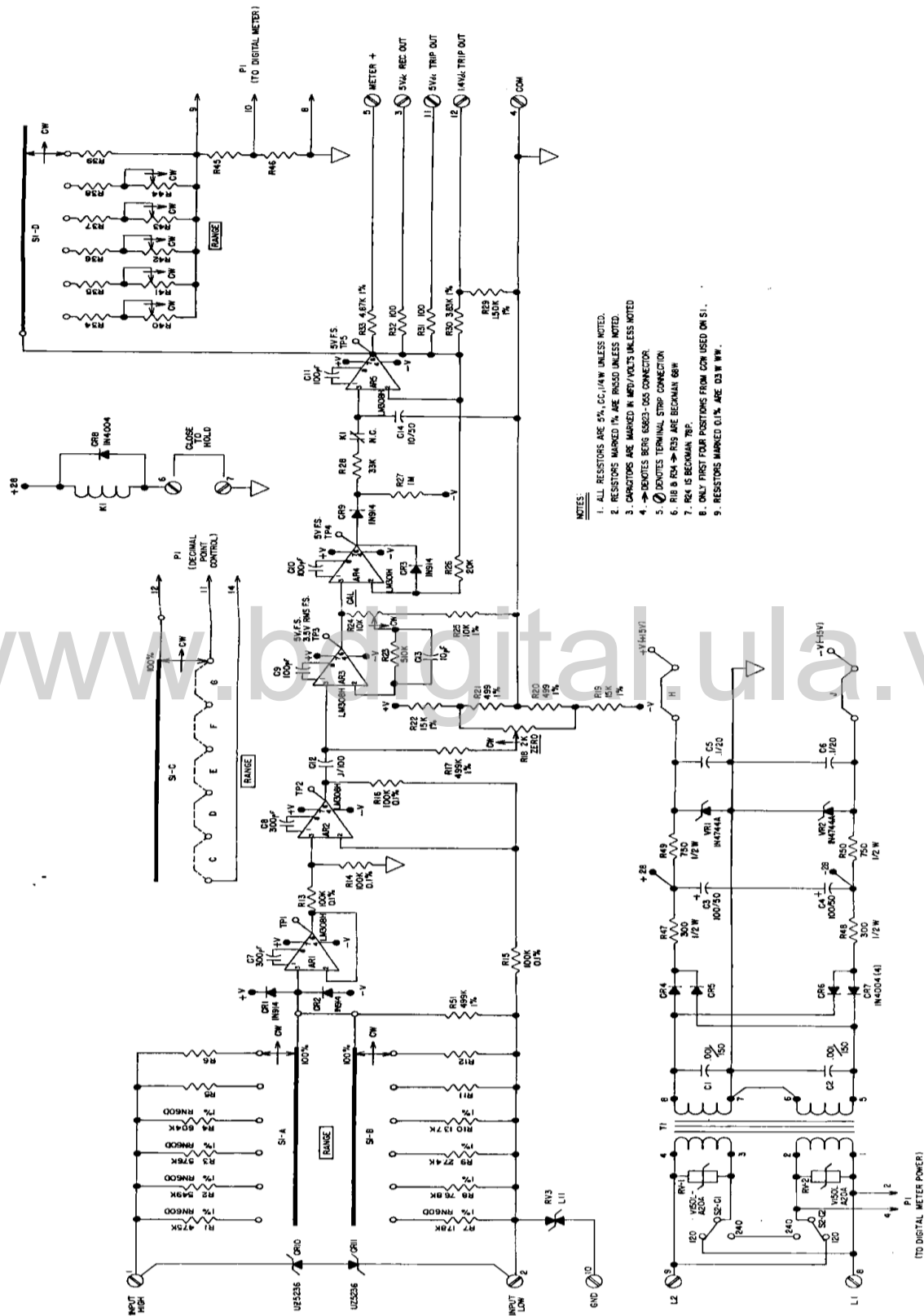


Figure 11: Voltmeter Driver Schematic.

