



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

“Dimensionamiento de un sistema de pruebas de voltaje de impulso para transformadores de distribución y potencia de hasta 10 MVA, clase 69 kV y hasta 3 000 msnm, sumergidos en aceite”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magister en Electricidad
mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Autor:

Mgtr. Almache Flores Oscar Renato

Tutor:

MSc. Quinatoa Caiza Carlos Ivan

LATACUNGA – ECUADOR

2 023

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Dimensionamiento de un sistema de pruebas de voltaje de impulso para transformadores de distribución y potencia de hasta 10 MVA, clase 69 kV y hasta 3 000 msnm, sumergidos en aceite” presentado por Oscar Renato Almache Flores para optar por el título magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, octubre 30, 2 023

.....
MSc. Quinatoa Caiza Carlos Ivan
C.C.: 172750251-8

AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: **“Dimensionamiento de un sistema de pruebas de voltaje de impulso para transformadores de distribución y potencia de hasta 10 MVA, clase 69 kV y hasta 3 000 msnm, sumergidos en aceite”**, ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, octubre 30, 2 023

.....
MSc. Pacheco Mena Carlos Francisco
C.C.: 050307290-2
Presidente del tribunal

.....
MSc. León Segovia Marco Anibal
C.C.: 050230540-2
Lector 2

.....
MSc. Hinojosa Guanoluiza Luis Eduardo
C.C.: 050236581-0
Lector 3

DEDICATORIA

A mi amada familia: Adry mi
compañera, amiga y esposa, Camy y Nyco
mis amados hijos, Mami Martha, Papi
Walter, mis padres, Sra. Anita, Don
Macario mis segundos padres, Silvia,
Verónica, Gaby mis hermanas, y todos los
amigos que me han dado el impulso y han
creído en mí, les dedico el presente trabajo
por ser ese soporte fundamental y la razón
de superación ante toda adversidad. Gracias
y que Dios los bendiga...

Renato

AGRADECIMIENTO

A Dios, todos aquellos ángeles enviados como personas y Empresas como SSEI, Hidrotambo y Ecuatran, que me impulsaron día a día a seguir adelante a pesar de las varias pruebas que te sorprende frecuentemente la vida...

Oscar Renato Almache Flores

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación.

Latacunga, octubre 30, 2 023

.....
Mgtr. Almache Flores Oscar Renato
C.C.: 180306304-7

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, octubre30, 2 023

.....
Mgtr. Almache Flores Oscar Renato
C.C.: 180306304-7

AVAL DE PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: **“Dimensionamiento de un sistema de pruebas de voltaje de impulso para transformadores de distribución y potencia de hasta 10 MVA, clase 69 kV y hasta 3 000 msnm, sumergidos en aceite”** contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, octubre 30, 2 023

.....
MSc. Pacheco Mena Carlos Francisco
C.C. 050307290-2
Presidente del tribunal

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: “Dimensionamiento de un sistema de pruebas de voltaje de impulso para transformadores de distribución y potencia de hasta 10 MVA, clase 69 kV y hasta 3 000 msnm, sumergidos en aceite.”

Autor: Almache Flores Oscar Renato

Tutor: Quinatoa Caiza Carlos Ivan MSc.

RESUMEN

La presente investigación, realiza el estudio de requisitos especificados en las normativas internacionales IEC y ANSI/IEEE, análisis y recomendaciones de varios especialistas en pruebas de transformadores y sistemas de pruebas de ensayos de voltaje de impulso para transformadores de distribución y potencia sumergidos en líquido aislante, con la finalidad de llevar a cabo el dimensionamiento de un sistema de pruebas de voltaje de impulso para transformadores de hasta 10 MVA, clase 69 kV hasta una altura de 3 000 metros sobre el nivel del mar (msnm). Los requisitos están conformados por los niveles de voltaje de ensayo, dependiendo de la clasificación del voltaje de bobinado, los tiempos de frente y cola del tipo de onda del impulso, las tolerancias para el voltaje y tiempos de la forma de onda, número, secuencia de los tipos y nivel de impulso a aplicar, entre otros. El dimensionamiento describe paso a paso la metodología con la cual se obtienen las características y requisitos técnicos que el sistema debe tener para llevar a cabo las pruebas de voltaje de impulso, tanto en el voltaje de cresta, así como en los tiempos de frente y cola específicos. Los resultados obtenidos fueron evaluados a través 87 simulaciones de 40 000 datos cada una realizadas en Matlab/Simulink. Adicionalmente, las simulaciones fueron evaluadas con los resultados de pruebas realizadas en laboratorio de ensayos de alto voltaje en transformadores de distribución y potencia. Los valores obtenidos durante la simulación y los ensayos en laboratorio son excelentes ya que las desviaciones son inferiores al 3 % en el nivel de voltaje, 8 % y 12 % en los tiempos de frente y cola, cuando éstos últimos tienen una tolerancia del 30 % y 20 %, respectivamente. Finalmente, se realizó la evaluación financiera para la implementación de un sistema de pruebas de voltaje de impulso en un laboratorio de alto voltaje para un fabricante de transformadores de distribución y potencia, cuyos resultados, ante un escenario pesimista de exportación, son favorables ante los criterios de evaluación TIR, VAN y periodo de recuperación.

PALABRAS CLAVE: Voltaje de impulso, Transformador de distribución y potencia, tiempo de frente y tiempo de cola.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Title: “DIMENSIONING OF AN IMPULSE VOLTAGE TEST SYSTEM FOR DISTRIBUTION AND POWER TRANSFORMERS UP TO 10 MVA, CLASS 69 KV AND UP TO 3,000 MASL, IMMERSED IN OIL”

Author: Ing. Almache Flores Oscar Renato

Tutor: Ing. Quinatoa Caiza Carlos Ivan MSc

ABSTRACT

The present research, carries out the study of requirements specified in the international norms IEC and ANSI/IEEE, analysis and recommendations of several specialists in transformer testing and impulse voltage test systems for distribution and power transformers immersed in insulating liquid, in order to carry out the sizing of a pulse voltage test system for transformers up to 10 MVA, class 69 kV up to a height of 3,000 meters above sea level (msnm). The requirements are shaped by the test voltage levels, depending on the winding voltage classification, impulse wave type front and tail times, tolerances for voltage and waveform times, number, sequence of types and impulse level to apply, among others. The sizing describes step by step the methodology by which the technical characteristics and requirements that the system must have to carry out the impulse voltage tests, both in the crest voltage, as well as in specific front and tail times. The results were evaluated through 87 simulations of 40,000 data each performed in Matlab/Simulink. Additionally, the simulations were evaluated with the results of laboratory tests of high voltage tests on distribution and power transformers. The values obtained during simulation and laboratory tests are excellent as the deviations are less than 3 % at the voltage level, 8 % and 12 % at the front and tail times, when the latter have a tolerance of 30 % and 20 % respectively. Finally, the financial evaluation was carried out for the implementation of an impulse voltage test system in a high voltage laboratory for a manufacturer of distribution and power transformers, whose results, faced with a pessimistic export scenario, are favourable to the evaluation criteria TIR, NPV and recovery period.

KEY WORDS: Impulse voltage, distribution and power transformer, front time and queue time.

Lorena Monserrath Meléndez Escobar con cédula de identidad número: 1802190239 Licenciada en Ciencias de la Educación, Especialidad Inglés con número de registro de la SENESCYT: 1010-03-458671; CERTIFICO haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de

investigación con el título: “**Dimensionamiento de un sistema de pruebas de voltaje de impulso para transformadores de distribución y potencia de hasta 10 MVA, clase 69 kV y hasta 3 000 msnm, sumergidos en aceite**” realizado por: Almache Flores Oscar Renato, aspirante a magister en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Ambato, octubre 30, 2023

.....
Lic. Lorena Meléndez

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS UTA

CI. 1802190239

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AVAL DEL TUTOR.....	II
AVAL DEL TRIBUNAL.....	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA.....	VI
RENUNCIA DE DERECHOS.....	VII
AVAL DE PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	XI
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del Problema.....	1
Formulación del Problema	2
Objetivo General	2
Objetivos Específicos.....	2
Sistema de tareas en relación a los objetivos específicos	3
Justificación.....	3
Hipótesis.....	4
CAPÍTULO I.....	5
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA – METODOLÓGICA	5
1.1. Antecedentes de la Investigación	5
1.1.1. Curva de probabilidad de falla del Transformador	5
1.2. Fundamentación Teórica	6
1.2.1. Clasificación de Voltajes y Sobrevoltajes.....	7
1.2.2. Clasificación de las pruebas dieléctricas para Transformadores.....	10
1.2.3. Niveles de aislamiento dieléctrico para Transformadores	12
1.2.4. Pruebas de voltaje de impulso tipo rayo	14
1.2.5. Pruebas de voltaje de impulso tipo maniobra	19
1.2.6. Sistema de pruebas de Voltaje de Impulso	20
1.3. Fundamentación Metodológica	27
CAPÍTULO II	29

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PRUEBAS DE VOLTAJE DE IMPULSO PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA	29
2.1. Datos de Transformadores de Potencia	29
2.2. Dimensionamiento del Generador de Impulsos	30
2.2.1. Requerimiento de Voltaje	30
2.2.2. Requerimiento de Energía.....	33
2.2.3. Dimensionamiento	35
2.3. Dimensionamiento de la unidad de carga.....	38
2.3.1. Requerimiento de magnitudes eléctricas.....	38
2.3.2. Dimensionamiento	39
2.4. Dimensionamiento del divisor de voltaje	40
2.4.1. Requerimiento de magnitudes eléctricas.....	40
2.4.2. Dimensionamiento	40
2.5. Dimensionamiento de las resistencias de frente y cola	42
2.5.1. Dimensionamiento	48
2.6. Evaluación del sistema de generación dimensionado	49
2.6.1. Pruebas en laboratorio en Vacío	49
2.6.2. Pruebas en Simulink en Vacío	50
2.6.3. Evaluación de Simulink con Transformador de Potencia	55
CAPÍTULO III.....	59
ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	59
3.1. Flujo de caja proyectado.....	59
3.2. Criterios de Evaluación	60
3.2.1. Tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR).....	61
3.2.2. Tasa interna de retorno (TIR).....	61
3.2.3. Valor Actual Neto (VAN).....	62
3.2.4. Periodo de recuperación.....	62
CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
ANEXOS.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Curva de Probabilidad de Falla - clásica	5
Fig. 2. Curva de Probabilidad de Falla – esperada.....	6
Fig. 3. Clasificación de Sobre Voltajes	7
Fig. 4. Sobrevoltaje tipo maniobra.....	8
Fig. 5. Operación de maniobra en un SEP	8
Fig. 6. Fenómeno de sobrevoltaje durante la operación de maniobra.....	8
Fig. 7. Sobrevoltaje tipo rayo	9
Fig. 8. Sobrevoltaje de frente muy rápido.....	9
Fig. 9. Sobrevoltajes en el sistema	10
Fig. 10. Grado de aislamiento en un transformador.....	10
Fig. 11. Formas de Onda de voltajes de impulso	12
Fig. 12. Impulsos de voltaje tipo rayo – polaridad positiva.....	15
Fig. 13. Forma de Onda de Impulso tipo rayo	16
Fig. 14. Forma de Onda de Impulso recortada.....	16
Fig. 15. Oscilaciones en el pico de la onda y determinación del su valor	17
Fig. 16. Resumen de requisitos de ensayos de voltaje de impulso tipo rayo	19
Fig. 17. Forma de Onda de impulso tipo maniobra – polaridad positiva.....	19
Fig. 18. Resumen de requisitos del ensayo de voltaje de impulso tipo maniobra	20
Fig. 19. Circuito básico de generador de voltaje de impulso	21
Fig. 20. Diferencia entre V_o y V_{ip}	22
Fig. 21. Generador de impulso tipo Marx, carga y descarga	23
Fig. 22. Distancias de seguridad	25
Fig. 23. Diagrama de Flujo metodológico	28
Fig. 24. Ensayo de eficiencia para impulso tipo rayo	32
Fig. 25. Ensayo de eficiencia para impulso tipo maniobra	32
Fig. 26. Distribución de Energía mínimas calculadas.....	36
Fig. 27. Cotas para dimensiones físicas del generador de impulsos	37
Fig. 28. Dimensiones físicas de un generador de impulsos de 500 kV / 25 kJ	38
Fig. 29. Dimensiones físicas de la unidad de carga GES 30/100E	40
Fig. 30. Dimensiones físicas aproximadas del divisor de voltaje de 500 kV.....	41
Fig. 31. Sistema de generación de voltaje de impulsos, 5 etapas, 500 kV.....	42

Fig. 32. Carga del generador de impulsos.....	43
Fig. 33. Descarga del generador de impulsos	44
Fig. 34. Circuito equivalente en la descarga del generador de impulsos	44
Fig. 35. Descarga de energía del objeto bajo prueba	45
Fig. 36. Circuito equivalente de un generador de impulsos con carga	45
Fig. 37. Componentes de forma de onda característica de impulso de voltaje	46
Fig. 38. Componentes de forma de onda característica de impulso de voltaje - Kuffel	48
Fig. 39. Pruebas de voltaje de impulso sin objeto bajo prueba.....	50
Fig. 40. Circuito para análisis en Simulink – Sin objeto bajo prueba.....	51
Fig. 41. Forma de onda de impulso para -100 kV, datos de Simulink.....	52
Fig. 42. Desviación en T1 durante la obtención de L_e del generador de impulsos	53
Fig. 43. Desviación en T2 durante la obtención de L_e del generador de impulsos	53
Fig. 44. Distribución de desviación para T1	54
Fig. 45. Distribución de desviación para T2.	55
Fig. 46. Circuito para análisis en Simulink – Con transformador de potencia	56
Fig. 47. Desviación de T1 entre la simulación y pruebas reales a transformadores de potencia de hasta 10 MVA clase 69 kV	57
Fig. 48. Desviación de T2 entre la simulación y pruebas reales a transformadores de potencia de hasta 10 MVA clase 69 kV	57

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Sistema de tareas en relación a los objetivos específicos	3
TABLA 2. Clasificación de Pruebas Dieléctricas.....	11
TABLA 3. Niveles de voltajes de prueba para Transformadores de Distribución	13
TABLA 4. Niveles de voltajes de prueba para Transformadores de Potencia Clase I	13
TABLA 5. Niveles de voltajes de prueba para Transformadores de Potencia Clase II.....	13
TABLA 6. Niveles de voltajes de prueba para Transformadores de Potencia.....	14
TABLA 7. Factor de corrección por la altura	24
TABLA 8. Datos de Transformadores de Potencia	30
TABLA 9. Voltajes de prueba de impulso para clase 69 kV	31
TABLA 10. Voltajes de prueba de impulso considerando la eficiencia.....	31
TABLA 11. Energía mínima para el generador de impulso	34
TABLA 12. Resultados de cálculo de energía mínima.....	35
TABLA 13. Opciones de Generadores de impulso.....	36
TABLA 14. Características mecánicas para generadores de impulso	37
TABLA 15. Opciones de Unidades de Carga	39
TABLA 16. Opciones de Divisores de Voltaje.....	41
TABLA 17. Valores calculados de R_s y R_p – sin objeto bajo prueba.....	48
TABLA 18. Valores calculados de R_s y R_p – con objeto bajo prueba.....	49
TABLA 19. Resultados de pruebas de impulso sin objeto bajo prueba.....	50
TABLA 20. Tabla de distribución de desviación de T1	54
TABLA 21. Tabla de distribución de desviación de T2	54
TABLA 22. Resumen de cotizaciones de un generador de impulsos de 500 kV / 25 kJ	60
TABLA 23. Flujo de caja proyectado	60
TABLA 24. Flujo neto por año - TIR	62
TABLA 25. Flujo neto por año - VAN.....	62
TABLA 26. Periodo de recuperación.....	63

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del Problema

En la actualidad, la confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia en estado permanente y transitorio son mucho más exigentes en todo el mundo; razón por la cual, día a día se busca la forma en que los elementos que integren estos sistemas sean más seguros y robustos, que permitan estar no solo a la altura sino por encima de dichas exigencias. Dentro de estos elementos, considerado uno de los más importantes, es el Transformador de Potencia, cuya probabilidad de falla, durante eventos que involucran sobre voltajes en los bornes de sus devanados, dependen de las materias primas, el diseño, la fabricación, el transporte, el montaje y por su puesto la validación de la capacidad de los aislamientos en resistir la intensidad y duración de éstos eventos, a través de la aplicación de ensayos de rutina, tipo y especiales en las pruebas de laboratorio durante su manufactura.

Es el ensayo de impulso de alto voltaje, en sus diferentes tipos, tales como: impulso tipo rayo de onda completa, impulso tipo rayo de onda recortada e impulso tipo maniobra, verifican el nivel básico de aislamiento del Transformador de Potencia (BIL) según la normativa aplicable; por lo tanto, principalmente los fabricantes y la academia del país, tienen la necesidad de dimensionar, evaluar, investigar, estudiar y si es factible, implementar este tipo de ensayos en sus respectivos laboratorios, con la finalidad de incrementar la confiabilidad de sus productos y contar con centros de investigación permanentes, que pongan en práctica los conocimientos adquiridos en las “aulas” y en la vida profesional, respectivamente.

