



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Dimensionamiento del sistema de control para un generador de alta tensión multipropósito tipo Kit CA/CD/impulso

Elkin Mayid Pérez Ayala

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería y arquitectura
Departamento de Ingeniería eléctrica y electrónica
Manizales, Colombia
2021

Dimensionamiento del sistema de control para un generador de alta tensión multipropósito tipo Kit CA/CD/impulso

Elkin Mayid Pérez Ayala

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Eléctrica

Director:

Francisco Abel Roldán Hoyos
DEA Génie Électrique

Línea de Investigación:

Alta Tensión

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Potencia Energía y Mercados - GIPEM

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de ingeniería y arquitectura
Departamento de Ingeniería eléctrica y electrónica
Manizales, Colombia

2021

A mi familia, mis padres Graciela y Pedro, a mi hermano Robinson, por alentarme para continuar cuando parecía que me iba a rendir.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Elkin Mayid Pérez Ayala

Fecha 16/04/2021

Agradecimientos

Agradezco al profesor Francisco Abel Roldan Hoyos, director del Laboratorio de Alta Tensión por su acompañamiento durante la elaboración de este trabajo y por su paciencia y guía durante todo este proceso, mi gratitud especial a Manuel Salvador Erazo, Alberto Mayorquín y Maria del Pilar Buitrago, por su disponibilidad, colaboración y apoyo en la realización de ensayos y experimentos.

A mi gran amigo Andres Rodriguez Ríos, por todo el tiempo y conocimiento invertido apoyando este proyecto y por ser ese gran ser humano y profesional que es.

Al ingeniero Jaime León Hincapié Daza, quien además de siempre estar dispuesto a enseñarme, me brindo una mano cuando la necesite.

A mi amigo y colega Daniel Augusto Rico Ayala por la colaboración brindada armando y ajustando una y otra vez el prototipo desarrollado.

A mi amiga Lya Morimitsu Escobar por su colaboración y apoyo incondicional durante todos los años que he compartido en su casa.

Un reconocimiento especial a todos mis amigos y compañeros del Laboratorio de Electricidad y Electrónica, de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, de Descafecol S.A. y de la Central Hidroeléctrica de Caldas CHEC S.A. E.S.P. y a todos mis parceros y colegas que por una u otra razón olvido mencionar y me han brindado su ayuda, soporte y amparo incondicional durante este proyecto y a lo largo de mi vida, mi más sincero y sentido agradecimiento, no hubiese sido posible finalizar este trabajo sin los aportes de cada uno de ustedes.

Resumen

Dimensionamiento del sistema de control para un generador de alta tensión multipropósito tipo Kit CA/CD/impulso

Se diseña un pupitre de control para un generador de impulsos de alta tensión ca - cd – impulso hasta 140 kV con el ensamblaje de un esquema de operación correspondiente a una operación combinada seleccionable monofásica o trifásica. El ensamble final se logró luego de 4 procesos de ensayo y error los cuales abarcaron un periodo de 12 meses. Se destaca que cada fase de la operación trifásica se ha dispuesto mediante dos variacs compensados mediante dos bobinas de choque, ubicados al mismo nivel, correspondiente a 10 kVA/fase, 50A/fase, 0-250 V. Para el caso de la operación monofásica todos los seis variacs dispuestos en paralelo son compensados mediante seis bobinas de choque, permitiendo obtener, 30 kVA, 150A, 0-250V. Cada variac cuenta con 250 espiras dispuestas en un arco de 290° aprox. para una tensión de 1 V por espira. Para la motorización del anterior suministro de tensión reconfigurable, se seleccionó y utilizó un motor dc de 15 vatios con reductor de velocidad (24 V a 625 mA) el cual mediante un arreglo de poleas acciona con velocidad uniforme el contacto móvil (cursor de escobillas) sobre las espiras del juego de variacs. De esta forma se obtiene una velocidad variable, tanto al ascenso como el descenso en la tensión de salida (recorrido de las espiras), alcanzando un tiempo mínimo de recorrido de 30 segundos (mayor velocidad) y un tiempo máximo de recorrido de 360 segundos (menor velocidad) de todas las espiras. La metodología establecida para el proyecto se basa en el cálculo y diseño de cada uno de los elementos involucrados en el tablero de control, como lo son la parte de la energización, la parte de control, la parte de señales, la parte de instrumentación, la parte de instrumentación y la parte de protecciones eléctricas. Estas se asocian también con otros componentes que a su vez se deben calcular como en el caso de los conductores, dimensiones de equipos, etcétera.

Palabras clave: Pupitre de control, generador de impulsos, variac, bobina de choke

Abstract

Control system sizing for a kit type multipurpose high voltage generator AC/ DC/impulse

A control desk is designed for a high voltage ac - dc - pulse generator up to 140 kV with the assembly of an operation scheme corresponding to a combined selectable single-phase or three-phase operation. The final assembly was achieved after 4 trial and error processes which spanned a period of 12 months. It should be noted that each phase of the three-phase operation has been arranged by means of two variants compensated by two choke coils, located at the same level, corresponding to 10 kVA / phase, 50A / phase, 0-250 V. In the case of single-phase operation All the six variacs arranged in parallel are compensated by six choke coils, allowing to obtain, 30 kVA, 150A, 0-250V. Each variac has 250 turns arranged in an arc of approx. 290 °. for a voltage of 1 V per turn. For the motorization of the previous reconfigurable voltage supply, a 15 watt dc motor with speed reducer (24 V at 625 mA) was selected and used which, through an arrangement of pulleys, drives the moving contact (brush cursor) with uniform speed. on the turns of the game of variacs. In this way, a variable speed is obtained, both when the output voltage rises and falls (loops travel), reaching a minimum travel time of 30 seconds (higher speed) and a maximum travel time of 360 seconds (slower speed) of all turns. The methodology established for the project is based on the calculation and design of each of the elements involved in the control panel, such as the energization part, the control part, the signal part, the instrumentation part, the instrumentation part and the electrical protection part. These are also associated with other components that must in turn be calculated as in the case of conductors, equipment dimensions, etc.

Keywords: Control desk, pulse generator, variac, choke coil.

Contenido

	Pág.
1. Capítulo I - Introducción	1
1.1 Formulación del problema	4
1.1.1 Antecedentes	4
1.1.2 Identificación del problema.....	7
1.2 Objetivos.....	8
1.2.1 Objetivo general.....	8
1.2.2 Objetivos específicos.....	8
1.3 Estructura del documento.....	8
2. Capítulo II – Marco teórico y estado del arte.....	11
2.1 Generador de voltaje (GIV)	11
2.1.1 Generador de impulsos de una etapa	12
2.1.2 Impulso normalizado tipo rayo [16]	13
2.1.3 Formas típicas ondas de rayo	13
2.2 Partes de un generador de impulso.....	14
2.2.1 Fuente variable de alta tensión	14
2.2.2 Etapa de rectificación	15
2.2.3 Circuito generador de impulsos.....	15
2.2.4 Trigatrón.....	16
2.2.5 Sistema de medida de tensión	16
2.2.6 Registro de la señal	17
2.2.7 Objeto bajo prueba	17
2.3 Pupitre de control para un generador de alta tensión	18
2.4 Seguridad	18
2.4.1 Sistema de puesta a tierra.....	19
2.5 Estándares de prueba de alto voltaje	20
2.5.1 Estándar IEC 60060-1 “High Voltage Test Techniques. Part 1: General definitions and test requirements”	20
2.5.2 Estándar IEEE 4-2013: IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques.	25
2.6 Generación de alta tensión	33
2.6.1 Generalidades.....	33
2.6.2 Generación AC	36
2.6.3 Generación DC	36
2.6.4 Generación de impulsos.....	36
2.7 Pruebas de alta tensión	42
2.7.1 Aisladores	43
2.7.2 Bujes	44
2.7.3 Interruptores y seccionadores.....	44
2.7.4 Cables.....	45
2.7.5 Pruebas aplicadas a transformadores de distribución.....	45
2.8 Fabricantes de pupitres de control	47

2.8.1	W.S Test Systems (WSTS. Bangalore, India) [40]	47
2.8.2	TERCO (Estocolmo, Suecia)	49
2.8.3	YANGZHOU POWER ELECTRIC CO., LTD (Jiangsu, China)	52
2.8.4	SAMGOR TECHNOLOGY (Shangai, China)	52
2.8.5	Yangzhou Xinyuan Electric Co., Ltd. PowerHV (Yangzhou, China)	54
2.8.6	Haefely (Basilea, Suiza)	55
2.8.7	HighVolt Prüftechnik Dresden GmbH (Dresden, Alemania)	59
2.9	Bobinas de choque paralelo	62
2.9.1	Variacs	65
2.10	Circuitos para experimentos de alto voltaje	66
2.10.1	Circuitos de seguridad y suministro de energía	66
2.10.2	Configuración de circuitos de alto voltaje	69
2.11	Elementos de construcción para circuitos de alto voltaje	70
2.11.1	Resistencias de alto voltaje	71
2.11.2	Condensadores de alto voltaje	72
3.	Capítulo III – Diseño metodológico	73
3.1	Diagrama de flujo esquemático del proceso de investigación	73
3.2	Enfoque metodológico	74
3.3	Etapas del proceso de investigación	74
3.3.1	Recopilación bibliográfica y referencias	74
3.3.2	Formulación y evaluación del proyecto / preguntas de investigación:	75
3.3.3	Adquisición de equipamiento técnico y de ingeniería para la correcta implementación del proyecto de investigación	75
3.3.4	Componentes eléctricos considerados	75
3.3.5	Componentes mecánicos considerados	76
3.3.6	Desarrollo y construcción de choques de corriente	76
3.3.7	Síntesis, conclusiones y recomendaciones finales	76
3.4	Cronograma de resultados	77
3.5	Dificultades	77
4.	Capítulo IV - Análisis de resultados	78
4.1	Características generalidades	78
4.2	Consola de control	78
4.2.1	Sinóptico de cableado	78
4.2.2	Esquema eléctrico	86
4.3	Especificaciones técnicas	87
4.3.1	Generalidades	87
4.3.2	Características generales	89
4.3.3	Impacto	89
4.4	Bobinas de choque paralelo	90
4.5	Consola de control – Entrada de alimentación	91
4.6	Consola de control – Conexión de chokes	91
5.	Capítulo V - Conclusiones	93
6.	Bibliografía	94
7.	Anexos	98

Lista de ilustraciones

	Pág.
Ilustración 1-1. Esquema de configuración para pruebas ca, cd e impulso [2].	4
Ilustración 2-1. Circuito característico para un generador de impulsos de una etapa [9].	12
Ilustración 2-2. Formas de onda característica de un generador de impulso tipo Marx. ..	13
Ilustración 2-3. Formas típicas de onda choque. /1/ Recortada en el frente. /2/ Recortada en la cola. /3/ Onda completa. [7].	14
Ilustración 2-4. Diagrama de bloques de un generador de impulsos de tensión.	14
Ilustración 2-5. Sistema de rectificación.	15
Ilustración 2-6. Circuitos de generadores de impulsos de tensión de una etapa [12].	15
Ilustración 2-7. Espinterómetro con trigatrón, adaptado de [22].	16
Ilustración 2-8. Divisor capacitivo, adaptado de [23].	17
Ilustración 2-9. Esquema de un laboratorio de alta tensión.	35
Ilustración 2-10. Generación de tensión AC.	36
Ilustración 2-11. Rectificador de media onda. Tomado de [3].	36
Ilustración 2-12. Impulso normalizado de tensión tipo maniobra.	37
Ilustración 2-13. Impulso normalizado de tensión tipo rayo.	38
Ilustración 2-14. Circuito característico para un generador de impulsos de una etapa. ...	38
Ilustración 2-15. Formas típicas de ondas de rayo/ 1. Recortada en el frente /2. Recortada en la cola /3. Onda completa.	39
Ilustración 2-16. Diagrama de bloques de un generador de impulsos de tensión.	39
Ilustración 2-17. Sistema de rectificación.	40
Ilustración 2-18. Espinterómetro con trigatrón, adaptado de [22].	41
Ilustración 2-19. Divisor capacitivo. Adaptado de [23].	41
Ilustración 2-20. Pupitre de control SRP 0.5 / 5E.	48
Ilustración 2-21. Pupitre de control SRP 0.5 / 5TrE y SRP 0.5 / 10E.	49
Ilustración 2-22. Pupitre de control TERCO HV 9103.	50
Ilustración 2-23. Pupitre de control TERCO HV 9104.	51
Ilustración 2-24. Pupitre de control Yangzhou Power Electric Co.	52
Ilustración 2-25. Pupitre de control SAMGOR.	54
Ilustración 2-26. Convertidor de frecuencia Haefely.	57
Ilustración 2-27. Equipo de control OT 276 de Haefely.	57
Ilustración 2-28. Equipo de medida DMI 551 de Haefely.	58
Ilustración 2-29. Esquema de adquisición, medida y control de datos en Kit 4.0 de Haefely.	58
Ilustración 2-30 Consolas de operador Hico Basic BG 8 G, 8 E, 9 P de HighVolt.	60

Ilustración 2-31. Visualización de pruebas y parámetros del iCOS Basic TT de HighVolt.	62
Ilustración 2-32. Bobina de choque paralelo.	63
Ilustración 2-33. Representación esquemática del circuito básico de una configuración experimental de alto voltaje [49].	67
Ilustración 2-34. Diagrama de bloques para el circuito de alimentación de una configuración experimental de alto voltaje.	69
Ilustración 2-35. Rutas de corriente de los circuitos de seguridad y control de una configuración experimental de alta tensión.	70
Ilustración 2-36. Tipos de resistencias de alto voltaje con resistencias de capa de carbono.	71
Ilustración 2-37. Izquierda - Divisor capacitivo amortiguado para tensiones de impulso hasta 200 kV con condensadores cerámicos y resistencias de tipo capa en el aire. Derecha - Condensador de referencia para 100 kV, 26 pF con aislamiento de gas comprimido.	72
Ilustración 3-1. Visión esquemática del proceso de investigación.	73
Ilustración 4-1. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 01.	79
Ilustración 4-2. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 02.	80
Ilustración 4-3. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 03.	81
Ilustración 4-4. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 04.	82
Ilustración 4-5. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 05.	83
Ilustración 4-6. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 06.	84
Ilustración 4-7. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 07.	85
Ilustración 4-8. Diseño de consola de control - Esquema eléctrico.	86
Ilustración 4-9. Construcción de la fuente motorizada variable.	87
Ilustración 4-10. Bobinas de choque utilizadas.	88
Ilustración 4-11. Diseño de Toroide para la bobina de choque paralelo.	90
Ilustración 4-12. Consola de control - Entrada de alimentación.	91
Ilustración 4-13. Consola de control - Conexión de chokes.	92

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Máximo nivel de tensión de ensayo ca - cd - impulso, por fabricante, utilizando una sola consola de control y circuitos con tres etapas.....	3
Tabla 2-1. Valores de tolerancia aceptados para impulsos tipo rayo según IEC 60061-1.	24
Tabla 2-2. Procedimientos de resistencia ante las pruebas con impulso tipo rayo según IEC 60061-1.	24
Tabla 2-3. Valores de tolerancia aceptados para impulsos tipo maniobra según IEC 60060-1.	25
Tabla 2-4. Condiciones normales de ambiente para la realización de pruebas de alta tensión según Std IEEE 4 - 2013.	25
Tabla 2-5. Requerimientos de incertidumbre para cada sistema de medida de acuerdo a IEEE Std 4. 2013.	26
Tabla 2-6. Valores de tolerancia aceptados para impulsos tipo rayo según IEEE Std 4-2013.	31
Tabla 2-7. Valores de tolerancia aceptados para impulsos tipo rayo recortados en la cola según IEEE Std 4-2013.	32
Tabla 2-8. Valores de tolerancia aceptados para impulsos tipo maniobra según IEC Std-4 2013.	32
Tabla 2-9. Matriz de relación entre usuarios y aplicaciones de laboratorios de alta tensión.	34
Tabla 2-10. Componentes para suministro de energía eléctrica. tomado de [34].	42
Tabla 2-11. Otras aplicaciones para energía eléctrica. Tomado de tomado de [34].	42
Tabla 2-12. Datos del pupitre SRP 0.5 / 5E suministrados por el fabricante.	47
Tabla 2-13. Datos del pupitre SRP 0.5 / 5TrE suministrados por el fabricante.	48
Tabla 2-14. Datos del pupitre SRP 0.5 / 10E suministrados por el fabricante.	49
Tabla 2-15. Datos del pupitre de control HV 9103 suministrados por el fabricante.	49
Tabla 2-16. Datos del pupitre de control HV 9104 suministrados por el fabricante.	51
Tabla 2-17. Datos del módulo de conmutación SGADI 300E suministrados por el fabricante.	53
Tabla 2-18. Parámetros de medición del Sistema Digital de Medida AC/DC (SG 3005).	53
Tabla 2-19. Características del Sistema Digital de Medida de Impulso (SG 3004).	53
Tabla 2-20. Características del Sistema Digital de Control AC/DC/Impulso (ACS-1).....	54
Tabla 2-21. Parámetros de generadores AC suministrados por Haefely.	55

Tabla 2-22. Parámetros de generadores DC suministrados por Haefely.....	56
Tabla 2-23. Generadores de impulso tipo Rayo y Maniobra.	56
Tabla 2-24. Especificaciones para la construcción del sistema de pruebas suministrados por HighVolt	59
Tabla 2-25. Referencias de consolas de operador fabricadas por HighVolt.	59
Tabla 2-26. Dimensiones y peso de consolas de operador fabricadas por HighVolt.	60
Tabla 2-27. Diferentes firmwares disponibles y sus aplicaciones.	60
Tabla 2-28. Funcionalidades de los diferentes firmwares desarrollados por HighVolt.	61
Tabla 2-29. Número de espiras por variac.	63
Tabla 2-30. Relación Voltios/Espira de cada variac.	64
Tabla 2-31. Dimensiones del núcleo de la bobina.	65
Tabla 4-1. Características generales del suministro motorizado de tensión.....	89

1. Capítulo I - Introducción

Los “ensayos en alta tensión” tienen como objetivo principal probar si los equipamientos eléctricos son aptos para soportar los requisitos de tensión, y/o verificar su desempeño, durante su etapa de desarrollo y/o antes de su puesta en servicio, a fin de determinar su operatividad satisfactoria en condiciones reales, de acuerdo con lo establecido por el fabricante y/o sus destinatarios, imitando las condiciones de operación a las que puedan estar sometidos durante su vida útil.

La magnitud y el tipo de la tensión de prueba varían con la tensión nominal de cada equipo. En particular, condiciones de tensión nominal o de sobretensión, tensión alterna a una frecuencia específica, tensión continua y/o de impulso con una polaridad definida, se encuentran entre las tensiones de prueba más comunes. Los ensayos a que cada equipamiento debería ser sometido están establecidos por reglamentos, normas (nacionales e internacionales) y/o requerimientos pertinentes a los mismos [1].

Según la norma IEC 60060-1 [2], los ensayos en alta tensión se pueden clasificar en ensayos de rutina, ensayos de tipo, ensayos especiales, ensayos de mantenimiento y ensayos de campo. Para realizar los ensayos mencionados, se utiliza alta tensión, alterna, continua e impulso (tipo rayo o maniobra), según el ensayo que se quiera realizar. En la mayoría de sus veces los ensayos son hechos en laboratorios de alta tensión dedicados a estas prácticas.

Para la generación de alta tensión alterna, así como en la mayoría de los circuitos para la generación continua y de impulso, se utilizan ya sea “transformadores resonantes” o, “transformadores de pruebas”, en estos últimos, cuando el nivel de tensión de ensayo ca no supera los 500 kV, es posible usar solo un transformador elevador para realizar la prueba (del tipo tanque o tipo cilíndrico), para niveles más elevados de tensión usualmente

se opta por la conexión en serie o “cascada” de varios transformadores (típicamente del tipo cilíndrico). Así, los “transformadores de laboratorio o de ensayo o de prueba”, son de baja potencia y su relación de transformación es mucho mayor que la de los “transformadores de potencia”. Su devanado de alta tensión está diseñado de manera que pueda soportar los ensayos de rutina a los que se somete el objeto de prueba.

La alimentación de tensión en el primario de los transformadores de prueba, se suministra mediante el uso de los llamados transformadores de regulación (“variacs” o autotransformadores variables), alimentados por la red eléctrica a través de transformadores de aislamiento, o en casos especiales, por generadores síncronos [3]. Los métodos más comunes de generación de alta tensión en continua emplean rectificación de alta tensión en alterna, a menudo utilizando “circuitos multiplicadores de tensión”. También se utilizan generadores electrostáticos.

Existen numerosos ensayos para alta tensión cd en laboratorio, tales como: prueba de equipos de transmisión en corriente continua de alta tensión (“high voltage direct current” - HVDC, por sus siglas en inglés), prueba de cables con relativa alta capacitancia (que, de probarse en alterna, demandarían corrientes elevadas, para lo cual se emplean los “transformadores resonantes”), y en pruebas de aislamiento, donde las descargas parciales en ca dan lugar a la degradación del mismo [4].

Las pruebas de impulso en alta tensión simulan el esfuerzo debido a sobretensiones internas y externas a las que se exponen los sistemas de aislamiento de los equipos en la red eléctrica. Típicamente, se generan mediante la descarga de condensadores de alta tensión a través de la conmutación de explosores¹ en un arreglo de rectificadores, resistores y capacitores, en circuitos multiplicadores de tensión, siendo el más común el generador de impulsos de tensión tipo Marx.

Los generadores de alta tensión multipropósito (ac / dc / impulso), modulares, comercialmente disponibles conocidos como “high voltage construction kit”, se utilizan en

¹ También conocido como “spark gap” o “sphere gap”

pequeños laboratorios de investigación, desarrollo y/o entrenamiento. Usualmente utilizan una sola consola de control, con niveles de tensión de hasta 430 kVac, 500 kVdc y 800 kVimpulso. La mayoría de los fabricantes de estos generadores de alta tensión, posibilitan la reconfiguración de los circuitos para aumentar los niveles de tensión de salida hasta los valores antes mencionados. La tabla 1-1 muestra las marcas más representativas a nivel global de este tipo de equipos.

En la figura 1-1 se muestra el diagrama de bloques para pruebas ca - cd - impulso, el bloque de interés el presente trabajo es el 1, “módulo de alimentación del circuito de alta tensión o módulo de potencia”, el cual está conformado por la consola de control y el transformador de ensayo. La función principal de la mesa de control es garantizar la seguridad e integridad tanto de los operarios como de los observadores de los ensayos, y permitir un modo correcto de operación de los equipos.

Tabla 1-1. Máximo nivel de tensión de ensayo ca - cd - impulso, por fabricante, utilizando una sola consola de control y circuitos con tres etapas.

Fabricante	Tensión ca [κV_{RMS}]	Tensión cd [κV]	Tensión impulso [κV]	Número de etapas
HUAGAO	300	400	400	3
POWER HIGH VOLTAGE TEST	300	400	420	3
Himalaya	100	200	200	2
HIGH VOLT	200	350	135	1
HAEFELY HIPOTRONICS	300	400	420	3
W.S. Test Systems	300	400	400	3
TERCO	300	400	400	3

En Colombia, kits de alta tensión multipropósito se encuentran en las tres sedes principales de la Universidad Nacional y en la Universidad Distrital de Bogotá. Otras universidades como la Industrial de Santander, la de Valle y también la Nacional de Bogotá y Medellín, cuentan con equipos de laboratorio de alta tensión tipo industrial.

La Universidad Nacional de Colombia en Manizales, ha proyectado un nuevo grupo de instalaciones incluidos laboratorios, para el Departamento de Ingeniería Eléctrica

Electrónica y Computación. Entre estos se proyecta el traslado del área de alta tensión a una nueva edificación con un área en terrenos, cercana a los 400 m².

Se cuenta con elementos de un kit de alta tensión de la marca TERCO, que dispone de una consola de control y un transformador de ensayos de alta tensión tipo cilíndrico de 5 kVA (módulo de potencia), además de otros componentes (capacitores, resistores, divisores de tensión, etc.) necesarios para la generación dc y de impulsos tipo rayo. Así mismo, se cuenta con un transformador de ensayos de alta tensión tipo tanque de 30 _VA que carece de una mesa de control para su accionamiento. Por tanto, se requiere diseñar una mesa de control para este último transformador, que puede además acoplarse con esquemas modulares de altas tensiones dc e impulso ya disponibles en el laboratorio de alta tensión de la sede.

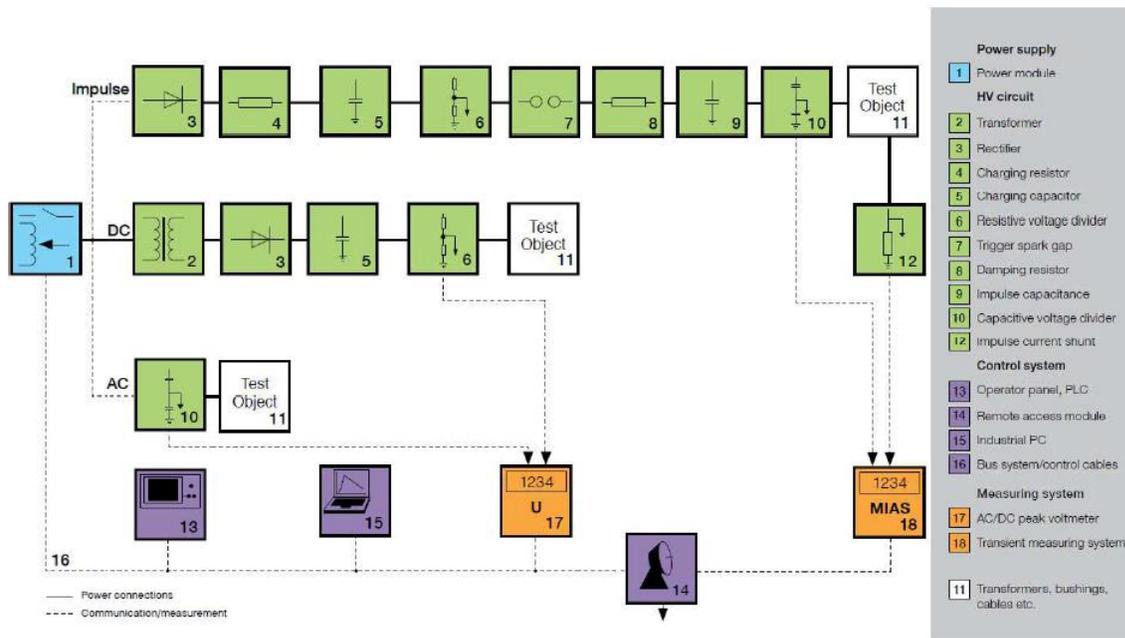


Ilustración 1-1. Esquema de configuración para pruebas ca, cd e impulso [2].

1.1 Formulación del problema

1.1.1 Antecedentes

A comienzos del siglo XX se requería que el aislamiento de los transformadores de alta tensión fuese capaz de resistir las sobretensiones de corta duración originadas por las

descargas atmosféricas y aunque se carecía de bases experimentales y teóricas suficientes, se ensayó el mismo (especialmente en Alemania y Suiza) con ondas de frente escarpado que alcanzaban un valor máximo de 1;1 veces la tensión de línea [5].

Fue necesario incrementar la amplitud de prueba de las ondas de impulso de tensión, por tanto, fue más difícil generar este tipo de señales, debido a que se requerían capacitancias que soportaran mucha mayor tensión de carga y la fuente DC que las alimentaba también demandaba más tensión, lo que tecnológicamente era complicado y costoso.

Por esta razón, en 1923 el ingeniero electricista Erwin Otto Marx presentó un circuito eléctrico cuya finalidad era generar un pulso de alta tensión partiendo de un suministro de CC de baja tensión, semejante a los propuestos en la década anterior, como el multiplicador de tensión de Heinrich Greinacher en 1913 (circuito rectificador para duplicar la tensión); los dos comparten el concepto de multiplicador de tensión en cascada, mediante el uso de múltiples etapas de capacitores, pero se diferencia en la forma de cargar los capacitores en paralelo desde la fuente y descargarlos en serie para lograr generar el impulso de tensión deseado [6]

El problema fue estudiado vigorosamente en los años 30 mayormente en EE.UU., mediante la investigación directa de los fenómenos producidos por el rayo en las redes de alta tensión. Las innumerables mediciones y registros gráficos efectuados, así como la interpretación estadística de los resultados obtenidos llevó a reproducirlos artificialmente en instalaciones dedicadas a la realización de ensayos y condujo a modificaciones del diseño del transformador que llevaron a lo que hoy conocemos como transformador "a prueba de rayos", también llamado "anti resonante" [5].

A comienzos de la década de los 40, los ensayos con los nuevos impulsos de tensión ya eran parte de las pruebas realizadas en las grandes fábricas de transformadores norteamericanas. Desde entonces la generación y medición de las ondas de impulso que simulan las sobretensiones de corta duración debidas en su mayoría a descargas atmosféricas, son fundamentales para comprobar experimentalmente el cumplimiento de los requisitos de control de calidad que exigen las normas de fabricación del equipo eléctrico (ISO 9001 e ISO 9004) [7].

En la tercera IEEE Pulsed Power Conference (junio de 1981), fue creado el premio Erwin Marx y dedicado a la memoria del profesor Marx y su concepto del generador de impulsos de alta tensión en cascada [8]. Hoy en día, el premio IEEE Erwin Marx, establecido en 1997 reconoce excepcionales logros técnicos en ingeniería de potencia pulsada, la ciencia y la tecnología; este premio reconoce la importancia del profesor Erwin Marx y se da cada dos años a individuos que han hecho contribuciones técnicas pendientes a la tecnología de potencia pulsada durante por lo menos diez años.

Es así como distintas instituciones de formación e investigación invierten esfuerzos para desarrollar generadores de impulso y/o aplicaciones de simulación para: entrenamiento, experimentación, análisis de desempeño (ajuste de parámetros de circuito), en adición a las capacidades de ensayo [9].

A nivel nacional, en la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá se tiene una amplia y larga experiencia en el dimensionamiento, diseño y construcción de elementos para generadores de impulso de tensión y corriente, con utilidad práctica a la vez que cumplen con funciones didácticas, entre los que se pueden citar [10], donde se reporta el dimensionamiento, diseño y construcción de un generador de impulsos de corriente para uso en laboratorio; mientras en [11], se muestra la secuencia de pasos concernientes a la fabricación (diseño y construcción) de un generador de impulsos modular para revisión de descargadores serie 15 kV en campo, el cual genera una tensión del orden de 45 kV con una corriente poco menor a 12 Amperios, que permite ubicar el descargador en su zona no lineal para realizar el diagnóstico de su funcionamiento.