Ilustración 1. Diagrama circuital tarjeta controladora del voltímetro. Fuente: [15]

NOTES

1. ALL RESISTORS 5% GC/4W UNLESS NOTED.
2. RESISTORS MARKED 1% ARE 1W/50 UNLESS NOTED.
3. CAPACITORS ARE MARKED IN WFD/VOLTS UNLESS NOTED.
4. \odot DENOTES TERMINAL STRIP CONNECTION.
5. \rightarrow DENOTES BENT 68823-005 CONNECTOR.
6. R40 - R48 ARE BECKMAN TYPE 4W.
7. R52 IS BECKMAN TYPE 7W.
8. ONLY FIRST FOUR POSITIONS FROM COW USED ON S1.

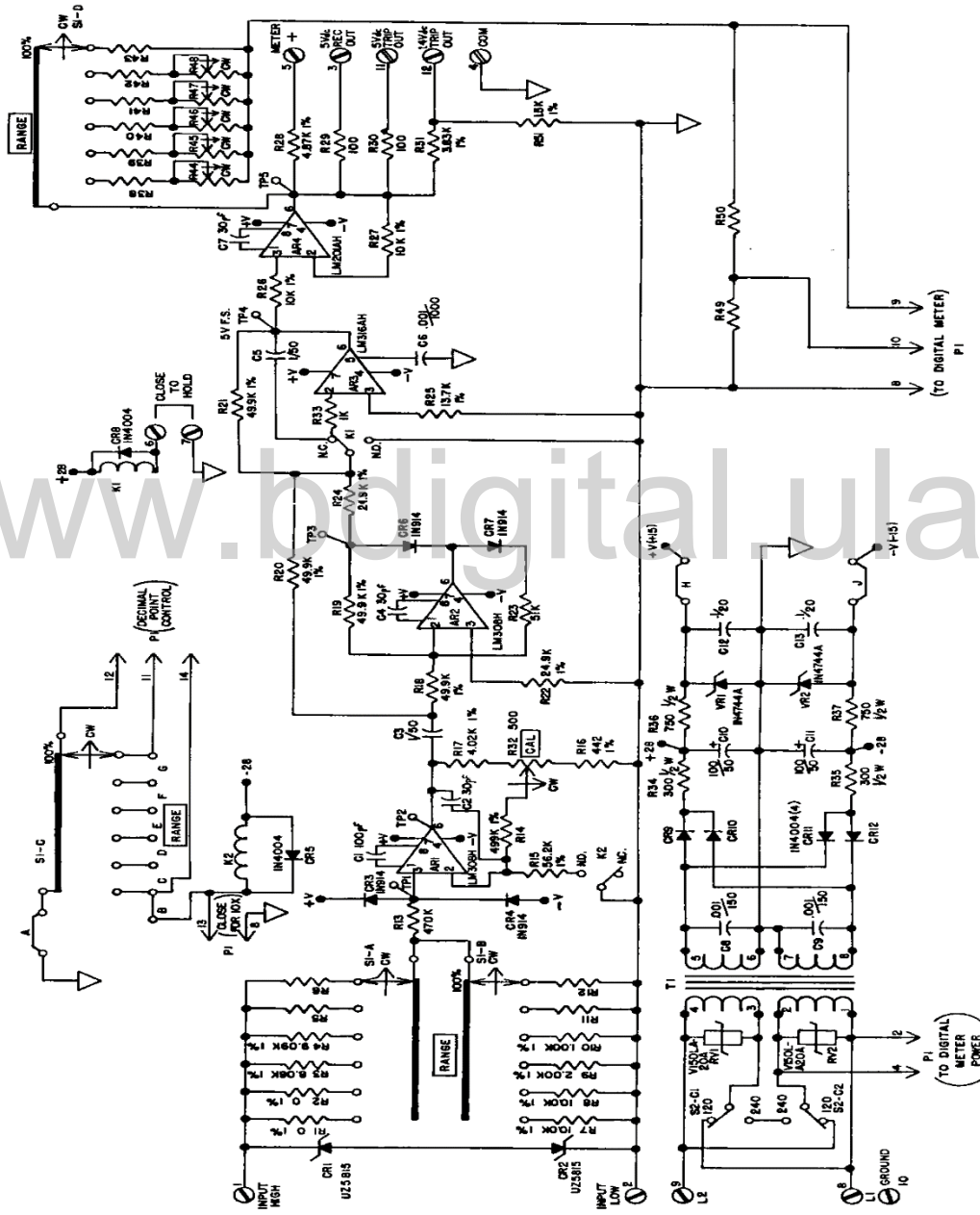


Figure 12: Current Meter Driver Schematic.