La implementación de este tipo de sistemas de generación de formas de onda de voltajes de impulso en los laboratorios de alto voltaje, requiere de un apropiado dimensionamiento, y para ello se debe desarrollar los estudios necesarios para definirlo adecuadamente. Dicho estudio debe brindar las herramientas y metodologías a través de las cuales permitan corroborar el dimensionamiento que los fabricantes de este tipo de sistemas realizan, con la finalidad de minimizar los errores durante su adquisición y compra, pues la inversión es relativamente elevada y las pérdidas económicas serían representativas si no se selecciona adecuadamente, a más de que el equipo no podría ser utilizado para el alcance y fin previsto, conociendo que la obtención y aplicación normalizada de la onda de impulso (amplitud y tiempos de frente y cola) depende de las

características del mismo sistema de ensayos (Capacitancias y resistencias de frente y cola), y principalmente de las características de los transformadores a ensayar.

Formulación del Problema

Llevar a cabo el dimensionamiento requiere de una amplia investigación sobre, los requisitos establecidos principalmente en los estándares IEC, ANSI/IEEE y NTE INEN-IEC, el funcionamiento y los elementos que integran y afectan la operación del sistema de generación de voltajes de impulso.

Razón por la cual la presente investigación busca establecer ¿en qué medida las características del objeto a ensayar influyen en el dimensionamiento para la obtención de la onda normalizada en los sistemas de generación de voltaje de impulso para la realización de ensayos a transformadores de potencia sumergidos en líquido aislante de hasta 10 MVA, clase 69 kV que operan hasta 3 000 msnm?

Por consiguiente, la variable independiente está conformada por las características de los transformadores de potencia a ensayar y la variable dependiente es la onda normalizada de voltaje de impulso.

Objetivo General

Dimensionar un Sistema de Pruebas de Voltaje de Impulso para Transformadores de Distribución y Potencia sumergidos en aceite, que cumpla los requerimientos especificados en las normas ANSI/IEEE, IEC y NTE INEN-IEC.

Objetivos Específicos

- Realizar la investigación bibliográfica para dimensionamiento de un Sistema de Pruebas de Voltaje de Impulso para Transformadores de Distribución y Potencia sumergidos en aceite.
- Dimensionar un Sistema de Pruebas de Voltaje de Impulso para Transformadores de Distribución y Potencia sumergidos en aceite aplicando los requerimientos especificados en las normas ANSI/IEEE, IEC y NTE INEN-IEC, a través de la metodología planteada.
- Analizar la factibilidad económica del dimensionamiento de un Sistema de Pruebas de Voltaje de Impulso para Transformadores de Distribución y Potencia sumergidos en aceite.

Sistema de tareas en relación a los objetivos específicos

La tabla 1, muestra el sistema de tareas desarrolladas a partir de los objetivos específicos planteados.

TABLA 1. Sistema de tareas en relación a los objetivos específicos

Objetivos Específicos	Actividad (Tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad
1	Investigación Bibliográfica	Contar con información relacionada y vinculante al proyecto de investigación.	Búsqueda, recopilación y revisión de la información a través de fuentes primarias y secundarias.
2	Propuesta	Dimensionamiento de un Sistema de pruebas de voltaje impulso para Transformadores de hasta 10 MVA, clase 69 kV y hasta 3 000 msnm.	Detallar y seleccionar los componentes requeridos y necesarios en el dimensionamiento planteado; tomando en cuenta los accesorios de un fabricante de este tipo de equipos.
3	Análisis de factibilidad económica	Análisis de factibilidad económica.	Evaluación de costo beneficio en cuanto a la implementación de un sistema de pruebas de voltaje de impulso para transformadores hasta 10 MVA, clase 69 kV.

Justificación

El presente proyecto, brinda el dimensionamiento adecuado de un equipo esencial, como lo es un sistema de pruebas de voltaje de impulso, que un laboratorio de pruebas de transformadores en la actualidad debe eficazmente implementarlo. Al hablar de laboratorios de pruebas no solo nos debemos referir a los fabricantes de éstos equipos (transformadores), sino también a instituciones de educación superior e inclusive empresas eléctricas que procuran verificar la calidad de los productos recibidos y el cumplimiento de los requisitos y normativas especificadas.

El estudio constituye la base fundamental con un ejemplo práctico, para poder llevar acabo el dimensionamiento de sistemas para pruebas de voltaje de impulso para transformadores de distribución y potencia. La implementación de este tipo de sistemas para la realización del ensayo de impulso, requiere fundamentalmente de un apropiado dimensionamiento, ya que, de no definirlo adecuadamente, el costo y pérdidas económicas serían representativas para la empresa.

Para llevar a cabo este dimensionamiento, se requiere de una amplia investigación, de requerimientos ANSI/IEEE, IEC y NTE INEN-IEC que son las normativas que se utilizan en nuestro país, en toda América y en varios países del mundo, y la recolección de datos y experiencias que los fabricantes y especialistas en este tipo de ensayos han tenido a lo largo del tiempo.

Hipótesis

Si se realiza el estudio de los requisitos, especificaciones y técnicas de las pruebas de impulso para transformadores de distribución y potencia, sumergidos en líquido aislante, entonces el dimensionamiento de un Sistema de Pruebas de Voltaje de Impulso es posible.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA – METODOLÓGICA

1.1. Antecedentes de la Investigación

Las pruebas a los transformadores han evolucionado considerablemente, principalmente por experiencias obtenidas a través de los años de aplicabilidad, el desarrollo de las materias primas, la optimización en los diseños, la revisión y actualización de los estándares o normativas, la sistematización, automatización de los procesos de manufactura, las necesidades mismas en cuanto a la confiabilidad en la cadena de abastecimiento de energía eléctrica hasta los usuarios, entre otras.

1.1.1. Curva de probabilidad de falla del Transformador

La probabilidad de falla clásica de un Transformador, caracterizada por la figura 1, presenta 3 zonas específicas:

- Zona A. - Presenta una alta probabilidad de falla temprana; al inicio de la operación del transformador. Las principales causas para aquello pueden ser: defectos de fabricación, inadecuada manipulación en el transporte, inadecuada instalación y puesta en marcha del equipo.
- Zona B. - La probabilidad de falla desciende, se estabiliza, pero no desaparece, ya que, dentro de este periodo de tiempo, eventos anormales tales como, cortocircuitos, sobrecargas, sobretensiones e inadecuadas operaciones en el mantenimiento podrían llevar al colapso del equipo.
- Zona C. - La probabilidad de falla empieza a incrementar, al cumplir la vida útil, que para un transformador sumergido en aceite se espera sea mínimo 180 000 horas, bajo condiciones adecuadas de mantenimiento y operación.

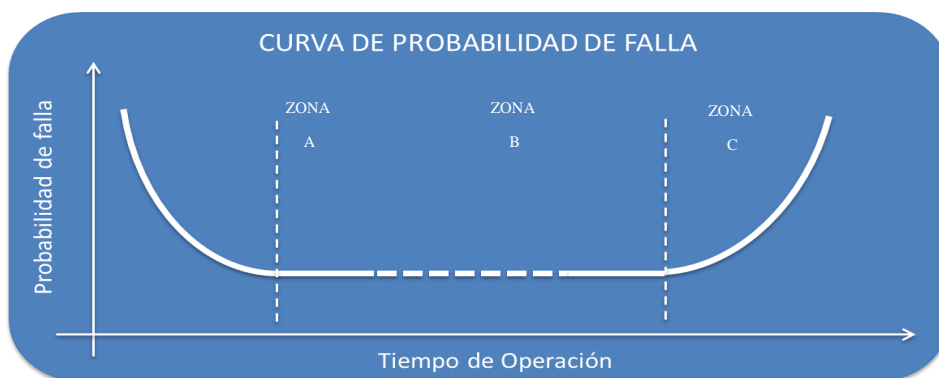


Fig. 1. Curva de Probabilidad de Falla - clásica

La curva de probabilidad de falla propuesta en la figura 2, pretende observar con mayor detalle el propósito e importancia de la severidad con que las pruebas eléctricas en fábrica deben ser realizadas para cumplir los requerimientos especificados por el cliente y garantizar que el transformador cumpla y sobrepase su expectativa de vida, a partir de las causas de probabilidad de falla en cada zona indicadas en el párrafo anterior.

Recordemos que dentro estos requisitos se encuentran: la capacidad de cargabilidad (verificada a través de ensayos de incrementos de temperatura), resistencia dieléctrica que demuestre la integridad del transformador ante sobre voltajes permanentes, temporales y transitorios, y demás características fundamentales de funcionamiento a lo largo de su operación.

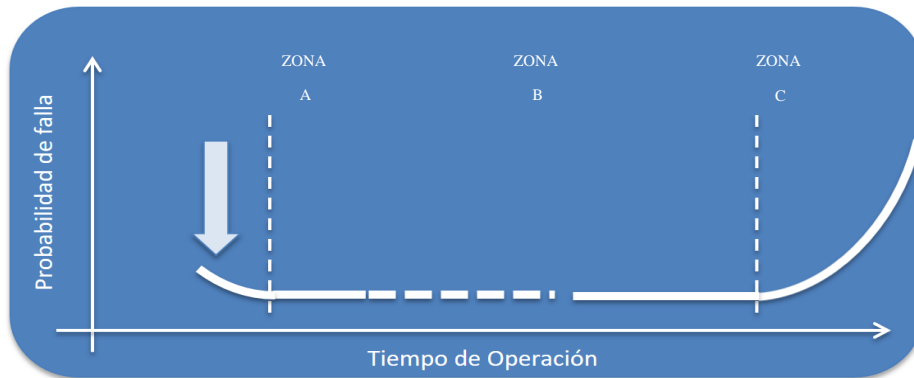


Fig. 2. Curva de Probabilidad de Falla – esperada

Dentro de los ensayos dieléctricos que garantizan la disminución de probabilidad de falla en un transformador se encuentra la prueba de voltaje de impulso, misma que, debe ser entendida y estudiada para conocer a cada uno los aspectos y requisitos existentes, para definir su capacidad, tamaño y elementos que deben constituir dicho sistema de pruebas de voltaje de impulso; según el tamaño, nivel de voltaje (clase) de un transformador de distribución y potencia, entre otros.

1.2. Fundamentación Teórica

Las diferentes normas del Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) así como del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos de los Estados Unidos (IEEE), establecen las especificaciones y requisitos eléctricos y mecánicos, mínimos, que un transformador de distribución y potencia deben cumplir; así como también, las pruebas a las que deben ser sometidos durante el proceso de fabricación.

1.2.1. Clasificación de Voltajes y Sobrevoltajes

Las normas IEC 60071-1 [1] e IEEE Std C62.82.1 [2], definen al sobre voltaje como cualquier voltaje entre fase a tierra o entre fases cuyo valor de cresta excede al valor de cresta que corresponde al voltaje máximo del sistema de un determinado material o equipo. Los sobre voltajes pueden ser clasificados por la forma y duración, así como también en temporales y transitorios.

El voltaje máximo del sistema, según IEEE Std C62.82.1 [2], es el voltaje rms (root-mean-square) fase-fase más elevado que aparece en el sistema bajo condiciones normales de operación, y el voltaje rms fase-fase para el cual el equipo y otros componentes del sistema están diseñados para una satisfactoria operación continua, sin deterioro de ningún elemento. El valor de cresta o valor pico es el valor absoluto máximo de una función, cuando tal máximo existe.

La figura 3, tomada de la norma IEC [1], muestra la clasificación de los sobrevoltajes, ejemplos de la forma de onda, rangos de frecuencia y tiempos y datos normalizados. Se puede observar al voltaje permanente que tiene un valor eficaz constante, al sobrevoltaje temporal a frecuencia industrial de duración relativamente larga (entre 3 600 s a 0,03 s), sobretensiones transitorias de corta duración, que no sobrepasa de unos milisegundos, oscilatoria o no, generalmente fuertemente amortiguada.

Clase	Baja frecuencia		Transitoria		
	Permanente	Temporal	De frente lento	De frente rápido	De frente muy rápido
Forma de tensión					
Rango de formas de tensión	$f = 50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3\,600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3\,600 \text{ s} \geq T_1 \geq 0,03 \text{ s}$	$5\,000 \mu\text{s} \geq T_p > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_f > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada de tensión	$f = 50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ T_1^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2\,500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Ensayo de tensión soportada normalizada	*	Ensayo de corta duración a frecuencia industrial	Ensayo de impulsos tipo maniobra	Ensayo de impulsos tipo rayo	*

* A especificar por el comité de producto concerniente.

Fig. 3. Clasificación de Sobre Voltajes

Los sobre voltajes transitorios se dividen en:

- Sobrevoltaje de frente lento. - generalmente unidireccional, de duración T_r hasta el valor de cresta tal que $20 \mu s < T_r \leq 5\,000 \mu s$ y de duración de cola $T_h \leq 20 \text{ ms}$. Conocido también como sobrevoltaje tipo maniobra [1], se representa en la figura 4, que es tomada de [2].

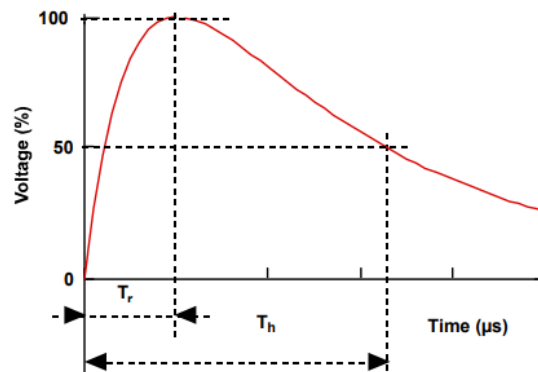


Fig. 4. Sobrevoltaje tipo maniobra

Las operaciones de maniobra en las redes de alto voltaje, simbolizada en la figura 5 [3], producen fenómenos transitorios que pueden dar lugar a sobrevoltajes, como se observa en la figura 6 [3]. La forma de onda y duración del sobrevoltaje de impulso tipo maniobra dependerá de las operaciones mismas de maniobra y la configuración de la red.

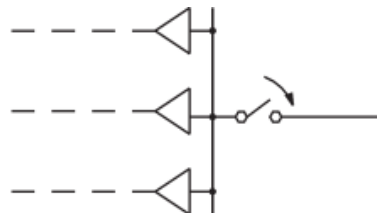


Fig. 5. Operación de maniobra en un SEP

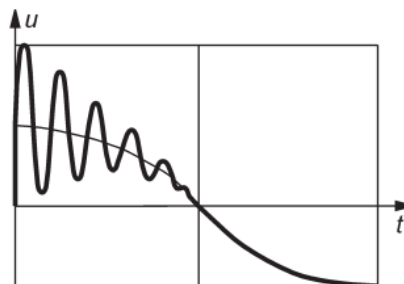


Fig. 6. Fenómeno de sobrevoltaje durante la operación de maniobra

- Sobrevoltaje de frente rápido. - generalmente unidireccional, de duración T_r hasta el valor de cresta tal que $0,1 \mu s < T_r \leq 20 \mu s$ y de duración de cola $T_h \leq$

300 ms. Conocido también como sobrevoltaje tipo rayo [1], se representa en la figura 7 [2].

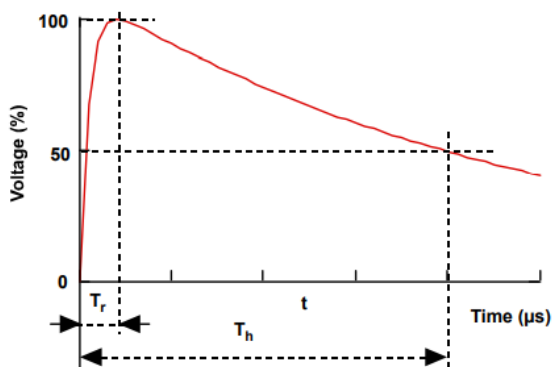


Fig. 7. Sobrevoltaje tipo rayo

La amplitud de un sobrevoltaje tipo rayo causado por descargas atmosféricas, son una función de la corriente del rayo y la impedancia de impulso en el lugar del impacto.

- Sobretensión de frente muy rápido. - generalmente unidireccional, de duración hasta el valor de creta $T_r \leq 0,1 \mu s$, duración total $T_h < 3 ms$ y con oscilaciones superpuestas de frecuencia $30 kHz < f < 100 MHz$ y $30 kHz < f < 2 < 300 kHz$. Generalmente son generadas por operaciones de maniobra de GIS (gas – insulated substation) o cuando los motores son encendidos) [1]. La forma de onda característica se observa en la figura 8 [2].

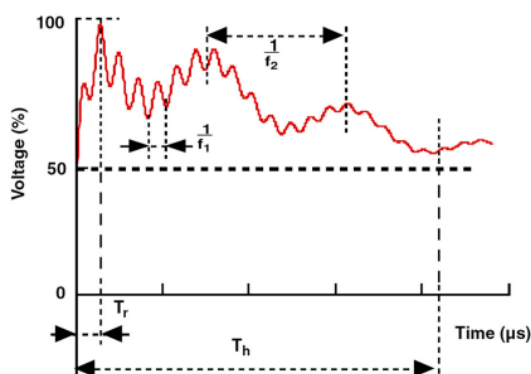


Fig. 8. Sobrevoltaje de frente muy rápido

Por lo general, a más del voltaje normal de operación, mismo que es semejante al voltaje nominal del equipo, un transformador estará expuesto a diferentes tipos de sobrevoltajes durante su vida útil. Como se indicó dependiendo de la duración y magnitud del sobrevoltaje estos son:

- Sobrevoltajes tipo rayo (zona A),
- Sobrevoltajes tipo maniobra (zona B) y

- Sobrevoltajes temporales (Zona C).

La figura 9 [3] ilustra de manera didáctica estos los sobrevoltajes que pueden ocurrir en la red.