La sede Medellín ha logrado desarrollar un generador de impulsos de AT hasta 200 kV que sirve para realizar pruebas y conocer la resistencia de equipos eléctricos frente a descargas atmosféricas, con el que se desea "aumentar el número de pruebas en el laboratorio y determinar el Nivel Básico de Aislamiento (BIL) de los equipos eléctricos."

En la Universidad del Valle se han desarrollado proyectos como el citado en [12], donde se implementó un divisor capacitivo para medir ondas de impulso de tensión, su laboratorio cuenta con un generador de impulso de tensión tipo Marx-Goodelt 300 kV.

La Universidad Industrial de Santander posee en su laboratorio de alta tensión un generador de impulsos marca HAFELY SGS 800=20, es un equipo modular que consta de 8 etapas, el cual permite obtener ondas de impulso con amplitudes entre 10 y 800 kV, con una energía almacenada de hasta 20 kJ [13].

En la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, cuentan con dos generadores de impulsos de tensión, uno adquirido a la empresa TERCO y el otro desarrollado en su laboratorio de alta tensión y Termoeléctricos [14]. Además de las instituciones académicas, los principales fabricantes de transformadores, cables y aisladores eléctricos cuentan en sus instalaciones con Laboratorios para ensayos de alta tensión, con generadores de impulso, por ejemplo [15]:

- En Medellín, SUNTEC, RYMEL, GAMMA, VERITEST.
- En Bogotá, SIEMENS y PROCABLES.
- En Pereira, MAGNETRON y ABB.
- En Cali, ROY ALPHA y CENTELSA.

Los cuales tienen disposición casi exclusiva de la producción del sitio y están dedicados a las exigencias presentes, en expansión y permiten realizar, entre otras: Pruebas dieléctricas, de calentamiento y climáticas. Pruebas de rutina y algunos ensayos tipo.

1.1.2 Identificación del problema

El equipo de alta tensión de la UNAL sede Manizales cuenta con un sistema rudimentario de control y medida para ondas ca - cd - impulso. Si bien, es posible generar ondas de alta tensión ca, cd e impulso, el control de los elementos y dispositivos de seguridad para la manipulación del equipo de alta tensión, no posibilita medir, caracterizar y visualizar la forma de onda generada, de una manera más segura y confiable.

El sistema de control y medida (electromecánico y/o digital) de generación de altas tensiones en Laboratorio debe integrar:

- Seguridad de acceso al área de ensayo (interrupción fuentes de energía, alarmas audibles y visuales, etc.)
- Control de tipo de ondas generadas (selección ca/cd/impulso, rampas de ascenso y descenso kV/s, polaridades, repetibilidad, etc.)

- Sistema de medida (calibración, visualización, cálculo de tiempos y amplitudes, etc.).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar un pupitre de control para un generador de impulsos de alta tensión ca - cd – impulso hasta 140 kV.

1.2.2 Objetivos específicos

- Mejorar el control de los elementos y dispositivos de seguridad para la manipulación del equipo de alta tensión en el laboratorio de la sede.
- Diseñar un pupitre de control que permita seleccionar entre diferentes formas de operación (ca/cd/impulso), generar rampas de ascenso y descenso kV/s y que posibilite la repetibilidad de los ensayos.

1.3 Estructura del documento

- En el Capítulo I se presenta la introducción general del trabajo con los aspectos más importantes de la aplicación, la identificación del problema, los antecedentes asociados del trabajo, los objetivos generales y específicos a alcanzar y la composición del documento en general.
- En el Capítulo II se muestran los tipos de ondas, partes y principios básicos de funcionamiento de los generadores de impulsos de voltaje, el marco teórico y el estado del arte asociado al parte de un generador de impulso, el pupitre de control para un generador de alta tensión, seguridad del circuito, estándares de prueba de alto voltaje, generación de alta tensión, pruebas de alta tensión, fabricantes de pupitres de control, bobinas de choke paralelo y análisis de los variacs.
- En el capítulo III se encuentra el diseño metodológico con el diagrama de flujo esquemático del proceso investigativo, el enfoque metodológico, las etapas del

proceso de investigación, el cronograma de resultados y las dificultades del proyecto.

- En el Capítulo IV se muestra el análisis de resultados donde se evidencia el proceso de diseño del pupitre de control divididas en diferentes componentes o partes. Se encuentran descritas las características generales, un apartado para la descripción de la consola de control, los esquemas sinópticos del cableado, el esquema eléctrico, las especificaciones técnicas, las generalidades de los instrumentos utilizados, el impacto asociado del proyecto, la conexión de los variacs, las bobinas de choque paralelo, la consola de control y su entrada de alimentación, la consola de control y la conexión de chokes.
- En el último capítulo – capítulo V se encuentran las conclusiones generales de todo el proyecto de investigación.

2. Capítulo II – Marco teórico y estado del arte

2.1 Generador de voltaje (GIV)

El generador de impulsos de voltaje (GIV) es un equipo que genera intencionalmente tensiones transitorias de alto voltaje [16], se emplea para verificar o investigar el comportamiento de equipos y aislamientos ante sobretensiones [5], con la finalidad de verificar la capacidad que posee un determinado dispositivo o máquina de soportar dicho impulso sin que ocurra ruptura dieléctrica en su aislamiento. Las sobretensiones son tensiones que presentan un valor superior a la tensión de operación en régimen permanente en una red y se dividen en temporales o transitorias.

Las sobretensiones transitorias, corresponden a la evolución de las sobretensiones entre dos estados de funcionamiento permanente, típicamente se subdividen en internas al sistema eléctrico (maniobra) o externas al mismo (rayo, origen electrostático, explosiones nucleares). Se caracterizan por tener formas de onda aperiódicas tipo impulso o choque, con tiempos de ascenso que van desde un nanosegundo hasta un milisegundo y comprenden tiempos de descenso que van desde una centena de nanosegundos hasta un segundo [17]. Para ensayos de laboratorio como los definidos en IEC 60060-1 [18]. los impulsos de tensión tipo rayo y/o maniobra, positivos o negativos², se logran mediante el uso de generadores de múltiples etapas alcanzando niveles de tensión de varios MV. El circuito eléctrico más empleado para tales generadores corresponde al llamado tipo Marx, que en su versión simplificada puede analizarse mediante un circuito de una sola etapa, correspondiente hasta versiones físicas de hasta 200 kV [9].

² El 90% de las descargas nube-tierra son de polaridad negativa. Sólo un 10% de las descargas nube-tierra son de polaridad positiva.

2.1.1 Generador de impulsos de una etapa

En la ilustración 2-1 se ilustra la configuración típica del generador de impulsos tipo Marx de una etapa. La forma de onda generada es mostrada en la ilustración 2-2, dicha onda se compone de dos funciones exponenciales obtenidas de un circuito con dos elementos almacenadores de energía. La generación del impulso en el circuito de la ilustración 2-1 comprende inicialmente la carga de un capacitor C_g con polaridad definida a partir de la fuente y hasta un nivel de tensión tal que produce la descarga del explosor, conduciendo la energía de la descarga a través de los resistores R_{s1} hacia el capacitor C_c , produciéndose de esta forma el frente de la onda hasta alcanzar su máxima amplitud. Posteriormente los capacitores drenan la energía por los resistores R_{s1} hacia la referencia a través del resistor R_p , produciendo en este caso la cola de la onda.

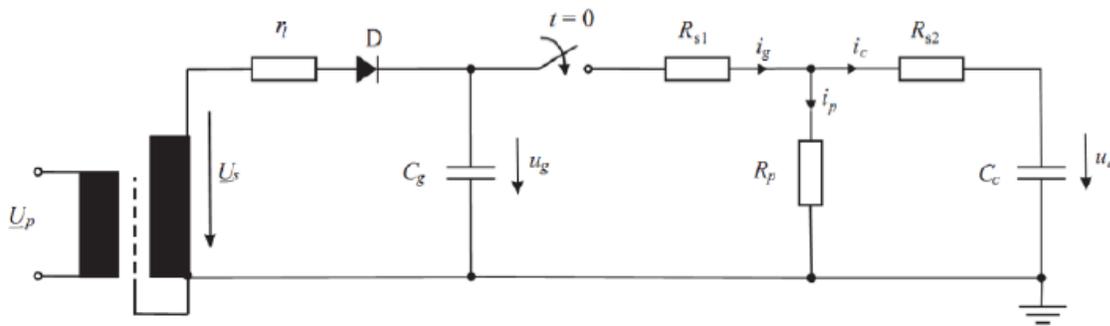


Ilustración 2-1. Circuito característico para un generador de impulsos de una etapa [9].

El explosor³ actúa como interruptor y como limitador de tensión, comportándose como un interruptor controlado por tensión [14]. El capacitor C_g define la energía almacenada por el generador.

El capacitor C_c se conecta en paralelo con el objeto de prueba adicionando su capacitancia para propósitos de análisis, por lo tanto, el valor del capacitor C_c debe ser lo suficientemente grande para no ser afectado por la capacitancia introducida por el objeto de prueba [9].

³ También conocido como "Spark Gap" o "Sphere Gap"

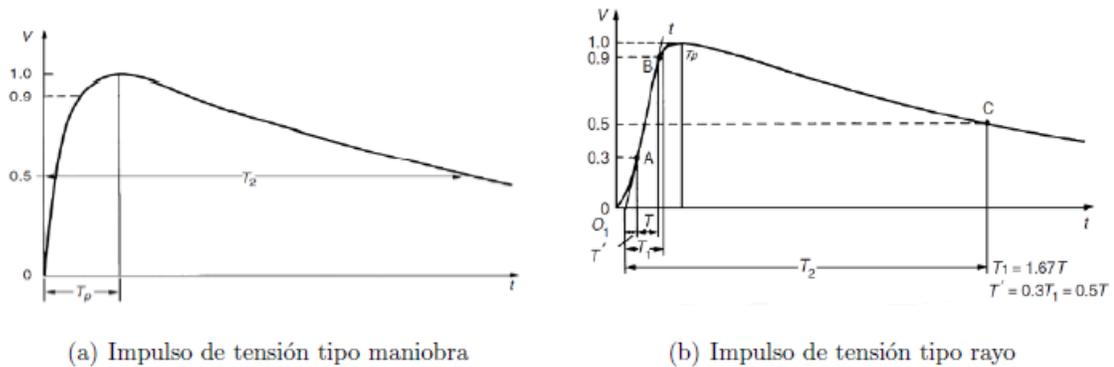


Ilustración 2-2. Formas de onda característica de un generador de impulso tipo Marx.

2.1.2 Impulso normalizado tipo rayo [16]

También llamado impulso 1, 2/50, se define como un impulso positivo o negativo cuya amplitud máxima establecida actúa en un rango de $\pm 3\%$, registrando tiempos de frente en el rango de $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$ y de cola en el rango de $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ cuando la tensión decae al 50% de su valor pico, ver ilustración 2.2(b). El tiempo de frente T_1 (T_f) del impulso tipo rayo, es determinado al escalar T por un factor de 1,67 donde T es el intervalo de tiempo medido (en el flanco ascendente) entre los instantes de tiempo en que se alcanza el 30% y el 90% de la tensión pico entregada por el generador. El tiempo de la cola T_2 , es medido desde el origen virtual O_1 ó T_0 ; abscisa a partir de la cual se miden los tiempos T_1 y T_2 en la ilustración 2.2(b), hasta cuando la tensión alcanza el 50% de la tensión nominal de la onda en el flanco descendente.

2.1.3 Formas típicas ondas de rayo

Las normas (IEC 60060-1 [1] y ASTM D3426-97 [19]) dividen en tres ondas típicas las ondas de choque que aparecen en los sistemas eléctricos. Estos tres tipos de ondas, mostradas en la ilustración 2-3, pueden presentarse en los equipos durante su operación dentro del sistema de potencia causando serios daños en los devanados de los transformadores, máquinas giratorias u otros aparatos tales como líneas, redes, etc. El daño producido depende, entre otros factores, del sitio del impacto, del tipo de onda, de la polaridad y de la adecuada coordinación del aislamiento del sistema [7], entendiéndose este concepto según la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC) como: "El proceso de correlacionar la rigidez dieléctrica del equipo, con las características de funcionamiento de los dispositivos de protección de acuerdo con los sobrevoltajes esperados".

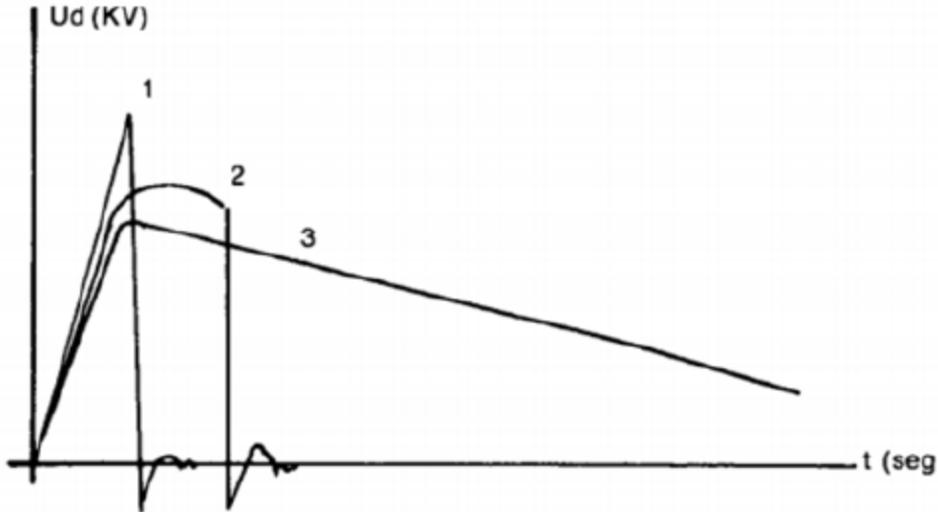


Ilustración 2-3. Formas típicas de onda choque. /1/ Recortada en el frente. /2/ Recortada en la cola. /3/ Onda completa. [7].

2.2 Partes de un generador de impulso

En la ilustración 2-4 se presenta un generador de impulsos de tensión dividido en bloques, dependiendo de la función que desempeñan dentro del sistema, lo cual facilita su entendimiento y permite determinar las partes que lo conforman a grosso modo.

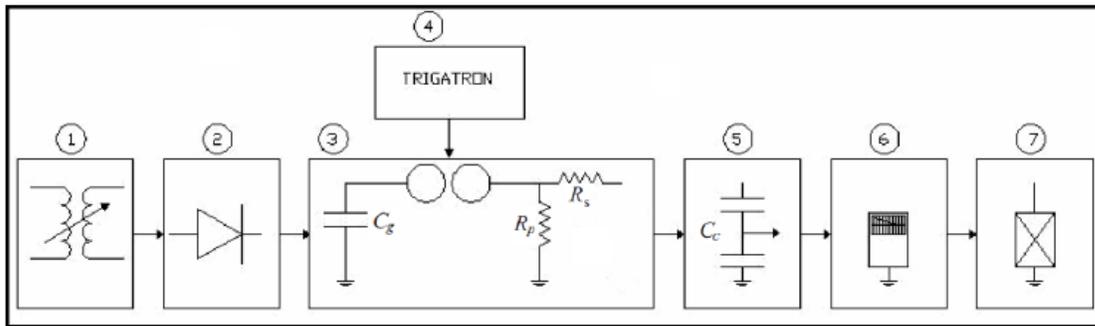


Ilustración 2-4. Diagrama de bloques de un generador de impulsos de tensión.

2.2.1 Fuente variable de alta tensión

Está conformada por el tablero de control y por un transformador elevador de tensión, contiene los elementos necesarios para operar y realizar pruebas de alto voltaje; por lo regular estos componentes se encuentran dentro de un gabinete o pupitre, cumpliendo funciones tales como: medición, protección y variación de voltaje [20].

Se utiliza para la carga del condensador C_g . La variación de tensión para la carga del condensador se puede hacer de forma manual utilizando una variac o de forma automática mediante el uso de elementos del tablero de control, el cual es el objetivo de este trabajo.

2.2.2 Etapa de rectificación

Se compone de una resistencia de entrada r_l que hace las veces de limitador de corriente [21] y un par de diodos de alta tensión que funcionan como rectificador de media onda, con los cuales se logra rectificar la señal ac proveniente de la fuente de alta tensión, también controla la polaridad del impulso.

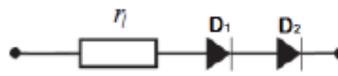


Ilustración 2-5. Sistema de rectificación.

2.2.3 Circuito generador de impulsos

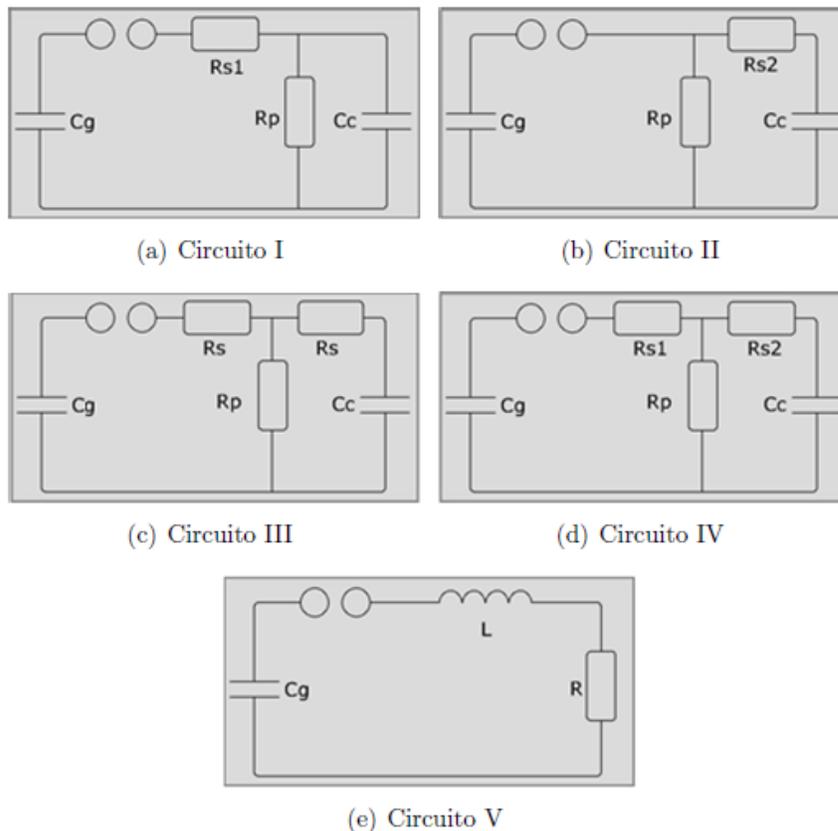


Ilustración 2-6. Circuitos de generadores de impulsos de tensión de una etapa [12].

Se conforma por el capacitor C_g , el sphere gap o explosor y las resistencias de frente R_s y cola R_p . Es común encontrar dos modelos de circuitos para la generación de impulsos tipo rayo 1; $2/50 \mu s$, en los cuales varía únicamente la posición de la resistencia R_s que determina el tiempo de frente de la onda, siendo el circuito mostrado en la ilustración 2-6(b), el más utilizado debido a su mayor eficiencia y menor uso de componentes.

2.2.4 Trigatrón

Se constituye por una esfera y una semiesfera (ambas huecas); dentro de ésta última se instala un electrodo eléctricamente aislado (aproximadamente de un milímetro de diámetro) que tiene como función iniciar "la chispa" que provoca una distorsión del campo eléctrico asegurando una descarga controlable entre los dos electrodos principales (esfera semiesfera) a un valor de tensión disruptiva más bajo que el requerido en condiciones de ruptura natural, lo cual conduce a la descarga completa entre el espinterómetro y así garantiza la transferencia total de la energía del condensador C_g al resto del circuito generador de impulsos.

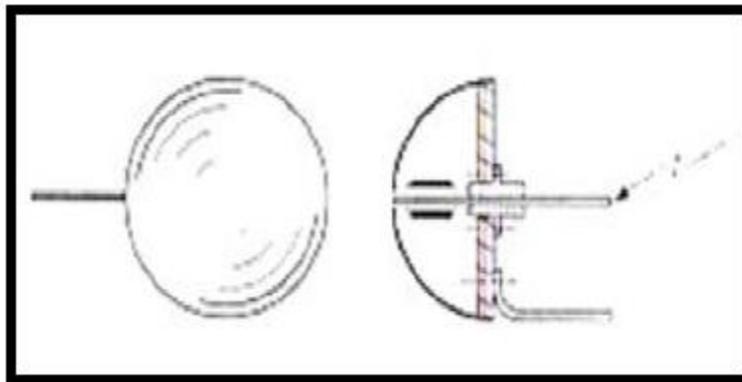


Ilustración 2-7. Espinterómetro con trigatrón, adaptado de [22].

En el caso de no disponer de un trigatrón, es posible forzar la descarga superando la tensión disruptiva en las dos esferas del espinterómetro o sphere gap.

2.2.5 Sistema de medida de tensión

Corresponde el sistema de medida sobre el objeto bajo prueba, generalmente se utiliza un divisor capacitivo puro, con una relación de transformación tal que permita visualizar

la onda completa en el instrumento de registro de señal. Donde, C_1 es la capacitancia de alta tensión y C_2 la capacitancia de baja tensión, siendo:

$$V_{out} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_{in}$$

Ecuación 2-1.

La relación de transformación, se define como $a = \frac{v_{in}}{v_{out}}$. Este divisor funciona mejor en ac que en dc, debido a que el condensador tiende a cargarse en alta tensión, además a lo largo del tiempo (estado estable del condensador) este se comporta como un circuito abierto en dc.

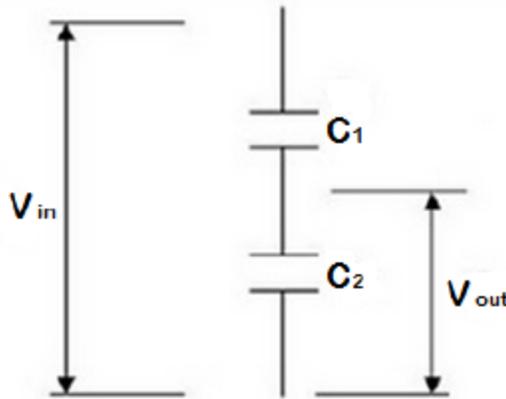


Ilustración 2-8. Divisor capacitivo, adaptado de [23].

2.2.6 Registro de la señal

Instrumento que permite visualizar y guardar la señal aplicada al objeto bajo prueba, en la mayoría de casos se utiliza un osciloscopio.

2.2.7 Objeto bajo prueba

Representa el objeto bajo prueba, el cual puede tener valores de capacitancia entre los 100 y 300 μF ⁴, típicamente corresponde a materiales y equipo eléctrico.

⁴ Valores en los cuales se mantienen los tiempos de frente y cola de la onda de impulso de tensión.

2.3 Pupitre de control para un generador de alta tensión

Los más reconocidos fabricantes de equipo eléctrico para entrenamiento en alta tensión (TERCO [24], HAEFELY HIPOTRONICS [[24]) incorporan en sus pupitres de control un motor para manejar la unidad de regulación de tensión, la cual consiste en un transformador regulante "Variac" de tipo toroidal y un transformador de aislamiento. Entre sus principales componentes tiene:

- Contactor primario (para energizar el variac).
- Contactor secundario (para energizar el transformador de ensayos de alta tensión).
- Relé térmico (protección contra sobre corriente).
- Interruptor termomagnético.
- Descargadores de sobretensión.
- Descargadores de gas.
- Varistores.
- Fusibles.
- Indicadores luminosos.
- Suiches.
- Pulsadores.
- Voltímetro.
- Amperímetro.
- Su función principal es evitar el contacto directo entre el operario y la parte de energización garantizando la seguridad e integridad tanto de las personas como de los equipos.

2.4 Seguridad

La seguridad es uno de los requerimientos más importantes en el área de alta tensión. Una operación apropiada incluye la presencia de personal calificado, el uso de procedimientos sistemáticos, cuerdas de seguridad, señales (de identificación), advertencias visuales y audibles y alarmas, el uso de varillas de puesta a tierra, la revisión periódica de las normas de seguridad, la disponibilidad de los extintores de fuego, números telefónicos de emergencia y botiquín de primeros auxilios. Una de las partes fundamentales para la

seguridad de las personas es el cerramiento de seguridad, ya que este debe prevenir de modo confiable, el acercamiento de personas que puedan llegar a tener contacto con elementos energizados. Para generadores de una, dos y tres etapas el fabricante TERCO en su manual de instrucciones [25] sugiere un área para ensayos de mínimo 4 metros de ancho por 5 metros de largo con altura de 2.3 metros, recubierta por una malla metálica con retícula no superior a 50 mm, formando una jaula de Faraday, garantizando la continuidad eléctrica entre todos los puntos del cerramiento y el sistema de puesta a tierra.

2.4.1 Sistema de puesta a tierra

Toda instalación eléctrica, con muy pocas excepciones debe disponer de un sistema de puesta a tierra (SPT), de tal forma que, en cualquier punto del interior o exterior, normalmente accesible a personas que puedan transitar o permanecer allí, no estén sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales que soportados por el ser humano cuando se presente una falla [26].

Los principales puntos a tener en cuenta en un SPT son: la seguridad de las personas, la protección de las instalaciones y la compatibilidad electromagnética; entre las funciones de un SPT esta:

- Garantizar la seguridad de los seres vivos.
- Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.
- Servir de referencia común al sistema eléctrico.
- Conducir y disipar con suficiente capacidad las corrientes de falla.

Las conexiones se pueden realizar por cintas de cobre de 100x0,6 mm, las cuales conectan todos los componentes del circuito de alta tensión que deben ser puestos a tierra, con una sola toma de tierra. También la superficie de blindaje (jaula de Faraday), los objetos de prueba y los objetos de medición deben ser conectados al mismo punto de puesta a tierra [21].

Para operar el pupitre de control, es conveniente ubicar este fuera del cerramiento de seguridad dispuesto para las pruebas (la distancia mínima de seguridad es de 1 metro por cada 100 kV [24, 15]), dado que la manipulación del pupitre desde la parte exterior del cerramiento en malla, permite la seguridad de las personas que operan el pupitre [20].

Los pupitres de control comerciales cuentan con la posibilidad de instalación de un indicador luminoso (lámpara rotativa o baliza) que indica el estado de energización del pupitre de control y del conjunto de elementos conectados al mismo (transformador de

ensayos, diodos, capacitores, divisores de tensión, etc.). También se cuenta con un final de carrera normalmente abierto (NO) para instalación en la puerta de acceso al área de ensayos, el cual se conecta en serie en la etapa que controla la alimentación de entrada al circuito regulante de tensión, de forma tal que al abrirse la puerta del área de ensayos, inmediatamente se deshabilita la entrada y salida de la etapa de regulación en el pupitre de control, lo que conlleva a interrumpir el ensayo que se esté realizando en ese momento para salvaguardar la integridad física de las personas que por error ingresen al área de pruebas.

2.5 Estándares de prueba de alto voltaje

2.5.1 Estándar IEC 60060-1 “High Voltage Test Techniques. Part 1: General definitions and test requirements”

Requerimientos para pruebas con Corriente Directa (DC):

- **Forma de onda:** En el momento de la aplicación de la prueba, se debe aplicar tensión DC con un factor de rizado menor al 3%.
- **Tolerancia:** Para pruebas que duren menos de 60 segundos, el valor medido de la tensión de prueba se debe mantener en un rango de $\pm 1\%$ del valor especificado para el procedimiento; para pruebas con una duración mayor a 60 segundos, el valor medido se debe mantener en un rango de $\pm 3\%$ al especificado. La fuente debe estar en la capacidad de permitir la carga de la capacitancia del objeto de prueba en un tiempo suficientemente corto. Además, para la aplicación de pruebas de humedad o polución, la fuente debe estar en la capacidad de suministrar las corrientes de descarga transitorias del objeto de prueba con una caída de tensión menor a 10%.
- **Medida de tensión de prueba:** Ver IEC 60060-2
- **Medida de corriente de prueba:** Para realizar medidas de corriente al objeto de prueba es importante una serie de componentes diferentes que se deben considerar para garantizar una medida correcta. Estos componentes son:
 - La corriente capacitiva, debido a la aplicación de una tensión de prueba con rizado o alguna otra fluctuación que se presenta.

- La corriente de absorción dieléctrica, debido a desplazamientos lentos de carga entre el aislamiento persistentes por períodos considerables de tiempo. Se presentan corrientes con polaridad opuesta cuando el objeto de prueba esta descargado y cortocircuitado.
- La corriente directa de fuga, que es la el ultimo valor de corriente de corriente directa obtenido a la tensión aplicada cuando todas las corrientes mencionadas anteriormente caen a cero.
- Corrientes de descargas parciales (IEC 60270 Insertar referencia).

La magnitud relativa y la impedancia de cada componente de corriente mencionado depende del tipo y la condición del objeto de prueba, el propósito del procedimiento y su duración; es importante asegurar que el instrumento utilizado para realizar la medida de cada uno de los componentes de corriente no vea afectada su capacidad con el uso de otros componentes y esté bien calibrado.

- **Pruebas de resistencia:** Al momento de aplicar la tensión al principio de la prueba debe tener un valor suficientemente bajo para prevenir cualquier fenómenos de sobretensión por la ocurrencia de cambios de estado transitorios; además, debe ser elevada de forma suficientemente lenta para permitir la lectura de los instrumentos de medida; sin embargo, es importante tener en cuenta que no se debe causar una prolongación innecesaria del estrés que sufren los equipos cuando se acercan a la tensión de prueba. Estos requerimientos se cumplen cuando la relación de incremento es de alrededor del 2% de la tensión nominal por segundo cuando la tensión aplicada es de aproximada el 75% de la misma. Esta tensión se deberá mantener por el tiempo especificado y luego se reducirá por la descarga de la capacitancia del circuito, incluyendo la del objeto de prueba con una resistencia adecuada. La aplicación de la prueba de resistencia será de 60 segundos.

Los requerimientos de la prueba se cumplirán si no ocurre ningún daño físico o descarga repentina en el objeto de prueba.

Requerimientos para pruebas con corriente alterna (AC)

- **Forma de onda:** La tensión de prueba debe ser una onda de tensión con una frecuencia de aproximada en el rango de 45 Hz a 65 Hz, generalmente a tensión industrial; además debe ser una onda sinusoidal que tenga una diferencia no mayor a 2% entre las magnitudes de los picos positivos y negativos. Los resultados del

procedimiento no se deben ver afectados por pequeñas desviaciones en la relación pico a r.m.s equivalente a $\sqrt{2}$ para valores entre $\pm 5\%$.