Ilustración 2. Diagrama circuital tarjeta controladora del medidor de corriente. Fuente: [15]

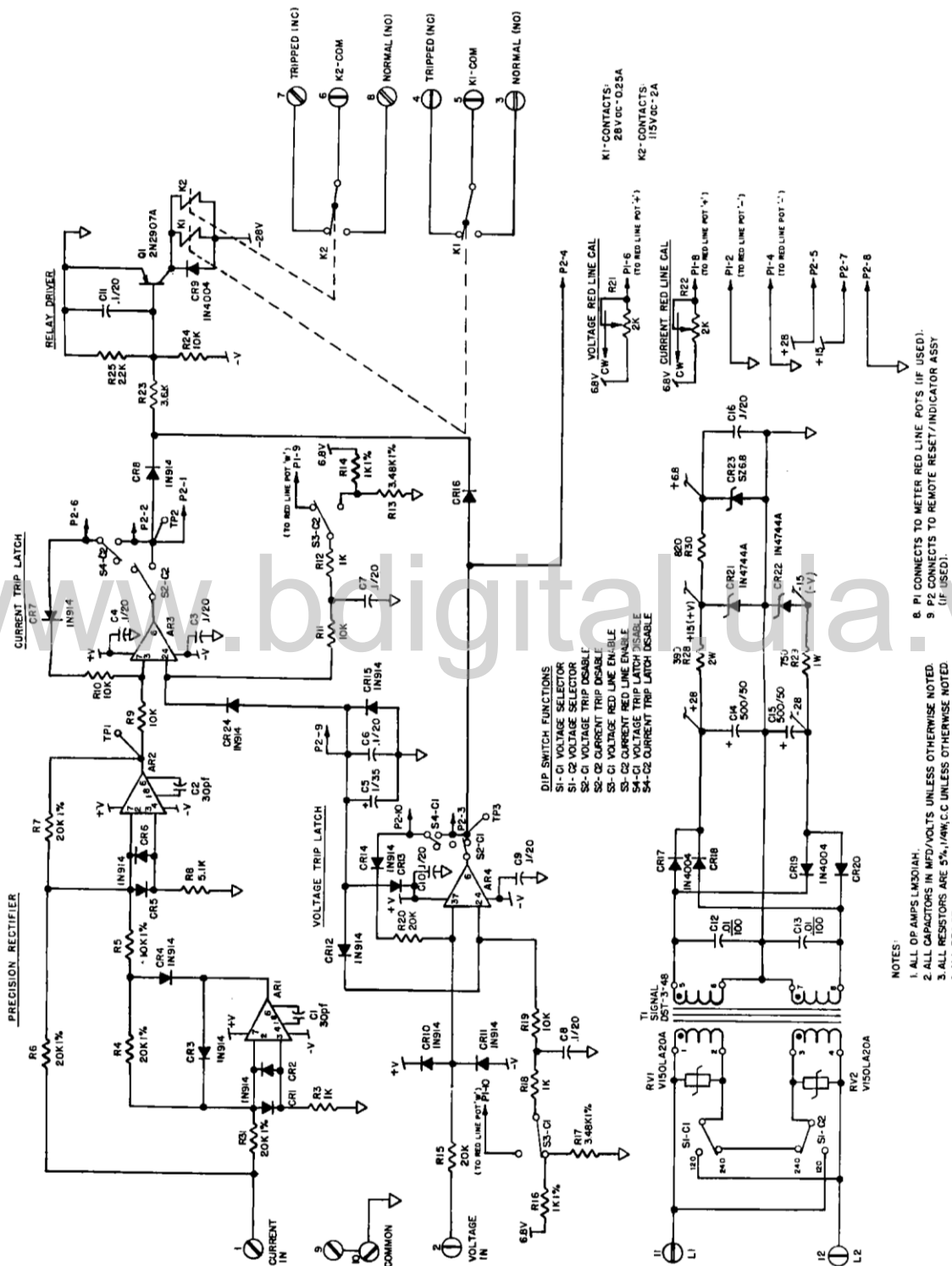


Figure 13: Overvoltage/Overcurrent Trip Board Schematic.