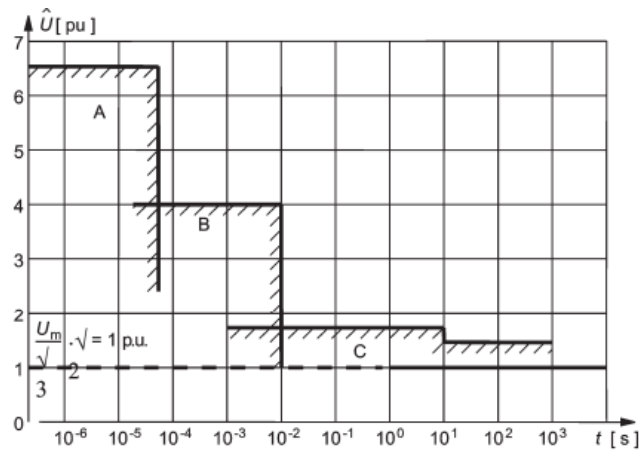


Fig. 9. Sobrevoltajes en el sistema

1.2.2. Clasificación de las pruebas dieléctricas para Transformadores

El principal propósito de las pruebas dieléctricas es verificar la integridad del aislamiento del transformador en soportar eventos de sobrevoltajes, que pueden aparecer durante condiciones normales y anormales de operación. La figura 10, muestra el esquema del interior de un transformador trifásicos en donde se puede observar el nivel de potencial eléctrico que soporta y por lo tanto en donde existe mayor o menor aislamiento.

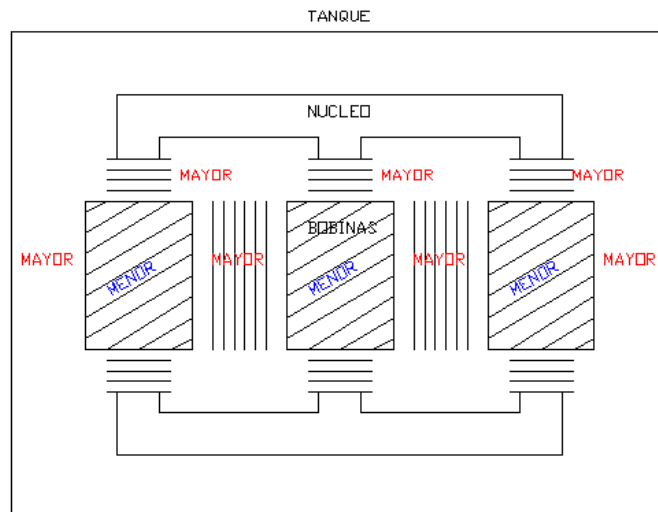


Fig. 10. Grado de aislamiento en un transformador

Las normativas [4] y [5], para Transformadores sumergidos en líquido aislante, clasifican a las diferentes pruebas en: ensayos de rutina, ensayos tipo o diseño y ensayos especiales u otros ensayos; y su aplicabilidad depende de la clase (nivel de voltaje) y tamaño del transformador. La tabla 2, muestra la clasificación de los ensayos dieléctricos especificados en las normas indicadas.

TABLA 2. Clasificación de Pruebas Dieléctricas

PRUEBAS	INEN		IEC 60076-1:2011 IEC 60076-3:2013			IEEE C57.12.00:2015		
	DISTRIBUCIÓN	POTENCIA	Um ≤ 72,5 kV	72,5 kV < Um ≤ 170 kV	Um > 170 kV	DISTRIBUCIÓN	POTENCIA	
	NTE INEN 2110	IEC					Vm ≤ 73 kV y P < 15 MVA	Vm ≥ 123 kV y todos MVA. 73 kV ≤ Vm ≤ 123 kV y P ≥ 15 MVA
Resistencia de Aislamiento a los devanados	R	Ver IEC 60076	E	R	R	E	R	R
Resistencia de Aislamiento al núcleo	--	Ver IEC 60076	E	R	R	E	R	R
Factor de Potencia de Aislamiento y Capacitancia	--	Ver IEC 60076	E	R	R	E	R	R
Corriente de Excitación - monofásica	--	Ver IEC 60076	--	--	--	E	E	E
Pruebas de baja frecuencia a dispositivos auxiliares y control, y circuitos de TCs	--	Ver IEC 60076	R	R	R	E	R	R
Impulso tipo Rayo	T	Ver IEC 60076	T	R	R	R, T, E	T, E	R
Impulso tipo Maniobra (Switching), fase a tierra	--	Ver IEC 60076	--	E	R	--	E	R, E
Impulso de Frente de Onda	--	Ver IEC 60076	--	--	--	--	E	E
Baja Frecuencia (Aplicado / Inducido)	R	Ver IEC 60076	R	R	R	R	R	R
Descargas Parciales	E	Ver IEC 60076	E	R	R	E	E	R
Rigidez dieléctrica al aceite	R	Ver IEC 60076	--	--	--	--	--	--

(R).- RUTINA (T).- TIPO O DISEÑO (E).- ESPECIAL U OTROS

Los diferentes tipos de sobrevoltajes, mencionados en el apartado anterior son tomados en cuenta en los estándares para los tipos y especificaciones de pruebas a los transformadores; mismas que, pueden significar una o algunas pruebas, independientes o combinadas. La aplicación de las pruebas dieléctricas, dependen de las características del transformador a ensayar tal como el tamaño, los voltajes y la norma bajo la cual es fabricado y probado.

1.2.3. Niveles de aislamiento dieléctrico para Transformadores

Las normativas [4] y [6], definen los niveles de voltaje de prueba, los métodos, requerimientos y evaluación de los ensayos, que deben ser estudiados y analizados para llevar a cabo el dimensionamiento de un sistema de pruebas seguro.

Las pruebas de voltaje de impulso, más aplicadas, por las normativas son:

- Prueba de voltaje de impulso tipo rayo
- Prueba de voltaje de impulso tipo rayo – recortado
- Prueba de voltaje de impulso tipo maniobra

La figura 11, ilustra las formas de onda, amplitud del voltaje de prueba en % y tiempo de duración de los tipos de pruebas de impulso.

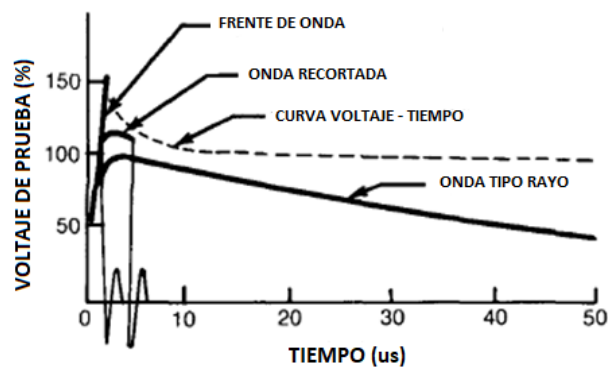


Fig. 11. Formas de Onda de voltajes de impulso

Los voltajes de pruebas de impulso que define la norma IEEE C57.12.00 [4] son:

- La tabla 3, para transformadores de distribución
- La tabla 4, para transformadores de potencia Clase I
- La tabla 5, para transformadores de potencia Clase II

TABLA 3. Niveles de voltajes de prueba para Transformadores de Distribución

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN							
Voltaje Máximo del Sistema	Voltaje Nominal del Sistema	BIL (Nivel de Aislamiento de Impulso tipo Rayo) Línea - Final			Onda Recortada		BLS Nivel de Aislamiento de impulso tipo maniobra
		Mínimo	Alternativa		1,1* BIL	T. mín. Corte	
			(kV cresta)				
(kV rms)	(kV rms)				(kV cresta)	(μ s)	(kV cresta)
1,5	1,2	30	--	--	33	1,0	--
3,5	2,5	45	--	--	50	1,5	--
6,9	5	60	--	--	66	1,5	50
11	8,7	75	--	--	83	1,5	62
17	15	95	110	--	105 / 120	1,8 / 2,0	79 / 92
26	25	125	150	--	138 / 165	2,3 / 3,0	104 / 125
36	34,5	125	150	200	138 / 165 / 220	2,3 / 3,0 / 3,0	104 / 125 / 166
48	46	200	250	--	220 / 275	3,0	166 / 208
73	69	250	350	--	275 / 385	3,0	208 / 291

TABLA 4. Niveles de voltajes de prueba para Transformadores de Potencia Clase I

TRANSFORMADORES DE POTENCIA CLASE I							
Voltaje Máximo del Sistema	Voltaje Nominal del Sistema	BIL (Nivel de Aislamiento de Impulso tipo Rayo) Línea - Final			Onda Recortada		BLS Nivel de Aislamiento de impulso tipo maniobra
		Mínimo	Alternativa		1,1* BIL	T. mín. Corte	
			(kV cresta)				
(kV rms)	(kV rms)				(kV cresta)	(μ s)	(kV cresta)
1,5	1,2	30	45	--	33 / 50	1,0 / 1,5	--
3,5	2,5	45	60	--	50 / 66	1,5	--
6,9	5	60	75	--	66 / 83	1,5	50
11	8,7	75	95	--	83 / 105	1,5 / 1,8	62
17	15	95	110	--	105 / 120	1,8 / 2,0	79 / 92
26	25	150	--	--	165	3,0	104 / 125
36	34,5	200	--	--	220	3,0	104 / 125 / 166
48	46	200	250	--	220 / 275	3,0	166 / 208
73	69	250	350	--	275 / 385	3,0	208 / 291

TABLA 5. Niveles de voltajes de prueba para Transformadores de Potencia Clase II

TRANSFORMADORES DE POTENCIA CLASE II							
Voltaje Máximo del Sistema	Voltaje Nominal del Sistema	BIL (Nivel de Aislamiento de Impulso tipo Rayo) Línea - Final			Onda Recortada		BLS Nivel de Aislamiento de impulso tipo maniobra
		Mínimo	Alternativa		1,1* BIL	T. mín. Corte	
			(kV cresta)				
(kV rms)	(kV rms)				(kV cresta)	(μ s)	(kV cresta)
≤ 17	≤ 15	110	--	--	120	2,0	92
26	25	150	--	--	165	3,0	125
36	34,5	200	--	--	220	3,0	166
48	46	200	250	--	220 / 275	3,0	166 / 208
73	69	250	350	--	275 / 385	3,0	208 / 291
121	115	350	450	550	385 / 495 / 605	3,0	291 / 375 / 460
145	138	450	550	650	495 / 605 / 715	3,0	375 / 460 / 540
169	161	550	650	750 / 825	605 / 715 / 825 / 910	3,0	460 / 540 / 620 / 685
242	230	650	750	825 / 900	715 / 825 / 910 / 990	3,0	540 / 620 / 685 / 745
362	345	900	1050	1175	990 / 1155 / 1290	3,0	745 / 870 / 975
550	500	1425	1550	1675	1570 / 1705 / 1845	3,0	1180 / 1290 / 1390
765	735	1950	2050	--	2145 / 2255	3,0	1150 / 1620 / 1700
800	765	1950	2050	--	2145 / 2255	3,0	1150 / 1620 / 1700

Los voltajes de pruebas de impulso que define la norma IEC 60076-3 [6] son:

TABLA 6. Niveles de voltajes de prueba para Transformadores de Potencia

TRANSFORMADORES DE POTENCIA						
Voltaje máximo para el bobinado del equipo Um (kV rms)	BIL (Nivel de Aislamiento de Impulso tipo Rayo)			Onda Recortada		BLS Nivel de Aislamiento de impulso tipo maniobra (kV cresta)
	Mínimo	Alternativa		1,1* BIL (kV cresta)	T. mín. Corte (µs)	
		(kV cresta)				
< 1,1	--	--	--	--	--	--
3,6	20	40	--	22 / 44	3@6 (2@3)	--
7,2	60	75	--	66 / 83	3@6 (2@3)	--
12	75	95	110	83 / 105 / 121	3@6 (2@3)	--
17,5	95	125	--	105 / 138	3@6 (2@3)	--
24	125	145	150	138 / 160 / 165	3@6 (2@3)	--
36	170	200	--	187 / 220	3@6 (2@3)	--
52	250	--	--	275	3@6 (2@3)	--
72,5	325	350	--	358 / 385	3@6 (2@3)	--
100	450	--	--	495	3@6 (2@3)	375
123	550	--	--	605	3@6 (2@3)	460
145	550	650	--	605 / 715	3@6 (2@3)	460 / 540
170	650	750	--	715 / 825	3@6 (2@3)	540 / 620
245	850	950	1050	935 / 1045 / 1155	3@6 (2@3)	700 / 750 / 850
300	950	1050	--	1045 / 1155	3@6 (2@3)	750 / 850
362	1050	1175	--	1155 / 1290	3@6 (2@3)	850 / 950
420	1175	1300	1425	1290 / 1430 / 1570	3@6 (2@3)	950 / 1050 / 1175
550	1300	1425	1550 / 1675	1430 / 1570 / 1705 / 1845	3@6 (2@3)	1050 / 1175 / 1300 / 1390
800	1800	1950	2050 / 2100	1980 / 2145 / 2255 / 2310	3@6 (2@3)	1425 / 1550 / 1700 / 1675
1100	1950	2250	--	2145 / 2475	3@6 (2@3)	1425 / 1800
1200	2250	--	--	2475	3@6 (2@3)	1800

1.2.4. Pruebas de voltaje de impulso tipo rayo

Los ensayos de impulso tipo rayo que definen las normas internacionales son las de onda completa (reducida y plena) y las de onda recortadas. La figura 12, muestra los tipos de voltaje de impulso tipo rayo y las características de éstas que son explicadas en los siguientes párrafos.

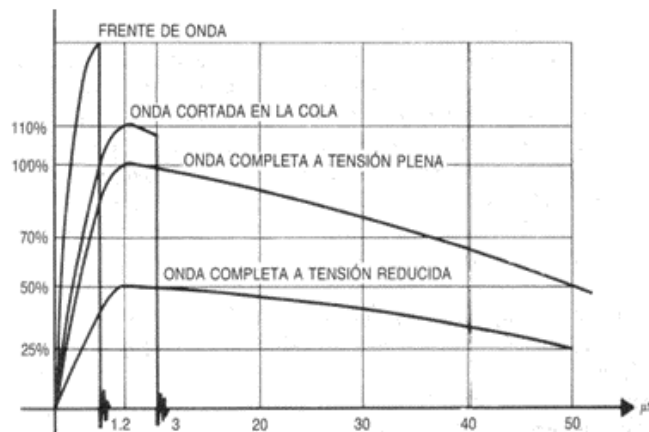


Fig. 12. Impulsos de voltaje tipo rayo – polaridad positiva

Los requisitos especificados en las normativas [6] y [7] para los ensayos de voltaje de impulso tipo rayo, para transformadores de potencia sumergidas en líquido aislante, se indican a continuación, cuya metodología está dada por la IEEE [8] :

- **Secuencia.** – Orden, tipo y cantidad de pruebas que deben ser aplicadas en cada bobina.

La norma IEC [6] define:

- 1 (una) prueba de onda de impulso de onda completa reducida y seguidamente,
- 3 (tres) impulsos de onda completa plenas.

Por otra parte, la norma IEEE [7] especifica:

- 1 (una) prueba de onda de impulso de onda completa reducida,
- 1 (una) plena, seguidamente de
- 2 (dos) impulsos de onda recortadas y finalmente,
- 2 (dos) ondas de impulso de onda completa - plenas.

Para transformadores de distribución, la norma IEEE [7] especifica como pruebas de rutina, cuya metodología está dada en [9]:

- Método A: 1 reducida + 1 plena
- Método B: 2 plenas
- **Amplitud.** – Magnitud expresada en porcentaje del nivel de aislamiento básico (BIL) indicado en las tablas 3, 4, 5 y 6 de niveles de voltaje de prueba, según el tipo de prueba requerida.
 - Para impulso de onda completa plena es el 100 %, ver figura 13 [10].
 - Para ondas reducidas se puede aplicar entre el 50 % al 70 % y

- Para onda recortada 110 %, del nivel del BIL, ver figura 14 [3].

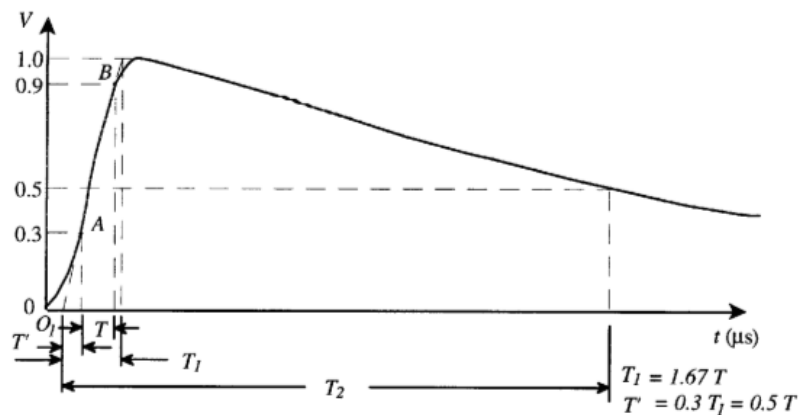


Fig. 13. Forma de Onda de Impulso tipo rayo

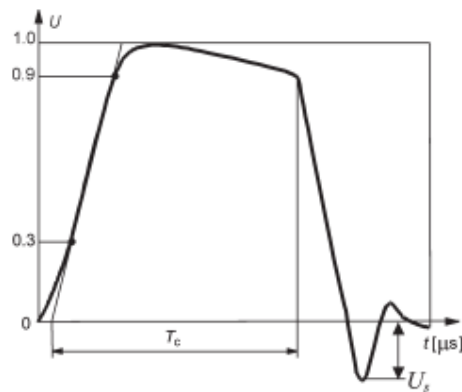


Fig. 14. Forma de Onda de Impulso recortada

- **Tiempos.** – Duración de tiempos de frente (T_f) y cola (T_c) que deben alcanzar los diferentes tipos de impulsos. Para el impulso de onda completa se define,
 - Tiempo de frente de $1,2 \mu s$ (T_1) y
 - Para el “tiempo de cola” de $50 \mu s$ (T_2). El tiempo de cola es el tiempo entre el cero virtual y el 50 % del valor pico en la cola.
 - Para el impulso recortado $1,2 \mu s$ para el tiempo de frente y para el tiempo de corte según lo indicado en las tablas anteriores.