- **Tolerancia:** Para procedimientos que duren menos de 60 segundos, los valores medidos de tensión de prueba se deben mantener en un rango de $\pm 1\%$ del especificado para la prueba. Para las pruebas que duren más de 60 segundos los valores medidos pueden oscilar en un rango de $\pm 3\%$ del valor asignado para la realización del procedimiento.
- **Generación de tensión de prueba:** La tensión AC generada debe ser lo suficientemente estable para no verse perjudicada por la aparición de corrientes de fuga.

La capacitancia total del objeto de prueba o cualquier capacitor adicional debe ser suficiente para asegurar que la tensión de descarga disruptiva medida no se ve afectada por la aparición de descargas no disruptivas o pre-descargas. Una capacitancia en el rango de 0,5 nF a 1,0 nF es generalmente suficiente.

Durante la realización de pruebas de alta tensión AC se presentan normalmente corrientes de carga con pulsos de corrientes superpuestos a medida que la tensión se incrementa; este fenómeno ocurre porque las tensiones de prueba son mucho más altas que las nominales y los equipos generalmente no tienen electrodos y sistemas de puesta a tierra lo suficientemente grandes para mantener los objetos de prueba eléctricamente estables; por esto es importante considerar parámetros particulares para la aplicación de los diferentes tipos de pruebas:

- Para pruebas en seco por debajo de 100 kV en aisladores que tengan fuente con corriente nominal mayor a 100 mA (transformadores, generadores, reguladores, etc.) un sistema con una impedancia de corto circuito menor a 20% es generalmente suficiente.
- Para pruebas dieléctricas con tensiones mayores a 100 kV en equipos con baja capacitancia (bujes, interruptores, seccionadores) una corriente nominal mayor a 100 mA y una impedancia de corto circuito menor a 20% es suficiente.

Los impulsos de corriente de corta duración se alimentan generalmente de la carga almacenada en la capacitancia del circuito de prueba. Se recomienda que para la

realización de procedimientos con tensiones mayores a 100 kV se instale un circuito con una capacitancia igual o mayor a 1000 pF.

- **El circuito serie-resonante:** Este circuito consiste esencialmente en un inductor en serie con un objeto de prueba capacitivo o viceversa. Con la variación de los parámetros del circuito se puede obtener un circuito resonante.

Cuando ocurre una descarga, la capacitancia del circuito se descarga instantáneamente ocasionando que la corriente proveniente de la fuente sea relativamente corta. Esta limitación de la corriente generalmente redundará en un menor daño al objeto de prueba.

Este circuito es especialmente útil cuando se están probando dispositivos capacitivos en los cuales las corrientes de fuga en el aislamiento interno son pequeñas en comparación con las corrientes que van desde la fuente hacia el objeto de prueba, un circuito serie-resonante puede suministrar corrientes de fuga más altas aliviando peso a la carga.

- **Medidas de tensión de prueba:** (Ver IEC 60060-2)
- **Medidas de corriente de prueba:** La corriente de prueba se mide usualmente utilizando un transformador de corriente convencional conectado a la tierra del objeto de prueba. Es importante verificar siempre que las medidas de corriente siempre se deben hacer con un sistema de medida correctamente calibrado.
- **Pruebas de resistencia:** Al momento de aplicar la tensión al principio de la prueba debe tener un valor suficientemente bajo para prevenir cualquier fenómenos de sobretensión por la ocurrencia de cambios de estado transitorios; además, debe ser elevada de forma suficientemente lenta para permitir la lectura de los instrumentos de medida; sin embargo, es importante tener en cuenta que no se debe causar una prolongación innecesaria del estrés que sufren los equipos cuando se acercan a la tensión de prueba. Estos requerimientos se cumplen cuando la relación de incremento es de alrededor del 2% de la tensión nominal por segundo cuando la tensión aplicada es de aproximada el 75% de la misma. Esta tensión se deberá mantener por el tiempo especificado y luego se reducirá rápidamente pero no de forma repentina, con el fin de evitar la generación de corrientes transitorias que pueden causar daños o resultados erróneos. La aplicación de la prueba de resistencia será de 60 segundos.

Se considerará que el objeto pasó a prueba si no ocurre ningún daño físico o descarga disruptiva durante la realización de la prueba.

Requerimientos para pruebas con impulso tipo rayo

El impulso estándar tipo rayo es una onda completa de tensión de impulso tipo rayo con un tiempo de frente de $1,2\mu s$ y un tiempo de cola de $50\mu s$ y se describe como un impulso 1,2/50.

- **Tolerancia:**

Tabla 2-1. Valores de tolerancia aceptados para impulsos tipo rayo según IEC 60061-1.

Valor de tensión de prueba	$\pm 3\%$
Tiempo de frente	$\pm 30\%$
Tiempo de cola	$\pm 20\%$

Además, se considera que la magnitud del valor del sobre impulso no deberá exceder el 10%.

- **Pruebas de resistencia:** En la tabla 2-2 se mencionan los tres procedimientos de resistencia al impulso tipo rayo mencionados en el estándar.

Tabla 2-2. Procedimientos de resistencia ante las pruebas con impulso tipo rayo según IEC 60061-1.

	Procedimiento	Criterios de éxito	Nota
A	Aplicar tres impulsos tipo rayo con la forma de onda, polaridad y tensión de soporte especificadas al equipo de prueba.	El procedimiento se considera exitoso si no se detecta ninguna indicación de falla	Recomendado para pruebas a dispositivo con aislamiento no restaurable
B	Aplicar quince impulsos tipo rayo con la forma de onda, polaridad y tensión de soporte especificadas al equipo de prueba.	Se considera que el procedimiento es exitoso si no ocurren más de 2 descargas disruptivas en la parte auto restaurable del aislamiento	Si no ocurre ninguna descarga disruptiva después del 15 se pueden aplicar 3 impulsos más y verificar
C	Aplicar tres impulsos tipo rayo con la forma de onda, polaridad y tensión de soporte especificadas al equipo de prueba.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Si no ocurre ninguna descarga disruptiva el equipo pasó la prueba ▪ Si ocurre más de una el equipo falló la prueba. 	

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Si solo ocurrió una, se deberán aplicar nueve impulsos adicionales verificando que no se presente ningún indicador de falla 	
--	--	---	--

Requerimientos para la realización pruebas con impulsos tipo maniobra

El impulso estándar tipo rayo es una onda completa de tensión de impulso tipo maniobra con un tiempo a pico $T_p = 250\mu s$ y un tiempo de cola de $2500\mu s$ y se describe como un impulso 250/2500.

Tabla 2-3. Valores de tolerancia aceptados para impulsos tipo maniobra según IEC 60060-1.

Valor pico de tensión de prueba	± 3%
Tiempo a pico	± 20%
Tiempo de cola	± 60%

Se aplicarán las mismas pruebas realizadas para el impulso tipo rayo.

2.5.2 Estándar IEEE 4-2013: IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques.

Requerimientos generales para pruebas y medidas de alta tensión

El estándar contempla que para la realización de pruebas de alta tensión de deben considerar las siguientes condiciones medio ambientales:

Tabla 2-4. Condiciones normales de ambiente para la realización de pruebas de alta tensión según Std IEEE 4 - 2013.

Temperatura	10°C a 40°C
Humedad relativa	< 95% no condensado
Altitud	<100m

Es importante verificar que la impedancia que la impedancia hacia tierra y la impedancia entre los diferentes componentes del circuito de prueba que se conectan a tierra se

mantenga siempre en un nivel bajo para minimizar el riesgo de altas diferencias de potencial durante fallos. Esto se puede lograr mediante el uso de una conexión común de tierra, celdas desmagnetizadas conectadas entre los puntos o una serie de conexiones a una rejilla de tierra dispuesta a través del terreno dónde se realizará el test.

- **Dimensionamiento para la conexión entre los electrodos:**

- Para pruebas con tensión AC y DC, el conductor deberá tener un diámetro de 2.5 cm (1 pulgada) por 100 kV.
- Para la realización de pruebas con impulsos con polaridad positiva y negativa menores a 100kV se podrán usar conductores de diámetro pequeño (cables) [referencia], para pruebas de mas de 1000 kV se deberán usar conductores con mayor diámetro para controlar las descargas.
- Para pruebas con impulso tipo maniobra de polaridad positiva, se deberán escoger conductores con un diámetro tal que limiten la magnitud del arco eléctrico en la superficie a menor a 15 kV/cm.

Equipos de medida

Los equipos de medida de alta tensión se clasifican en términos de su **incertidumbre**.

Este estándar establece dos clasificaciones para estos instrumentos:

- **Sistemas de medida aprobados:** Utilizados para realizar pruebas de alta tensión rutinaria
- **Sistemas de medida de referencia:** Se utilizan normalmente para calibrar sistemas de medida aprobados, también se pueden utilizar para realizar pruebas rutinarias si se demuestra que están funcionando correctamente

Tabla 2-5. Requerimientos de incertidumbre para cada sistema de medida de acuerdo a IEEE Std 4. 2013.

Cantidad Medida	Sistema de medida aprobados	Sistemas de medida de referencia
Tensión DC	± 3%	± 1%
Tensión AC	± 3%	± 1%

Tensión pico de impulso	$\pm 3\%$	$\pm 1\%$
Parámetros tensión de impulso (tiempo de frente, tiempo de cola)	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$

Requerimientos para pruebas con tensión DC

- **Forma de onda:** En el momento de la aplicación de la prueba, se debe aplicar tensión DC con un factor de rizado **menor** al 3%. Es importante considerar que el factor de rizado se puede ver afectado por la conexión del objeto de prueba o por condiciones particulares durante la realización de la prueba
- **Tolerancia:** Para pruebas con una duración menor a 5 minutos, la tensión medida se debe mantener en un valor $\pm 3\%$ del especificado para el procedimiento. La fuente de tensión, debe estar dimensionada para soportar corrientes transitorias con una caída de tensión menor a 10%. Ante este fenómeno, se debe enfatizar en que, si se presentan corrientes transitorias durante la realización de las pruebas, el equipo de medida que se utiliza debe estar en la capacidad de medir efectivamente estas condiciones.
- **Pruebas de resistencia:** Al momento de aplicar la tensión al principio de la prueba debe tener un valor suficientemente bajo para prevenir cualquier fenómenos de sobretensión por la ocurrencia de cambios de estado transitorios; además, debe ser elevada de forma suficientemente lenta para permitir la lectura de los instrumentos de medida; sin embargo, es importante tener en cuenta que no se debe causar una prolongación innecesaria del estrés que sufren los equipos cuando se acercan a la tensión de prueba. Estos requerimientos se cumplen cuando la relación de incremento es de alrededor del 2% de la tensión nominal por segundo cuando la tensión aplicada es de aproximada el 75% de la misma. Esta tensión se deberá mantener por el tiempo especificado y luego se reducirá por la descarga de la capacitancia del circuito, incluyendo la del objeto de prueba con una resistencia adecuada. La aplicación de la prueba de resistencia será de 60 segundos.

Los requerimientos de la prueba se cumplirán si no ocurre ningún daño físico o descarga repentina en el objeto de prueba.

Requerimientos para pruebas con tensión AC

- **Forma de onda:** La tensión de prueba debe ser una onda de tensión con una frecuencia de aproximada en el rango de 45 Hz a 65 Hz, generalmente a tensión industrial. La onda de tensión sinusoidal utilizada debe tener sus semiciclos positivos y negativos muy parecidos y deben tener valores en la relación pico a r.m.s equivalente a $\sqrt{2}$ en el rango de $\pm 5\%$. Se entiende como requerimiento general que la distorsión armónica total (THD) debe ser menor al 5%.
- **Tolerancia:** El valor medido de la tensión AC se debe mantener en un rango de $\pm 3\%$ del valor especificado para la prueba para pruebas con una duración menos a 5 minutos. La ocurrencia de descargas no disruptivas en el circuito de prueba no debería reducir la tensión de prueba de manera que se vea significativamente afectada.
- **Generación de tensión de prueba:** La tensión AC se produce generalmente por un transformador o por un circuito resonante. Es importante recalcar que la tensión de prueba se debe mantener en un rango de $\pm 3\%$ de tolerancia en presencia de corrientes de fuga. La capacitancia total del objeto de prueba o cualquier capacitor adicional debe ser suficiente para asegurar que la tensión de descarga disruptiva medida no se ve afectada por la aparición de descargas no disruptivas o pre-descargas. Una capacitancia en el rango de 0,5 nF a 1,0 nF es generalmente suficiente.
- **Transformador:** Durante la realización de pruebas de alta tensión AC con un transformador como fuente se presentan normalmente corrientes de carga con pulsos de corrientes superpuestos a medida que la tensión se incrementa; este fenómeno ocurre porque las tensiones de prueba son mucho más altas que las nominales y los equipos generalmente no tienen electrodos y sistemas de puesta a tierra lo suficientemente grandes para mantener los objetos de prueba eléctricamente estables; su magnitud y duración se puede ver influenciada por diferentes factores entre los que se enumeran la configuración de las pruebas, los conductores utilizados para los conectores, las condiciones atmosféricas, las características físicas de la fuente, etc.

La ocurrencia de estos fenómenos vuelve importante poner en consideración una serie de parámetros particulares para la aplicación de los diferentes tipos de pruebas:

- Para pruebas en seco por debajo de 100 kV en aisladores que tengan fuente con corriente nominal mayor a 100 mA (transformadores, generadores, reguladores, etc.) un sistema con una impedancia de corto circuito menor a 20% es generalmente suficiente.
- Para pruebas dieléctricas con tensiones mayores a 100 kV en equipos con baja capacitancia (bujes, interruptores, seccionadores) una corriente nominal mayor a 100 mA y una impedancia de corto circuito menor a 20% es suficiente.
- Para pruebas dieléctricas con tensiones mayores a 100 kV, corrientes de prueba de 1 A e impedancias de cortocircuito menores al 20% hacen necesario conocer si se presentan descargas continuas o si se están realizando pruebas en condiciones de humedad. Cuando se presentan descargas continuas, se recomienda la utilización de sistemas de medida de tensión con tiempos de respuesta más rápidos para asegurar que la caída tensión de prueba se mantenga dentro del límite durante la duración del procedimiento. Adicionalmente, se pueden implementar medidas adicionales como el incremento del diámetro en los electrodos y la utilización de conductores con más capacidad pueden reducir estos fenómenos. Los impulsos de corriente de corta duración se alimentan generalmente de la carga almacenada en la capacitancia del circuito de prueba. Se recomienda que para la realización de procedimientos con tensiones mayores a 100 kV se instale un circuito con una capacitancia igual o mayor a 1000 pF.
- **Circuito serie-resonante:** Este circuito consiste esencialmente en un inductor en serie con un objeto de prueba capacitivo o viceversa. Con la variación de sus parámetros o su frecuencia de alimentación, el circuito se puede calibrar para conseguir una tensión en el equipo de prueba considerablemente más grande que la de la fuente con una onda en buena medida sinusoidal. Los circuitos serie resonantes de alta tensión no producen sobretensiones después de la ocurrencia de descargas disruptivas, debido a que “pierden su calibración” cuando la impedancia en la carga cambia. Este tipo de circuito de alimentación es útil para hacer pruebas a equipos cuyas corrientes de fuga son pequeñas en comparación

con sus corrientes capacitivas. Sin embargo, este circuito no se debería utilizar para probar aislamientos externos en condiciones de contaminación.

- **Medidas de tensión de prueba:** A continuación, se mencionarán los diferentes parámetros que se deben tener en cuenta para realizar la medición de tensión AC correctamente, es importante recalcar que los instrumentos de medida pueden variar en sus construcciones y requerimientos de acuerdo al tipo de prueba que se esté conduciendo:
- **Valor pico o rms de la tensión de prueba:** El valor pico o rms debe ser medido con un valor de incertidumbre total en un rango no mayor a $\pm 3\%$.

El tiempo de respuesta del sistema de medida debe ser suficiente para identificar correctamente la tasa de crecimiento de la tensión de prueba. Los sistemas utilizados en la realización de pruebas bajo condiciones de humedad o polución deben estar en la capacidad de medir la estabilidad del voltaje de prueba.

- **Armónicos:** La respuesta en frecuencia de un sistema de medida aprobado es adecuada si el factor de escala para cada frecuencia armónica hasta el séptimo armónico está en un rango del 10% determinado para la prueba de rendimiento más reciente.

No se deben verificar los requerimientos para la respuesta en frecuencia de sistemas de medida si se logra demostrar que la relación entre los valores de tensión pico y rms equivalen a $\sqrt{2}$ con un margen de error de $\pm 1\%$ para todas las condiciones de operación esperadas.

- **Caídas de tensión transitorias debido a descargas no disruptivas (si se requiere):** Las descargas no disruptivas en el interior del objeto de prueba durante la realización del procedimiento tienen generalmente una magnitud pequeña que no afecta la tensión de prueba. Sin embargo, la ocurrencia de descargas no disruptivas en el exterior del objeto de prueba puede ocasionar el fenómeno contrario, estas condiciones se presentan normalmente durante la realización de pruebas a tensiones muy altas y con circuitos con dimensiones físicas importantes. Estas caídas deben ser registradas por sistemas de medida con ancho de banda suficiente según los requerimientos específicos para la realización de la prueba.

- **Pruebas de resistencia:** Al momento de aplicar la tensión al principio de la prueba debe tener un valor suficientemente bajo para prevenir cualquier fenómenos de sobretensión por la ocurrencia de cambios de estado transitorios; además, debe ser elevada de forma suficientemente lenta para permitir la lectura de los instrumentos de medida; sin embargo, es importante tener en cuenta que no se debe causar una prolongación innecesaria del estrés que sufren los equipos cuando se acercan a la tensión de prueba. Estos requerimientos se cumplen cuando la relación de incremento es de alrededor del 2% de la tensión nominal por segundo cuando la tensión aplicada es de aproximada el 75% de la misma. Esta tensión se deberá mantener por el tiempo especificado y luego se reducirá rápidamente pero no de forma repentina, con el fin de evitar la generación de corrientes transitorias que pueden causar daños o resultados erróneos. La aplicación de la prueba de resistencia será de 60 segundos.

Se considerará que el objeto pasó a prueba si no ocurre ningún daño físico o descarga disruptiva durante la realización de la prueba.

Requerimientos para pruebas de impulso tipo rayo

El impulso estándar tipo rayo es una onda completa de tensión de impulso tipo rayo con un tiempo de frente de $1,2\mu s$ y un tiempo de cola de $50\mu s$ y se describe como un impulso 1,2/50.

En la mayoría de los casos, las oscilaciones o sobre impulsos se pueden limitar a un valor no mayor al 5% de la tensión pico. En situaciones particulares, se pueden elevar los límites de tolerancia, sin embargo, el nivel de sobre impulso u oscilación nunca deberá exceder el 10%.

- **Tolerancia:**

Tabla 2-6. Valores de tolerancia aceptados para impulsos tipo rayo según IEEE Std 4-2013.

Valor de tensión de prueba	$\pm 3\%$
Tiempo de frente	$\pm 30\%$
Tiempo de cola	$\pm 20\%$

Requerimientos generales para hacer pruebas con impulsos tipo rayo recortados

- Una **onda de tensión tipo rayo recortada en la cola** es una onda estándar de impulso recortada por un agente externo en el rango de $2\mu s$ a $5\mu s$ desde su origen virtual, en la tabla [] se mencionan las tolerancias aceptadas por el estándar:

Tabla 2-7. Valores de tolerancia aceptados para impulsos tipo rayo recortados en la cola según IEEE Std 4-2013.

Tiempo de frente	$\pm 3\%$
Tiempo de cola	$\pm 30\%$

Requerimientos para pruebas con impulsos tipo maniobra

El impulso estándar tipo maniobra es una onda completa de tensión de impulso tipo maniobra con un tiempo a pico $T_p = 250\mu s$ y un tiempo de cola de $2500\mu s$ y se describe como un impulso 250/2500.

- **Tolerancia:**

Tabla 2-8. Valores de tolerancia aceptados para impulsos tipo maniobra según IEC Std-4 2013.

Valor pico de tensión de prueba	$\pm 3\%$
Tiempo a pico	$\pm 20\%$
Tiempo de cola	$\pm 60\%$

Se seguirán los mismos estándares para la realización de pruebas con impulsos tipo rayo.

- **Generación de impulsos de tensión**

Las tensiones de impulso para la realización de pruebas de alta tensión se generan usualmente utilizando un circuito que consiste esencialmente en una serie de capacitores que se cargan en paralelo desde una fuente de tensión DC que se descargan en serie sobre un circuito que incluye el objeto de prueba y el sistema de medida. La forma de onda

del impulso, ya sea tipo rayo, maniobra u oscilatorio se controla a partir de la selección de resistores y/o inductores incorporados en el generador.

2.6 Generación de alta tensión

2.6.1 Generalidades

El continuo y extensivo desarrollo de sistemas de transmisión de potencia eléctrica alrededor del mundo en el último siglo ha supuesto un reto importante para las empresas manufactureras involucradas en el sector. El desarrollo de sistemas eléctricos que estén preparados para satisfacer demandas cada vez más altas con excelentes indicadores de confiabilidad implica la utilización de equipos que cumplan con todos los requisitos y estándares técnicos de calidad que garanticen una alta disponibilidad en su trabajo.

Por este motivo, se hace imprescindible la implementación de una serie de pruebas que permitan evaluar el funcionamiento de los equipos ante condiciones físicas específicas como el impacto de descargas atmosféricas, sobrecargas y/o la ocurrencia de eventos que conlleven a la aparición de sobretensiones en los equipos.

Este objetivo se logra mediante la utilización de laboratorios de alta tensión que cuenten con la capacidad de simular este tipo de escenarios de la manera más exacta posible y que cuenten con todos los dispositivos de diagnóstico y medida para realizar los análisis correspondientes

Según [27], el término “Laboratorio de alta tensión” tiene un significado muy amplio, se puede referir desde un sistema de baja capacidad de unos pocos kV hasta un complejo UHV que ocupa una gran cantidad de espacio y que cuenta con diversas aplicaciones. Debido a esto, es importante poder identificar los diferentes agentes, pruebas y aplicaciones en dónde se utilizan estos sistemas que permitan evaluar las necesidades reales y permitan hacer un correcto dimensionamiento.

Los usuarios de un sistema de alta tensión se pueden clasificar en:

- Empresas fabricantes y de reparación de equipos de potencia (proveedores).
- Compañías prestadoras de servicios de generación, transmisión y distribución de electricidad (operadores de red).
- Institutos de investigación y entidades prestadoras del servicio de pruebas (proveedores de servicio de pruebas).

- Entidades prestadoras de servicios de calibración y medidas (proveedores de servicio de calibración).
- Universidades e institutos técnicos (Instituciones).

Las pruebas que se realizan en un laboratorio de alta tensión se dividen en:

- Pruebas de rutina para equipos nuevos o reparados (pruebas de rutina).
- Pruebas tipo para equipos nuevos (pruebas tipo).
- Pruebas para investigación y desarrollo de equipos nuevos (pruebas de desarrollo).
- Pruebas para medida y calibración de equipos de alta tensión (pruebas de medida y calibración).
- Pruebas de entrenamiento práctico y demostraciones (educativas).
-

En la tabla 2-9 se muestra una matriz que relaciona los diferentes usuarios con las aplicaciones.

Tabla 2-9. Matriz de relación entre usuarios y aplicaciones de laboratorios de alta tensión.

	Pruebas				
	Rutina	Tipo	Desarrollo	Medida y calibración	Educativas
Proveedores de equipos	✓	✓	✓	-	-
Operadores de red	✓	✓	✓	-	-
Proveedores de servicios de pruebas	✓	✓	✓	✓	-
Proveedores de servicios de medida y calibración	-	-	✓	✓	-
Instituciones	-	✓	✓	✓	✓

Las empresas que desarrollan sistemas para hacer pruebas en equipos de alta tensión han encontrado que a partir de la fabricación de componentes que se puedan integrar fácilmente dentro la infraestructura se puedan alcanzar sistemas cada vez más compactos,

con un menor tamaño y que puedan realizar más actividades cumpliendo con todos los estándares de calidad, con todas las herramientas de análisis y estudio necesarias para su trabajo y que permiten al cliente un alto nivel de personalización de acuerdo a sus necesidades.

Se debe considerar además que el esquema base para la implementación de un laboratorio de alta tensión consta de tres bloques: alimentación, protección y alta tensión [28]. El bloque de alimentación generalmente tiene un mecanismo para seleccionar la tensión de excitación deseada, el de protección integra todos los equipos de control, medida y protección necesarios para garantizar la operación segura y confiable del sistema y el bloque de alta tensión integra el generador de alta tensión, y el equipo que se desea probar [29].



Ilustración 2-9. Esquema de un laboratorio de alta tensión.

Teniendo en cuenta que los diferentes organismos internacionales exigen estrictas medidas de seguridad y protección en el momento de pruebas de alta tensión y pensando en implementar en sus sistemas una amplia variedad de aplicaciones y pruebas de automatización, los fabricantes deciden diseñar sus laboratorios en torno a la utilización de consolas que agrupen todas las funciones del bloque de control y desde dónde se puedan ver todos los eventos que suceden en el sistema durante la realización de cada una de las pruebas de forma segura para las personas.

Es importante tener en cuenta que para el dimensionamiento realizado se consideró una consola de control que tiene capacidad para realizar pruebas que involucren tensión mediante la generación de altas tensiones AC, DC e impulso a frecuencia industrial.

2.6.2 Generación AC

Para generar alta tensión AC basta con utilizar un transformador elevador y un variac que nos permita variar la magnitud de la salida de acuerdo a las actividades que se vayan a realizar.

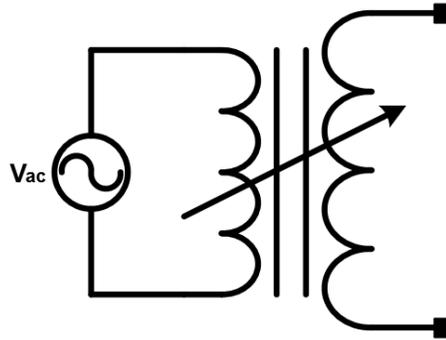


Ilustración 2-10. Generación de tensión AC.

2.6.3 Generación DC

El método más simple utilizado para generar altas tensiones DC es el circuito rectificador de media onda que aprovecha la tensión alterna suministrada por el transformador elevador y mediante la configuración de diodos y capacitores mostrada en la ilustración 2-11, entrega a la salida una señal rectificada de corriente directa. [30]

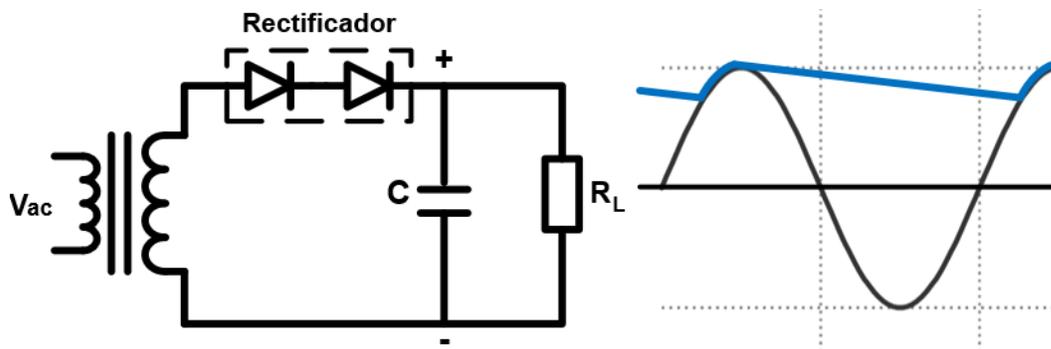


Ilustración 2-11. Rectificador de media onda. Tomado de [3].

2.6.4 Generación de impulsos

Un generador de impulsos de alto voltaje (GIV) es un equipo diseñado para producir tensiones transitorias de alto voltaje (Cediel, 2006) y se emplea para verificar o investigar

el comportamiento de equipos y aislamientos ante la aparición de fenómenos que generan sobretensiones transitorias [5].

Las sobretensiones se definen como variaciones en la magnitud de la tensión de un valor superior a la tensión permanente de la red, típicamente se clasifican entre sobretensiones internas del sistema eléctrico (maniobra) o externas al mismo (rayo, descargas atmosféricas, explosiones nucleares, etc.) y se caracterizan por tener formas de onda aperiódicas tipo impulso o choque, con tiempos de ascenso que van desde un nanosegundo hasta un milisegundo y de descenso que comprenden tiempos desde una centena de nanosegundos hasta un segundo [31].

- Impulsos normalizado tipo maniobra. [32]

También llamado impulso 250/2500, se define como un impulso positivo o negativo cuya amplitud máxima establecida fluctúa en una rango de $\pm 3\%$, registrando en el ascenso un tiempo de cresta T_{cr} (o pico T_p) en el rango de $250\mu s \pm 20\%$ y para el 50% de su valor de cresta en el descenso un tiempo de cola T_2 (T_c ó T_t) en el rango de $2500\mu s \pm 60\%$.

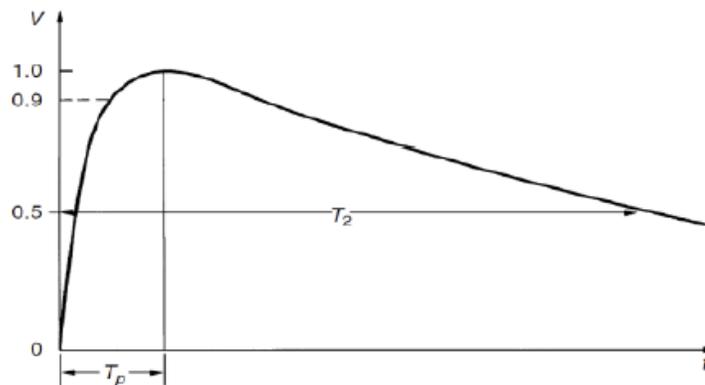


Ilustración 2-12. Impulso normalizado de tensión tipo maniobra.

- Impulso normalizado tipo rayo [32].