Ilustración 3. Diagrama circuital tarjeta de disparo de sobrecorriente/sobrevoltaje. Fuente: [15]

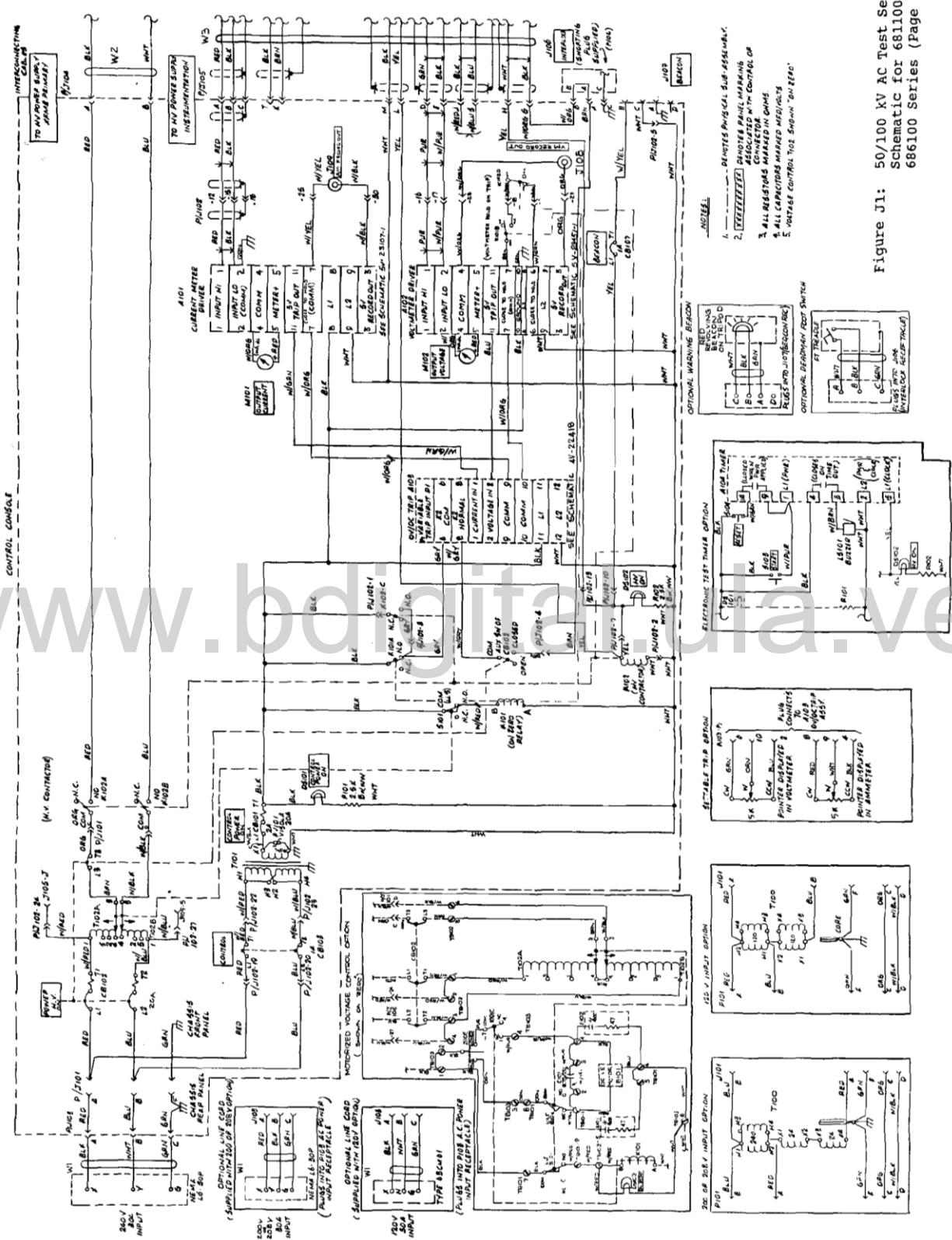


Figure J1: 50/100 KV AC Test Set Schematic for 68100 or 686100 Series (Page 1)