El tiempo de frente es considerado 1,67 veces el tiempo entre los puntos del 30 % y 90 % del valor del pico, es decir, $1,67 * T$. Debido a que muchas veces, el instante de origen de la onda está difuso y no se puede observarse con toda certeza, se define un llamado “tiempo cero virtual” que se determina dibujando una línea recta en el frente de la onda a través de los

puntos al 30 % y 90 % del valor pico. La intersección de esta línea con el eje de tiempo es el cero de tiempo virtual.

Cuando existen oscilaciones en el frente de la onda, los puntos del 30 % y 90 % se determinarán en el frente de onda liso esbozado a través de las oscilaciones.

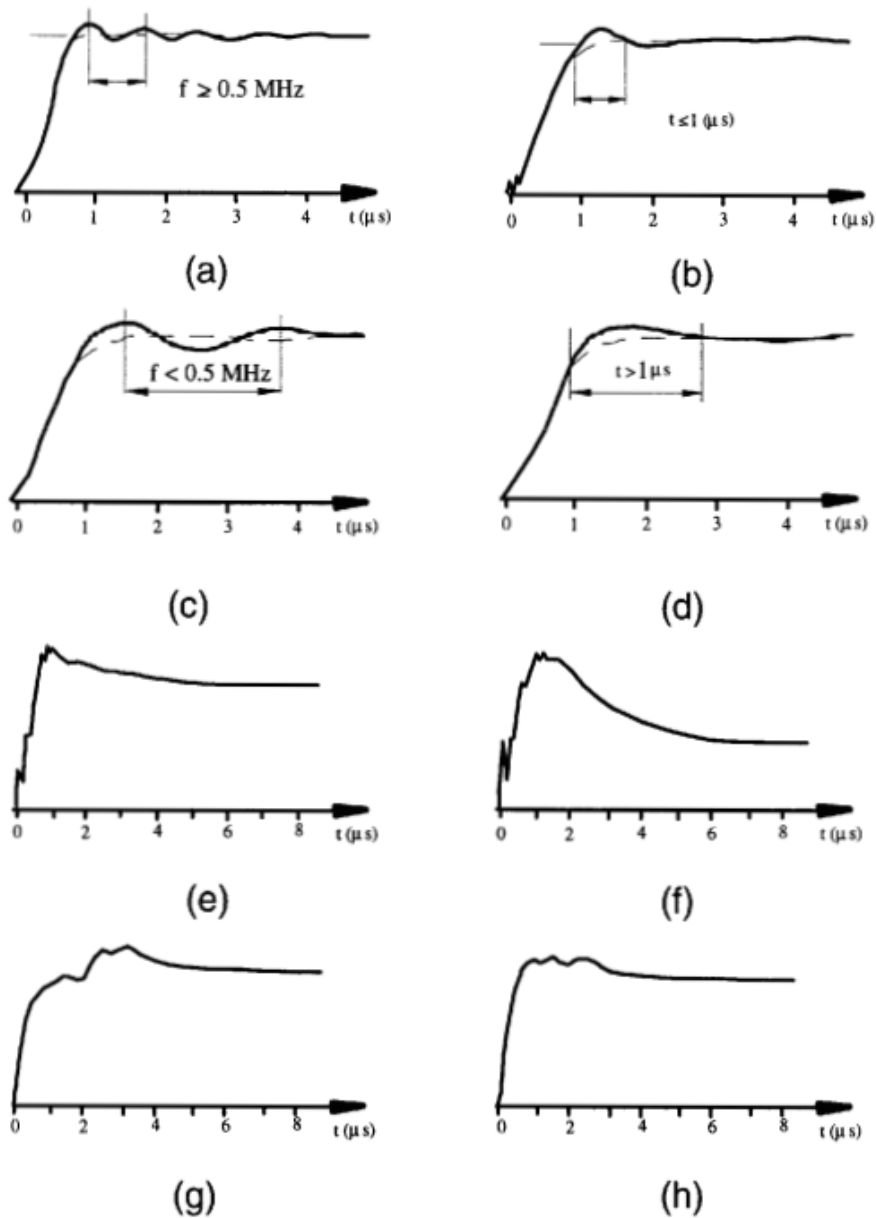


Fig. 15. Oscilaciones en el pico de la onda y determinación del su valor

Las figuras (a) y (b), indican que el valor del voltaje es determinado por una curva de valor medio. Las figuras (c) y (d), el valor del voltaje de prueba es determinado por el valor pico. Las figuras e, f, g h, generalmente no existe una guía para determinar el valor de voltaje de prueba, todas éstas vistas en la figura 15 [10].

La magnitud de las oscilaciones, preferentemente, no debe exceder el 10 % de la tensión aplicada. Cuando hay oscilaciones de alta frecuencia en el pico de la onda, el valor de pico se determinará de la onda lisa esbozada a través de las oscilaciones. Cuando el período de estas oscilaciones es de 2 μs o más, se empleará el valor real del pico.

En la práctica, se puede aplicar lo siguiente:

- a) El tiempo de frente no excederá 2,5 μs salvo en los devanados de capacitancia de impulso grande (devanados de baja tensión y potencia alta y algunos de alta tensión y alta potencia). Para comprobar que la alta capacitancia es la causa del tiempo de frente mayor, la resistencia serie del generador de impulso puede reducirse. Esta reducción debe causar las oscilaciones superpuestas. Para esto sólo deben estar en el circuito la inductancia inherente del generador y de los conductores de conexión.
 - b) La impedancia de algunos devanados puede ser tan baja que el tiempo necesario de cola de la onda no puede obtenerse con el equipo disponible. En casos así, pueden usarse ondas más cortas.
 - c) Para obtener una prueba adecuada se debe asegurar que los valores de capacitancia del generador con las conexiones usadas excedan 0,011 μF .
- **Polaridad / Tap.** – Tipo de polaridad que la norma recomienda. Para transformadores sumergidos en aceite debe ser polaridad negativa, para reducir el riesgo de descarga errática externa en el circuito de prueba.
- En cuanto al tap del cambiador de derivaciones de la bobina, puede irse realizando en el medio y en los extremos, para cada fase, es decir para un transformador trifásico la primera bobina puede ser realizada en el tap de mayor número de espiras, la segunda bobina en el tap intermedio y la tercera bobina en el tap de menor número de espiras.
- **Tolerancias.** – Se especifica un valor de $\pm 3 \%$ para el voltaje de cresta del BIL y para los tiempos de frente y cola valores del $\pm 30 \%$ y $\pm 20 \%$, respectivamente, es decir que el T_f frente (1,2 μs) los valores aceptables están entre 0,84 μs a 1,56 μs , y para el T_c están entre 40 μs a 60 μs .

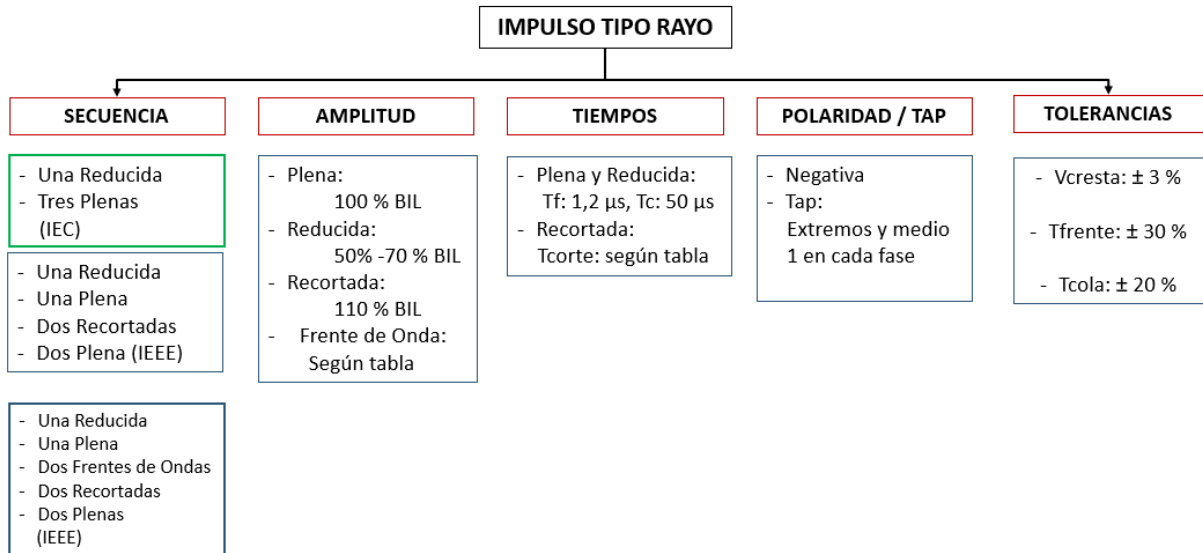


Fig. 16. Resumen de requisitos de ensayos de voltaje de impulso tipo rayo

1.2.5. Pruebas de voltaje de impulso tipo maniobra

Los ensayos de impulso tipo maniobra o switch que definen las normas internacionales de la misma manera define requisitos bajo los cuales deben ser ejecutados dichos ensayos. La figura 17 [10], muestra la forma de onda para esta clase de voltaje de impulso.

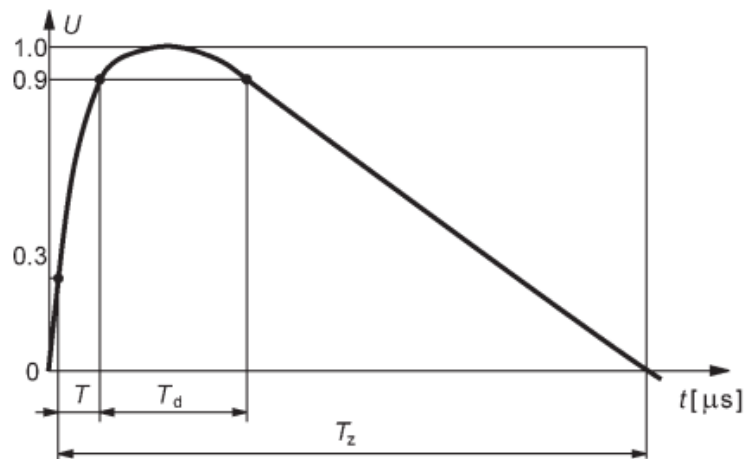


Fig. 17. Forma de Onda de impulso tipo maniobra – polaridad positiva

- **Secuencia.** – Orden, tipo y cantidad de pruebas que deben ser aplicadas en cada bobina.

La norma IEC [6] e IEEE [7] definen:

- 1 (una) prueba de onda de impulso tipo maniobra reducida y seguidamente
- 3 (tres) impulsos de onda plena.

- **Amplitud.** – Magnitud expresada en porcentaje del nivel de aislamiento para este ensayo tipo maniobra (BLS) indicado en las tablas 3, 4, 5 y 6 de niveles de voltaje de prueba. Para impulso de onda plena es el 100 %, para ondas reducidas se puede aplicar entre el 50 % al 70 %, del nivel del BLS.
- **Tiempos.** – En cuanto a los tiempos de duración se tienen algunas particularidades, tales como:
 - T es el tiempo desde el 30 % al 90 % del nivel de voltaje BLS,
 - T1 es 1,67 veces el tiempo de T que debe ser mayor a 100 μ s,
 - Td es el tiempo en que la onda permanece por encima de 90 % del BLS y debe ser mayor o igual a 200 μ s, y
 - Tz es el tiempo de duración total del ensayo que debe ser igual o mayor a 1 000 μ s, hasta que el voltaje sea cero, como se puede observar en la figura 16.
- **Polaridad / Tap.** – Tipo de polaridad que la norma recomienda. Para transformadores sumergidos en aceite debe ser polaridad negativa. En cuanto al tap del cambiador de derivaciones de la bobina, puede el fabricante o cliente seleccionar el tap en donde se realice el ensayo, que puede ser el nominal.
- **Tolerancias.** – Se especifica un valor de ± 3 % para el voltaje de cresta del BLS.

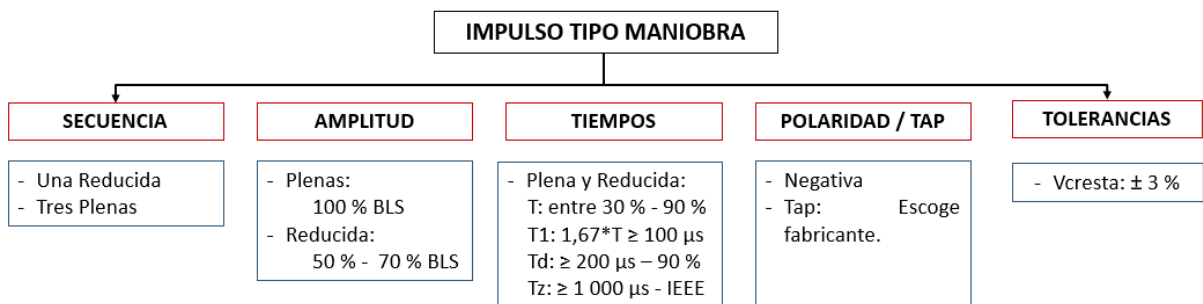


Fig. 18. Resumen de requisitos del ensayo de voltaje de impulso tipo maniobra

1.2.6. Sistema de pruebas de Voltaje de Impulso

Un sistema de generación de voltaje de impulso [3] esta generalmente conformado por:

- Generador de impulso
- Equipos de medición de voltaje
- Equipos de medición de corriente
- Esferas de disparo

- Circuito de corte de Onda (“Chopping gap”)
- Sistema de tierra del circuito de prueba de impulso.

- **Generador de Impulsos**

Los generadores de impulso son utilizados para producir sobre voltajes tipo rayo y maniobra, para las pruebas de transformadores.

La operación de un circuito básico para voltajes de impulso debe ser explicado por el circuito equivalente de la figura 19, cuando el condensador de impulso (C_1) se carga a través de una resistencia de carga (R_L) hasta el voltaje V_0 de rompimiento del dieléctrico que separa las esferas de arranque (G), en ese instante, el condensador C_2 es cargado a través de la resistencia R_1 , la cual forma el frente del voltaje de impulso. Al mismo tiempo, el capacitor de impulso C_1 es descargado a través de la resistencia de cola R_2 y forma el voltaje de impulso de cola. La superposición de ambos procesos, entrega un voltaje pico V_{ip} el cual es menor al voltaje V_0 de las esferas de arranque (G).

El voltaje de impulso de frente es determinado principalmente por la constante de tiempo τ_f y la de cola por τ_t , expresada por las ecuaciones 1 y 2, respectivamente .

$$\tau_f = R_1 * C_1 \tag{1}$$

$$\tau_t = R_2 * C_2 \tag{2}$$

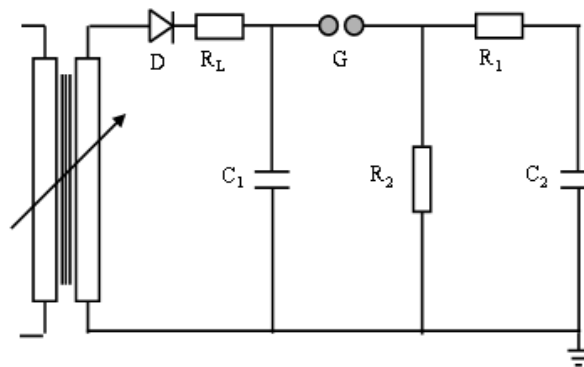


Fig. 19. Circuito básico de generador de voltaje de impulso

La relación entre los dos voltajes (V_{ip} y V_0), ecuación 3, entregados se denomina factor de eficiencia (también conocido como factor de utilización) del generador de impulso básico [11].

$$\eta = \frac{V_{ip}}{V_0} < 1 \tag{3}$$

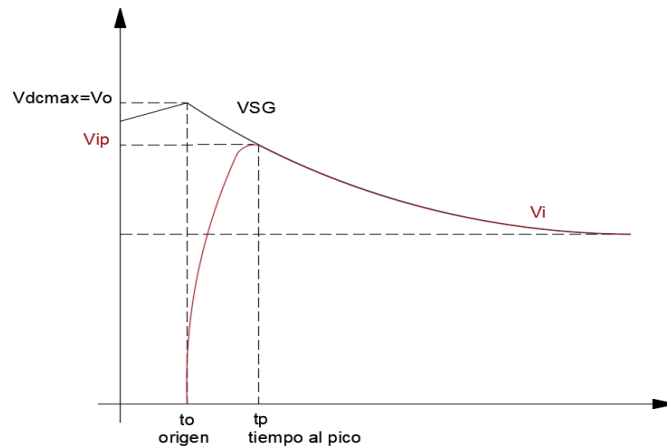


Fig. 20. Diferencia entre Vo y Vip

El factor de eficiencia η , ecuación 4, puede también ser entendido como el producto de la eficiencia η_s dependiendo de la forma del impulso y la eficiencia η_c dependiendo de los parámetros del circuito.

$$\eta = \eta_s * \eta_c \quad (4)$$

La eficiencia η_s aumenta con la relación entre el tiempo de cola y frente del impulso a ser generado. Cuando un impulso tipo rayo (1,2 / 50) debe ser generado, la relación es por ejemplo aproximadamente 40, cuando voltaje de impulso tipo maniobra es generado (250 / 2 500) la relación es solo aproximadamente 10. La eficiencia η_c depende principalmente de la relación entre el condensador de impulso y el de carga, como lo describe [11]. El condensador de impulso es mucho mayor al condensador de carga. El más alto es la eficiencia del circuito. De manera general el factor de eficiencia del impulso tipo rayo es relativamente elevado ($\eta \approx 0,85 \dots 0,95$) y la eficiencia del impulso tipo maniobra es marcadamente menor ($\eta \approx 0,70 \dots 0,80$).