También llamado impulso 1,2/50, se define como un impulso positivo o negativo cuya amplitud máxima establecida varía en un rango de $\pm 3\%$, registrando tiempo de frente en el rango de $1,2\mu s \pm 30\%$ y de cola en el rango de $50\mu s \pm 20\%$ cuando la tensión cae hasta el 50% de su valor pico. Ver figura []. El tiempo de frente T_1 (T_f) del impulso tipo rayo se determina calculando el intervalo de tiempo medido T cuando el flanco ascendente varía entre el 30% y el 90% de la tensión pico entregada por el generador y multiplicándolo por

1,67. El tiempo de cola T_2 se mide desde el origen virtual (O_0 ó T_0), abscisa a partir de la cual se miden los tiempos T_1 y T_2 en la figura, hasta el intervalo de tiempo dónde la tensión alcanza el 50% del valor de tensión nominal de la onda en flanco descendente.

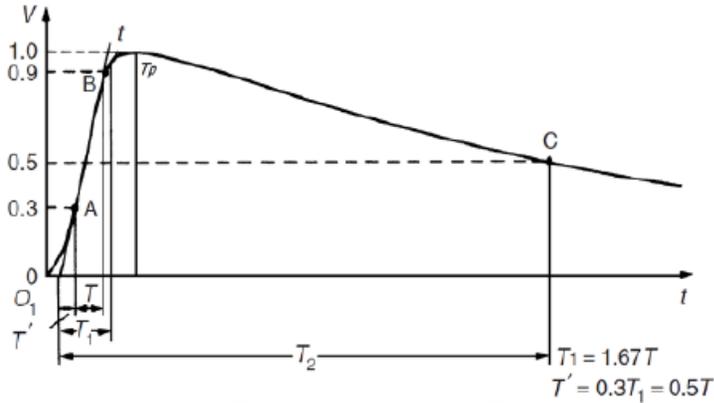


Ilustración 2-13. Impulso normalizado de tensión tipo rayo.

Para pruebas en un laboratorio de alta tensión, como las definidas en IEC 60060-1 [32], la generación de impulsos de tensión tipo rayo y maniobra se logra utilizando el generador de Marx, que en su versión simplificada se puede analizar a partir de un circuito una etapa que permite alcanzar tensiones hasta de 200kV [9].

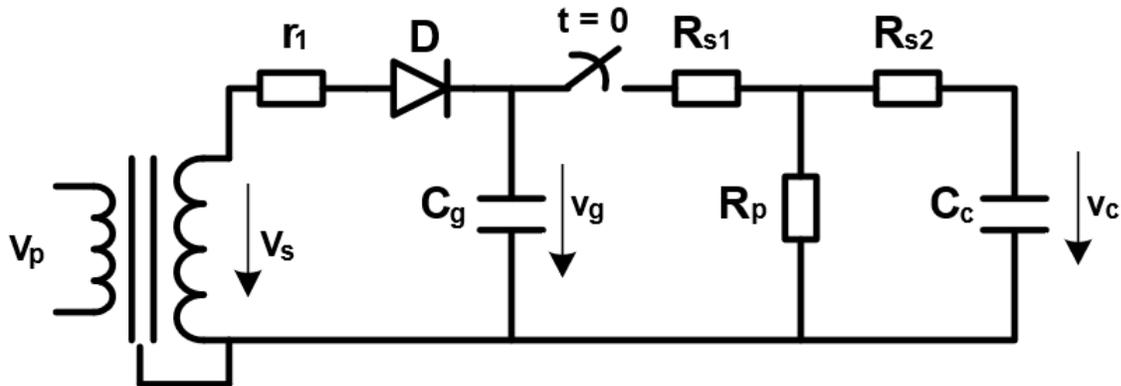


Ilustración 2-14. Circuito característico para un generador de impulsos de una etapa.

Para generar los impulsos de tensión con este circuito se busca inicialmente cargar el capacitor C_g con la polaridad definida por la fuente y hasta un nivel de tensión tal que produce la descarga del explosor, para conducir la energía de su descarga por los resistores R_{si} hacia el capacitor C_c que genera el frente de onda hasta alcanzar su máxima amplitud. Luego, los capacitores drenan la energía por las resistencias R_{si} hacia la referencia a través del resistor R_p produciendo la cola de onda.

El explosor actúa como interruptor y como limitador de tensión, comportándose como un interruptor controlado por tensión [14]. El capacitor C_g define la cantidad de energía almacenada por el generador. Además, es importante anotar que el capacitor C_c se conectará en paralelo con el objeto de prueba, por lo que su valor debe ser lo suficientemente grande para que el generador no se vea afectado por la capacitancia de la carga.

- Formas típicas de rayo.

En los estándares IEC 60060-1 [32] y ASTM D3426-97 [33] se hace una distinción de las tres ondas de choque que pueden aparecer en la operación de los sistemas eléctricos causando daños considerables en los equipos donde se presentan. La onda recortada en el frente, la recortada en la cola y la onda completa. Ver figura

El daño producido depende, entre otros factores, del sitio del impacto, el tipo de onda, su polaridad y la coordinación de aislamiento del sistema.

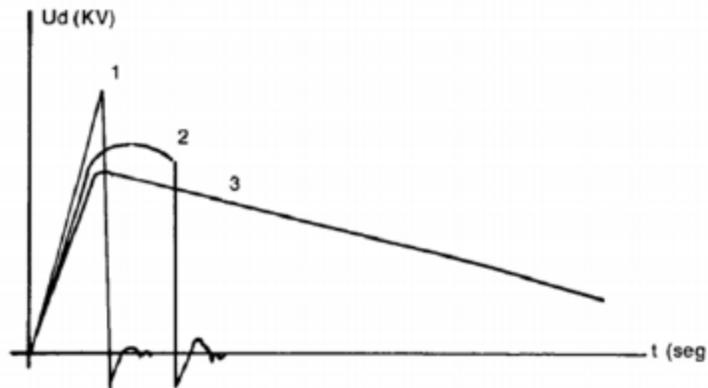


Ilustración 2-15. Formas típicas de ondas de rayo/ 1. Recortada en el frente /2. Recortada en la cola /3. Onda completa.

- Diagrama de bloques de un generador de impulso

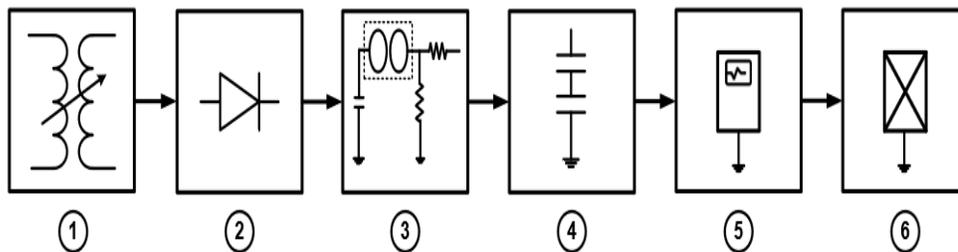


Ilustración 2-16. Diagrama de bloques de un generador de impulsos de tensión.

1. **Fuente variable de tensión:** La conforman la consola de control y un transformador de tensión; por lo regular estos componentes se encuentran integrados con las funciones de control, medida y protección en el gabinete o pupitre de control.

La función principal de esta fuente es cargar el capacitor C_g variando la tensión de forma manual (variac) o automática de acuerdo a los requerimientos.

2. **Etapas de rectificación:** Se compone de una resistencia de entrada r_1 que sirve como limitador de corriente [33] y un par de diodos de alta tensión que funcionan como un rectificador de media onda con el fin de rectificar la señal AC que viene de la fuente de alta tensión y de controlar la polaridad del impulso.

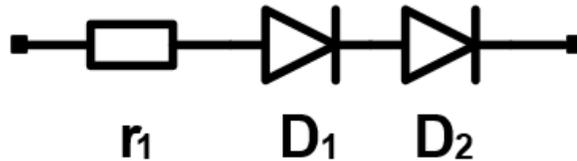


Ilustración 2-17. Sistema de rectificación.

3. **Circuito generador de impulsos:** Conformado por el capacitor C_g , el sphere gap o explosor y las resistencias de frente R_s y de cola R_p .

Explosor con trigatrón: Conformado por una esfera y una semiesfera huecas, dentro de la última se instala un electrodo eléctricamente aislado que tiene como objetivo iniciar “la chispa” que provoca una distorsión en el campo eléctrico asegurando una descarga controlable entre los dos electrodos principales a un valor de tensión disruptiva más bajo que el requerido en condiciones de ruptura naturales, que conduce a la descarga completa entre el *espinterómetro* garantizando la transferencia total de energía del condensador C_g al resto del circuito generador de impulsos.

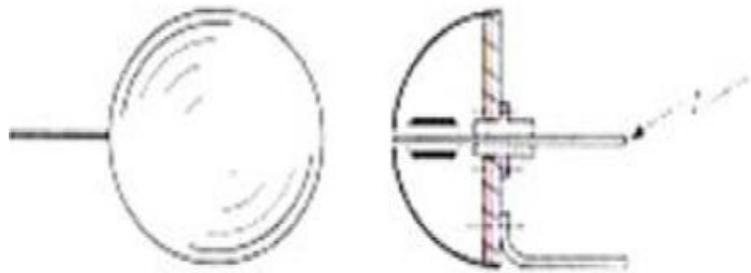


Ilustración 2-18. Espinterómetro con trigatrón, adaptado de [22].

4. **Sistema de medida de tensión:** Corresponde al sistema de medida del objeto de prueba; típicamente se utiliza para medir la tensión de alimentación de la consola, la baja tensión variable o regulada, la alta tensión AC (divisor capacitivo), alta tensión DC (divisor resistivo) y la tensión de impulso (divisor capacitivo). Para la implementación de un divisor capacitivo puro, se debe calcular una relación de transformación tal que permita visualizar la onda completa en el instrumento de registro de señal.

$$V_{out} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_{in}$$

Donde C_1 es la capacitancia de alta tensión y C_2 es la capacitancia de baja tensión. Cabe anotar que este divisor de tensión se comporta mejor en AC que en DC debido a que el capacitor tiene a cargarse con alta tensión DC y se comporta como un circuito abierto.

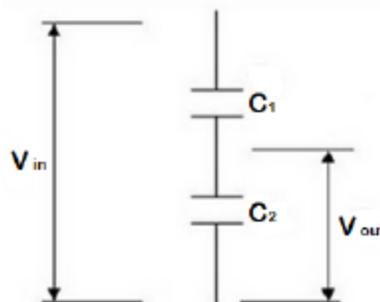


Ilustración 2-19. Divisor capacitivo. Adaptado de [23].

5. **Registro de la señal:** Este equipo permite visualizar y guardar la señal del objeto que se está probando, en la mayoría de casos se utiliza un osciloscopio.

- 6. Objeto bajo prueba:** Representa el objeto bajo prueba, típicamente corresponde a materiales y equipo eléctrico (transformadores, cables, aisladores, guantes, porcelanas, etc.).

2.7 Pruebas de alta tensión

Aunque no nos demos cuenta, la alta tensión afecta nuestra vida diaria de muchas maneras con sus diferentes aplicaciones [34].

- Toda la energía eléctrica que llega a nuestros hogares alcanza niveles de alta tensión.
- Descargas eléctricas que cuentan con una tensión de gran magnitud.
- Otras aplicaciones como la televisión, el radar, los rayos X, cercas eléctricas, mecanismos de arranque, etc.

Tabla 2-10. Componentes para suministro de energía eléctrica. tomado de [34].

Componentes para suministro de energía eléctrica	
Máquinas	
Transformadores	Potencia
	Medida
Interruptores y seccionadores	
Cables y accesorios	
Bujes y DPS	
Aisladores	
Líneas de alta tensión	
Capacitores	
Convertidores AC-DC	

Tabla 2-11. Otras aplicaciones para energía eléctrica. Tomado de tomado de [34].

Otras aplicaciones
Equipos de rayos X
Aceleradores de partículas
Radares
Tubos de televisión
Cercas eléctricas
Bujías

Filtrado electroestático
Pintura electroestática
ETC.

Debido a esto, y considerando que todos los equipos deben ser seguros y confiables al momento de entrar en operación, se hace necesario someterlos a una serie de pruebas que garanticen en buena medida su calidad. En el Capítulo 10 de su libro, [3] explican las diferentes pruebas realizadas a los equipos encargados del suministro de energía eléctrica; a continuación, se mencionarán estas pruebas haciendo énfasis en las que se van a poder realizar con la consola de control que se está dimensionando:

2.7.1 Aisladores

Las pruebas aplicadas usualmente a aisladores se dividen en pruebas tipo y pruebas de rutina. Las pruebas tipo tienen como objetivo la verificación de las características de diseño y su calidad y las de rutina sirven para verificar el funcionamiento de cada equipo individual. A los aisladores se les aplican generalmente pruebas relacionadas con la frecuencia y con el impulso:

Pruebas de impulso a aisladores:

- Prueba de resistencia al impulso: Para la realización de esta prueba se aplica una tensión impulso estándar de un valor determinado con polaridad positiva y negativa. Si las características físicas del aislador no se ven modificadas después de la aplicación de 5 impulsos se considera que el equipo ha pasado la prueba.
- Prueba impulso de arco eléctrico: Esta prueba sirve para verificar cual capacidad de máxima de los aisladores para prevenir la generación de un arco eléctrico por un cortocircuito. En esta prueba se generan impulsos estándar para diferentes valores de tensión de acuerdo a la probabilidad de fallo y se verifica la respuesta del aislador constatando la aparición del fenómeno de arco; un aislador que funcione correctamente no se debería ver afectado por estas pruebas [35].
- Pruebas de polución: Debido al cada vez más alto nivel de polución al que se someten los aisladores instalados al aire libre y a los problemas que causan en el mantenimiento de sistemas eléctricos; las pruebas de polución están ganando cada vez más importancia. La prueba de polución más popular más popular es la prueba de niebla salina; en esta actividad se aplica la tensión máxima nominal que soporta el aislador y se genera un ambiente artificial de niebla salina a partir de chorros de

sal y un compresor de aguas; se comprueba cada hora que no ocurran daños en los equipos y se aumenta o disminuye el nivel de salinidad; sin embargo, no existe un estándar para realizar estas pruebas que determine con exactitud cuál es el nivel que debería soportar el producto para garantizar que la prueba fue exitosa.

2.7.2 Bujes

Las pruebas a bujes se dividen en pruebas de frecuencia, térmicas y de impulso:

Pruebas de impulso a Bujes:

- Prueba de resistencia de onda completa: El buje se evalúa mediante la aplicación de tensiones impulso de onda completa para cada polaridad. Si no ocurre ningún daño después de repetir 5 veces la prueba se considera que el equipo pasa la prueba.
- Pruebas de resistencia de onda recortada y sobrecarga de maniobra: Se realizan las pruebas de forma similar a las de onda completa considerando la variación de parámetros. Estas pruebas se realizan generalmente a equipos de tensiones mayores a 220kV.

2.7.3 Interruptores y seccionadores

Las pruebas realizadas buscan evaluar las características constructivas y operacionales de los equipos y las características eléctricas del circuito dónde se conectan el interruptor y el seccionador. Para determinar estas características, las principales pruebas realizadas a interruptores y seccionadores se clasifican en pruebas dieléctricas o de sobretensión, pruebas térmicas, pruebas de temperatura y pruebas de cortocircuito.

Pruebas dieléctricas a interruptores y seccionadores:

Ejecutadas aplicando la máxima tensión nominal que resisten los aislamientos internos y externos del equipo de corte en sus dos posiciones de operación; cuando el equipo de corte está abierto se aplica una tensión 15% mayor que cuando está cerrado.

- **Pruebas de impulso:** Realizadas con el impulso estándar tipo rayo de manera similar a los aisladores. Adicionalmente, se aplican impulsos tipo maniobra para verificar su funcionamiento ante condiciones de sobretensión por su operación.

- **Pruebas de corto circuito en interruptores y seccionadores:** Las pruebas más importantes realizadas a interruptores y seccionadores son las pruebas de cortocircuito debido a que permiten verificar el correcto funcionamiento de los equipos e identificar su correcto funcionamiento al momento de interrumpir corrientes de falla.

2.7.4 Cables

Los cables son tal vez, el dispositivo más importante en un sistema de transmisión de energía; ya que son el medio utilizado para llevar energía de un lugar a otro. Los cables se evalúan usando tensiones máximas de resistencia AC, DC e impulso. Cuando se fabrican, los cables deben pasar por una prueba a su tensión nominal para revisar su continuidad. Como pruebas de rutina, se les aplican a los cables tensiones AC 2.5 veces mayores a la nominal por minutos; también se aplican tensiones DC con polaridad inversa 1.8 veces mayores por 30 minutos; por último, se aplican 5 impulsos de tensión con valor estándar al cable y no debería ocurrir ningún daño.

2.7.5 Pruebas aplicadas a transformadores de distribución

Los transformadores son los equipos más relevantes en la cadena de suministro de energía eléctrica, desde los grandes transformadores utilizados en plantas de generación y transmisión que sirven como vínculo a través del sistema de potencia, hasta los miles de transformadores que se conectan en el sistema de distribución y que se encargan suministrar energía a cada uno de nuestros hogares e industrias [36].

Considerando la cantidad de unidades fabricadas y sus costos, los fabricantes de transformadores han buscado extensivamente diseñar equipos de prueba que agrupen de forma compacta y en el menor tiempo posible, todos los estándares y parámetros eléctricos necesarios para garantizar al cliente que todos los requerimientos que solicite se cumplan satisfactoriamente.

Las pruebas eléctricas más importantes a las que se someten los transformadores de distribución se pueden dividir en tres grupos [37].

1. Medidas de parámetros operativos.
2. Pruebas de desempeño bajo carga
3. Pruebas de calidad de aislamiento dieléctrico entre los devanados y entre los devanados y tierra.

- **Medidas de parámetros operativos.**

El estándar IEC 60076-3 [38] menciona que este tipo de pruebas sirven para medir las características generales del transformador, como la relación de transformación, la resistencia DC de los devanados, la resistencia del aislamiento, etc.; estas pruebas se realizan utilizando una potencia relativamente baja. De la misma forma, dentro de estas pruebas se agrupan los test de corriente sin carga y pérdidas en los devanados alimentando el lado de baja del transformador con su tensión nominal y empleando una corriente considerablemente más alta.

- **Pruebas de desempeño bajo carga**

Este grupo de pruebas incluye el de *medida de pérdidas bajo carga* y la *prueba de calor* para determinar el incremento de temperatura con carga nominal [38] a partir de pruebas de cortocircuito. Se debe considerar que el equipo de prueba debe soportar alrededor de un 6% adicional de potencia nominal y un equipo de medida de potencia activa muy preciso para poder realizar las pruebas.

- **Pruebas de calidad de aislamiento.**

Este grupo de pruebas sirve para demostrar la calidad de las propiedades de aislamiento en los transformadores. Para esto, se aplican tensiones a los devanados hasta del doble de la tensión nominal en el lado de baja del transformador utilizando un transformador adicional que permiten identificar estos problemas a través de la ocurrencia de descargas parciales (PD) pulsos de baja frecuencia que sirven como indicador cuando ocurren estos fenómenos. Además, es importante tener en cuenta que para evitar saturación magnética durante la prueba la frecuencia se debería incrementar al menos utilizando la misma relación de cambio de la tensión. El conjunto de instalaciones y equipos eléctricos respeta unas características de aislamiento para permitir su funcionamiento con toda seguridad. Ya sea a nivel de los cables de conexión, de los dispositivos de

seccionamiento y de protección o a nivel de los motores y generadores, el aislamiento de los conductores eléctricos se lleva a cabo mediante materiales que presentan una fuerte resistencia eléctrica para limitar al máximo la circulación de corrientes fuera de los conductores [39].

2.8 Fabricantes de pupitres de control

Siguiendo esta premisa, se presentan a continuación los equipos desarrollados por los principales fabricantes alrededor del mundo, su funcionamiento y sus valores nominales suministrados. Además, se mencionarán las especificaciones técnicas de los equipos de control y medida integrados.

2.8.1 W.S Test Systems (WSTS. Bangalore, India) [40]

SRP 0.5 / 5E

- Tipo: Variac, incluye una unidad de regulación que opera a partir de un motor DC de 24V.
- Características generales: El pupitre de control integra elementos de seguridad y alarmas visuales y auditivas para garantizar la seguridad de las personas, los equipos y el objeto de prueba.

Tabla 2-12. Datos del pupitre SRP 0.5 / 5E suministrados por el fabricante.

Tensión de alimentación	220 V
Potencia de transformador de regulación	5 kVA
Potencia de salida	5 kVA continuos, 10 kVA en un ciclo de trabajo de 2 minutos
Tensión de salida	220 V / 0-230 VAC
Peso	180 kg aprox.



Ilustración 2-20. Pupitre de control SRP 0.5 / 5E.

SRP 0.5 / 5TrE

- Tipo: Variac, incluye una unidad de regulación que opera a partir de un motor DC de 24V.
- Características generales: El pupitre de control integra elementos de seguridad y alarmas visuales y auditivas para garantizar la seguridad de las personas, los equipos y el objeto de prueba.

Además, permite instalar un módulo adicional para controlar el trigger, orientado a la prueba del impulso de alta tensión.

Tabla 2-13. Datos del pupitre SRP 0.5 / 5TrE suministrados por el fabricante.

Tensión de alimentación	220 V
Potencia de transformador de regulación	5 kVA
Potencia de salida	5 kVA continuos, 10 kVA en un ciclo de trabajo de 2 minutos
Tensión de salida	220 V / 0-230 VAC
Peso	275 kg aprox.

SRP 0.5 / 10E

- Tipo: Variac, incluye una unidad de regulación que opera a partir de un motor DC de 24V.

- Características generales: El pupitre de control integra elementos de seguridad y alarmas visuales y auditivas para garantizar la seguridad de las personas, los equipos y el objeto de prueba. Además, tiene un módulo adicional para la instalación de equipos de medida adicionales. No cuenta con un módulo para triggering.

Tabla 2-14. Datos del pupitre SRP 0.5 / 10E suministrados por el fabricante.

Tensión de alimentación	220 V
Potencia de transformador de regulación	10 kVA
Potencia de salida	10 kVA continuos, 20 kVA en un ciclo de trabajo de 2 minutos
Tensión de salida	220 V / 0-230 VAC
Peso	300 kg aprox.



Ilustración 2-21. Pupitre de control SRP 0.5 / 5TrE y SRP 0.5 / 10E.

2.8.2 TERCO (Estocolmo, Suecia)

HV 9103 [21]

- Tipo: Variac, incluye una unidad de regulación que opera a partir de un motor DC de 24V.
- Características generales: El pupitre de control integra elementos de seguridad y alarmas visuales y auditivas para garantizar la seguridad de las personas, los equipos y el objeto de prueba. Además, tiene módulos adicionales para el control de activación (triggering) y la instalación de equipos de medida.

Tabla 2-15. Datos del pupitre de control HV 9103 suministrados por el fabricante.

Tensión de alimentación	220 - 230 V
Potencia de transformador de regulación	5 kVA
Potencia de salida	5 kVA continuos, 10 kVA en un ciclo de trabajo de 2 minutos
Tensión de salida	0-220 VAC
Dimensiones:	H: 1220 mm W: 1050 mm D: 800 mm
Peso	275 aprox.



Ilustración 2-22. Pupitre de control TERC0 HV 9103.

HV 9104 [25]

- Tipo: Variac, incluye una unidad de regulación que opera a partir de un motor DC
- Características generales: Este pupitre integra dos módulos físicos, uno de control y uno de conmutación.
- El módulo de control utiliza una interfaz de usuario de doble pantalla con el software *TERCO DAQC* que incluye todos los elementos de control para la operación manual y automática del equipo; el dispositivo tiene la capacidad de adquirir medidas en tiempo real gracias a un digitalizador de 12 bit, 200MS/s; estos datos se pueden exportar como archivos planos (.csv), de

Excel (.xls) o pueden interactuar directamente con otro tipo de software (Ej. Matlab).

- En la interfaz de usuario se pueden visualizar además las medidas de HVAC/HVDC e impulso a la salida en un rango de 0-300kV/420kV y las tensiones y corrientes a la entrada en un rango de 0-250 VAC y 0-25.
- El módulo de conmutación integra contactores, relés de sobrecorriente y equipos de protección adicional que garanticen la seguridad de los equipos durante las pruebas.

Tabla 2-16. Datos del pupitre de control HV 9104 suministrados por el fabricante.

Tensión de alimentación	230 V
Potencia de transformador de regulación	5 kVA
Potencia de salida	5 kVA continuos, 10 kVA en un ciclo de trabajo de 2 minutos
Tensión de salida	0-250 VAC
Dimensiones:	H: 800 mm W: 1050 mm D: 1350 mm
Peso	250 kg aprox.



Ilustración 2-23. Pupitre de control TERCO HV 9104.

2.8.3 YANGZHOU POWER ELECTRIC CO., LTD (Jiangsu, China)

Multifunctional High Voltage Test System Module

- Tipo: Variac, incluye una unidad de regulación que opera a partir de un motor DC
- Características generales: Se utiliza disposición modular en su diseño, se pueden generar diferentes formas de onda (AC/DC/Impulso), conmutando estos módulos de acuerdo con la necesidad. La consola cuenta con un botón de encendido y apagado, un indicador del regulador de tensión de salida, protecciones ajustables de sobretensión y sobrecorriente, indicador de corriente de carga y un medidor electrostático de tensión AC/DC para bajas tensiones y operación manual. Un transformador de pruebas de 10kVA/100kV con un capacitor de impulso de 0.1 μ F.



Ilustración 2-24. Pupitre de control Yangzhou Power Electric Co.

2.8.4 SAMGOR TECHNOLOGY (Shangai, China)

SGADI 300E (SAMGOR TECHNOLOGY, 2014)

- **Módulo de conmutación:** Incluye una unidad de regulación que opera a partir de un motor DC (Variac). Cuenta también con capacidad para la aplicación de pruebas AC/DC/Impulso.

Tabla 2-17. Datos del módulo de conmutación SGADI 300E suministrados por el fabricante.

Tensión de alimentación	400 V
Potencia de transformador de regulación	6 kVA
Potencia de salida	6 kVA continuos en un ciclo de trabajo de 1 hora
Tensión de salida	0-420 VAC
Corriente de salida	15 A

Nota: Estas características pueden variar de acuerdo a los requerimientos de cada cliente.

- **Sistema Digital de Medida AC/DC (SG 3005):** Dispositivo controlado por un microprocesador que muestra y almacena las medidas de tensión AC, DC y la distorsión de la forma onda durante la prueba realizada.

Tabla 2-18. Parámetros de medición del Sistema Digital de Medida AC/DC (SG 3005).

	AC	DC
Modos de medida	Pico, pico/2, rms	Valor medio, ondulamiento
Rangos de tensión	0-700 V rms	0-1000 V
Precisión	±0.2%	±0.2%
Rangos de frecuencia	16...1000Hz	

- **Sistema Digital de Medida de Impulso (SG3004):**

Tabla 2-19. Características del Sistema Digital de Medida de Impulso (SG 3004).

Número de canales	2 canales independientes
Tensión de entrada	1.5V – 1500V
Impedancia de entrada	2MΩ/20pF
Ancho de banda:	50MHz para cada canal
Trigger	Canal 1, canal 2 o externo
Resolución	12 bit
Tasa de muestreo:	100MS/s max.

- **Sistema Digital de Control AC/DC/Impulso (ACS-1):** Este dispositivo se encarga de controlar todas las variables y botones que tiene el equipo; regulador de tensión, trigger del impulso, tensión y potencia regulada, etc. Trabaja sobre Windows 10 y

utiliza el software **Labview** para realizar todas sus funciones, entre sus características se tienen:

Tabla 2-20. Características del Sistema Digital de Control AC/DC/Impulso (ACS-1).

Hardware	TFT 23.5' TFT Screen
Sistema operativo	Windows 10, Windows 8
I/O control	Mitsubishi PLC
Muestreo A/D	Mitsubishi PLC
Salida D/A	Mitsubishi PLC
Canales de medida	8
Precisión A/D	0.5% (16 bit)



Ilustración 2-25. Pupitre de control SAMGOR.

2.8.5 Yangzhou Xinyuan Electric Co., Ltd. PowerHV (Yangzhou, China)

Sistema de Control y Medida IMSC01042 [41].

- Características principales: Integración de las unidades de control y medida. 2 a 4 canales de medida. Sistema con alta precisión (12bit) y velocidad de muestreo (100MS/s). El sistema muestra y guarda los datos en tiempo real la forma de onda y sus parámetros (pico, atenuación, valor actual) durante la realización de las pruebas. Integra todas las funciones de protección necesarias para garantizar alta disponibilidad y confiabilidad en el sistema. Funciones de control manual durante la realización de las pruebas (Triggering, on/off, cambio de polaridad, carga, etc.)

Nota: Los parámetros de la unidad de carga se establecen a partir de solicitud específica del cliente.

2.8.6 Haefely (Basilea, Suiza)

Construcción de Kit de alta tensión [42]

Sistema que integra varios módulos con varios componentes para diferentes aplicaciones en tecnología de alta tensión. Cada uno de los componentes tiene el mismo tamaño y forma de interconexión, lo que hace que el sistema sea muy versátil de acuerdo con las necesidades de los clientes. En estas configuraciones se pueden generar tensiones de hasta 300kV AC y 400V DC e impulso para realizar pruebas.

- **Generadores AC**

Tabla 2-21. Parámetros de generadores AC suministrados por Haefely.

	Tiene reactor de compensación (S:N)	Ciclo de trabajo	Referencia trafo	Tensión máx. (kV)	Corriente máx(mA)	Potencia (kVA)
Una etapa	N	Continuo	STL 5	100	50	5
			STL 7.5		75	7,5
			STL 10		90	9
		1h ON/ 1h OFF. 4 veces x día	STL 10		100	10
Dos etapas	N	Continuo	STL 5	200	15	3
			STL 7.5		28	5,6
			STL 10		36	7,2
	S	Continuo	STL 5		36	7,2
			STL 7.5		65	13
			STL 10		80	16
		1h ON/ 1h OFF. 4 veces x día	STL 7.5		85	17
			STL 10		100	20
Tres etapas	N	Continuo	STL 7.5	300	5	1,5
			STL 10		5	1,5
	S	Continuo	STL 5		17	5,1
			STL 7.5		50	15
			STL 10		60	18
		1h ON/ 1h OFF. 4 veces x día	STL 10		80	24

- **Generadores DC**

Tabla 2-22. Parámetros de generadores DC suministrados por Haefely.

	Referencia transformador	Capacitor de rectificación (Cs)	Tensión máx. (kV)	Corriente máx. (mA)	Potencia (kVA)
Una etapa	STL 5	25 nF	140	11,2	5
		50 nF (2x25 nF)		21,5	5
Dos etapas	STL 5	25 nF	280	11	5
		50 nF (2x25 nF)		21,5	5
Tres etapas	STL 5	25 nF	400	8,2	5
		50 nF (2x25 nF)		17	5
Nota: Todas las referencias tienen ciclo de trabajo continuo					

- **Generadores de impulso**

Tabla 2-23. Generadores de impulso tipo Rayo y Maniobra.