Ilustración 4. Diagrama circuital de la consola de control. Fuente: [15]

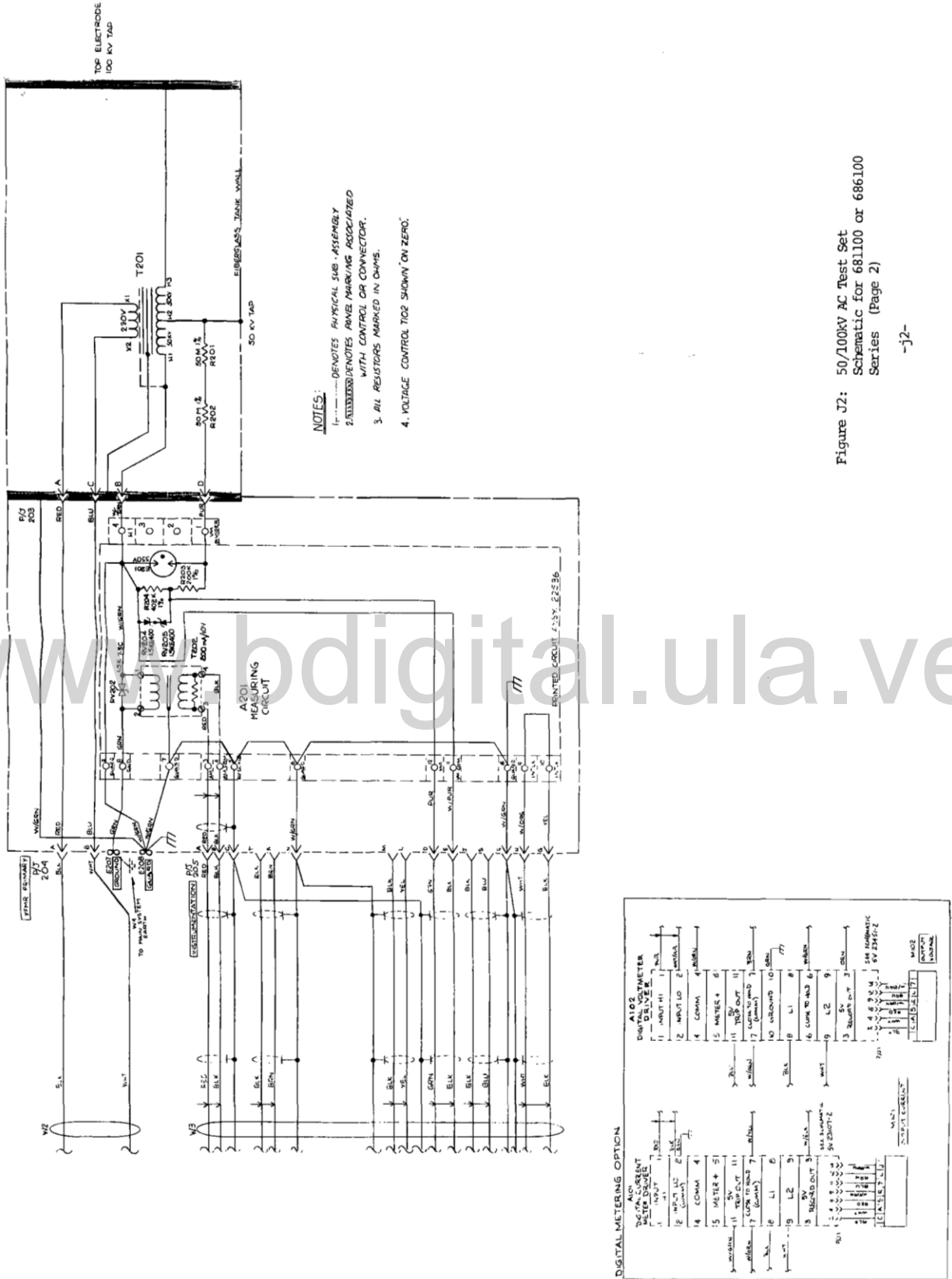


Ilustración 5. Diagrama circuital conjunto de alto voltaje. Fuente: [15]

Figure J2: 50/100KV AC Test Set Schematic for 681100 or 686100 Series (Page 2)