Las dificultades encontradas con esferas separadas para el arranque de muy altos voltajes, el incremento del tamaño físico de los elementos del circuito, los esfuerzos para obtener voltajes DC para cargar C1 y los problemas para suprimir descargas tipo corona desde la estructura hacia los terminales durante el periodo de carga, hacen que el circuito de una sola etapa presente inconvenientes ante altos voltajes.

Es así que, en el año 1 923, el profesor alemán Erwin Marx diseñó el llamado generador Marx, en donde un número de condensadores eran cargados en paralelo a través de una resistencia óhmica elevada y descargados en serie a través de las esferas separadas, la

figura 21 [3], ilustra lo indicado; en donde los condensadores C_{gs} son cargados en paralelo a través de la resistencia R_1 y la resistencia R_{ps} de cada etapa, y la descarga inicia a través de la esfera de ignición ZFS , que a su vez provoca el arranque de las esferas SFS de cada etapa, poniendo en serie el circuito para la descarga de los condensadores C_{gs} y la carga del condensador del objeto bajo prueba denominado como C . El voltaje de salida es la suma de los voltajes cargados en cada condensador.

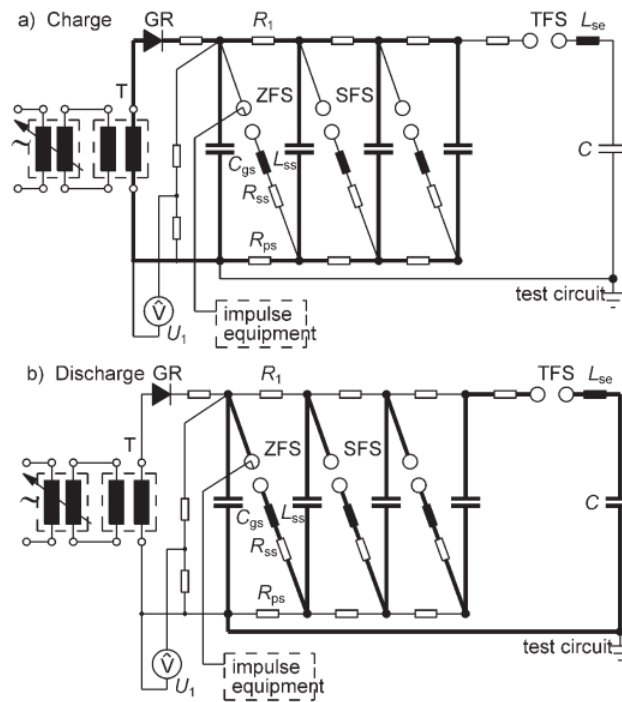


Fig. 21. Generador de impulso tipo Marx, carga y descarga

De la figura 21 [3], se tiene:

- T: Transformador de alto voltaje
- GR: Rectificador de voltaje
- R_1 : Resistencias de carga
- U_1 : Voltaje de carga por etapa
- C_{gs} : Condensadores por etapa
- R_{ss} : Resistencia de amortiguamiento por etapa
- R_{ps} : Resistencia de descarga por etapa
- L_{ss} : Inductancia parásita por etapa
- ZFS: Esfera de ignición
- SFS: Esfera de encendido por etapa
- TFS: Esfera de desconexión
- L_{se} : Inductancia parásita externa

C: Capacitancia de carga del objeto bajo prueba

Así, un generador de voltaje de impulso de n etapas, cargado con un voltaje DC V_o , que tenga un factor de eficiencia η , entrega el siguiente voltaje de impulso V_{im} , ecuación 5.

$$V_{im} = n * \eta * V_o \quad (5)$$

Según [6], la mínima energía del generador de impulso requerido, ecuación 6, para un tiempo de cola de 50 μ s durante la prueba de impulso en un transformador puede ser estimada a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{min} = \frac{100 * 2\pi * f * (t_2)^2}{z * U^2} * \left(\frac{U_{LI}}{\eta}\right)^2 * Sr \quad (6)$$

Donde:

E_{min} : Es la mínima energía requerida para el generador de impulsos en julios

f: Es la frecuencia nominal del transformador en Hz

t_2 : Es el tiempo de cola en segundos; $t_2 = 50 \times 10^{-6}$ s

z: Es la impedancia de cortocircuito en %

U: Es el voltaje nominal del bobinado en voltios, fase a fase

U_{LI} : Es el voltaje de prueba de impulso tipo rayo del bobinado bajo prueba en voltios

η : es la eficiencia en por unidad del generador;

Sr: Es la potencia nominal del transformador en VA para la impedancia z definida.

- **Nivel de Aislamiento**

La norma IEEE [4], indica que la resistencia dieléctrica del aire decrece cuando se incrementa la altura, debido a la disminución de la densidad del aire. Por tal motivo, muestra que se deben usar los factores de corrección indicados en la tabla 7 para obtener una adecuada resistencia dieléctrica del aire en altitudes superiores a los 1 000 msnm.

TABLA 7. Factor de corrección por la altura

Altitud (m)	Factor de corrección
1 000	1,00
1 200	0,98
1 500	0,95
1 800	0,92
2 100	0,89
2 400	0,86
2 700	0,83

3 000	0,80
-------	------

El generador de impulsos y otros componentes de alto voltaje necesitan distancias suficientes hacia tierra o hasta objetos del lugar donde se instale y vaya a funcionar. La figura 22, muestra las distancias de separación recomendadas, en donde H, es la altura total del equipo y D es aproximadamente H/2 y L x B son las dimensiones del largo y ancho de la base.

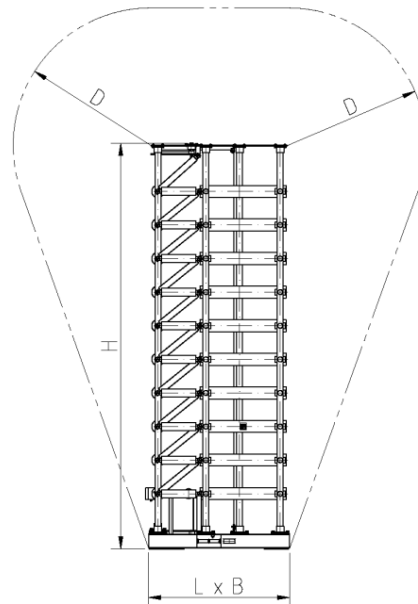


Fig. 22. Distancias de seguridad

- **Los oscilogramas de los impulsos**

Todos los impulsos aplicados a un transformador serán grabados por un osciloscopio o por un registrador digital de transitorios. Estos oscilogramas incluirán los de voltaje y los de corriente a tierra de todos los impulsos de onda plena reducida y onda plena.

Cuando los informes requieren incluir los oscilogramas, se entregarán los registros del voltaje y corriente de la onda plena reducida, de las dos ondas cortadas y la onda plena.

Cuando los transformadores a los que se les aplica las pruebas de impulso de frente de onda requieren informes que incluyan los oscilogramas, se entregarán los registros del voltaje y corriente de la onda plena reducida, de los dos frentes de ondas, de las dos ondas cortadas y la onda plena.

La medición de la corriente a tierra se realiza, precisamente, a través de una impedancia de bajo valor (que puede ser considerada equivalente de una tierra sólida), conectada entre los terminales puestos a tierra y tierra.

Los tiempos de barrido deben estar en el orden de 2 μ s a 5 μ s para las pruebas de la frente de onda y para las pruebas de onda cortada. De 50 μ s a 100 μ s para las pruebas de onda plena y 100 μ s a 600 μ s para la medición de corriente a tierra.

- **Detección de fallas**

Dado la naturaleza de las fallas en la prueba de impulsos, una de las materias más importantes a considerar es la detección de estas. Existen varios métodos para la detección de fallas del aislamiento.

- **Método de oscilogramas de corrientes a tierra.**

En este método de detección de falla, el impulso de corriente en el terminal del devanado que se prueba es registrado por medio de un osciloscopio, o por un registrador digital apropiado conectado a través de la impedancia de bajo valor insertada entre el terminal que se conectaría normalmente a tierra y la tierra.

Cualquiera diferencia en la forma de la onda de corriente entre la onda plena reducida y la onda plena final observada en la comparación de los dos oscilogramas puede ser indicación de falla o de desviaciones debido a causas de otra índole. Los ejemplos de causas probables de formas de onda diferentes son el funcionamiento de dispositivos de protección, saturación del núcleo o condiciones en el circuito de prueba externo al transformador.

Estas causas deben investigarse totalmente y deben explicarse con nuevas aplicaciones de ondas plenas reducidas y ondas plenas.

El método de oscilogramas de corrientes a tierra no es conveniente para aplicarlo con las pruebas de onda cortada.

- **Otros métodos de detección de fallas**

a) Método del oscilograma de voltaje. Cualquier diferencia inexplicada entre la onda plena reducida y la onda plena final observado en la comparación de los dos oscilogramas de voltaje o comparando las ondas cortadas y a sus ondas antes del tiempo de corte, es indicación de falla.

b) Ruptura en algún entrehierro. Durante la prueba de onda cortada, un arco eléctrico en cualquier parte externa al dispositivo de corte, cuando el oscilograma de voltaje muestra bien la onda cortada, es una indicación definitiva de fallo dentro del transformador o en el circuito de prueba.

- c) Ruido. Un ruido raro dentro del transformador al momento de aplicar el impulso es una indicación de problema. El tal ruido debe investigarse.
- d) Método de medición de voltaje y corriente inducidos. Las mediciones de voltaje y corriente inducidos en otro devanado también pueden emplearse para la detección de falla.

1.3. Fundamentación Metodológica

La investigación del presente proyecto está basada sobre la metodología descriptiva, deductiva - inductiva y cuantitativa.

Se toma como descriptiva porque se realiza la investigación a través de fuentes primarias y secundarias para la investigación, tales como libros, normas, papers, tesis, catálogos de fabricantes, etc. A través de éste método, se conocerán, entenderán y describirán los aspectos principales de los transformadores de potencia, sus características, tipos, requisitos y pruebas/métodos de ensayos, y que en este caso particularmente se profundiza en las especificaciones dadas para las pruebas de voltajes de impulso y los requisitos del Nivel Básico de Aislamiento (BIL) o también conocido como nivel de aislamiento al impulso tipo rayo, para transformadores de distribución y potencia hasta 10 MVA – clase 69 kV, sumergidos en líquido aislante; ya que de esta manera se obtendrán los datos, los diferentes elementos, funcionamiento y particularidades que contiene un sistema de pruebas de voltaje de impulso para llevar acabo paso a paso el dimensionamiento de este considerado sistema.

Con el método deductivo, se emplearán los datos obtenidos de las normas para partir de lo general como son los principios universales, estandarizaciones, se llegará a lo particular, que formará teorías, diseños, datos, características, etc., definidos para el presente estudio. De lo general que es la teoría de transformadores se llegará a algo particular que es determinar los requisitos para dicho ensayo que tendrán concordancia con los parámetros establecidos por las normas internacionales.

Según el tipo de datos empleados, corresponde a una investigación cuantitativa, el estudio reflejará datos estimados que permitirán realizar el análisis de factibilidad económica del dimensionamiento de un Sistema de Pruebas de Voltaje de Impulso para Transformadores de Distribución y Potencia sumergidos en aceite. Se podrá realizar la comparación de un equipo montado en un laboratorio nacional Vs el dimensionado, así como se observarán pruebas realizadas a un transformador de potencia.

En resumen, el siguiente diagrama de flujo muestra la metodología general a seguir para la realización del presente proyecto.

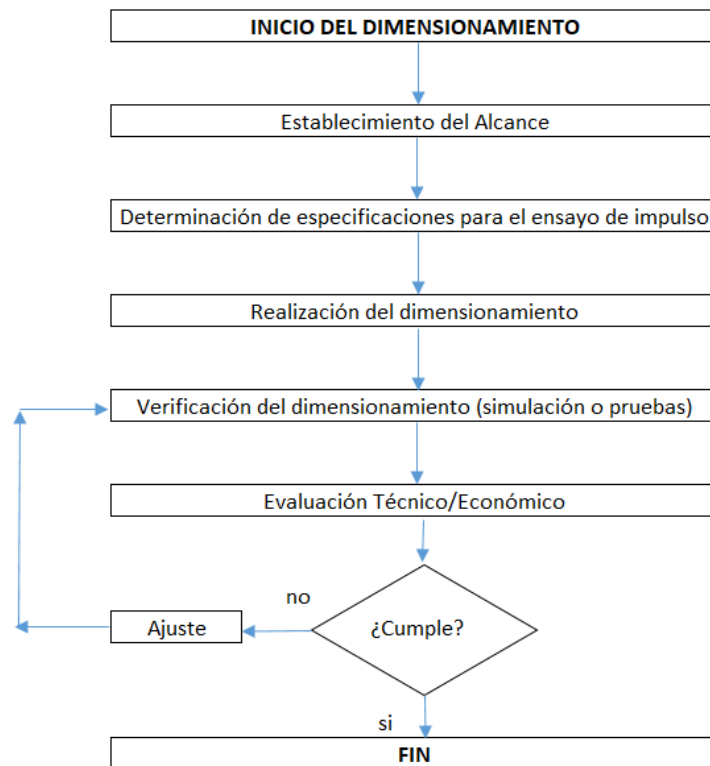


Fig. 23. Diagrama de Flujo metodológico

CAPÍTULO II

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PRUEBAS DE VOLTAJE DE IMPULSO PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA

El presente capítulo, muestra el dimensionamiento de un sistema de pruebas de voltaje de impulso para transformadores de potencia sumergidos en aceite hasta de 10 MVA, clase 69 kV, que satisface los requisitos especificados por las normativas IEEE e IEC. Para lo cual, se toma como referencia las características de los equipos del fabricante High Volt de Alemania.

2.1. Datos de Transformadores de Potencia

Para un adecuado dimensionamiento, resulta imprescindible contar con los datos técnicos de las magnitudes eléctricas de transformadores de potencia que afectan a los parámetros del sistema de pruebas de voltaje de impulso. Dentro de estas características se encuentran: la potencia aparente, los voltajes del devanado de alto voltaje, devanado de medio voltaje, nivel de aislamiento básico, impedancia de cortocircuito a la potencia nominal del transformador con la finalidad de obtener la inductancia, y capacitancias del devanado de alto y medio voltaje.

La tabla 8, muestra la información recopilada de fuentes primarias de información, como son los protocolos o reportes de pruebas de fábrica, datos de placa y reportes de pruebas en campo. La primera columna especifica el valor de potencia aparente de los transformadores, la segunda columna el número de serie, la tercera columna el nombre del fabricante, la cuarta y quinta columna el voltaje nominal tanto en el devanado de alto voltaje, así como el de bajo o medio voltaje, la sexta y séptima columnas especifican el nivel básico de aislamiento (BIL) de cada devanado, la siguiente columna muestra la impedancia de cortocircuito a la potencia nominal, la novena y décima columnas muestran las inductancias del devana de alto voltaje y medio voltaje, la décimo primera columna y décimo segunda muestran la energía mínima calculada para el generador de impulsos y las últimas 2 columnas las capacitancias del lado de alto voltaje y bajo voltaje.