	Tensión máx. (kV)	Capacitor de impulso	Tipo de impulso	Máx. valor sin carga (kV)	Máx. valor a carga máxima (kV)	Máx. carga capacitiva (pF)
Una etapa	140	25 nF (1 x CS25)	Rayo (LI)	125	98	7000
			Maniobra (SI)	118	99	5000
		50 nF (2 x CS25)	Rayo (LI)	130	115	5800
			Maniobra (SI)	123	112	4500
Dos etapas	280	25 nF (1 x CS25)	Rayo (LI)	243	196	2500
			Maniobra (SI)	229	198	3500
		50 nF (2 x CS25)	Rayo (LI)	258	233	2600
			Maniobra (SI)	244	223	2300
Tres etapas	420	25 nF (1 x CS25)	Rayo (LI)	365	295	2300
			Maniobra (SI)	341	295	1700
		50 nF (2 x CS25)	Rayo (LI)	388	348	1900
			Maniobra (SI)	364	335	1500

Convertidor de frecuencia [43]

El Kit 4.0 de Haefely integra un convertidor de frecuencia que como su nombre lo indica, puede variar los valores de frecuencia y tensión suministrados por la red a un valor según se requiera.



Ilustración 2-26. Convertidor de frecuencia Haefely.

Equipos de control y medida [42]

- **OT 276:** Este equipo sirve para controlar el transformador de regulación, utiliza tecnología de relés convencionales y se opera a través de botones. El estado de los contactores y la tensión y corriente en el secundario del transformador se indican en utilizando displays LED en la parte frontal del dispositivo.



Ilustración 2-27. Equipo de control OT 276 de Haefely.

- **DMI 551:** Debido a que usualmente el sistema requiere medición de todos los parámetros durante la realización de las pruebas, el equipo de medida DMI 551 cuenta con tres canales de medición independientes (AC, DC, IMP) que pueden mostrar sus valores simultáneamente.

Este equipo utiliza un microcontrolador para ejecutar todas sus funciones y tiene también la capacidad de incorporar la función de configuración del triggering para hacer pruebas de impulso específicas.

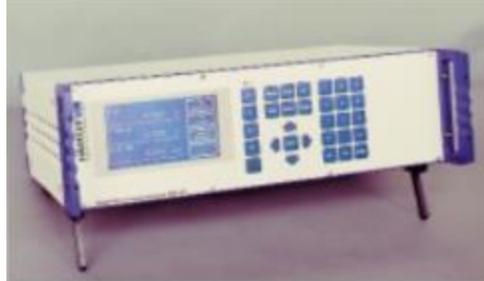


Ilustración 2-28. Equipo de medida DMI 551 de Haefely.

Supervisión y control con LabView [43]

La versión 4.0 del kit se puede supervisar y controlar a través de una laptop, este equipo adquiere los datos del kit a través de un digitalizador de 12 bits que integra cada una de las funciones de los equipos de alta tensión en LabView, software que permite personalización de interfaces y pruebas; además, el sistema también permite incorporación de softwares adicionales como Matlab o Microsoft Excel de acuerdo con la naturaleza de los requerimientos.

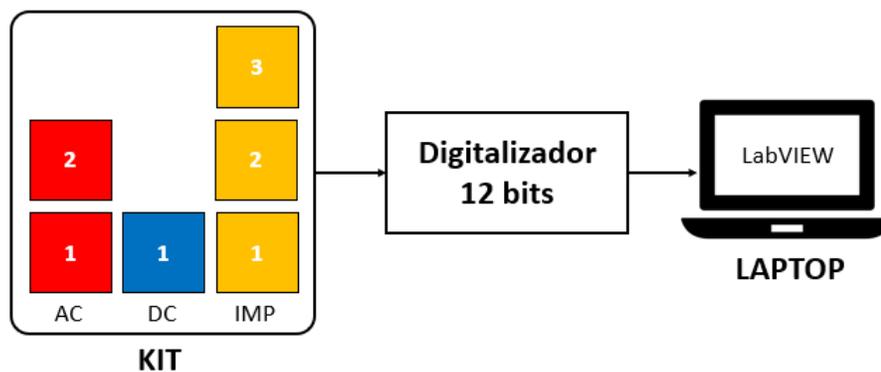


Ilustración 2-29. Esquema de adquisición, medida y control de datos en Kit 4.0 de Haefely.

2.8.7 HighVolt Prüftechnik Dresden GmbH (Dresden, Alemania)

Sistema modular para pruebas de alta tensión [44]

El sistema para pruebas de alta tensión utiliza módulos para generar tensiones de hasta 200 kV AC, 350 kV DC e impulso de hasta 110 kV que se pueden combinar y configurar de acuerdo a requerimientos particulares, en la Tabla 2-24 se muestran sus especificaciones:

Tabla 2-24. Especificaciones para la construcción del sistema de pruebas suministrados por HighVolt

	Una etapa	Dos etapas	Tres etapas
Tensión nominal AC (kV)	100	200	
Potencia en ciclo continuo (kVA)	5,8	5,8	
Potencia 1h ON/23h OFF (kVA)	11	11	
Tensión nominal DC (kV)	135	270	350
Corriente nominal DC (mA)	14	10	8
Tensión nominal de carga (kV)	135		
Máx. valor sin carga (kV)	Rayo (LI)	110	
	Maniobra (SI)	100	

- **Sistema de adquisición, medida y control:** Consola de operador HiCO Basic [45]. Conjunto de módulos que se encargan de controlar, medir, gestionar y reportar todos los datos obtenidos desde los equipos de potencia. Hay diferentes referencias, cada una cuenta con un botón de parada de emergencia y un HMI de marca Siemens entre el operador y el equipo de pruebas:

Tabla 2-25. Referencias de consolas de operador fabricadas por HighVolt.

Referencia	Diseño	Alimentación	Frecuencia	Resolución de pantalla	Comunicación
HiCO Basic BG 8 G	Unidad independiente	230 ± 10% V	50/60 Hz	800 x 480p	Ethernet, Fibra óptica
HiCO Basic BG 8 E	Unidad incorporada de 19"	230 ± 10% V	50/60 Hz	800 x 480p	Ethernet, Fibra óptica
HiCO Basic BG 9 P	Unidad independiente con equipos de control no integrados	230 ± 10% V	50/60 Hz	800 x 480p	Ethernet, Fibra óptica

Tabla 2-26. Dimensiones y peso de consolas de operador fabricadas por HighVolt.

Referencia	Dimensiones (mm)	Peso (kg)	Instalación
HiCO Basic BG 8 G	440 x 463 x 280	9	-
HiCO Basic BG 8 E	440 x 483 x 267	9	Rack o escritorio
HiCO Basic BG 9 P	Panel: 220 x 420 x 272 Equipos de control: 483W x 178H	10	Tablero



Ilustración 2-30 Consolas de operador Hico Basic BG 8 G, 8 E, 9 P de HighVolt.

- **Firmware tipo iCOS Basic [46]**

Existen diferentes firmwares instalados en las consolas de operador de los equipos de pruebas de alta tensión a partir de los requerimientos solicitados:

Tabla 2-27. Diferentes firmwares disponibles y sus aplicaciones.

Nombre	Aplicación
iCOS Basic T	Sistema AC con transformador
iCOS Basic V	Sistema AC resonante con frecuencia variable
iCOS Basic R	Sistema AC resonante con inductancia variable
iCOS Basic TT	Sistema AC para pruebas de transformador
iCOS Basic DT	Sistema AC para pruebas de transformador de distribución
iCOS Basic H	Sistema de pruebas para alta corriente
iCOS Basic G	Sistema de pruebas para alta tensión DC
iCOS Basic I	Sistema de pruebas de impulso
iCOS Basic M	Sistema modular de pruebas

Tabla 2-28. Funcionalidades de los diferentes firmwares desarrollados por HighVolt.

Funcionalidades	iCOS Basic T	iCOS Basic V	iCOS Basic R	iCOS Basic TT	iCOS Basic H	iCOS Basic G	iCOS Basic I	iCOS Basic M
Switch principal on/off	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Indicación estado de switch principal	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Alarmas y mensajes de error del equipo de pruebas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Variación de tensión	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
Preselección de tensión, polaridad y tiempo de prueba	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
Preselección de dos velocidades de regulación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
Visualización de tensión y corriente límites para protección	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
Operación de compensación	✓	-	✓	✓	✓	-	-	-
Protección con contraseña para configuraciones esenciales en el sistema	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Control remoto de la unidad de acondicionamiento de agua	-	-	✓	-	-	-	-	-
Sincronización con HIGHVOLT AC test system	-	-	-	-	✓	-	-	-
Operación para aterrizar	-	-	-	-	-	✓	✓	-
Operación para descargar resistor	-	-	-	-	-	✓	-	-
Preselección de impulsos	-	-	-	-	-	-	✓	-
Contador de impulsos	-	-	-	-	-	-	✓	-
Operación de triggering	-	-	-	-	-	-	✓	-

Notas:

- En el iCOS Basic T la operación de compensación es opcional.
- En iCOS Basic R no se puede elegir la polaridad, el control de la unidad de acondicionamiento de agua es opcional.
- En el iCOS Basic TT se puede seleccionar la frecuencia de prueba, la operación de compensación es opcional.
- En el iCOS Basic H no se visualiza la variación de tensión sino de corriente, se selecciona tiempo, temperatura y corriente de prueba, muestra temperatura y corriente límites para protección.
- En el iCOS Basic G la operación para descargar resistor es opcional.

- En iCOS Basic I se pueden realizar operaciones de polaridad, carga automática y se pueden seleccionar la tensión y el tiempo de carga por cada etapa antes de realizar la prueba.
- En iCOS Basic M no se puede seleccionar la polaridad.

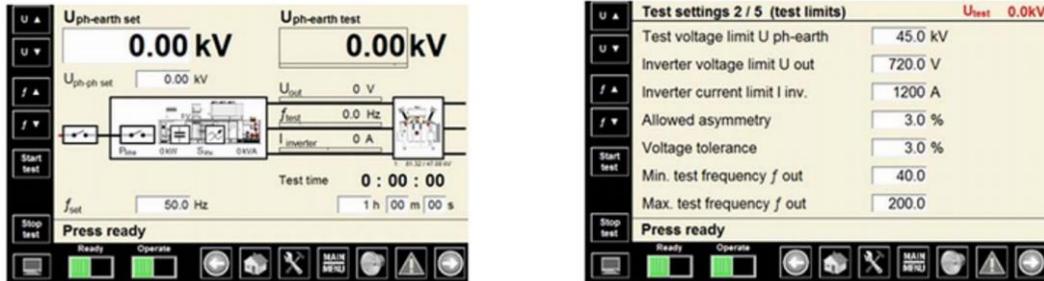


Ilustración 2-31. Visualización de pruebas y parámetros del iCOS Basic TT de HighVolt.

2.9 Bobinas de choque paralelo

Considerando que para realizar el montaje de la etapa de potencia se requiere la conexión de un conjunto de Variacs por los que circula una importante cantidad de corriente (aprox. 25 A) y que debido a las limitaciones físicas de su construcción tienen una relación de transformación ligeramente diferente que ocasiona un consumo excesivo de energía sin carga debido al desbalance de tensión que se presenta cuando se conectan en paralelo y un reparto desigual de corriente entre los variacs cuando se conecta carga; se plantea la utilización de bobinas de choque paralelo con el objetivo de equilibrar la distribución de corriente entre los dispositivos conectados [47]. Estas bobinas se construyen típicamente a partir de la utilización de un núcleo toroidal de ferrita de talla grande con dos cables bobinados que se arrollan en direcciones opuestas sobre el núcleo; lo que se busca es que cada uno de los bobinados genere un flujo magnético opuesto al otro, que equilibre las tensiones de cada uno de los variacs en paralelo y en consecuencia permita repartir uniformemente la corriente entre los mismos [48].

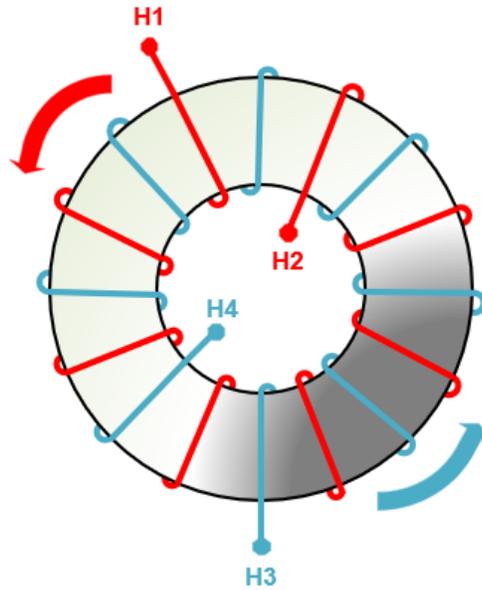


Ilustración 2-32. Bobina de choque paralelo.

Para la construcción del dispositivo se decide entonces que se deben elaborar bobinas de choque paralelo con parámetros que se adapten a las características físicas de los variacs que se van a utilizar. Para la realización de las bobinas se calculan los siguientes parámetros:

Diferencia de relación de transformación: Para calcular las variaciones en cuanto a la relación de transformación de cada uno de los variacs que se utilizarán se debe calcular la diferencia del número de espiras entre los variacs. Ver **Tabla 2-29**.

Tabla 2-29. Número de espiras por variac.

Variac	Cantidad de espiras
1	249
2	253
3	252
4	256
5	247
6	254

Cálculo de relación Voltios/Espira y análisis del peor de los casos: Se procede a calcular el desfase que existe en la entre la tensión nominal y la tensión que entregará cada Variac de acuerdo con su número de espiras a partir de la siguiente ecuación (Ver tabla 2-30).

$$\frac{\text{Voltios}}{\text{espira}} = \frac{V_{\text{nominal}}}{\#_{\text{espiras}}} [V]$$

Tabla 2-30. Relación Voltios/Espira de cada variac.

Variac	Relación Voltios/Espira [V]
1	1,004
2	0,988
3	0,992
4	0,976
5	1,012
6	0,984

Para la construcción de la bobina se considera el peor de los casos, es decir, la relación Voltios/Espira más alta, que en este caso será la del **Variac #5 = 1,012 V**.

Para limitar la diferencia entre espiras de cada uno de los variacs, es necesario poner todos los cursores en cero, aferrarlos al eje y moverlos de forma simétrica verificando la posición de cada uno de los cursores y ajustándolos respecto al eje para que la diferencia para que sea de ± 2 vueltas en el peor de los casos. Después de realizar esta actividad se puede inferir que la diferencia de tensión en el peor de los casos es de **4,048V**.

Cálculo de la sección transversal del núcleo y del número de vueltas del bobinado:

A partir del análisis realizado anteriormente y aplicando la ecuación para el cálculo estándar de parámetros del transformador se obtienen el número de vueltas que debe tener cada bobinado.

$$\frac{V}{N} = 4Ff\alpha B$$

Donde:

$$V = \text{Tensión} = 4,048 \text{ V}$$

N = Número de vueltas o espiras

$$F = \text{Factor de forma} = 1,3$$

$$f = \text{Frecuencia} = 60\text{Hz}$$

α = Área de sección transversal del núcleo de la bobina [pulgadas²]

$$B = 0,8 \times 10^{-3} \frac{\text{Maxwell}}{\text{pulgada}^2}$$

Para calcular la sección transversal del núcleo se consideran las dimensiones de los toroides suministrados por **Aisladores y Transformadores ATEL S.AS** en la **Tabla 2-31**.

Tabla 2-31. Dimensiones del núcleo de la bobina.

Material: Acero al silicio de grano orientado		
Dimensiones	Medida [mm]	Medida [pulgada]
Diámetro externo	124,64	4,9
Diámetro interno	73,66	2,9
Altura	44,45	1,75

El área de la sección transversal del núcleo equivale entonces a **10,4 cm²** o **1,61 pulgada²**. Se calcula el número de vueltas aplicando la fórmula:

$$\frac{V}{N} = 4 \times (1,3) \times 60 \times (1,61) \times (0,8 \times 10^{-3}) = 0,401 \frac{\text{voltios}}{\text{vuelta}}$$

$$N = \frac{4,2 \text{ voltios}}{0,401 \frac{\text{voltios}}{\text{vuelta}}} = \mathbf{10,47 \text{ vueltas}}$$

2.9.1 Variacs

Dado que el bobinado de Tesla puede implicar una buena cantidad de potencia y voltaje, generalmente es bueno tener algún tipo de control sobre la situación. Variacs permite la oportunidad de controlar el voltaje que va al transformador que suministra el voltaje a las bobinas. Los suministros de bobina más pequeños como los de NST realmente no necesitan un variac, pero seguro que es bueno tener uno cuando se sintoniza una bobina por primera vez y cuando se realizan experimentos mientras se cambian los parámetros principales de la bobina. Las bobinas más grandes, como las bobinas piggie, se benefician definitivamente del uso de un variac. Hay variantes que pueden manejar los requisitos de energía de los cerdos pequeños, pero cuando comenzamos a necesitar más de 25 amperios de potencia para alimentar al cerdito, las variantes deben estar en paralelo. Las variantes en paralelo permiten "igualar" el flujo de corriente entre múltiples variantes, aumentando así la cantidad de corriente disponible para ser utilizada.

El elemento necesario para poner en paralelo un conjunto de variacs se denomina estrangulador en paralelo. Consiste en un núcleo de ferrita toroidal de un tamaño más grande con 2 juegos de devanados. La mayoría de las empresas de variac ofrecen una máquina de este tipo, pero el costo de estos estranguladores es algo elevado (150 \$ + cada uno).

Uno de los componentes más importantes en el diseño de del tablero de control es el variac, ya que este permite realizar una variación de tensión a la salida dependiendo de la aplicación requerida. “El principio de autotransformador encuentra aplicación en un dispositivo muy útil, el variac, de uso en el laboratorio y en otras situaciones que requieren un voltaje continuamente variable sobre rangos muy amplios donde una las terminales de entrada con uno de salida, que son fijos. Pero el segundo terminal de salida se conecta a una escobilla de carbón que desliza sobre toda la longitud de la bobina, generalmente este tipo de autotransformador (Variac) es devanado sobre un núcleo de hierro toroidal, la superficie exterior del devanado tiene un recubrimiento electrolítico y está preparada para usarse como una superficie de conmutación parecida a un conmutador.

2.10 Circuitos para experimentos de alto voltaje

El circuito eléctrico para configuraciones experimentales de alta tensión se compone adecuadamente de tres circuitos que se muestran en la ilustración 2-33, a saber, el circuito de suministro de energía 1, el circuito de seguridad 2 y el circuito de alto voltaje 3. Además del equipo de conmutación, el circuito de suministro de energía en la mayoría de los casos contiene un elemento para establecer el voltaje deseado. El circuito de seguridad impide la conexión o provoca desconexión, del circuito de alta tensión cuando uno de los interruptores del circuito de seguridad no está cerrado. Finalmente, el circuito de alto voltaje consta del generador de alto voltaje y el equipo de medición, así como el objeto de prueba.

2.10.1 Circuitos de seguridad y suministro de energía

Además del equipo de conmutación, la disposición para configurar una excitación variable. El voltaje para la fuente de alto voltaje es un elemento importante del circuito de suministro de energía. [28].

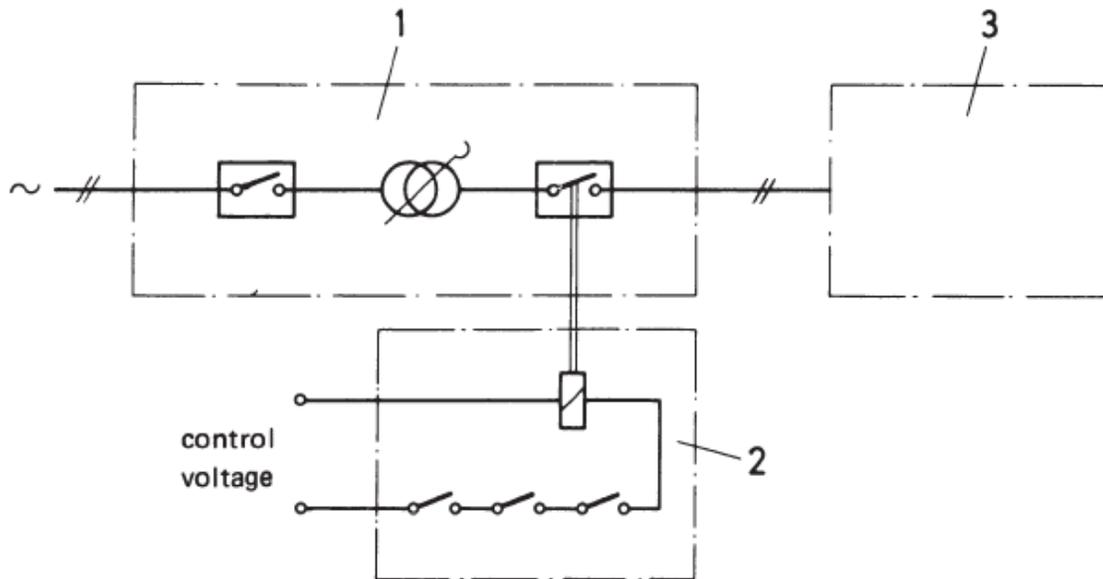


Ilustración 2-33. Representación esquemática del circuito básico de una configuración experimental de alto voltaje [49].

1. Circuito de alimentación con unidad de regulación y subestación de control.
2. Circuitos de seguridad y control
3. Circuito de alto voltaje con generadores de alto voltaje, equipo de medición y objeto de prueba.

Para potencias nominales de hasta 50 kV A, como máximo 100 kV A, un transformador regulador con carbono se utiliza con rodillos. Esto es económico y el uso de diversos circuitos se puede hacer de manera confiable hasta las clasificaciones de alta potencia indicadas. La instalación en la mesa de control es posible hasta aproximadamente 5 kVA, y la operación manual es entonces más practicable. Para una instalación separada de mayor potencia y se hace necesario el accionamiento del motor por control remoto. Por encima de unos 100 kVA a el transformador de regulación donde debe elegirse con contacto metálico y disyuntor de carga o excitación por medio de una máquina síncrona. Otras posibilidades son los transformadores de regulación con bobinado giratorio, mientras que para la excitación a través de un generador síncrono a la red de suministro donde se libera de impulsos de potencia durante las descargas de ruptura en el circuito de alto voltaje, para la excitación con transformadores reguladores estos impulsos se transfieren a la red sin amortiguar. La disposición de los circuitos de seguridad y de alimentación que se describen a continuación corresponde a la utilizado para los soportes prácticos de la ilustración 2-34. Los experimentos se controlan desde el control escritorios que acomodan

un transformador regulador para la excitación del transformador de prueba, así como las instalaciones de medición y control más importantes. Como protección contra accidentes eléctricos, el circuito de seguridad efectúa la desconexión del transformador de prueba en todos los polos para la interrupción de cualquiera de los interruptores del circuito de seguridad conectados en serie. La puerta de la instalación de prueba solo se puede abrir con una llave que también se ajuste a un dispositivo de enclavamiento. Encienda el pupitre de mando situado en el circuito de seguridad. La configuración solo se puede activar cuando la compuerta está cerrada. Un diagrama de bloques y los caminos actuales de la configuración se reproducen en la ilustración 2-34 y en la ilustración 2-35. El voltaje de control requerido para energizar los circuitos de seguridad y control se toma de la tensión de alimentación a través de un transformador de aislamiento. Lámparas de advertencia montadas visiblemente en la entrada del experimental soporte indica la condición del interruptor del transformador.

La entrada de la configuración solo está permitida cuando la luz de advertencia verde está encendida. Toda la iluminación de los instrumentos y de las luces de advertencia también, se pueden interrumpir por períodos cortos presionando el botón 'Luces apagadas', para permitir que las observaciones se realicen en total oscuridad donde está ubicado en una posición particularmente prominente en la mesa de control está el botón de presión 'Peligro', que liberará inmediatamente el interruptor principal cuando se pulsa.

Lo mismo es válido cuando el relé de sobre corriente indica una sobrecarga de la fuente de alimentación circuito.

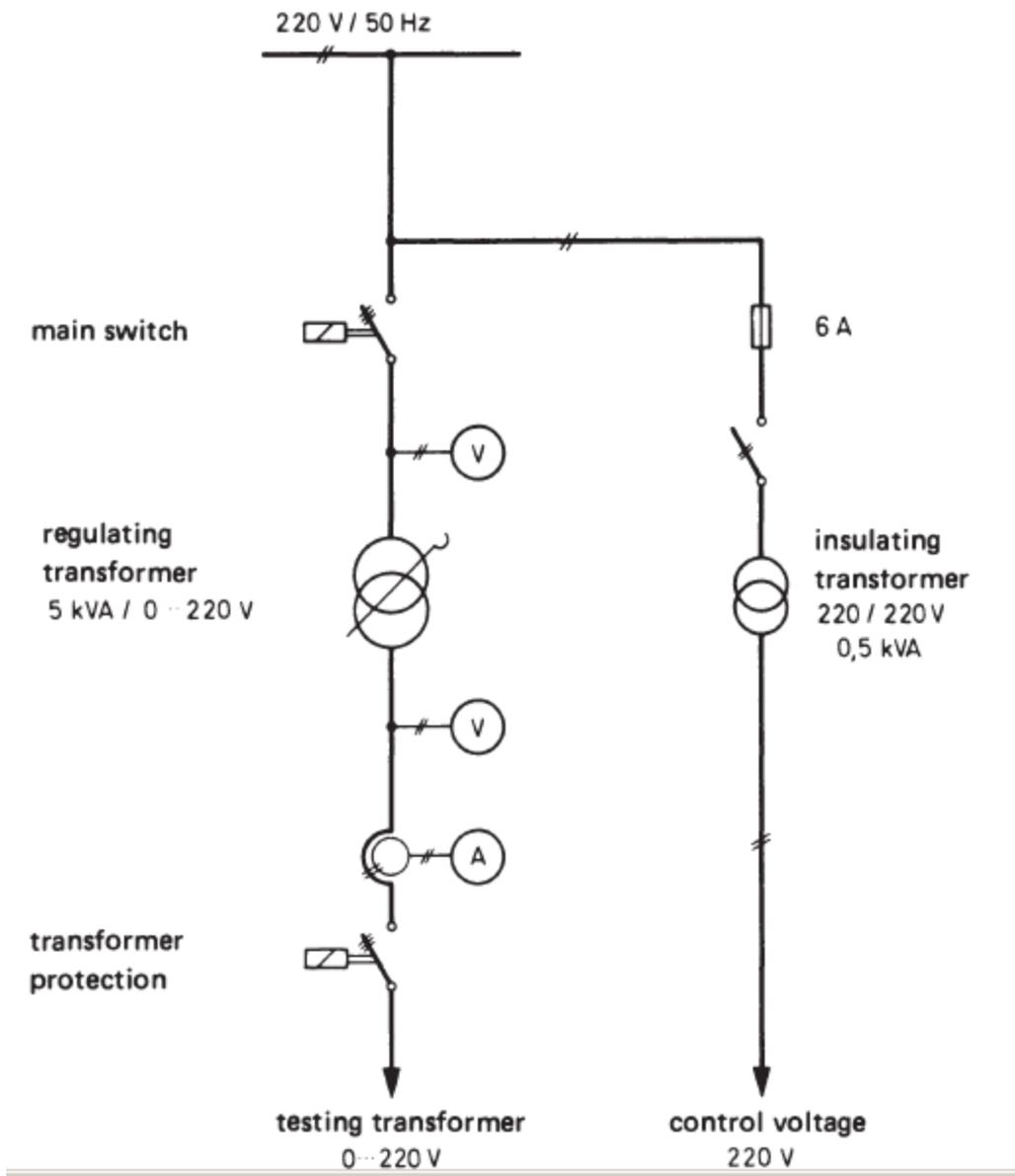


Ilustración 2-34. Diagrama de bloques para el circuito de alimentación de una configuración experimental de alto voltaje.

2.10.2 Configuración de circuitos de alto voltaje

El diagrama del circuito eléctrico de los circuitos de alto voltaje suele ser bastante simple, ya que, aparte del equipo de medición, sólo se involucran comparativamente pocos elementos. Una dificultad particular, sin embargo, es que los espacios libres especificados dentro de la configuración y los alrededores tienen que estar permitidos. Por esta razón, el diagrama del circuito eléctrico por sí solo no es suficiente para el circuito de alto voltaje;

por lo general tiene que ser complementado por un diagrama de circuito espacial que indica claramente la disposición tridimensional.

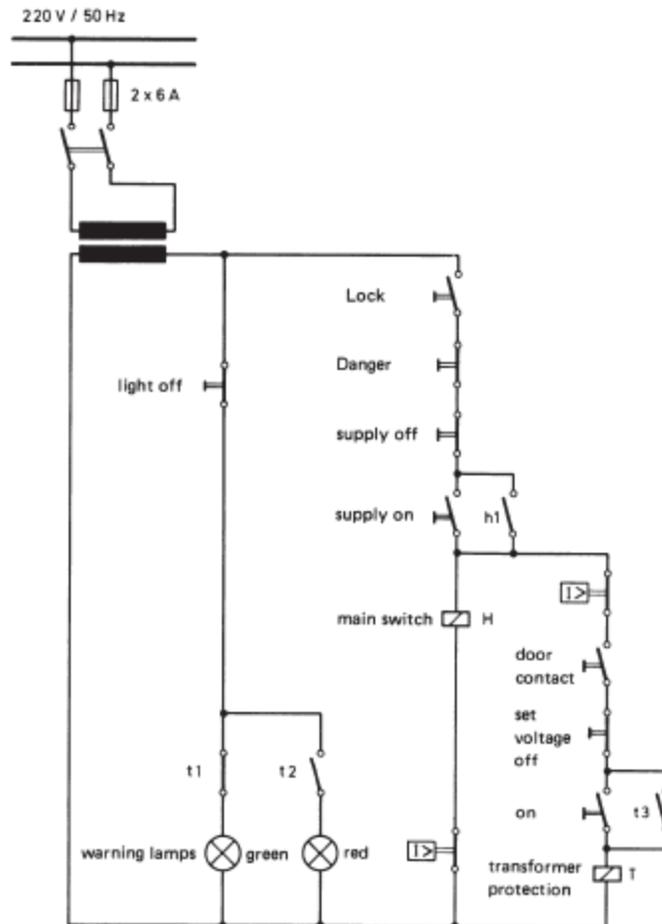


Ilustración 2-35. Rutas de corriente de los circuitos de seguridad y control de una configuración experimental de alta tensión.

2.11 Elementos de construcción para circuitos de alto voltaje

Los equipos para experimentos con alto voltaje generalmente se instalan en aire atmosférico. Las dimensiones requeridas de los elementos de construcción utilizados dependen principalmente de la magnitud de los voltajes que aparecen a través de ellos. Aparte de esto, es necesario considerar la disipación de pérdidas operativas para evitar un sobrecalentamiento inadmisibles. A continuación, se observará varios tipos de los elementos de construcción de alto voltaje más importantes para la instalación de interiores en la cual se describirá brevemente. En la selección de los ejemplos, en particular se dará

prioridad a los aplicables en experimentos prácticos de alta tensión y también a la viabilidad de dispositivos de fabricación propia.

2.11.1 Resistencias de alto voltaje

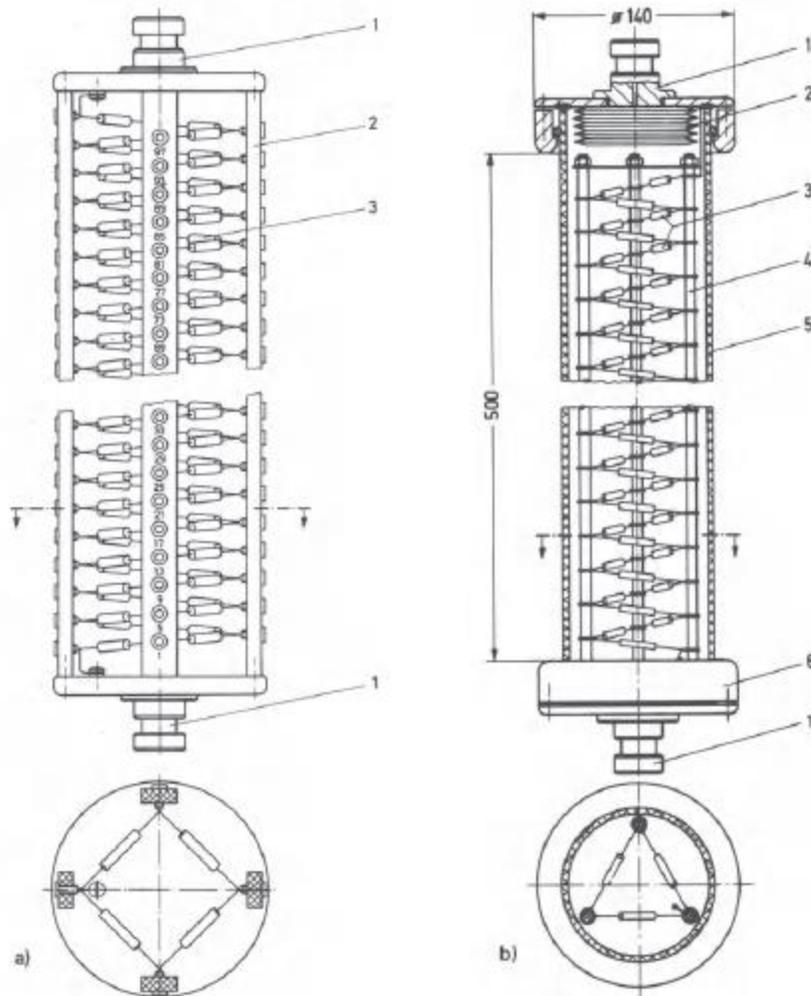


Ilustración 2-36. Tipos de resistencias de alto voltaje con resistencias de capa de carbono.

2.11.2 Condensadores de alto voltaje

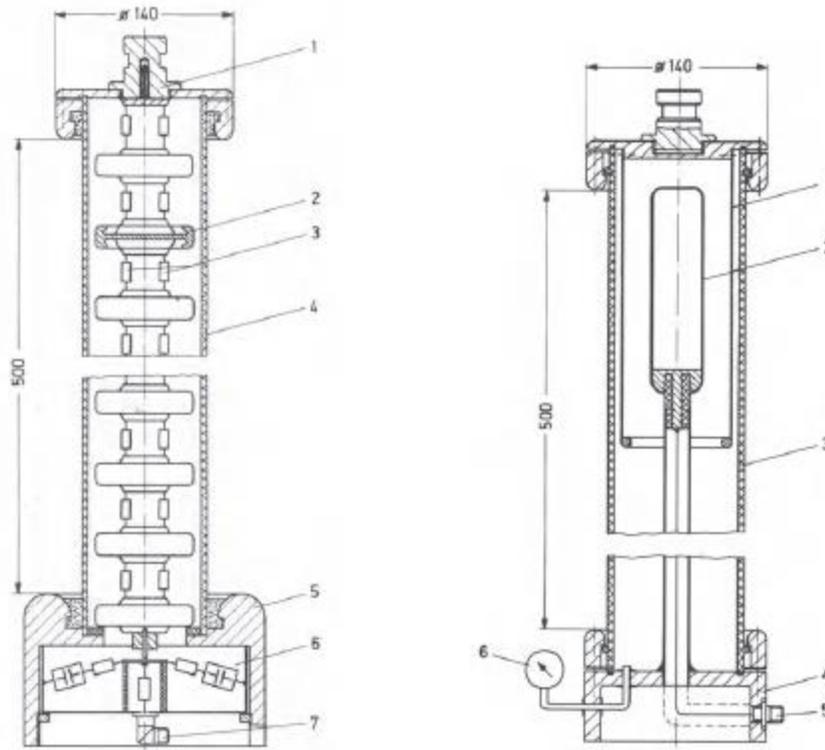


Ilustración 2-37. Izquierda - Divisor capacitivo amortiguado para tensiones de impulso hasta 200 kV con condensadores cerámicos y resistencias de tipo capa en el aire.
Derecha - Condensador de referencia para 100 kV, 26 pF con aislamiento de gas comprimido.

3. Capítulo III – Diseño metodológico

3.1 Diagrama de flujo esquemático del proceso de investigación

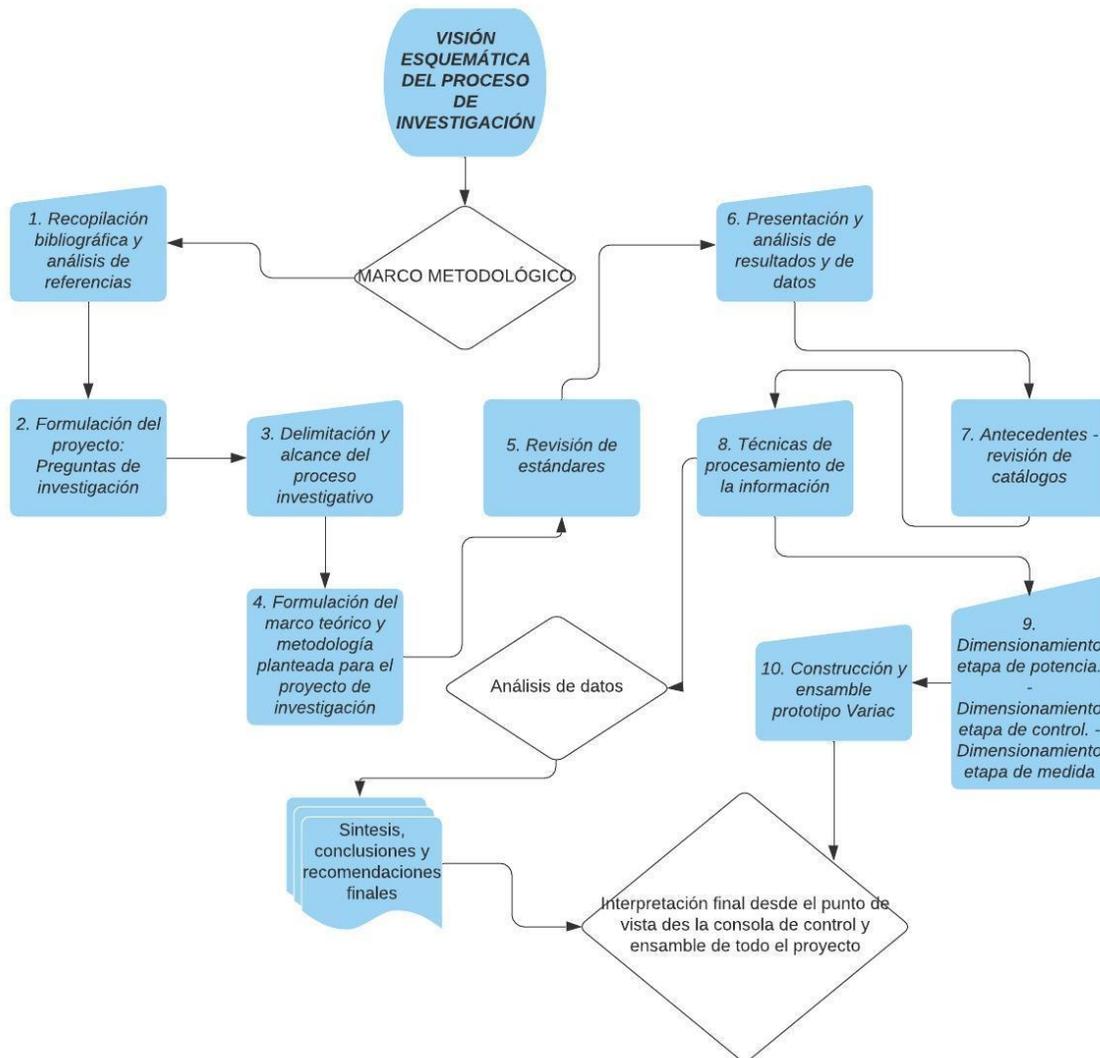


Ilustración 3-1. Visión esquemática del proceso de investigación.

3.2 Enfoque metodológico

La metodología cuantitativa es una de las dos metodologías de investigación que tradicionalmente se han utilizado en las ciencias empíricas. Se centra en los aspectos observables susceptibles de cuantificación, y utiliza la estadística para el análisis de los datos. En este proyecto de investigación hay mucho enfoque cuantitativo, pero la presentación de los datos es más pragmático y práctico en función de la presentación de resultados del montaje de todo el esquema y cálculos del esquema del tablero de control. Este tipo de metodología es característico de un planteamiento científico positivista. El postulado fundamental del positivismo es que el conocimiento válido sólo puede establecerse por referencia a lo que se ha manifestado a través de la experiencia. La investigación que sigue una metodología cuantitativa supone un planteamiento, un acercamiento a la realidad objeto de estudio y a la teoría, y unos fines de la investigación característicos. Por otro lado, en la investigación cuantitativa la relación entre teoría e hipótesis es muy estrecha pues la segunda deriva de la primera. A partir de un marco teórico se formula una hipótesis, mediante un razonamiento deductivo, que posteriormente se intenta validar empíricamente. Se busca establecer una relación de causa-efecto entre dos fenómenos. Dicha relación está ligada con la interconexión entre conceptos que supone la hipótesis. La validación de la hipótesis supone explicitar esa relación de causa-efecto latente en dicha hipótesis. La metodología establecida para el proyecto se basa en el cálculo y diseño de cada uno de los elementos involucrados en el tablero de control, como lo son la parte de la energización, la parte de control, la parte de señales, la parte de instrumentación, la parte de instrumentación y la parte de protecciones eléctricas. Estas se asocian también con otros componentes que a su vez se deben calcular como en el caso de los conductores, dimensiones de equipos, etcétera.

3.3 Etapas del proceso de investigación

3.3.1 Recopilación bibliográfica y referencias

Levantamiento inicial de datos sobre información básica del contexto del proyecto de investigación, análisis de textos característicos del tema, recopilación bibliográfica

existente de otros estudios del caso. Se efectuó consulta de bibliografía básica en máquinas eléctricas existente en biblioteca, sobre los tipos de motores eléctricos que mejor se adaptan a la operación y control proyectada para bajas velocidades (menores que 10 rpm), considerándose motores DC y motores síncronos.

3.3.2 Formulación y evaluación del proyecto / preguntas de investigación:

La selección del problema se establece cuándo el investigador analiza que se va a investigar y los motivos para hacerlo, los desafíos en el plano del conocimiento y la hoja de ruta a seguir en función de un plan estructurado de trabajo para la realización exitosa de la investigación. La delimitación del alcance del proyecto estará basada en los limitantes o fronteras dentro del proyecto establecidos por la información que se tiene en el momento de plantear el problema y el análisis de resultados. También se debe resaltar si hay algunas restricciones respecto al uso de la información debido a la carencia de data en algunos casos o de falta de equipamiento técnico o de ingeniería

3.3.3 Adquisición de equipamiento técnico y de ingeniería para la correcta implementación del proyecto de investigación

Se adquirieron (de cuenta propia del responsable del proyecto), un motor dc de 15 vatios con reductor de velocidad (24 V a 625 mA) y un motor síncrono de 48 vatios (120 V a 0.4 A), ambos de segunda mano y de potencia fraccionaria. Se probó su funcionamiento exitoso en vacío en ambos casos. Se proyectaron tres esquemas de operación posibles de los seis variacs ya existentes en el Laboratorio de Electricidad y Electrónica, contemplando su operación motorizada así: todos en conexión monofásica, por pares para operación trifásica y la finalmente seleccionada correspondiente a una operación combinada seleccionable, bien sea monofásica o trifásica. Se consideraron 6 variacs de iguales especificaciones nominales correspondientes a potencia de 5 kVA, tensión 220:0-250 V, corriente 20 A, para una potencia total de 30 kVA. El esquema propuesto puede aún ser aplicado para acoplar variacs de mayor potencia.

3.3.4 Componentes eléctricos considerados

- Seis (6) variacs (autotransformadores variables).
- Un (1) motor DC con reductor de velocidad.
- Seis (6) toroides en acero al silicio de 500 VA c/u, CON PRESUPUESTO DEL PROYECTO.
- Setenta (70) metros de cable 10 AWG THWN.
- Aprox. treinta (30) terminales de ojo para cable calibre 10.
- Dos finales de carrera.
- Un (1) relé con bobina a 24 VDC.
- Dos (2) pulsadores.
- Cinco (5) metros de cable 18 AWG para control.
- Seis (6) rollos Scott 33 (cinta aislante).

3.3.5 Componentes mecánicos considerados

- Seis (6) platinas de hierro (bases soporte de variacs).
- Diez (10) varillas roscadas 1m x 7/16".
- Dos (2) metros de ángulo 3/4" para apoyo de bases.
- Cuatro (4) metros de tubo de aluminio de 1/2".
- Ochenta (80) tuercas 7/16 con sus arandelas.
- Dos (2) chumaceras pedestal 5/8".
- Dos (2) varillas lisas de hierro 5/8" x 1.5 m.
- Cuatro (4) poleas así: 9 a 1 (1), 6 a 1 (2) y 2 a 1 (1).
- Dos (2) correas lisas de transmisión: 138 y 439.
- Una (1) bolsa de 100 unidades de amarras plásticas.

3.3.6 Desarrollo y construcción de choques de corriente

Se emplean para conexión paralelo de los variac. Se construyen a partir de dos bobinados independientes de 10 vueltas c/u con cable 10 AWG, hecho manualmente, alrededor de c/u de los seis (6) toroides; ambos (toroides y cables) contemplados en los componentes eléctricos (Ver fotos 2 a 11 Construcción bobinas de choque).

3.3.7 Síntesis, conclusiones y recomendaciones finales

Planteamientos finales respecto a todo el proceso investigativo del proyecto, profundización del análisis respectivo de resultados.

3.4 Cronograma de resultados

Para el desarrollo de las primeras cinco (5) actividades se estimaron tres meses en el cronograma. En la práctica las mismas actividades tomaron nueve y medio meses. Las dos últimas actividades del cronograma, son objeto del informe final.

3.5 Dificultades

- Disponibilidad de recursos de la DIMA durante el primer semestre de 2015.
- Estudiantes del semillero del primer semestre no continuaron en el semillero para el segundo semestre de 2015.
- Demora en el ingreso del informe por desconocimiento del formato del HERMES, al ser la primera vez en el uso de esta plataforma.

4. Capítulo IV - Análisis de resultados

4.1 Características generalidades

Esquemáticamente un generador de alta tensión se compone de tres secciones: comando y control, generación de alta tensión y medida. Un componente relevante de la sección de comando y control es el correspondiente a la producción de la tensión variable, la cual alimenta los componentes de generación de alta tensión. Algunos tipos de producción de la tensión variable se efectúan mediante el empleo de varias clases de transformadores entre los que se encuentra el autotransformador variable o variac. El variac permite regular la rampa de suministro de tensión de un modo suave y sin sobresaltos mediante el acople de un mecanismo motorizado; el que a diferencia de los suministros de tensión controlados manualmente, no presenta variaciones escalonadas y/o abruptas que puedan afectar tanto los componentes de alta tensión del generador, como los equipos bajo prueba.

Entre los mecanismos motorizados acoplados al variac se encuentran mecanismos que emplean motores síncronos de corriente alterna, motores paso a paso o motores de corriente directa. El control de estos mecanismos puede efectuarse mediante dispositivos electrónicos o analógicos, siendo estos últimos de una menor complejidad aparente.

4.2 Consola de control

4.2.1 Sinóptico de cableado

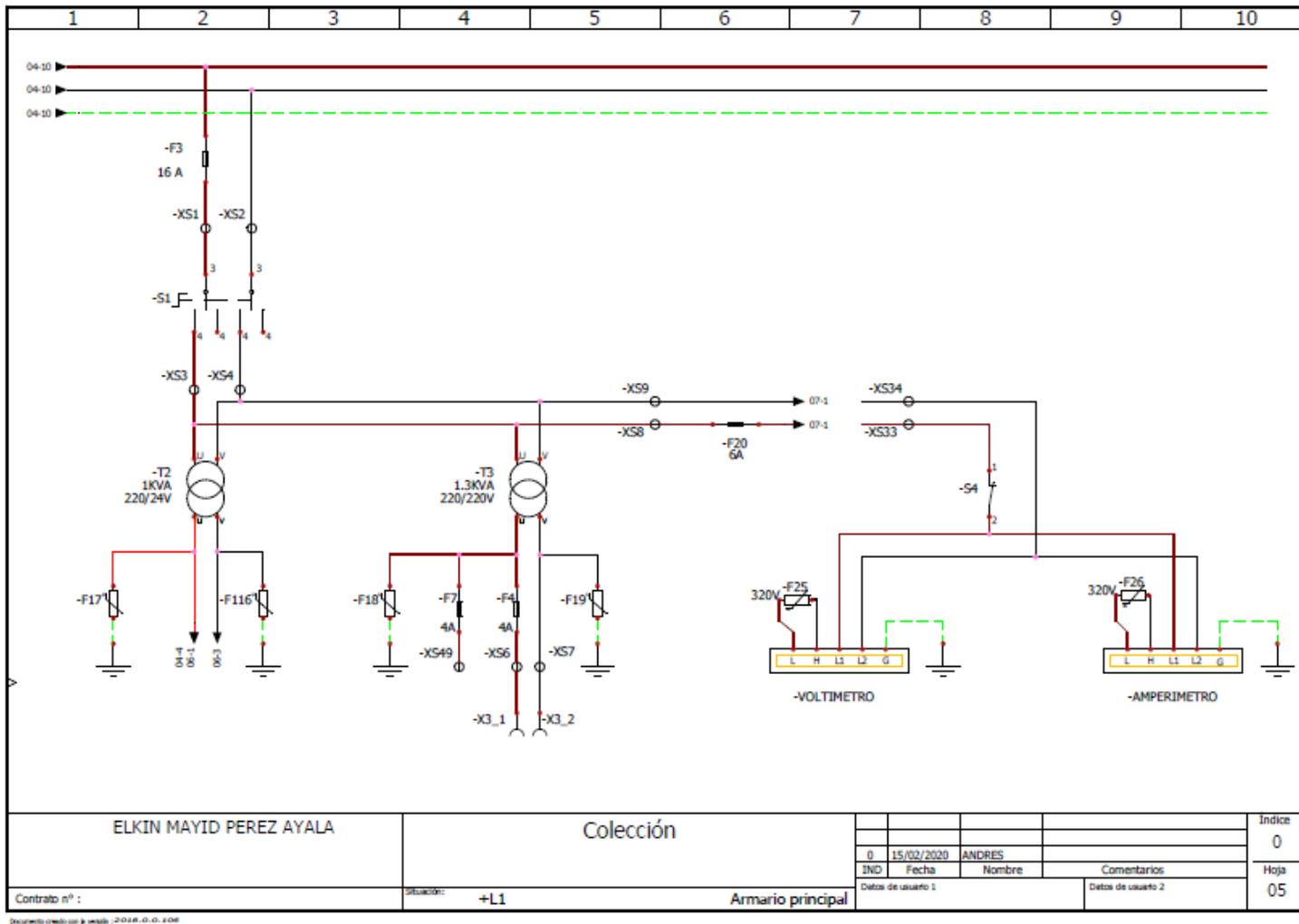


Ilustración 4-2. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 02.

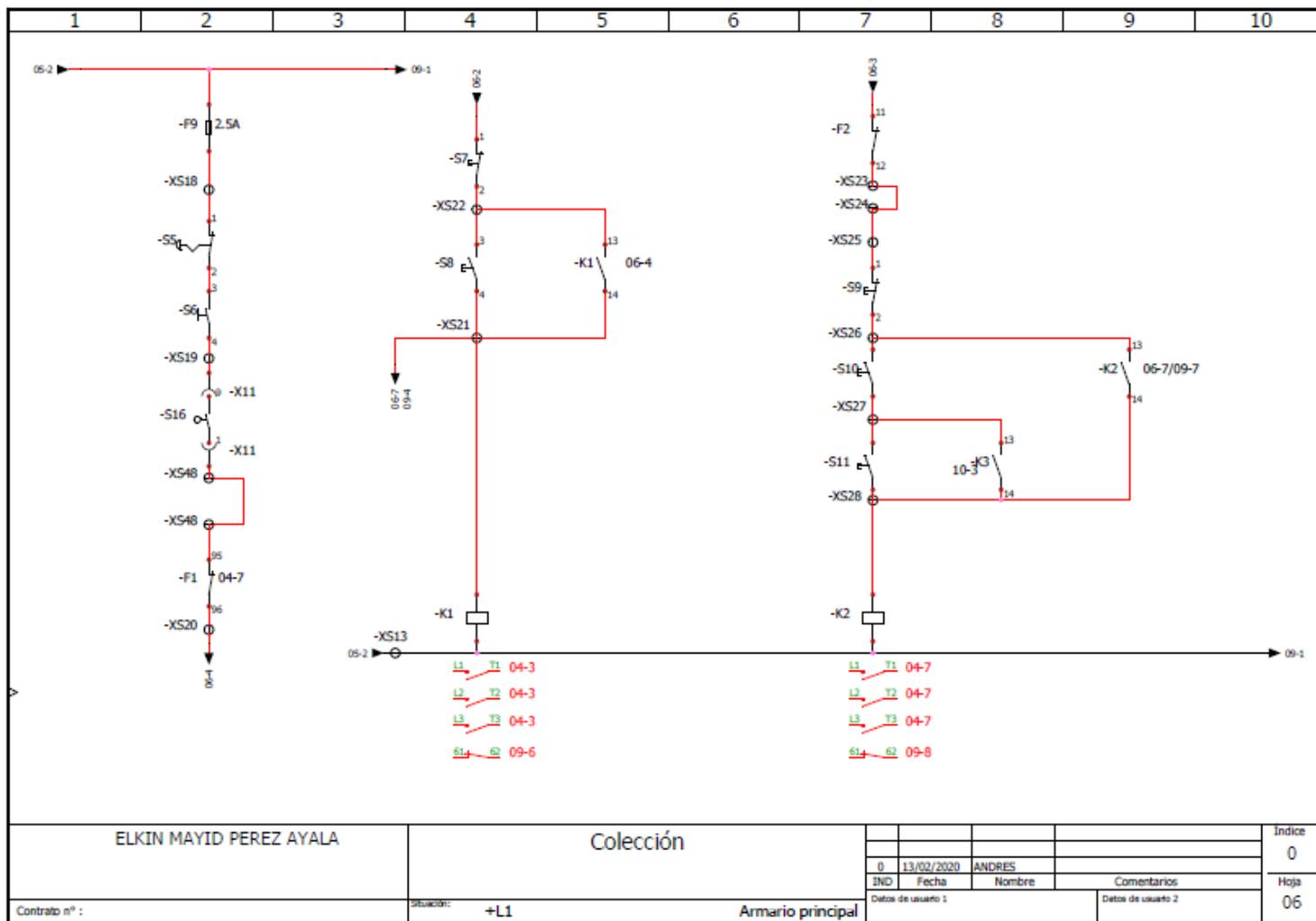


Ilustración 4-3. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 03.

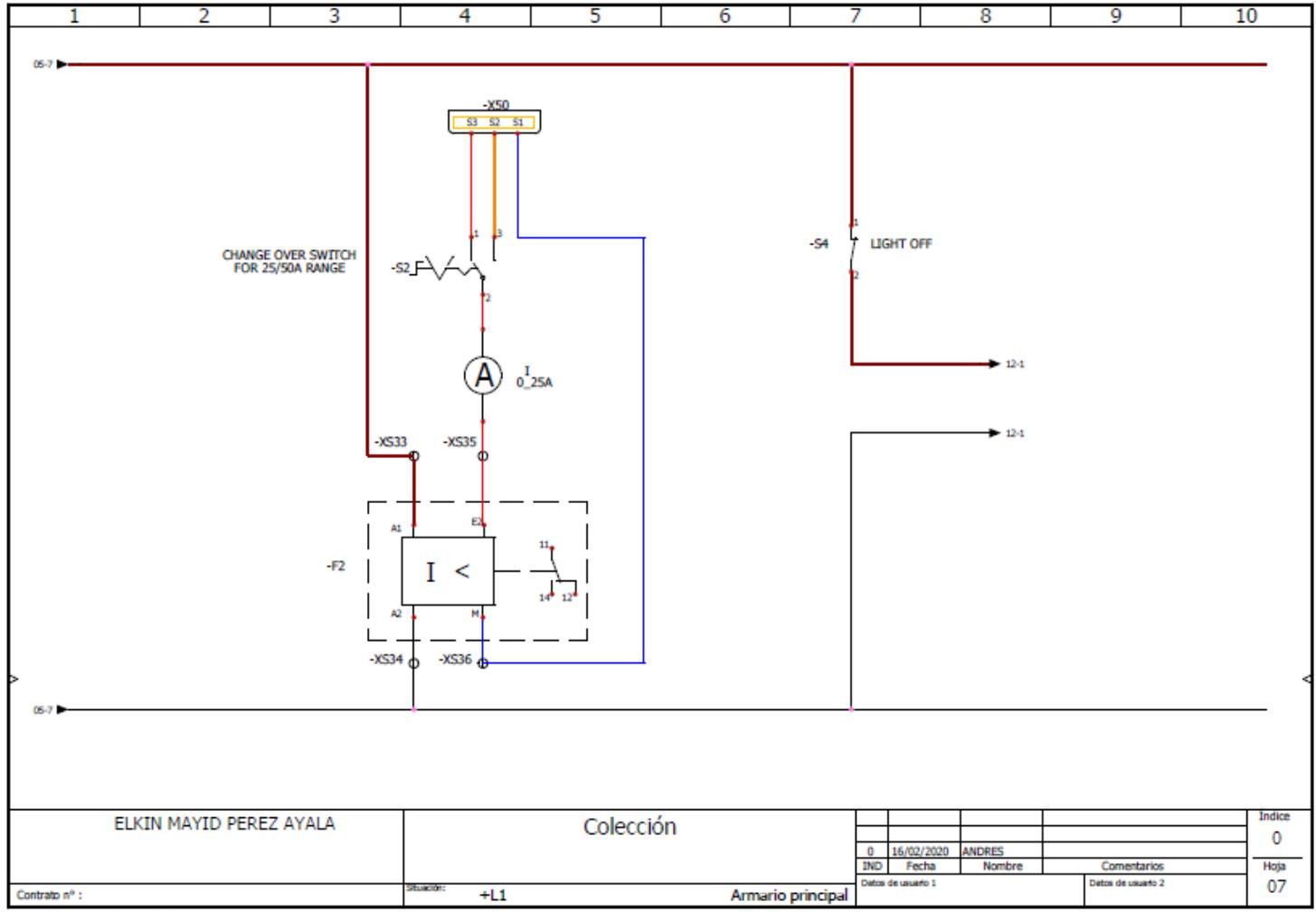


Ilustración 4-4. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 04.

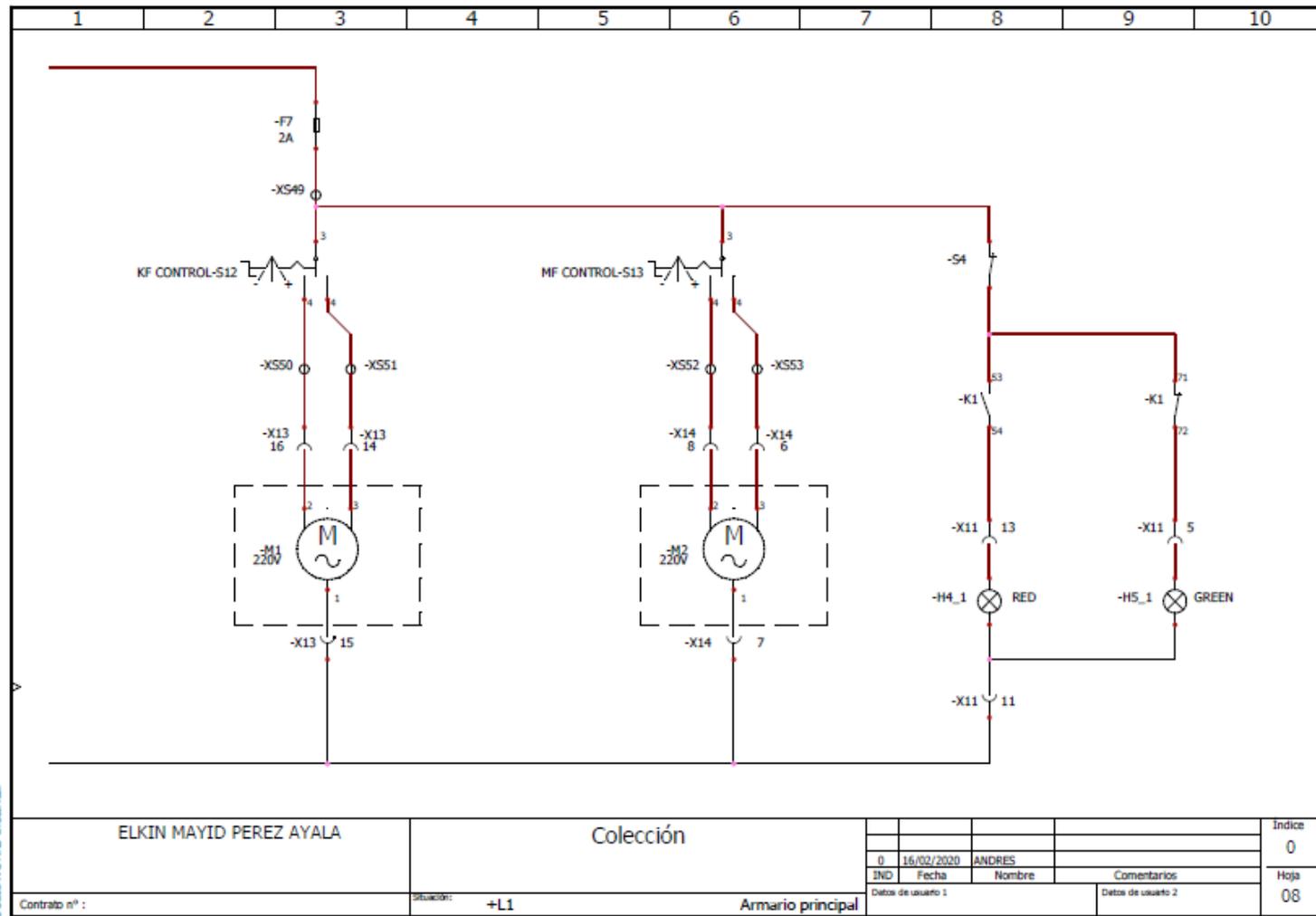


Ilustración 4-5. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 05.