TABLA 8. Datos de Transformadores de Potencia

Potencia Aparente MVA	Serie	Marca	Voltajes del Sistema		BIL		Imp. de CC Z% @ Pn %	INDUCTANCIAS		Emin Lado AV kJ	Emin Lado MV kJ	CAPACITANCIAS	
			AV kV	MV kV	AV kV	MV kV		AV mH	MV mH			CH nF	CL nF
CLASE 15 kV													
3,5	2012120044	Inatra	13,2	0,48	95	30	3,7	5	0	5,1	n/a	2,45	5,30
5,0	20-YD030-0127	Toshiba	13,8	6,90	95	70	5,9	6	1	4,2	9,1	1,39	3,82
5,0	565385	Mitsubishi	13,2	2,40	110	45	6,8	6	0	5,3	27,1	1,78	4,04
7,5	567576	Mitsubishi	13,2	2,40	110	45	9,7	6	0	5,6	28,3	2,55	5,07
7,5	328632016	Ecuatran	13,8	4,16	95	60	6,5	4	0	5,7	25,1	1,30	5,31
CLASE 25 kV													
0,9	07027219	Inatra	22,86	0,21	150	30	4,7	72	0	0,9	n/a	0,89	3,98
1,0	1020711	Ecuatran	22,00	0,23	150	30	3,1	40	0	1,6	n/a	1,19	3,95
2,0	1019811	Ecuatran	22,00	0,46	150	30	3,5	22	0	2,8	n/a	1,60	3,87
3,0	33730117	Weg	22,00	4,16	150	60	5,5	24	1	2,6	11,8	1,26	3,56
6,0	322572016	Ecuatran	22,0	6,3	150	75	6,3	13	1	4,6	14,1	1,62	4,79
CLASE 34.5 kV													
5,0	358467	Siemens	34,5	13,8	200	110	5,1	32	5	3,4	6,5	2,55	5,98
7,5	281564/01	Schneider	34,5	13,8	200	110	5,7	24	4	4,6	8,7	2,61	4,46
10,0	281557/01	Schneider	34,5	13,8	200	110	5,9	19	3	5,9	11,2	2,34	5,5
CLASE 46 kV													
4,0	327932016	Ecuatran	46,0	6,3	250	95	7,2	101	2	1,7	13,2	2,06	3,254
6,0	322162016	Ecuatran	46,0	20,0	250	125	6,9	65	12	2,7	3,5	2,02	3,46
CLASE 69 kV													
2,5	104902	Moretran	69,0	13,2	350	110	4,1	207	8	1,6	4,4	1,58	3,94
2,5	5SK004101	Osaka	69,0	13,8	350	110	5,9	298	12	1,1	2,8	1,94	3,93
3,0	442872017	Ecuatran	69,0	2,4	350	45	4,7	198	0	1,7	23,4	1,51	6,35
3,5	1016783147	Trafo	69,0	13,8	350	110	5,2	188	8	1,8	4,5	1,67	3,96
5,0	201044	ABB	69,0	13,8	350	110	6,1	154	6	2,2	5,4	2,22	4,72
5,0	XA 1994 A001	Trafo	69,0	13,8	350	110	6,4	162	6	2,1	5,2	1,55	3,77
5,0	4760622018	Ecuatran	69,0	13,8	350	110	5,6	141	6	2,4	5,9	1,43	5,15
6,3	435542017	Ecuatran	69,0	13,8	350	110	6,0	120	5	2,8	7,0	1,66	3,457
6,3	93.2.40	Pauwels	69,0	13,8	350	110	6,0	121	5	2,8	6,9	2,09	5,13
7,5	1366932018	Ecuatran	67,0	13,8	350	95	6,5	103	4,4	3,3	5,7	1,81	4,62
10,0	844430-01	France	69,0	4,2	325	60	8,7	110	0	2,7	25,0	2,25	4,84
10,0	497582018	Ecuatran	69,0	4,2	325	60	7,8	99	0	3,0	27,7	1,86	5,82
10,0	CK150101-2	Shenda	69,0	13,8	350	110	7,2	90	4	3,8	9,3	2,32	5,78
10,0	CK150101-4	Shenda	69,0	13,8	350	110	7,2	91	4	3,7	9,2	2,32	5,79
10,0	9812281211	Mitsubishi	69,0	13,8	350	110	7,5	95	4	3,6	8,8	2,35	7,07
10,0	246937	WEG	69,0	13,8	350	110	6,1	77	3	4,4	10,9	1,84	6,38
10,0	410100	Siemens	69,0	22,0	350	150	6,5	82	8	4,1	7,5	2,15	6,54
10,0	16710116	WEG	69,0	22,9	350	150	6,3	80	9	4,3	7,1	2,81	4,81

2.2. Dimensionamiento del Generador de Impulsos

2.2.1. Requerimiento de Voltaje

Los valores de voltajes de pruebas que el generador de impulsos debe satisfacer depende del nivel de voltaje de los devanados del transformador y su respectivo nivel de aislamiento tipo rayo (BIL) o tipo maniobra (BLS), mismos que fueron descritos en el capítulo I. Son aplicados de acuerdo al tipo de ensayo requerido, es decir:

- Voltajes de impulso tipo rayo reducido (50 % al 70 % BIL)
- Voltaje de impulso tipo rayo pleno (100 % BIL)

- Voltaje de impulso recortado (110 % del BIL)
- Voltaje de impulso tipo maniobra reducido (50 % al 70 % BLS)
- Voltaje de impulso tipo maniobra pleno (100 % BLS)

La tabla 9, resume los valores de los voltajes de pruebas tomados de las tablas 3, 4, 5 y 6, del capítulo I, las columnas muestran el BIL reducido, BIL pleno, impulso recortado, nivel básico de aislamiento para impulso de maniobra reducido y pleno, respectivamente, para transformadores de potencia cuya clase nominal es 69 kV y un voltaje máximo de 73 kV, siendo éste el alcance del dimensionamiento planteado.

TABLA 9. Voltajes de prueba de impulso para clase 69 kV

Parámetros	BIL Reducido 70 %	BIL Pleno 100 %	IMP. Recortado 110 %	BLS reducido 70 %	BLS pleno 100 %
	kV	kV	kV	kV	kV
Nominal	245	350	385	204	291

El mayor voltaje de prueba es 385 kV, correspondiente al impulso de onda recortada. Sobre este valor se debe tomar en cuenta la eficiencia del generador; mismo que es especificado por cada fabricante. En este caso, el fabricante High Volt, declara una eficiencia mínima del 95 % para el impulso tipo rayo y 70 % para el impulso tipo maniobra. En ensayos de puesta a punto estos valores podrían superar valores especificados.

Para cada valor especificado en la tabla 9, a través de la ecuación 7, se calculan los voltajes que el generador debe suministrar para los diferentes ensayos. Los resultados obtenidos se indican en la tabla 10, en la última fila.

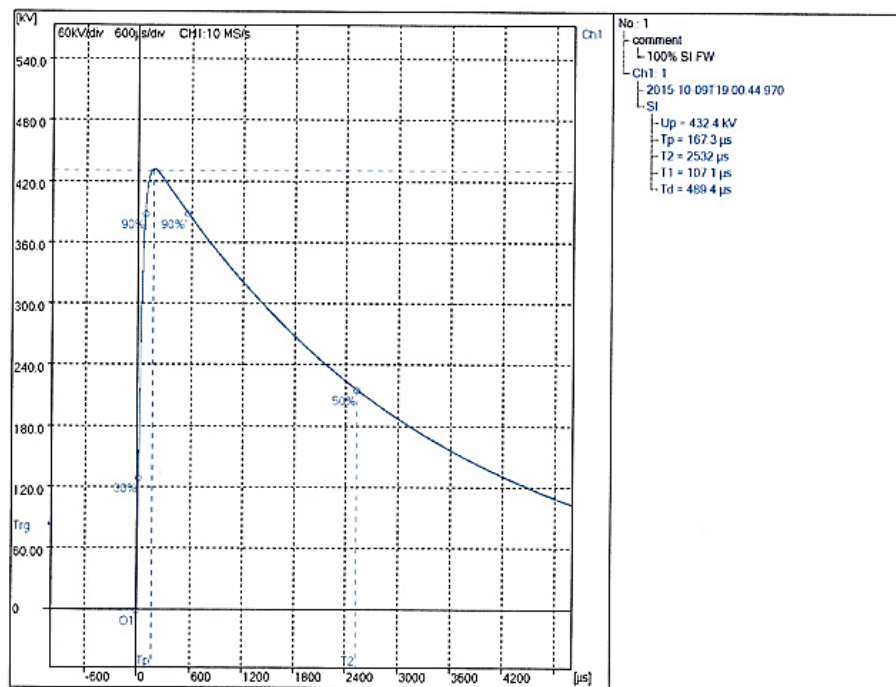
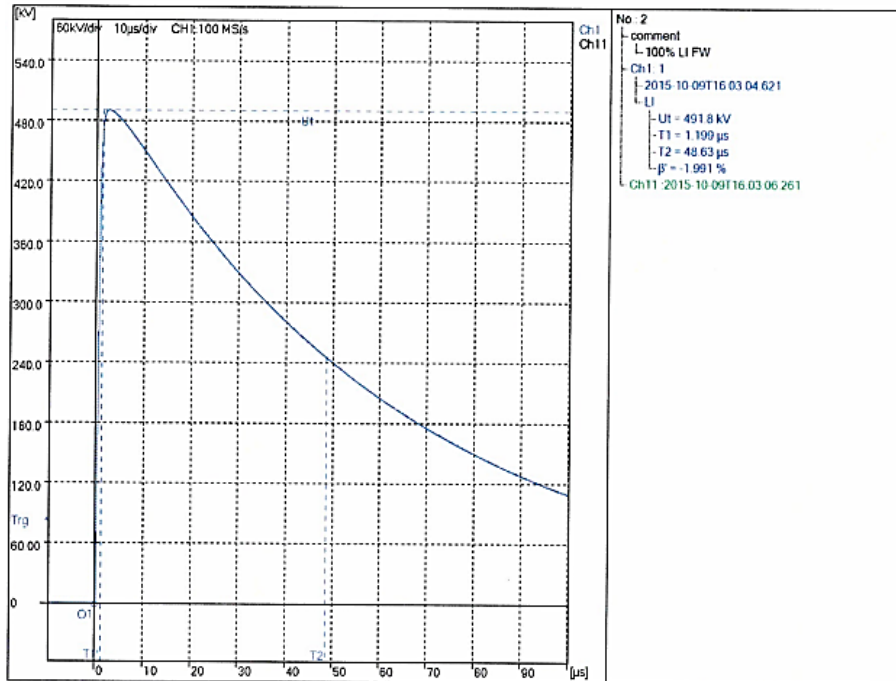
$$V_{Gen} = \frac{V_{prueba}}{\eta} \quad (7)$$

TABLA 10. Voltajes de prueba de impulso considerando la eficiencia

Parámetros	BIL Reducido 70 %	BIL Pleno 100 %	IMP. Recortado 110 %	BLS reducido 70 %	BLS pleno 100 %
	kV	kV	kV	kV	kV
Nominal	245	350	385	204	291
n (L:0,95 y S:0,70)	258	368	405	291	416

La figura 24 muestra un ensayo de impulso tipo rayo, en donde el valor de voltaje de impulso alcanzado (V_{ip}) es de 491,8 kV y la figura 25 muestra un ensayo de impulso tipo maniobra cuyo V_{ip} es de 432,4 kV, para un Voltaje de impulso de arranque (V_o)

para cada prueba fue de 500 kV. De esta manera se obtiene la eficiencia sin carga (V_{ip}/V_o) de 98,36 % y 86,48 %, respectivamente.



Tomando las consideraciones y tolerancias del caso, el voltaje del generador dimensionado es de 400 kV para una altura de operación de hasta 1 000 msnm. Para el alcance planteado, el fabricante del equipo generador de impulsos debe garantizar las

distancias dieléctricas de aislamiento para una altura de operación de 3 000 msnm o a su vez, seleccionar un generador con un factor de corrección por la altura de 0,80, valor especificado en la tabla 7 del capítulo I.

En la actualidad se utilizan generadores tipo Marx de varias etapas, cada etapa ya sea de 100 kV o 200 kV; en donde los condensadores que lo forman son cargados en paralelo, para nuestro caso los condensadores seleccionados son aquellos con voltajes DC de 100 kV (para cada etapa), y conectados en serie a través de electrodos separados para obtener el voltaje de salida deseado. De esta manera el mínimo voltaje para el generador de impulsos que cubre el rango deseado es de 500 kV, con 5 etapas de 100 kV cada una.

2.2.2. Requerimiento de Energía

La mínima energía requerida para el generador de impulsos se calcula a través de la ecuación 8, de la siguiente manera:

$$E_{min} = \frac{100 * 2\pi * f * (t_2)^2}{z * U^2} * \left(\frac{U_{LI}}{\eta}\right)^2 * Sr \quad (8)$$

En donde:

$f = 60$ Hz,

$t_2 = 50$ μ s con una tolerancia del ± 20 %,

$U_{AV} = 69\ 000$ V, $U_{MV} = 13\ 200$ V, $U_{LIAV} = BIL_{AV} = 350\ 000$ V, tanto para la norma IEEE e IEC con una tolerancia de ± 3 %,

$U_{LIMV} = BIL_{MT\ IEC} = 125\ 000$ V, dado en la tabla 6, $\eta = 0,95$, Según el fabricante High Volt,

$Sr = 10\ 000\ 000$ VA, $z = 8$ % sin LTC tomado de [12], tolerancia de $\pm 7,5$ % según [4].

El siguiente cálculo está dado para el devanado de AV ($E_{min\ AT\ BIL}$) para un transformador de 10 MVA, sin aplicar ninguna tolerancia. El cálculo para el devanado de MV ($E_{min\ MV\ BIL}$) para el BIL mayor según la IEC aplicando las tolerancias que afectan en el cálculo, esto es un 20 % más en el tiempo T2, un 3 % adicional en el voltaje de pico y un -7,5 % en el valor de impedancia de cortocircuito, y finalmente el cálculo el valor de impedancia de cortocircuito menor de los transformadores de potencia dado en la tabla 8.

$$E_{min\ AV\ BIL} = \frac{100 * 2\pi * 60 * (50 * 10^{-6})^2}{8 * 69\ 000^2} * \left(\frac{350\ 000}{0,95}\right)^2 * 10\ 000\ 000$$

$$E_{\min AV BIL} = 3\,359\,J = 3,4\,kJ$$

$$E_{\min MV BIL} = \frac{100 * 2\pi * 60 * (60 * 10^{-6})^2}{7,4 * 13\,200^2} * \left(\frac{129\,000}{0,95}\right)^2 * 10\,000\,000$$

$$E_{\min MV BIL} = 19\,333\,J = 19,3\,kJ$$

La tabla 11, muestra los resultados obtenidos para los diferentes voltajes de pruebas para ensayo de voltaje de impulso tipo rayo, tanto para el devanado de AV clase 69 kV con BIL 350 kV y el devanado de MV clase 15 kV ($V_{\text{nominal}} 13,2\,kV$), con BIL 110 kV y 125 kV dados por las normas IEEE e IEC, respectivamente.

TABLA 11. Energía mínima para el generador de impulso

NIVEL DE PRUEBA	Emin. sin Tolerancias	Emin. con Tolerancia t2 (+ 20 %)	Emin. con Tolerancias t2 (+ 20 %) + ULI (+ 3 %)	Emin. con Tolerancias t2 (+ 20 %) + ULI(+ 3 %) + z (- 7.5 %)
	kJ	kJ	kJ	kJ
AV BIL 350 kV / 69 kV	3,4	4,8	5,1	5,5
MV BIL 110 kV / 13,8 kV	8,3	11,9	12,7	13,7
MV BIL 125 kV / 13,8 kV	10,7	15,4	16,4	17,7
MV BIL 110 kV / 13,2 kV	9,1	13,1	13,8	15,0
MV BIL 125 kV / 13,2 kV	11,7	16,9	17,9	19,3

La primera columna de la tabla 11 identifica el devanado de AV y MV, según su BIL. La siguiente columna presenta el cálculo de energía mínima para el generador de impulsos sin considerar las tolerancias en las variables donde las normas permiten; la tercera columna toma en cuenta la tolerancia del 20 % en el tiempo de cola; la cuarta considera adicionalmente la tolerancia del + 3% en el voltaje pico de prueba y la quinta columna adicionalmente considera un -7,5% especificado por [4] en la impedancia de cortocircuito. Dadas las consideraciones la energía mínima para el alcance planteado es 19,3 kJ, tomando en cuenta los datos normalizados. Para los datos de transformadores especificados en la tabla 8, se realiza el cálculo de energía mínima para el lado de AV y lado de MV, cuyos resultados se observa en las columnas 9 y 10 de la tabla 12.

TABLA 12. Resultados de cálculo de energía mínima

Potencia Nominal MVA	Serie	Marca	Voltajes del Sistema		BIL		Imp. de CC Z% @ Pn %	Emin Lado AV kJ	Emin Lado MV kJ
			AV kV	MV kV	AV kV	MV kV			
CLASE 15 kV									
3,5	2012120044	Inatra	13,2	0,48	95	30	3,7	5,1	n/a
5,0	20-YD030-0127	Toshiba	13,8	6,90	95	70	5,9	4,2	9,1
5,0	565385	Mitsubishi	13,2	2,40	110	45	6,8	5,3	27,1
7,5	567576	Mitsubishi	13,2	2,40	110	45	9,7	5,6	28,3
7,5	328632016	Ecuatran	13,8	4,16	95	60	6,5	5,7	25,1
CLASE 25 kV									
0,9	07027219	Inatra	22,86	0,21	150	30	4,7	0,9	n/a
1,0	1020711	Ecuatran	22,00	0,23	150	30	3,1	1,6	n/a
2,0	1019811	Ecuatran	22,00	0,46	150	30	3,5	2,8	n/a
3,0	33730117	Weg	22,00	4,16	150	60	5,5	2,6	11,8
6,0	322572016	Ecuatran	22,0	6,3	150	75	6,3	4,6	14,1
CLASE 34.5 kV									
5,0	358467	Siemens	34,5	13,8	200	110	5,1	3,4	6,5
7,5	281564/01	Schneider	34,5	13,8	200	110	5,7	4,6	8,7
10,0	281557/01	Schneider	34,5	13,8	200	110	5,9	5,9	11,2
CLASE 46 kV									
4,0	327932016	Ecuatran	46,0	6,3	250	95	7,2	1,7	13,2
6,0	322162016	Ecuatran	46,0	20,0	250	125	6,9	2,7	3,5
CLASE 69 kV									
2,5	104902	Moretran	69,0	13,2	350	110	4,1	1,6	4,4
2,5	5SK004101	Osaka	69,0	13,8	350	110	5,9	1,1	2,8
3,0	442872017	Ecuatran	69,0	2,4	350	45	4,7	1,7	23,4
3,5	1016783147	Trafo	69,0	13,8	350	110	5,2	1,8	4,5
5,0	201044	ABB	69,0	13,8	350	110	6,1	2,2	5,4
5,0	XA 1994 A001	Trafo	69,0	13,8	350	110	6,4	2,1	5,2
5,0	4760622018	Ecuatran	69,0	13,8	350	110	5,6	2,4	5,9
6,3	435542017	Ecuatran	69,0	13,8	350	110	6,0	2,8	7,0
6,3	93.2.40	Pauwels	69,0	13,8	350	110	6,0	2,8	6,9
7,5	1366932018	Ecuatran	67,0	13,8	350	95	6,5	3,3	5,7
10,0	844430-01	France	69,0	4,2	325	60	8,7	2,7	25,0
10,0	497582018	Ecuatran	69,0	4,2	325	60	7,7	3,0	28,2
10,0	CK150101-2	Shenda	69,0	13,8	350	110	7,2	3,8	9,3
10,0	CK150101-4	Shenda	69,0	13,8	350	110	7,2	3,7	9,2
10,0	9812281211	Mitsubishi	69,0	13,8	350	110	7,5	3,6	8,8
10,0	246937	WEG	69,0	13,8	350	110	6,1	4,4	10,9
10,0	410100	Siemens	69,0	22,0	350	150	6,5	4,1	7,5
10,0	16710116	WEG	69,0	22,9	350	150	6,3	4,3	7,1

2.2.3. Dimensionamiento

Los valores principales para el dimensionamiento del generador de impulsos estimados son, 500 kV voltaje pico y 19,3 kJ energía mínima para datos estandarizados de tiempo, impedancia y voltajes. Ahora bien, se puede observar en la tabla 12 y figura 26, que la mayor distribución de datos de energía mínima calculada no sobrepasa los 15 kJ y un

porcentaje mínimo se encuentra por debajo de los 30 kJ, sin embargo, aplicando las respectivas tolerancias no sobrepasa los 25 kJ.