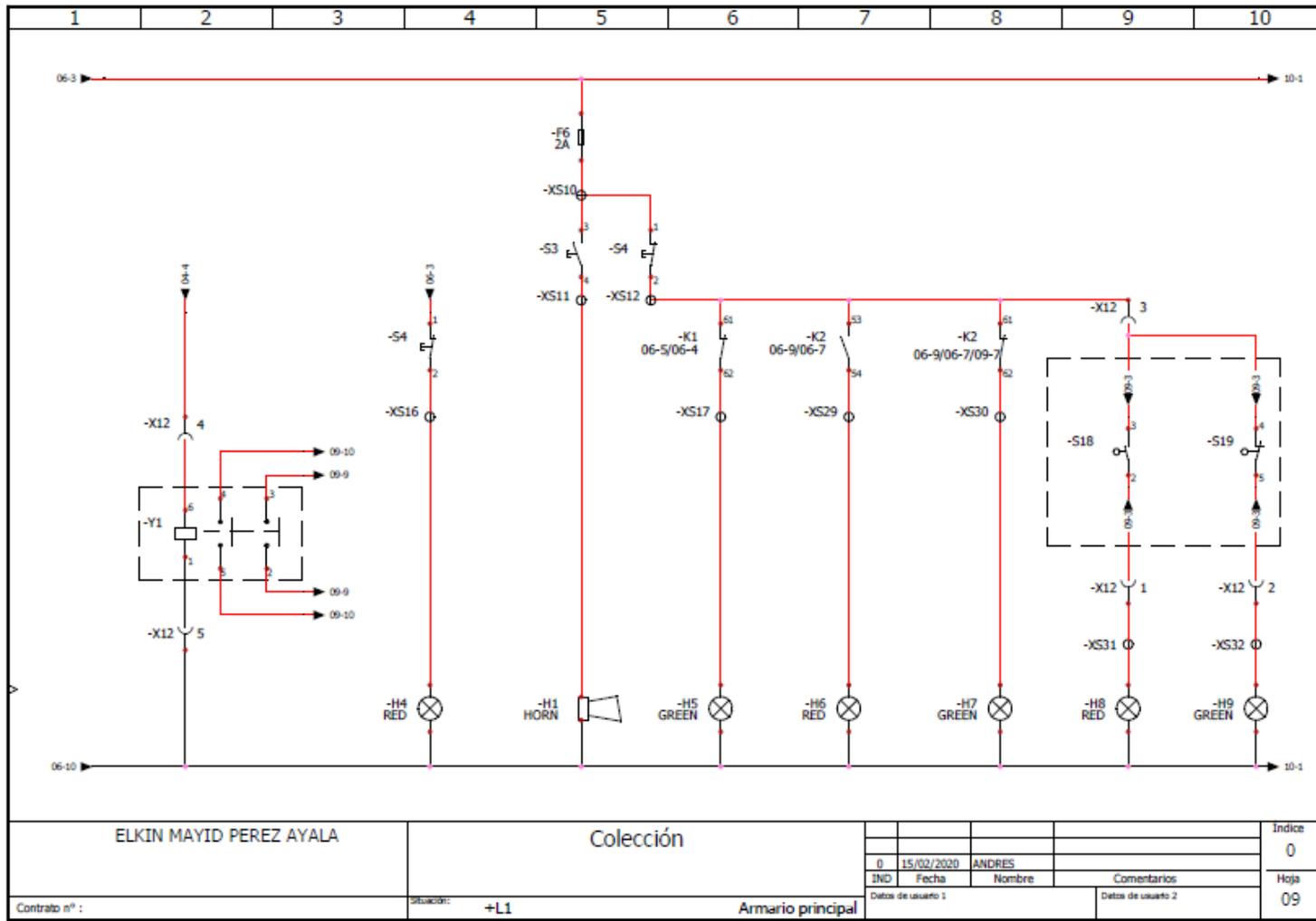


Ilustración 4-6. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 06.

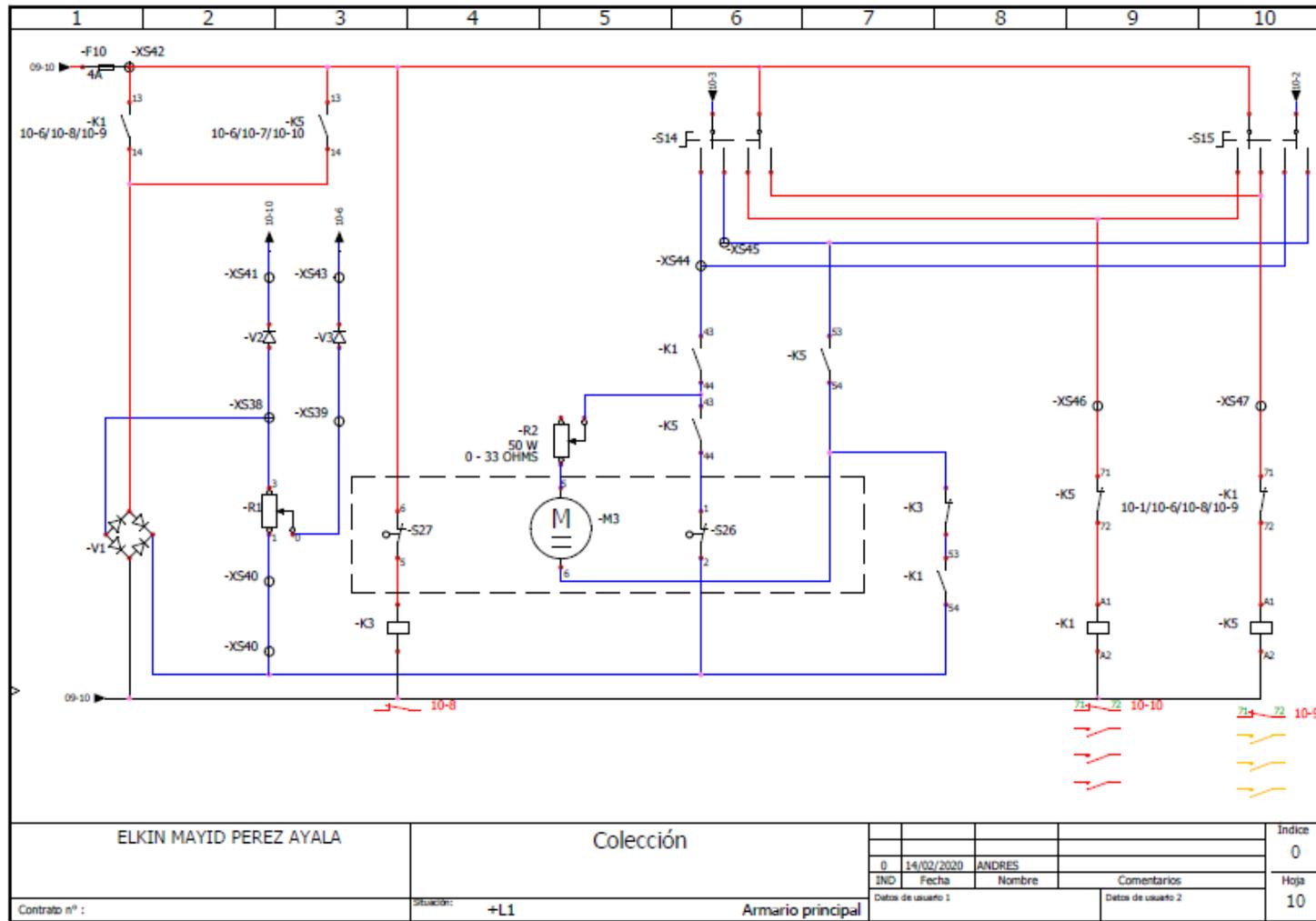


Ilustración 4-7. Diseño de consola de control - Sinóptico de cableado - Parte 07.

4.2.2 Esquema eléctrico

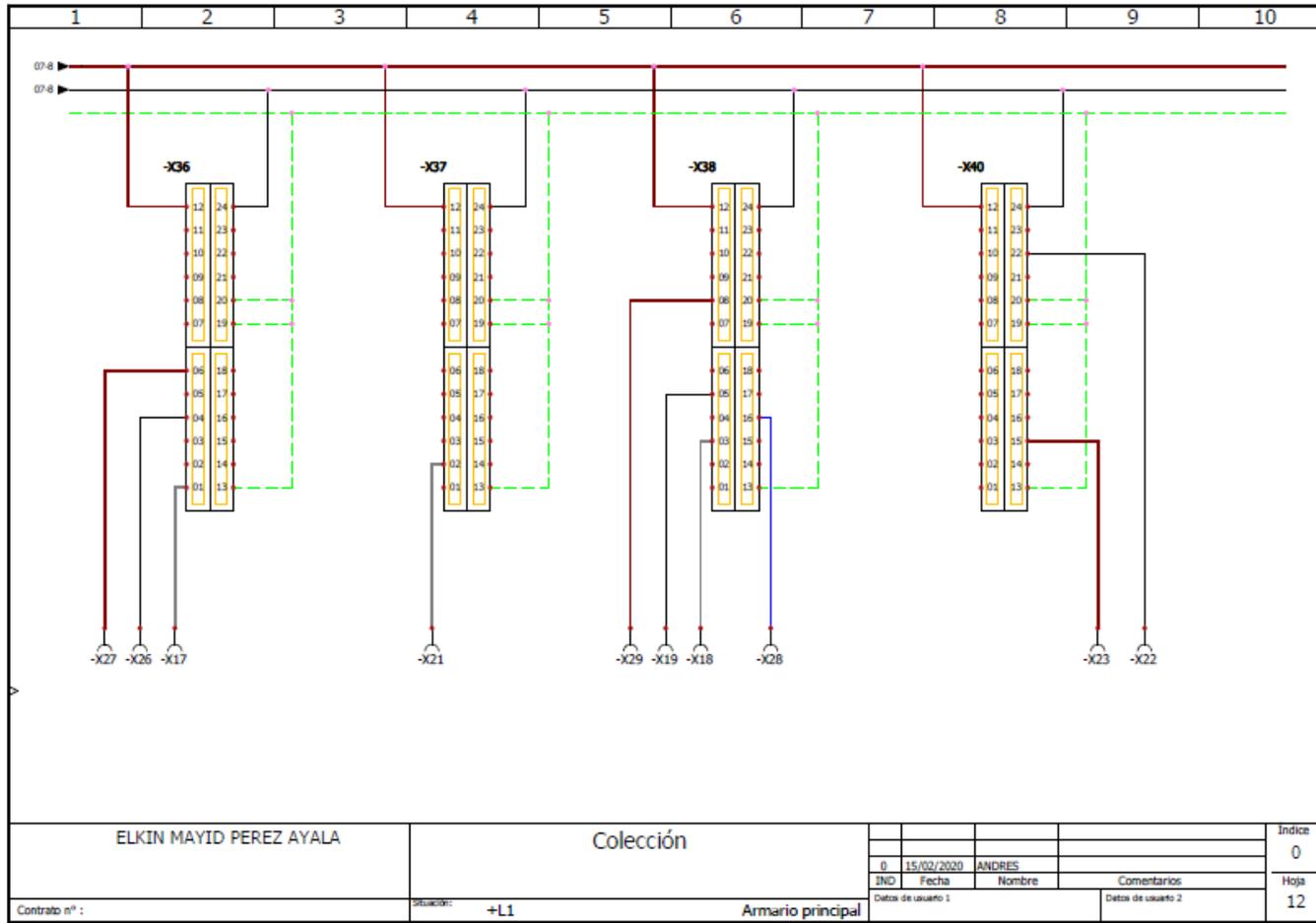


Ilustración 4-8. Diseño de consola de control - Esquema eléctrico.

4.3 Especificaciones técnicas

4.3.1 Generalidades

Se ensambló el esquema de operación elegido en la actividad tres del informe parcial de avance, correspondiente a una operación combinada seleccionable monofásica o trifásica.



Ilustración 4-9. Construcción de la fuente motorizada variable.

Para el montaje del suministro motorizado de tensión se realizó la construcción de una fuente motorizada variable que son equipos con variacs de 5 kVA. La fuente suministra una potencia de 30kVA (por eso, se utilizan 6 variacs de 5 kVA) y se puede utilizar como fuente monofásica o fuente trifásica.

El ensamble final se logró luego de 4 procesos de ensayo y error los cuales abarcaron un periodo de 12 meses. Se destaca que cada fase de la operación trifásica se ha dispuesto mediante dos variacs compensados mediante dos bobinas de choque, ubicados al mismo nivel, correspondiente a 10 kVA/fase, 40A/fase, 0-250 V.



Ilustración 4-10. Bobinas de choque utilizadas.

Para el caso de la operación monofásica todos los seis variacs dispuestos en paralelo son compensados mediante seis bobinas de choque, permitiendo obtener, 30 kVA, 120A, 0-250V.

Cada variac cuenta con 250 espiras dispuestas en un arco de 290° aprox. para una tensión de 1 V por espira. Para la motorización del anterior suministro de tensión reconfigurable, se seleccionó y utilizó un motor dc de 15 vatios con reductor de velocidad (24 V a 625 mA) el cual mediante un arreglo de poleas acciona con velocidad uniforme el contacto móvil (cursor de escobillas) sobre las espiras del juego de variacs. De esta forma se obtiene una velocidad variable, tanto al ascenso como el descenso en la tensión de salida (recorrido de las espiras), alcanzando un tiempo mínimo de recorrido de 30 segundos (mayor velocidad) y un tiempo máximo de recorrido de 360 segundos (menor velocidad) de todas las espiras.

Se ensayaron dos alternativas para controlar la velocidad de giro del motor: control de tensión mediante resistencia de campo y control PWM mediante un sistema de desarrollo Arduino, ambas con funcionamiento satisfactorio. Se seleccionó la primera de ellas. El motor es accionado mediante un control de tensión (resistencia variable) a 24 vdc el cual permite variar la velocidad e invertir el sentido de giro mediante pulsadores para ascenso y descenso.

Se probó el prototipo desarrollado, tanto en vacío como a plena carga, en configuración monofásica y en configuración trifásica (ver video 1). Finalmente se verificó el comportamiento sinusoidal de la forma de onda de la tensión entregada por el prototipo observándose, como se esperaba, ausencia de distorsión para cargas resistivas.

4.3.2 Características generales

Tabla 4-1. Características generales del suministro motorizado de tensión

Peso:	120 kg
Dimensiones (Ancho, largo y alto):	50X30X70 cm
Tensión de alimentación:	220 VAC
Tensión de salida:	0-250 VAC

4.3.3 Impacto

No se tiene conocimiento del ensamble de un suministro de tensión variable motorizado y reconfigurable de manufactura nacional y menos aún de haberse desarrollado por una institución de educación superior. Tampoco se ha hecho el ejercicio de valorar los costos de mano de obra calificada, de “know how”, ni de investigación y desarrollo.

Académicamente el suministro desarrollado tiene diversas aplicaciones en equipos de potencia eléctrica. En este caso se concibió como un desarrollo que hace parte de un pupitre de control de un generador de alta tensión. El cual se emplea como suministro de potencia de los transformadores de ensayo de alta tensión.

Comercialmente estos pupitres de control se consiguen en precios que fluctúan en función de la potencia suministrada. Se sabe de un fabricante/proveedor europeo con costos cercanos a los sesenta millones de pesos para pupitres de control de la quinta parte de la potencia disponible en el prototipo desarrollado.

4.5 Consola de control – Entrada de alimentación

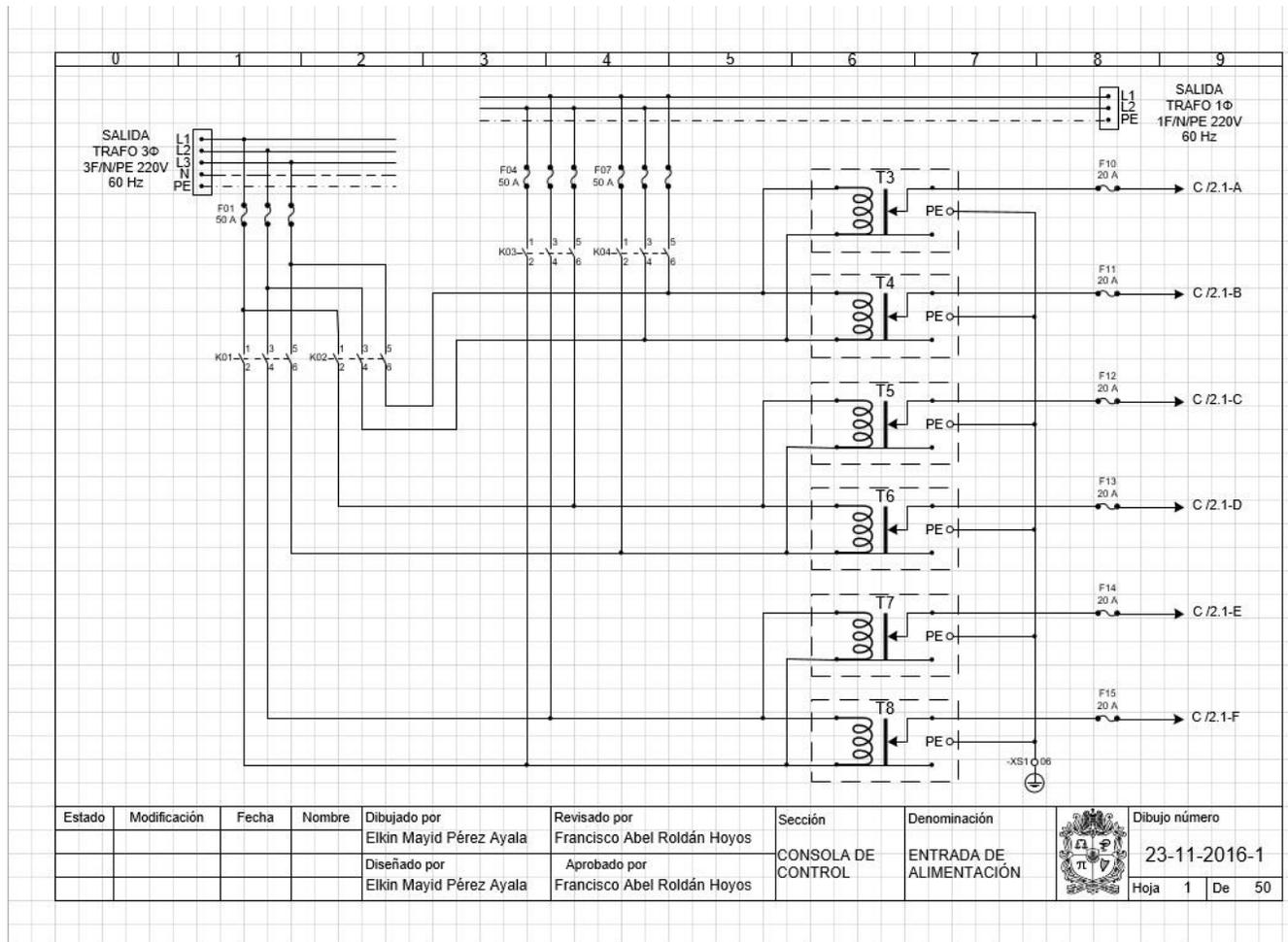


Ilustración 4-12. Consola de control - Entrada de alimentación.

4.6 Consola de control – Conexión de chokes

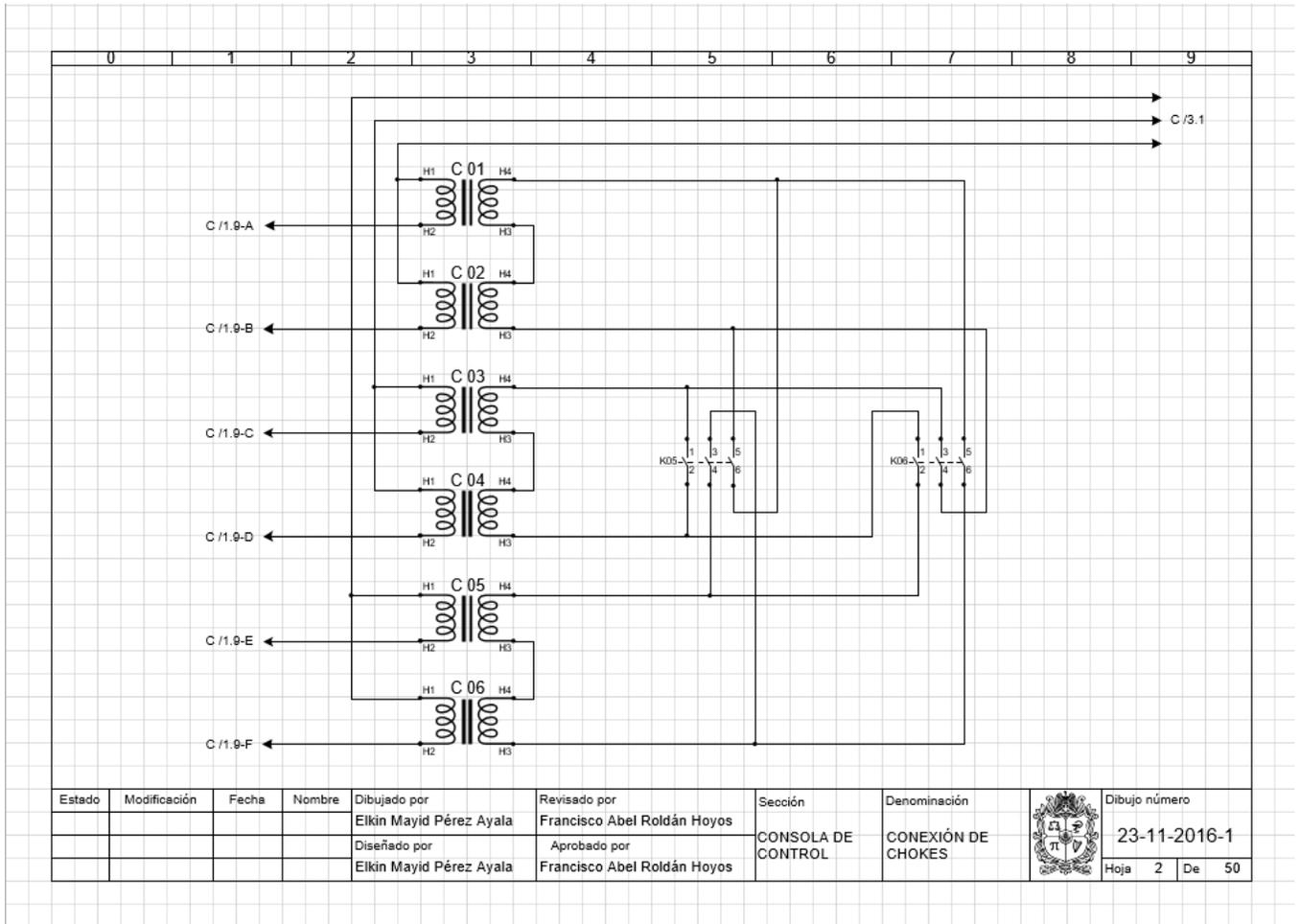


Ilustración 4-12. Consola de control - Conexión de chokes

5. Capítulo V - Conclusiones

- Se alcanzaron todos los objetivos del proyecto con un presupuesto reducido y con los equipos disponibles en el laboratorio de electricidad y electrónica, a saber: Dimensionar y/o diseñar el suministro motorizado de tensión para un generador de alta tensión especificando cada uno de sus componentes. Adquirir, construir y/o desarrollar cada uno de los componentes o dispositivos requeridos, tanto mecánicos como eléctricos, para el suministro motorizado de tensión. Ensamblar el suministro de tensión variable propuesto. Observar y probar el desempeño del suministro motorizado de tensión variable.
- Se dificultó el trabajo en el semillero debido a la falta de permanencia de los estudiantes de pregrado en el transcurso del proyecto.
- El diseño del prototipo desarrollado con variacs toroidales similares refrigerados por aire puede ser extendido a mayores potencias.
- El control de velocidad implementado permite obtener tasas de tensión de medio voltio por segundo hasta siete y medio voltios por segundo, rango de valores empleado en el suministro de tensión de los transformadores de ensayo de laboratorio.
- La forma de onda de la tensión no se deforma con el uso de los variacs empleados, indicando con ello que el núcleo magnético de los mismos no presentó saturación, lo cual es deseable para la aplicación propuesta.

6. Bibliografía

- [1] J. Rodríguez, «ENSAYOS EN ALTA TENSIÓN,» Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Bogotá DC., 2012.
- [2] IEC, 60060-1, «High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements,» International Standard IEC 60060-1. Septiembre, 1989.
- [3] M. S. Naidu y V. Kamaraju, «High Voltage Engineering,» Second Edition. McGraw-Hill, 1996. – ISBN 0-07-462286-2, 1996.
- [4] D. Kind y K. Feser, «High Voltage Test Techniques,» Second Edition. Newnes, 2001. – ISBN 0 7506 5183 0, 2001.
- [5] Textos científicos, «Generación de Impulsos de Alta Tensión,» Física universitaria, 2014. [En línea]. Available: <http://www.textoscientificos.com/fisica/alta-tension/generacion-impulsos>. [Último acceso: 17 Diciembre 2020].
- [6] A. Rodewald y K. Feser, «The generation of lightning and switching impulse voltages in the UHV region with an improved Marx circuit,» IEEE transactions on POWER APPARATUS AND SYSTEMS Vol. 93, 1974, p. 414{417, 1974.
- [7] F. R. Campos, R. Melo, C. Ponce y N. Triviño, Ingeniería e investigación Vol. 3, 1985, p. 33{42 xiii), 1985.
- [8] M. A. Saboy Gabiña, «High Voltage Laboratory: simulation, adjustment and test on electrical insulators,» Universidad de Porto, Tesis de Maestría, Porto, 2009.
- [9] S. P. Gómez, M. Buitrago y F. A. Roldan, «Simulador de impulsos de tensión normalizados / Presentado en X Congreso Latinoamericano y VII Iberoamericano en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico,» Informe de Investigación xiii, 2005.
- [10] A. Campos y J. H. Morales, «Diseño y construcción de un generador de impulsos de corriente,» Universidad Nacional de Colombia. Tesis de Pregrado, Bogotá DC., 2001.
- [11] A. Guevara, «Diseño y construcción de un equipo para revisión de descargadores de media tensión en campo a 45 kV,» Universidad Nacional de Colombia. Tesis de Pregrado, Bogotá DC., 2001.

- [12] T. Prado y D. F. García, Universidad del Valle - Trabajo técnico, Cali, Valle del Cauca, 2008.
- [13] J. P. Alvarez, Universidad Industrial de Santander, Tesis de Pregrado, Bucaramanga, 2011.
- [14] H. E. Ortiz, «Diseño y construcción de un generador de impulsos de tensión.,» Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Tesis de Pregrado, Bogotá DC., 2007.
- [15] CIDET, «Laboratorio Nacional del Sector Eléctrico LATTCA-1500 MVA,» CIDET - Colombia, 2015. [En línea]. Available: <http://redclustercolombia.com/assets/multimedia/>. [Último acceso: 30 Noviembre 2020].
- [16] V. Cediél, «Diagnóstico del Generador de Impulsos de la Empresa C.A.I.V.E.T,» Univerisdad Simón Bolívar., Barranquilla, 2006.
- [17] M. Aguet y M. Ianoz, «HAUTE TENSION VOLUME XXII,» Traité D'Électricité, París, Francia, 1999.
- [18] 60060-1:2010, IEC, «High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements,» 2010.
- [19] ASTM, «Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials Using Impulse Waves,» Standard ASTM International, 2004.
- [20] GIPUD, «Manual de Instrucciones Para el Tablero de control AT 220-5,» Universidad Distrital Francisco de Paula Santander, Bogotá DC., 2012.
- [21] TERCO, «HV 9000 High Voltage Modular Training Set. 1,» 2011.
- [22] INDUCOR, «Diagnosis, Monitoring, Quality Control, Reasearch,» Electrical Testing Group. INDUCOR Ingeniería, 2012.
- [23] T. Cadavid y M. Martínez, «Diseño y construcción de un divisor de tensión capacitivo amortiguado de 300 kV,» Universidad del Valle, Cali, Valle del Cauca, 2006.
- [24] HAEFELY, «HIGH VOLTAGE CONSTRUCTION KIT. 105.10. Lehen,attstrasse 353 P.O. Box CH-4028 Basel Switzerland,» Haefely Test AG High Volatge Test Division. May, 2011.

- [25] TERCO, «High Voltage Training SET HV9000,» Estocolmo, 2019.
- [26] O. Mejía, «Propuesta para la Adecuación de la Infraestructura del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander,» Universidad Industrial de Santander - UIS. Tesis de Pregrado, Bucaramanga, Santander, 2009.
- [27] W. Hauschild, High-voltage test and measuring techniques (Vol. 1), Heidelberg, Alemania: Springer, 2014.
- [28] D. Kind, An Introduction to High-Voltage Experimental Technique, Vieweg: Braunschweig, 1978.
- [29] W. B. Hauschild, Computer-aided impulse-voltage testing. IEEE transactions on electrical insulation, 26(3), 344-348, Heidelberg, Alemania: Springer, 1991.
- [30] D. Kind, The Half-Period Rectifier Circuit. In An Introduction to High-Voltage Experimental Technique (pp. 17-18), Braunschweig, Deutschland: Vieweg, 1978.
- [31] M. Aguet y M. Ianoz, Haute Tension Volume XXII, París, Francia: Traité D'Électricité., 1990.
- [32] IEEE, Techniques for High Voltage Testing, Power Systems Instrumentation measurements. IEEE Standard., IEEE Standard., 1995.
- [33] International Electrotechnical Commission, IEC 60060-1. High voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements, IEC Standard, 2010.
- [34] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials Using Impulse Waves, Standard ASTM International, 2004.
- [35] F. H. Kreuger, Industrial High Voltage, vol. 3, Delf, Netherlands: Delft University Press., 1991.
- [36] J. J. Torok y W. Ramberg, Impulse Flashover of Insulators, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. DOI:10.1109/T-AIEE.1929.5055205Corpus ID: 51636462, 1929.
- [37] J. D. Juárez Cervantes, Sistemas de distribución de energía eléctrica, Azcapotzalco: Universidad Autónoma Metropolitana, 1995.
- [38] D. K. Dipl.-Ing Raoul D. Karkenthal, Automates test systems for distribution transformers - Part I, Transformers Magazine | Volume 3, Issue 1, 94-99, 2016.

- [39] IEC 60076-1, Power Transformers - Part 1: General, Second edition., 2000.
- [40] Chauvin Arnoux Group, «Guía de la medición de aislamiento,» Chauvin Arnoux - Megaohmetros 50V a 5000VDC, 2010. [En línea]. Available: https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/documents/cat_guia_de_medicion_de_aislamiento.pdf. [Último acceso: 27 Enero 2021].
- [41] WSTS, «HV kit General Catalogue,» WSTS - General Catalogue - 562157, Bangalore, India , 2000.
- [42] PowerHV, «Impulse Voltage Test System,» PowerHV Edition Publication, Yangzhou, China., 2000.
- [43] Haefely, «High Voltage Construction Kit,» Basilea, Suiza, 2000.
- [44] Haefely, «Kit 4.0 High Voltage Construction Kit,» Basilea, Suiza, 2001.
- [45] HighVolt, «4.0/4 High Voltage Module Test System,» Dresden, Alemania., 2012.
- [46] HighVolt, «12.10/1 Operator Device HiCO Basic,» Dresden, 2014.
- [47] HighVolt, «12.11/3 PLC Firmware, Type iCOS Basic,» Dresden, Alemania, 2016.
- [48] STACO Energy Products Co, «Variable Transformers motorized "Quick-Step",» 04 2020. [En línea]. Available: http://stevenengineering.com/Tech_Support/PDFs/41SDSER.pdf. [Último acceso: 26 Enero 2020].
- [49] Superior Electric, «<http://capturedlightning.com>. Retrieved from Paralleling 1256D Variacs,» Capture Lightning, 04 2020. [En línea]. Available: <http://capturedlightning.com/photos/P-Chokes/parallel.html>. [Último acceso: 19 02 2020].
- [50] D. Kind, An Introduction to High-Voltage Experimental Technique. Textbook for Electrical Engineers. 1. cd. -, Braunschweig: Vieweg: CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek. ISBN 978-3-528-08383-0 ISBN 978-3-322-91763-8 (eBook). DOI 10.1007/978-3-322-91763-8, 1978.

7. Anexos

A. Informe de avance del proyecto de investigación

Vicerrectoría de Investigación



INFORME AVANCE DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Código del proyecto	28642
Nombre del proyecto	Suministro motorizado de tensión variable para un pupitre de control de un generador de alta tensión.
Investigador principal	FRANCISCO ABEL ROLDAN HOYOS
Sede	Manizales
Facultad	Decanatura Facultad de Ingeniería y Arquitectura Manizales
Departamento	Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación Manizales
Fecha del informe	23/01/2018
Código informe	18825
Periodo del informe	Desde 2/03/2015 Hasta 18/12/2015
Porcentaje de ejecución	30%
Calificación	Sin calificación

INFORMACIÓN GENERAL

<p>Avances de actividades</p> <p>Esquemáticamente un generador de alta tensión se compone de tres secciones: comando y control, generación de alta tensión y medida. Un componente relevante de la sección de comando y control es el correspondiente a la producción de la tensión variable, la cual alimenta los componentes de generación de alta tensión.</p> <p>Algunos tipos de producción de la tensión variable se efectúan mediante el empleo de varias clases de transformadores entre los que se encuentra el autotransformador variable o variac. El variac permite regular la rampa de suministro de tensión de un modo suave y sin sobresaltos mediante el acople de un mecanismo motorizado; el que a diferencia de los suministros de tensión controlados manualmente, no presenta variaciones escalonadas y/o abruptas que puedan afectar tanto los componentes de alta tensión del generador, como los equipos bajo prueba.</p> <p>Entre los mecanismos motorizados acoplados al variac se encuentran mecanismos que emplean motores síncronos de corriente alterna, motores paso a paso o motores de corriente directa. El control de estos mecanismos puede efectuarse mediante dispositivos electrónicos o analógicos, siendo estos últimos de una menor complejidad aparente.</p> <p>Actividades Iniciales:</p>

<p>1. Se efectuó consulta de bibliografía básica en máquinas eléctricas existente en biblioteca, sobre los tipos de motores eléctricos que mejor se adaptan a la operación y control proyectada para bajas velocidades (menores que 10 rpm), considerándose motores DC y motores síncronos.</p> <p>2. Se adquirieron (de cuenta propia del responsable del proyecto), un motor dc de 15 vatios con reductor de velocidad (24 V a 625 mA) y un motor síncrono de 48 vatios (120 V a 0.4 A), ambos de segunda mano y de potencia fraccionaria. Se probó su funcionamiento exitoso en vacío en ambos casos.</p> <p>3. Se proyectaron tres esquemas de operación posibles de los sets variacs ya existentes en el Laboratorio de Electricidad y Electrónica, contemplando su operación motorizada así: todos en conexión monofásica, por pares para operación trifásica y la finalmente seleccionada correspondiente a una operación combinada seleccionable, bien sea monofásica o trifásica (Ver foto 1 Conexión de variacs).</p> <p>Se consideraron 6 variacs de iguales especificaciones nominales correspondientes a potencia de 5 kVA, tensión 220:0-250 V, corriente 20 A, para una potencia total de 30 kVA. El esquema propuesto puede aun ser aplicado para acoplar variacs de mayor potencia.</p> <p>Componentes eléctricos considerados:</p> <p>Sets (6) variacs (autotransformadores variables)</p> <p>Un (1) motor DC con reductor de velocidad</p> <p>Sets (6) toroides en acero al silicio de 500 VA c/u, CON PRESUPUESTO DEL PROYECTO.</p> <p>Setenta (70) metros de cable 10 AWG THWN.</p> <p>Aprox. treinta (30) terminales de ojo para cable calibre 10.</p> <p>Dos finales de carrera.</p> <p>Un (1) rele con bobina a 24 Vdc.</p> <p>Dos (2) pulsadores.</p> <p>Cinco (5) metros de cable 18 AWG para control.</p> <p>Sets (6) rollos Scott 33 (cinta aislante)</p> <p>Componentes mecánicos considerados:</p> <p>Sets (6) platinas de hierro (bases soporte de variacs)</p> <p>Diez (10) varillas roscadas 1m x 7/16"</p> <p>Dos (2) metros de ángulo 3/4" para apoyo de bases.</p> <p>Cuatro (4) metros de tubo de aluminio de 1/2"</p> <p>Ochenta (80) tuercas 7/16 con sus arandelas</p> <p>Dos (2) chumaceras pedestal 5/8"</p> <p>Dos (2) varillas Isas de hierro 5/8" x 1.5 m</p> <p>Cuatro (4) poleas así: 9 a 1 (1), 6 a 1 (2) y 2 a 1 (1)</p>
<p>Dos (2) correas lisas de transmisión: 138 y 439</p> <p>Una (1) bolsa de 100 unidades de amarras plásticas</p> <p>Desarrollo y construcción de choques de corriente.</p> <p>Se emplean para conexión paralelo de los variac. Se construyen a partir de dos bobinado independientes de 10 vueltas c/u con cable 10 AWG, hecho manualmente, alrededor de c/u de los sets (6) toroides; ambos (toroides y cables) contemplados en los componentes eléctricos (Ver fotos 2 a 11 Construcción bobinas de choque).</p>
<p>Resultados</p> <p>Para el desarrollo de las primeras cinco (5) actividades se estimaron tres meses en el cronograma. En la práctica las mismas actividades tomaron nueve y medio meses.</p> <p>Las dos últimas actividades del cronograma, son objeto del informe final.</p>
<p>Dificultades</p> <ul style="list-style-type: none"> - Indisponibilidad de recursos de la DIMA durante el primer semestre de 2015. - Estudiantes del semillero del primer semestre no continuaron en el semillero para el segundo semestre de 2015. - Demora en el ingreso del informe por desconocimiento del formato del HERMES, al ser la primera vez en el uso de esta plataforma.

ARCHIVOS ADJUNTOS	
Nombre del archivo	Fecha de entrega
Foto 2.jpg	23/01/2018
Foto 3.jpg	23/01/2018
Foto 4.jpg	23/01/2018
Foto 5.jpg	23/01/2018
Foto 6.jpg	23/01/2018
Foto 7.jpg	23/01/2018
Foto 8.jpg	23/01/2018
Foto 9.jpg	23/01/2018
Foto 10.jpg	23/01/2018
Foto 11.jpg	23/01/2018
Foto 1. Conexión de variacs.png	23/01/2018

B. Informe final del proyecto de investigación

INFORME FINAL DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	
Código del proyecto	28642
Nombre del proyecto	Suministro motorizado de tensión variable para un pupitre de control de un generador de alta tensión.
Investigador principal	FRANCISCO ABEL ROLDAN HOYOS
Sede	Manizales
Facultad	Decanatura Facultad de Ingeniería y Arquitectura Manizales
Departamento	Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación Manizales
Calificación	Sin calificación
Fecha del informe	30/01/2019
Código informe	21759
Periodo del informe	Desde 2/03/2015 Hasta 30/01/2019
Porcentaje de ejecución técnica	100%
Porcentaje de ejecución presupuestal	22%
Fecha del informe	30/01/2019
Código informe	21759

INFORMACIÓN GENERAL
Sinopsis divulgativa
No aplica por tratarse de un producto tecnológico.
Resumen técnico
<p>Se ensambló el esquema de operación elegido en la actividad tres del informe parcial de avance, correspondiente a una operación combinada seleccionable monofásica o trifásica (ver fotos 12 a 107).</p> <p>El ensamble final se logró luego de 4 procesos de ensayo y error los cuales abarcaron un periodo de 12 meses.</p> <p>Se destaca que cada fase de la operación trifásica se ha dispuesto mediante dos variacs compensados mediante dos bobinas de choque, ubicados al mismo nivel, correspondiente a 10 kVA/fase, 40A/fase, 0-250 V (ver fotos 1 y 89). Para el caso de la operación monofásica todos los seis variacs dispuestos en paralelo son compensados mediante seis bobinas de choque, permitiendo obtener, 30 kVA, 120A, 0-250V.</p> <p>Cada variac cuenta con 250 espiras dispuestas en un arco de 290 aprox. para una tensión de 1 V por espira (ver Foto 23).</p> <p>Para la motorización del anterior suministro de tensión reconfigurable, se seleccionó y utilizó un motor dc de 15 vatios</p>

INFORMACIÓN GENERAL
<p>con reductor de velocidad (24 V a 625 mA) el cual mediante un arreglo de poleas acciona con velocidad uniforme el contacto móvil (cursor de escobillas) sobre las espiras del juego de variacs. De esta forma se obtiene una velocidad variable, tanto al ascenso como el descenso en la tensión de salida (recorrido de las espiras), alcanzando un tiempo mínimo de recorrido de 33 segundos (mayor velocidad) y un tiempo máximo de recorrido de 510 segundos (menor velocidad) de todas las espiras.</p> <p>Se ensayaron dos alternativas para controlar la velocidad de giro del motor: control de tensión mediante resistencia de campo y control PWM mediante un sistema de desarrollo Arduino, ambas con funcionamiento satisfactorio. Se seleccionó la primera de ellas.</p> <p>El motor es accionado mediante un control de tensión (resistencia variable) a 24 vdc el cual permite variar la velocidad e invertir el sentido de giro mediante pulsadores para ascenso y descenso.</p> <p>Se probó el prototipo desarrollado, tanto en vacío como a plena carga, en configuración monofásica y en configuración trifásica (ver video 1). Finalmente se verificó el comportamiento senoidal de la forma de onda de la tensión entregada por el prototipo observándose, como se esperaba, ausencia de distorsión para cargas resistivas (ver foto 108).</p> <p>Características generales: Peso: 120 kg Dimensiones (ancho, largo, alto): 50x30x70 cm. Tensión de alimentación: 220 VAC Tensión de salida: 0-250 VAC</p>

Impacto (Económico, Científico, Social, Académico)
<p>No se tiene conocimiento del ensamble de un suministro de tensión variable motorizado y reconfigurable de manufactura nacional y menos aún de haberse desarrollado por una institución de educación superior. Tampoco se ha hecho el ejercicio de valorar los costos de mano de obra calificada, de know how, ni de investigación y desarrollo. Académicamente el suministro desarrollado tiene diversas aplicaciones en equipos de potencia eléctrica. En este caso se concibió como un desarrollo que hace parte de un pupitre de control de un generador de alta tensión. El cual se emplea como suministro de potencia de los transformadores de ensayo de alta tensión. Comercialmente estos pupitres de control se consiguen en precios que fluctúan en función de la potencia suministrada. Se sabe de un fabricante/proveedor europeo con costos cercanos a los sesenta millones de pesos para pupitres de control de la quinta parte de la potencia disponible en el prototipo desarrollado.</p>
Conclusiones
<p>Se alcanzaron todos los objetivos del proyecto con un presupuesto reducido y con los equipos disponibles en el laboratorio de electricidad y electrónica, a saber:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Dimensionar y/o diseñar el suministro motorizado de tensión para un generador de alta tensión especificando cada uno de sus componentes. -Adquirir, construir y/o desarrollar cada uno de los componentes o dispositivos requeridos, tanto mecánicos como

INFORMACIÓN GENERAL				
<p>eléctricos, para el suministro motorizado de tensión. -Ensamblar el suministro de tensión variable propuesto. -Observar y probar el desempeño del suministro motorizado de tensión variable. Se dificultó el trabajo en el semillero debido a la falta de permanencia de los estudiantes de pregrado en el transcurso del proyecto. El diseño del prototipo desarrollado con variacs toroidales similares refrigerados por aire puede ser extendido a mayores potencias. El control de velocidad implementado permite obtener ratas de tensión de medio voltio por segundo hasta siete y medio voltios por segundo, rango de valores empleado en el suministro de tensión de los transformadores de ensayo de laboratorio. La forma de onda de la tensión no se deforma con el uso de los variacs empleados, indicando con ello que el núcleo magnético de los mismos no presenta saturación, lo cual es deseable para la aplicación propuesta.</p>				
INFORMACIÓN RELACIONADA CON LA COMPRA DE EQUIPOS				
Placa	Descripción	Ubicación	Valor	
No existen equipos registrados.				
INFORMACIÓN RELACIONADA CON LA FORMACIÓN DE ESTUDIANTES				
Nombre estudiante			Programa	
Elkin Mayid Perez Ayala null null null			MAESTRÍA EN INGENIERÍA - INGENIERÍA ELÉCTRICA	
INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS PRODUCTOS ACADÉMICOS				
Objetivo	Tipo producto esperado	¿Entregado?	Tipo producto obtenido	Resultado Obtenido
Dimensionar y/o diseñar el suministro motorizado de tensión para un generador de alta tensión especificando cada uno de sus componentes.	Producto tecnológico	SI	Otro	Prototipo de suministro motorizado de tensión variable
Dimensionar y/o diseñar el suministro motorizado de tensión para un	Resultado adicional	SI	Estudiante en formación Maestra	Habilidades de laboratorio en manejo de equipos de alta

INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS PRODUCTOS ACADÉMICOS				
Objetivo	Tipo producto esperado	¿Entregado?	Tipo producto obtenido	Resultado Obtenido
generador de alta tension especificando cada uno de sus componentes.				tension

ARCHIVOS ADJUNTOS	
Nombre del archivo	Fecha de entrega
Foto 1.png	28/01/2019
Foto 2.jpg	28/01/2019
Foto 3.jpg	28/01/2019
Foto 4.jpg	28/01/2019
Foto 5.jpg	28/01/2019
Foto 6.jpg	28/01/2019
Foto 7.jpg	28/01/2019
Foto 8.jpg	28/01/2019
Foto 9.jpg	28/01/2019
Foto 10.jpg	28/01/2019
Foto 11.jpg	28/01/2019
Foto 12.jpg	28/01/2019
Foto 13.jpg	28/01/2019
Foto 14.jpg	28/01/2019
Foto 15.jpg	28/01/2019
Foto 16.jpg	28/01/2019
Foto 17.jpg	28/01/2019
Foto 18.jpg	28/01/2019
Foto 19.jpg	28/01/2019
Foto 20.jpg	28/01/2019
Foto 21.jpg	28/01/2019
Foto 22.jpg	28/01/2019

C. Cotización Toroide de acero al silicio de grano orientado con medidas: Externo – 124,5mm, interno 73,6mm.



DCR-GC-03 - 3605

Santiago de Cali, 28 de Septiembre de 2015

Señores:
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
 Elkin Pérez
 3152409848 - 8879490
elkinmayid@gmail.com
 Manizales

COTIZACIÓN

CANTIDAD	RELACION	ALTURA	TOLERANCIA	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
6	TOROIDE DE ACERO AL SILICIO DE GRANO ORIENTADO MEDIDAS: Ø Externo 124,5mm Ø Interno 73,6mm	44,4mm	+/- 1	\$ 150,000	\$ 900,000
SUBTOTAL	\$ 900,000				
IVA 16%	\$ 144,000				
TOTAL	\$ 1,044,000				

NOTA:

ATEL SAS NO CUBRE FLETES, NI COSTOS DE ENVÍO. FELTE PAGO CONTRA-ENTREGA.
 TIEMPO DE ENTREGA: 8 DIAS HABLES, DESPUES DE RECIBIDA ORDEN DE COMPRA Y PAGO.
 FORMA DE PAGO: CONTADO.

ATEL SAS DA GARANTIA LOS EQUIPOS POR PERIODO DE 12 MESES A PARTIR DE SU COMPRA.
 NO SE OFRECERÁ GARANTIA POR:

- * Mala instalación.
- * Mal uso.
- * Daños presentados en la manipulación de la Carga.
- * Daños presentados en el Transporte.
- * No Garantía por Daños Civiles.

ATEL NO ASUME RESPONSABILIDAD CIVIL, BAJO NINGUNA CIRCUNSTANCIA

CONSIGNACIONES EN:

BANCOLOMBIA CTA CTE # 30071510501 A NOMBRE DE ATEL SAS NIT. 805.006.023-7

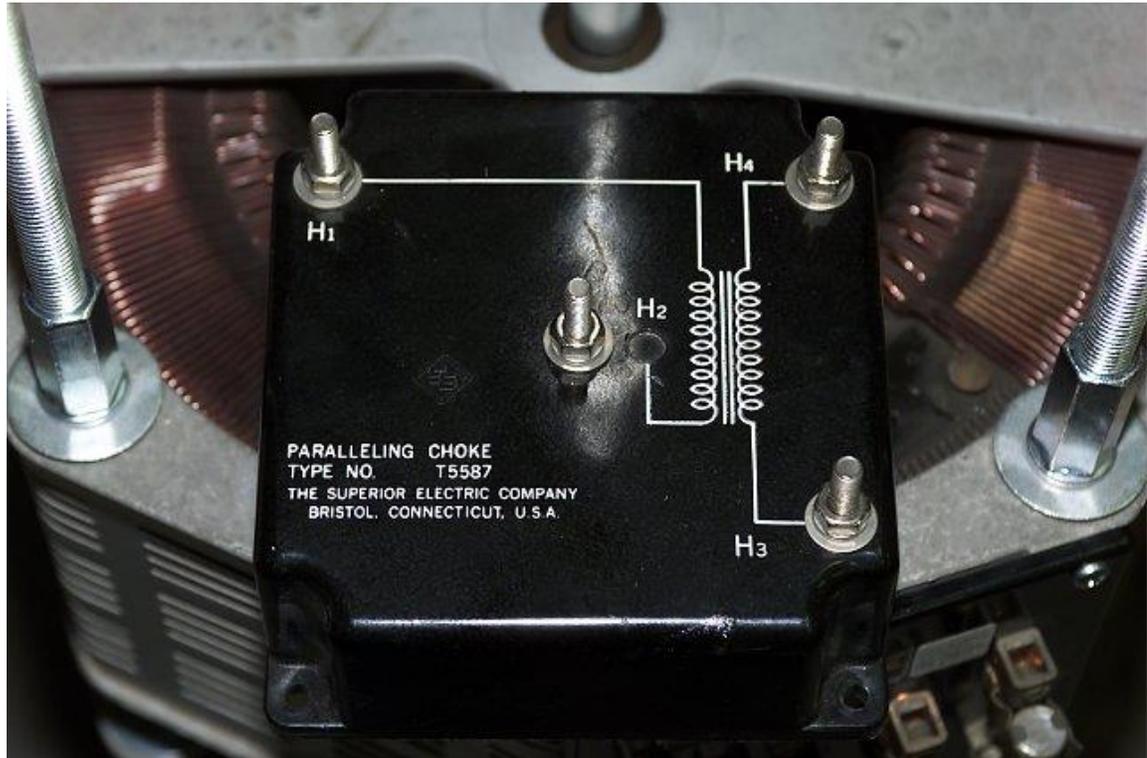
Cualquier información adicional con gusto les será suministrada.

NATALIA VÉLEZ QUINTERO.
 DEPARTAMENTO COMERCIAL

CARRERA 2N #98-14 BODEGA 10, CALIMA. TELS: (092) 8811024 – 8823313.
 TEL – FAX: (092) 8823313 CEL: 311 - 3726783
 E-MAIL: garancia@atel-tda.com
 SANTIAGO DE CALI, VALLE – COLOMBIA

D. Bobinas de choke



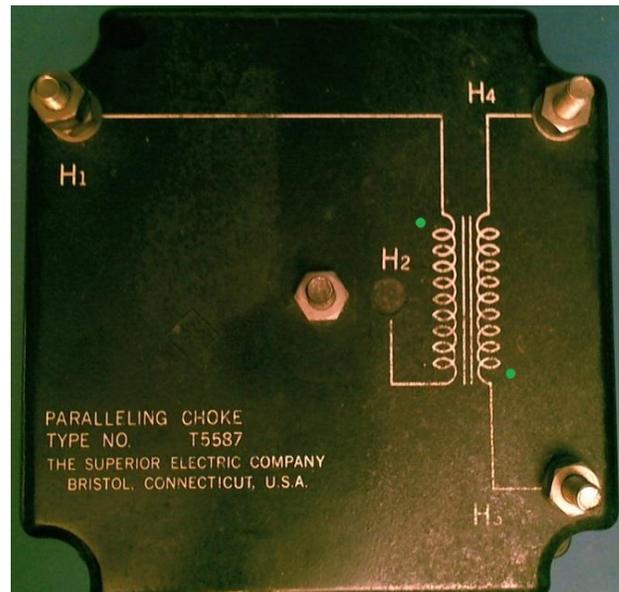


BOBINAS o “CHOKE” PARA CONEXIONES EN PARALELO

Los bobinados o choke paralelos (“paralleling choke”) son usados para conectar en paralelo, dos o más variacs típicamente cuando los requerimientos de corriente superan los 25 A. Ellos permiten equilibrar el flujo de corriente entre múltiples variacs.

Estos chokes típicamente están hechos sobre núcleos toroidales de ferrita de talla grande con dos bobinados sobre él, con alambre sólido de cobre # 8 o # 10 (con aislamiento THHN o similar de 105 ó más °C), bobinando 10 vueltas de alambre a través del hueco del núcleo del toroide en un sentido y nuevamente bobinando un segundo devanado en la misma dirección en el otro lado del núcleo con el otro alambre (omitimos cálculos).

Es decir, el anterior montaje pretende que cuando circule corriente por ambos bobinados cada uno produzca un flujo magnético opuesto al del otro, lo cual equilibra las tensiones de salida de cada uno de los variacs en paralelo y en consecuencia permite repartir uniformemente la corriente entre los mismos.



Número de Bobinas CHOKE a cotizar.

Opción 1 cuatro (4).

Opción 2 ocho (8).

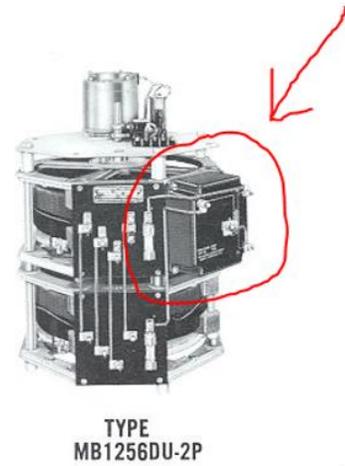
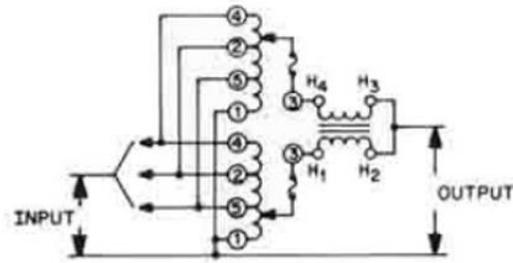
Dimensiones para un núcleo toroidal laminado (No de ferrita) de 500 VA como el anterior.

Diámetro interno (ID): 2.9" ó 7,366 cm.

Diámetro externo (OD): 4.9" ó 12,446 cm.

Altura (H): 1.75" ó 4,445 cm.

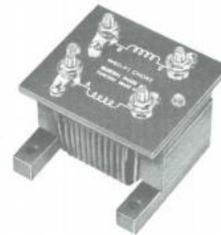
Sección transversal: 1.61" cuadradas ó 10,4 cm cuadrados.



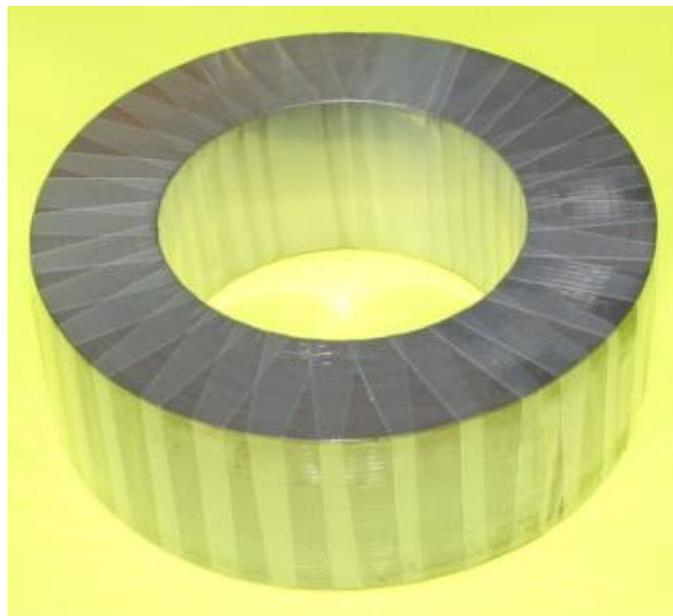
Conexiones del choke en los variacs en paralelo.

W50-P1 Parallelling Choke

Many of the Variac® autotransformers listed on the preceding pages are indicated to require one or more Type W50-P1 Chokes. This unit is used when two or more autotransformer outputs are to be connected in parallel; it prevents the flow of potentially damaging currents from one unit to the other. Instructions for proper interconnecting are included with each unit.



Description	Catalog Number
W50-P1 Choke	3150-5016



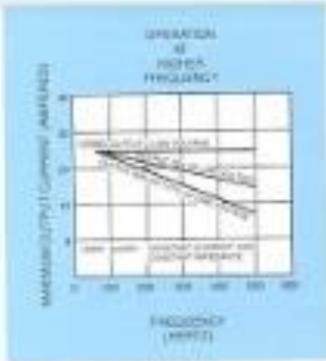


FIGURE A



TYPE 11560-21



TYPE M6121600-2P

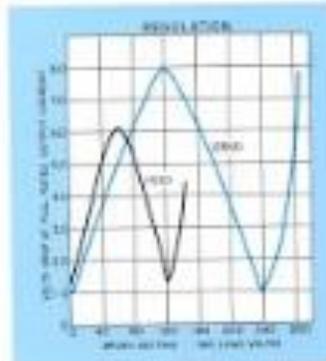


FIGURE B



12-GANG MOTOR GENERATOR ASSEMBLY

CONNECTIONS AND RATINGS

ASSEMBLY IDENTIFICATION	TYPE MOTOR GENERATOR	INPUT		OUTPUT				TERMINALS		
		VOLTS	HERTZ	VOLTS	CIRCUIT SUPPLY VOLTAGE		CIRCUIT SUPPLY VOLTAGE		TYPE	RATING
					200	400	200	400		
11560-21 11560-22 11560-23	M611560 M611560T M611560E	120	60-90	0-100	30	0.1	00	4.0	1-4	1-7
				0-140	30	1.0	—	—	2-0	1-0
				0-200	20	0.7	20	0.7	1-4	1-0
11560-24 11560-25 11560-26	M611560 M611560T M611560E	200	60-90	0-200	20	1.0	—	—	1-0	1-0
		120	60-90	0-200	20*	1.41	—	—	1-0	1-0



WIND TYPES AS NOTED TERMINAL 'S'

*Maximum output current in output voltage range up to 150 volts. At higher output voltages, output current must be reduced according to rating curve Figure B on page 7.
 †Maximum IFL of low-voltage output voltage. Maximum IFL of lower output voltages may be calculated from rating curve Figure B on page 7.
 ‡Even applied: 30 amperes on 11560 types, 30 amperes on 11560 types.