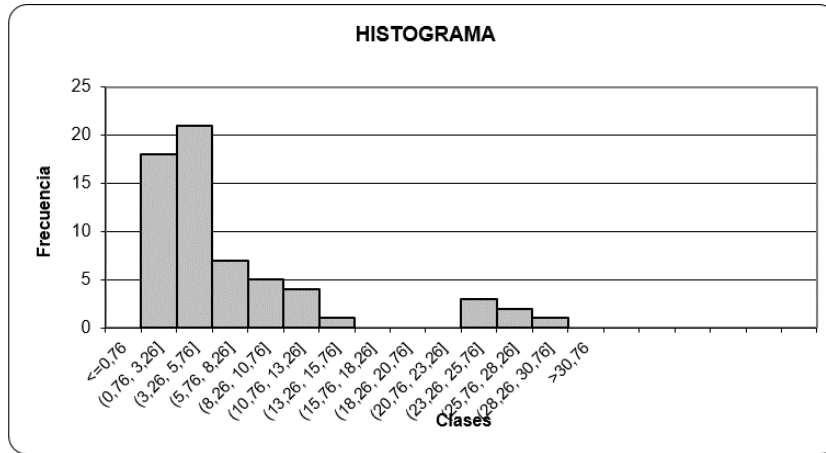


Fig. 26. Distribución de Energía mínimas calculadas

El fabricante High Volt en su hoja de datos técnicos [13], muestra las diferentes opciones para generadores de impulso, considerando el voltaje total de carga, el número de etapas, la energía total de carga y la capacitancia de impulso, como se observa en la tabla 13.

TABLA 13. Opciones de Generadores de impulso

Energía por Etapa		5 kJ	
Voltaje Total de carga	Número de etapas	Energía Total Cargada	Capacitancia de impulso
kV		kJ	nF
100	1	5,0	1 000
200	2	10,0	500
300	3	15,0	333
400	4	20,0	250
500	5	25,0	200
600	6	30,0	167
700	7	35,0	143
800	8	40,0	125
900	9	45,0	111
1 000	10	50,0	100
1 100	11	55,0	91
1 200	12	60,0	83
Tiempo mínimo entre impulsos (s):			40
Capacitancia por etapa:			1 x 1 uF / 100 kV

Expuesto lo anterior, el generador de impulsos que cumple los requerimientos evaluados es el de 500 kV, 5 etapas de capacitancias de 100 kV / 1 000 nF, y 25 kJ de energía total

de carga. Las características físicas, se observa en la tabla 14 y figuras 27 y 28, dadas por High Volt.

TABLA 14. Características mecánicas para generadores de impulso

Voltaje Total de carga kV	Número de etapas	Altura H mm	Base Largo x Ancho L x B Para etapas de 5 kJ mm	Peso Para etapas de 5 kJ kg
100	1	1050	1 425 x 835	327
200	2	1390		423
300	3	1730		520
400	4	2070		616
500	5	2410		713
600	6	2750		810
700	7	3090		906
800	8	3430		1003
900	9	3770		1099
1000	10	4110		1196
1100	11	4450		1293
1200	12	4790		1389

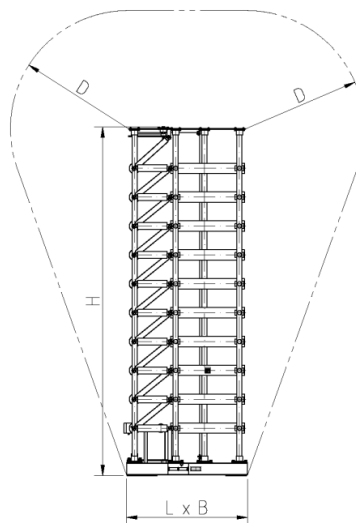


Fig. 27. Cotas para dimensiones físicas del generador de impulsos

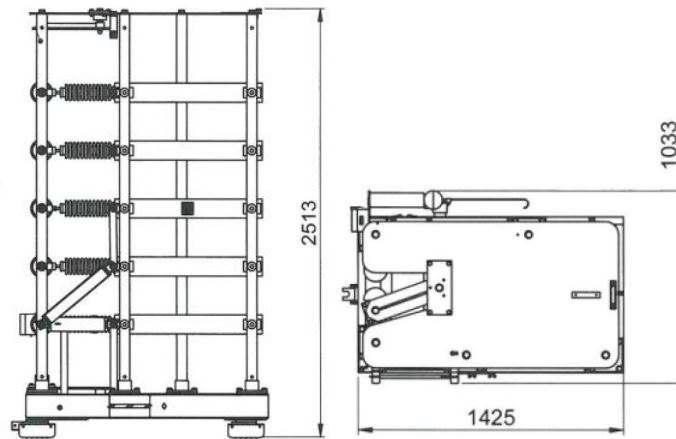


Fig. 28. Dimensiones físicas de un generador de impulsos de 500 kV / 25 kJ

2.3. Dimensionamiento de la unidad de carga

2.3.1. Requerimiento de magnitudes eléctricas

La fuente de carga de alto voltaje que se utiliza es una de corriente directa con rectificación de media onda; por lo tanto, ésta fuente se encuentra conformada por un transformador elevador, un condensador y un diodo rectificador; mismo que según su conexión tiene la capacidad de carga del generador con polaridad positiva o polaridad negativa; siendo ésta última, la recomendada por las normativas para la realización de ensayos en transformadores de potencia sumergidos en aceite.

Por lo tanto, los condensadores del generador de impulsos son cargados a través de una fuente de corriente directa con una capacidad de hasta 100 kV (valor nominal de los condensadores), y una energía de 25 kJ (5 kJ x 5 etapas), pudiendo los intervalos de tiempo entre impulsos ser iguales o inferiores a 40 segundos. Intervalo de tiempo límite mínimo que especifica el fabricante High Volt para el generador de impulsos seleccionado.

$$E = V * I * t \tag{9}$$

Donde:

E, es la energía total en Joules

V, es el valor de voltaje de cada etapa en voltios

I, el valor de corriente en amperios

t, el tiempo mínimo entre impulsos del generador, en segundos

Por lo tanto, para el cálculo de corriente se tiene,

$$I = \frac{E}{V * t} = \frac{25\ 000}{100\ 000 * 40} = 6,25\ mA$$

La corriente calculada de 6,25 mA, es la corriente mínima que la fuente debe suministrar para la capacidad plena del generador de impulsos seleccionado.

Las unidades de carga tienen incluido el sistema de control, con la finalidad de combinadamente controlar la carga del voltaje de prueba del ensayo requerido.

2.3.2. Dimensionamiento

En la unidad de control, a más de otros elementos, se encuentran instalados los reguladores por medio de tiristores para el control del voltaje y la corriente de carga, los interruptores de operación, relés auxiliares, controladores lógicos programables (PLCs) tipo SIMATIC, convertidores de medición, amplificadores aislados y filtros para las entradas y salidas de digital a analógico. Adicionalmente, la utilización de fibra óptica para la transmisión y recepción de datos eliminan la posibilidad de errores por inducciones eléctricas y electromagnéticas.

High Volt, en su hoja de datos técnicos, especifica las unidades de carga y control, disponibles para acoplamiento a generadores de impulso, mismos que son indicados en la tabla 15.

TABLA 15. Opciones de Unidades de Carga

Tipo	Serie	Voltaje de etapa kV	Máxima energía de kJ	Corriente de carga mA	Medio de aislamiento	Largo mm	Ancho mm	Alto mm	Peso kg	Alimentación V 50/60 Hz
GES 30/100	L	100	67,5	30	Aire	1 390	945	1 510	322	230
GES 30/100 E	L	100	67,5	30	Aire	1 390	945	1 510	332	230
GES 60/100	M	100	120	60	Aire	1 380	1 145	1 505	390	400
GES 60/100 E	M	100	120	60	Aire	1 380	1 145	1 505	400	400
GES 150/100	M	100	250	150	Aire	1 380	1 145	1 505	476	400
GES 150/100 E	M	100	250	150	Aire	1 380	1 145	1 505	486	400

La figura 29, proporciona las dimensiones físicas aproximadas de la unidad de carga seleccionada.

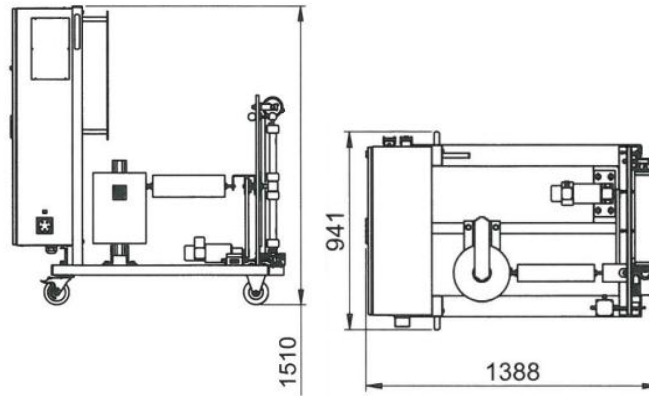


Fig. 29. Dimensiones físicas de la unidad de carga GES 30/100E

2.4. Dimensionamiento del divisor de voltaje

2.4.1. Requerimiento de magnitudes eléctricas

El divisor de medición de voltaje es utilizado para convertir los voltajes de impulso, tanto de onda tipo rayo, así como de conmutación, en este caso desde 500 kV hasta niveles inferiores a 1 kV. Este voltaje de salida es medido ya sea por un voltímetro-pico o por un sistema de almacenamiento de pruebas de impulso.

El divisor de voltaje a utilizarse debe tener:

- Condensador de Alto Voltaje.
- Condensador de bajo voltaje, montado sobre la base.
- Base con ruedas.
- Cable de medición con una impedancia de 50 Ohm.
- Electrodo superior, diseñado para voltajes de impulso.

Los divisores de impulso sirven también como un condensador de carga básico para generadores de voltaje de impulso, cuando éstos se encuentren sin el objeto bajo prueba.

2.4.2. Dimensionamiento

El condensador de alto voltaje está fabricado con unidades únicas de condensadores impregnados en aceite. Los condensadores de alto voltaje están conectados en serie con las resistencias de amortiguamiento insertadas y el condensador de bajo voltaje está localizado en la parte inferior de la columna del divisor de voltaje. Este diseño compacto con la configuración en paralelo de condensadores de bajo voltaje proporciona el valor de baja inductancia necesaria. El divisor tiene que ser conectado a una unidad de medición de impedancia elevada ($\geq 1 \text{ M}\Omega$, $\leq 100 \text{ pF}$). La tabla 16 presenta las opciones que el fabricante High Volt posee.

El divisor de voltaje seleccionado es el de 500 kV, con una capacitancia de 1 600 pF.

Según [14], la capacitancia total del divisor de voltaje debe ser al menos 10 veces menor a la capacitancia total del generador de impulsos, con la finalidad de que éste no influya en la forma de onda de la señal aplicada. Como se puede observar a continuación la relación calculada es 125 veces, valor que cumple lo indicado.

$$F = \frac{C_{gen}}{C_{div}} \quad (10)$$

$$F = \frac{200 \text{ nF}}{1,6 \text{ nF}} = 125 \text{ veces}$$

TABLA 16. Opciones de Divisores de Voltaje

Voltaje de impulso tipo rayo (LI) 1,2/50	Voltaje de impulso tipo maniobra (SI) 250/2 500	Voltaje AC (RMS) 50/60 Hz	Capacitancia Alto Voltaje pF	Resistencia Alto Voltaje Amortiguamiento Ohm	Altura H *Sin electrodo de prueba m	Ancho C m	Peso *Sin electrodo de prueba kg
kV	kV	kV	pF	Ohm	m	m	kg
100	90	25	8 000	12,5	0,9	0,65	41
200	180	50	4 000	25	0,9	0,65	43
300	270	75	2 670	37,5	1,2	0,65	48
400	360	100	2 000	50	1,47	0,65	52
500	450	125	1 600	62,5	1,79	0,65	65
600	540	150	1 330	75	2,14	1,2	90
700	630	175	1 140	87,5	2,42	1,2	105
800	720	200	1 000	100	2,72	1,2	110
900	810	225	890	113	3,02	1,2	130
1 000	900	250	800	125	3,44	1,2	210

Las dimensiones físicas aproximadas del divisor de voltaje de 500 kV se observan en la figura 30.

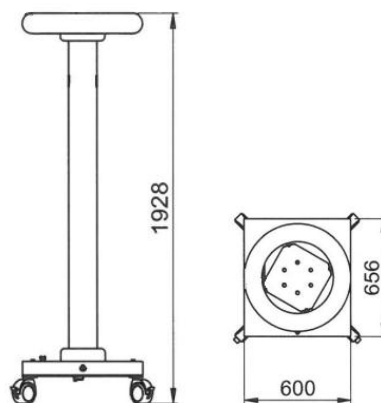


Fig. 30. Dimensiones físicas aproximadas del divisor de voltaje de 500 kV

2.5. Dimensionamiento de las resistencias de frente y cola

Las formas de onda y los tiempos de frente y cola estandarizados, indicados en el capítulo I, están directamente relacionados, principalmente con las resistencias también de frente (R_s) y cola (R_p) que deben colocarse en el circuito generador de impulsos tipo Marx, que depende de las características eléctricas del objeto bajo prueba, principalmente de la capacitancia de carga que éste posea.

En la práctica suele realizarse ensayos con parámetros de pruebas de voltaje de impulso de equipos semejantes (transformadores) anteriormente probados; en donde se tienen ya identificados los parámetros a configurar en el sistema, y en la mayoría de casos, cualquier ajuste es llevado a cabo a partir de ensayos de voltaje de impulsos reducidos (50 % del voltaje de prueba).

La figura 31, muestra el diagrama del sistema de generación de voltaje de impulsos que se ha dimensionado en los apartados anteriores; mismo que, contiene la unidad de carga (U_c), las resistencias de carga (R_c), el generador de impulsos de 5 etapas con los condensadores de carga (C_g), el divisor de voltaje (D_v) y las resistencias de frente (R_s) y de cola (R_p); en donde $R_c \gg R_s, R_p$.

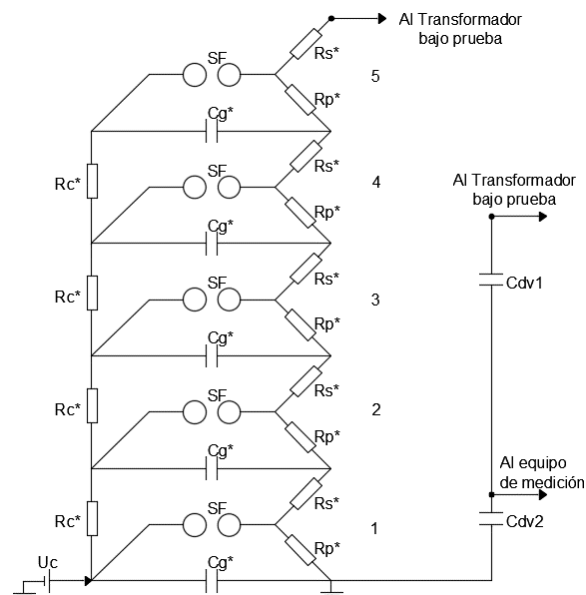


Fig. 31. Sistema de generación de voltaje de impulsos, 5 etapas, 500 kV

La figura 32, muestra como los condensadores son cargados en paralelo, a través de las resistencias de carga, hasta el valor fijado en la unidad de control. Todos los condensadores tendrán almacenado un voltaje igual a V_o^* . El tiempo de carga estará dado por $R_c \cdot U_c$ (Resistencia de carga y voltaje de carga) y el número total de etapas.

Cuando las esferas de disparo actúan instantáneamente, el generador de impulsos se descarga, los condensadores se ponen en serie a través de las resistencias R_s , sumándose el voltaje y la energía almacenada de cada uno de éstos elementos, dicho voltaje es dirigido hacia el objeto bajo prueba y al divisor de voltaje capacitivo. Dado que en donde $R_c \gg R_s, R_p$, no afecta a la descarga del condensador.

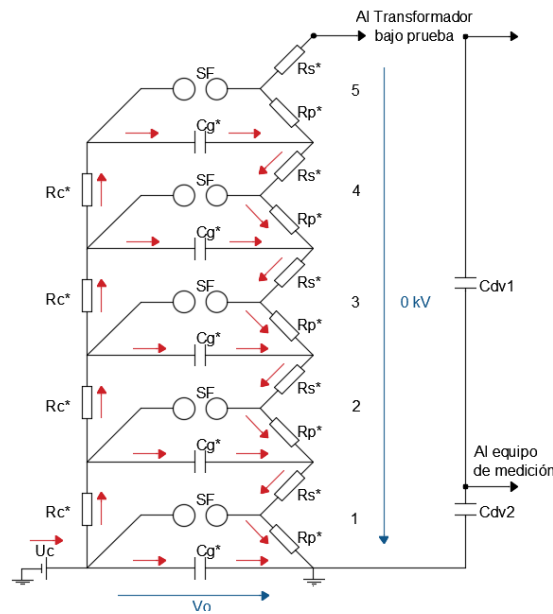


Fig. 32. Carga del generador de impulsos

La figura 33 muestra lo indicado.

El tiempo de descarga del generador de impulsos estará influenciado por:

- La capacitancia de cada etapa C_g^* ,
- Las resistencias en serie R_s^* , las resistencias en paralelo R_p^* , de cada etapa,
- La impedancia del generador,
- El divisor de voltaje C_d ,
- El objeto bajo prueba y
- El recortador de onda (chopping gap), si está incluido.

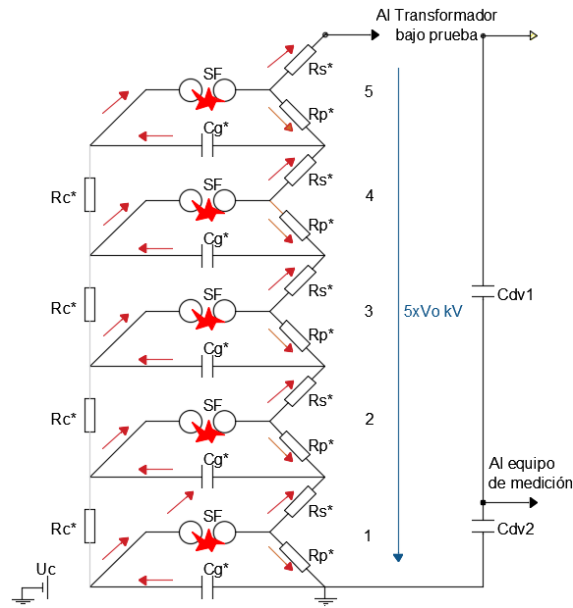


Fig. 33. Descarga del generador de impulsos

La figura 34, muestra el circuito equivalente, en donde la carga del generador (energía almacenada en C_g), será descargada sobre el objeto bajo prueba por medio de la corriente I_s y por la corriente I_p . La resistencia serie (R_s) unida a la inductancia (L) de las conexiones de alto voltaje, capacitancia del divisor (C_d) de medida y el objeto bajo prueba influyen en la corriente I_s .

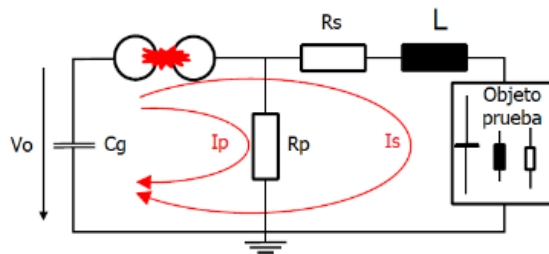


Fig. 34. Circuito equivalente en la descarga del generador de impulsos

La descarga de la capacitancia del objeto bajo prueba y divisor de voltaje, principalmente, se realiza a través de las resistencias R_s y R_p como se observa en la figura 35.

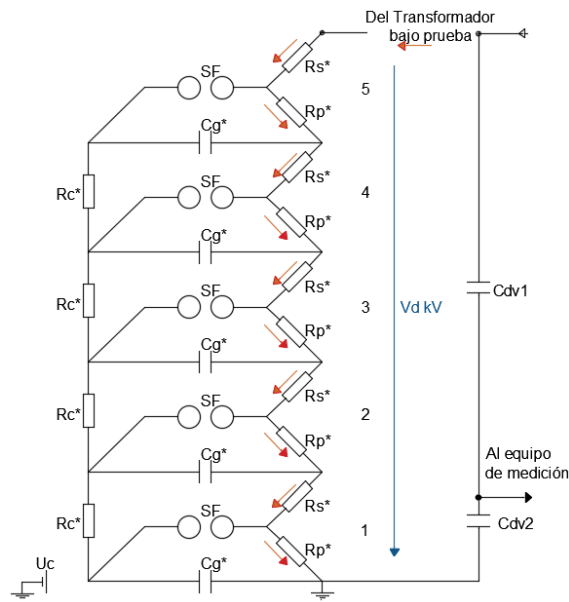


Fig. 35. Descarga de energía del objeto bajo prueba

La figura 36, muestra el circuito equivalente para un generador de impulso con objeto bajo prueba en el momento de la descarga (C). La forma de onda del voltaje de impulso es determinada en su primera etapa por la resistencia serie R_s , que afecta al tiempo de frente, la resistencia de descarga R_p afecta principalmente en la segunda etapa de la forma de onda en el tiempo de cola durante la descarga y la inductancia L_s del circuito bajo prueba (inductancia de cada etapa del generador de impulso e inductancia de las conexiones externas al objeto bajo prueba), siempre que $R_s \ll R_p$ y $C \ll C_g$, lo cual es cierto para la mayoría de configuraciones.

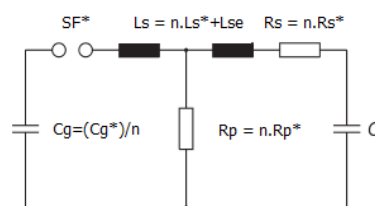


Fig. 36. Circuito equivalente de un generador de impulsos con carga

La forma de onda característica para un ensayo de voltaje de impulso tipo rayo y las formas de onda de frente y cola que la componen se observan en la figura 37.

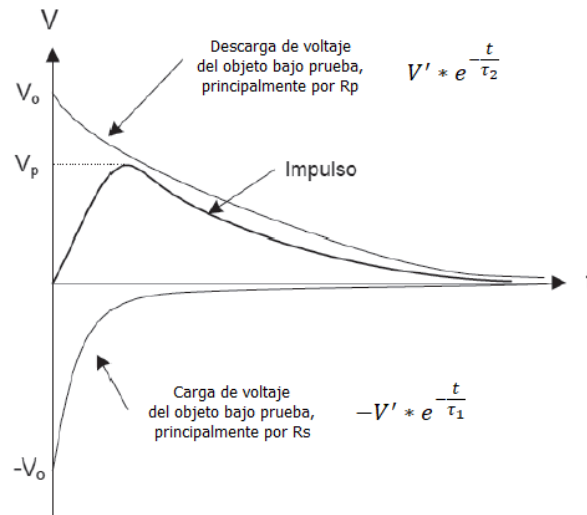


Fig. 37. Componentes de forma de onda característica de impulso de voltaje

Por lo tanto:

$$V(t) = V' * e^{-\frac{t}{\tau_2}} - V' * e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (11)$$

Siempre que $R_s \ll R_p$ y $C \ll C_g$, lo cual es verdad en la mayoría de configuraciones en una prueba de impulso, y se tiene la siguiente ecuación dada por ABB [3]:

$$V(t) \approx V' * \frac{e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}}}{1 - \frac{\tau_1}{\tau_2}} \quad (12)$$

En donde:

τ_1 es la constante de tiempo de frente y τ_2 es la constante de tiempo de cola, de la onda de voltaje de impulso, también tomados del libro de pruebas a transformadores de potencia de ABB [3], se observa en las ecuaciones 13 y 14, respectivamente.

$$\tau_1 = R_s \cdot \frac{C \cdot C_g}{C + C_g} \approx R_s \cdot C \quad (13)$$

$$\tau_2 = R_p \cdot (C + C_g) \approx R_p \cdot C_g \quad (14)$$

Por otro lado, para evitar oscilaciones de alta frecuencia, el circuito de pruebas de impulso debería tener una oscilación aperiódica, esto es demostrado mediante la ecuación 15:

$$R_s \geq \sqrt{\frac{C + C_g}{C \cdot C_g}} \cdot L_s \quad (15)$$

La inductancia L_s está compuesta por las inductancias de las resistencias de amortiguamiento, las interconexiones entre los capacitores, las conexiones de los componentes de cada etapa (aproximadamente 5 μH por etapa) y las inductancias de las conexiones externas (aproximadamente 1 μH por metro) como lo menciona ABB en [3].

Para determinar los tiempos de frente y cola, en función de las resistencias y capacitancias que involucran el circuito de prueba se utilizan los factores de proporcionalidad empíricos recomendados por Salam [15], obteniendo:

$T_1 \approx 3,06 \cdot R_s \cdot \frac{C \cdot C_g}{C + C_g}$	(16)
$T_2 \approx 0,73 \cdot R_p \cdot (C + C_g)$	(17)

El fabricante de transformadores de potencia ABB [3], realiza la distinción en la utilización de éstas ecuaciones para el circuito equivalente de la figura 36 y para transformadores con bobinados de alta inductancia ($L_t > 100 \text{ mH}$); considerando, las mismas proporcionan únicamente una guía para la estimación de los parámetros y no representan un cálculo exacto.

En donde:

$C = C_t + C_e$. Para, $C_t = C_B + C_b$. Siendo, C_b capacitancia del bobinado a tierra y C_B capacitancia del bushing. y C_e la capacitancia parásita del generador.

Otra metodología para el cálculo de las resistencias de frente R_s y de cola R_p se observa en el libro de Kuffel [16], en donde plantea las ecuaciones 18 y 19, considerando las componentes de la curva de voltaje de impulso de la figura 38.

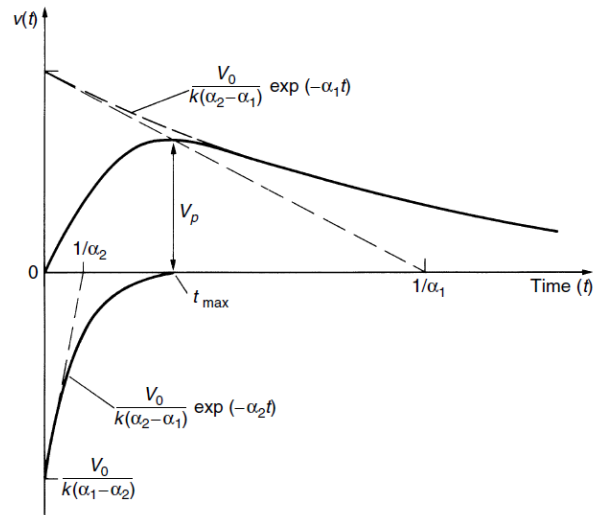


Fig. 38. Componentes de forma de onda característica de impulso de voltaje - Kuffel

$$R_s = \frac{1}{2C} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_g + C)}{\alpha_1 \alpha_2 C_g}} \right] \quad (18)$$

$$R_p = \frac{1}{2(C_g + C)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_g + C)}{\alpha_1 \alpha_2 C_g}} \right] \quad (19)$$

En donde, según de Kuffel [16], para una onda 1,2/50 μs :

$$\frac{1}{\alpha_1} = 68,2 \mu s \text{ y } \frac{1}{\alpha_2} = 0,405 \mu s$$

2.5.1. Dimensionamiento

A través de las ecuaciones planteadas tanto por ABB, así como por Kuffel, a continuación, la tabla 17, las dos últimas columnas muestran los valores calculados para las resistencias de frente R_s^* y cola R_p^* del sistema de generación de impulso con $T_1 = 1,2 \mu s$ y $T_2 = 50 \mu s$; en vacío (sin carga), es decir sin transformador de potencia y teniendo como carga la capacitancia parásita (C_e) del mismo generador de impulsos y la capacitancia del divisor de voltaje (C_{div}).

TABLA 17. Valores calculados de R_s y R_p – sin objeto bajo prueba

Fuente	C_g^* etapa	C_g Total	C_e Total	C_{div}	R_s Total	R_p Total	R_s^* etapa	R_p^* etapa
ABB	1 000 nF	200 nF	0,2 nF	1,6 nF	220 Ω	339 Ω	44,0 Ω	67,9 Ω
Kuffel	1 000 nF	200 nF	0,2 nF	1,6 nF	227 Ω	338 Ω	45,4 Ω	67,6 Ω

En base a los resultados obtenidos, para el sistema de generación dimensionado, las resistencias de frente R_s^* para cargas mayormente capacitivas (en orden de 1,6 nF – 1,8 nF) se requiere $R_s^* = 45 \Omega$. Aplicando la tolerancia del -30 %, límite bajo permitido para T1, la alternativa para cargas inductivas mayores sería $R_s^* = 32 \Omega$, de la misma manera para una tercera escala $R_s = 22 \Omega$. La energía nominal que debe soportar cada resistencia es de 5 kJ, valor nominal de cada etapa del generador de impulsos. La resistencia de cola R_p^* dimensionada para este caso sería de 67Ω y con una primera escala de + 20 % sería de 80Ω .

Colocando un objeto bajo prueba, en este caso, el transformador de potencia de la tabla 8, de 7,5 MVA clase 69 kV con una inductancia (LT) de 103 mH, es decir mayor que 100 mH, se calculan las resistencias de frente y cola de la misma manera, valores observados también en las 2 últimas columnas de la tabla 18.

TABLA 18. Valores calculados de R_s y R_p – con objeto bajo prueba

Fuente	Cg Total	Ce Total	CB	Ct	Rs Total	Rp Total	Rs* etapa	Rp* etapa
ABB	200 nF	0,2 nF	0,25 nF	1,81 nF	175 Ω	339 Ω	35,1 Ω	67,7 Ω
Kuffel	200 nF	0,2 nF	0,25 nF	1,81 nF	181 Ω	337 Ω	36,2 Ω	67,4 Ω

Considerando la carga del transformador de potencia de 7,5 MVA clase 69 kV, la R_s^* promedio calculada es $35,5 \Omega$, por lo que la R_s^* de 32Ω , satisface para la ejecución del ensayo en la obtención del tiempo T1 normalizado dentro de las tolerancias permitidas. Para el caso de la resistencia de cola R_p^* el valor determinado es de 67Ω .

2.6.Evaluación del sistema de generación dimensionado

La evaluación del sistema dimensionado se la realiza a través de pruebas de voltaje de impulso en el laboratorio de la fábrica de transformadores Ecuatran S.A. con un sistema de semejantes características al estudiado y la implementación de la simulación de dicho sistema a través de Simulink de Matlab.

2.6.1. Pruebas en laboratorio en Vacío

Las pruebas en vacío desarrolladas, observados en la figura 39, se realizan con polaridad negativa, para varios niveles de voltaje, con resistencias en serie (R_s) diferentes, Capacitancia de carga (Cg Total) = 200 nF, Capacitancia parásita del

generador de impulsos (C_e) = 0,2 nF y capacitancia del divisor de voltaje (C_{div}) = 1,6 nF; cuyos resultados de T1 y T2 obtenidos se observan en la tabla 19 y sus oscilogramas se observan en el anexo 1.



Fig. 39. Pruebas de voltaje de impulso sin objeto bajo prueba

La primera columna de la tabla 19, muestra el voltaje de prueba de referencia para las pruebas realizadas, las siguientes columnas muestran los resultados obtenidos de los tiempos de frente (T1) y cola (T2), para las resistencias de frente (R_s) y cola (R_p) instalados en el generador de impulsos.

TABLA 19. Resultados de pruebas de impulso sin objeto bajo prueba

Voltaje	$R_s = 43 \Omega$	$R_p = 66 \Omega$	$R_s = 30 \Omega$	$R_p = 66 \Omega$	$R_s = 22 \Omega$	$R_p = 66 \Omega$
kV	T1 μs	T2 μs	T1 μs	T2 μs	T1 μs	T2 μs
-100	1,172	48,070	0,823	46,998	0,6639	45,613
-150	1,177	48,038	0,826	47,001	0,6686	45,621
-200	1,184	48,115	0,833	47,088	0,6728	45,681
-250	1,189	48,116	0,838	47,100	0,6836	45,768
-300	1,192	48,199	0,841	47,164	0,6824	45,793

2.6.2. Pruebas en Simulink en Vacío

La figura 40, muestra el circuito eléctrico implementado en Simulink, mismo que contiene las diferentes componentes que intervienen en la obtención de la forma de onda de voltaje impulso normalizado. La implementación permite estimar el valor de

inductancia interna característica que mejor se acople y convalide con los resultados de pruebas en vacío en laboratorio, para la obtención de este valor, que no es conocido por el usuario. Según el libro High Voltaje Test and Measuring Techniques [11], un buen generador de impulsos, debería tener un valor de inductancia interna $< 4 \text{ mL/etapa}$.

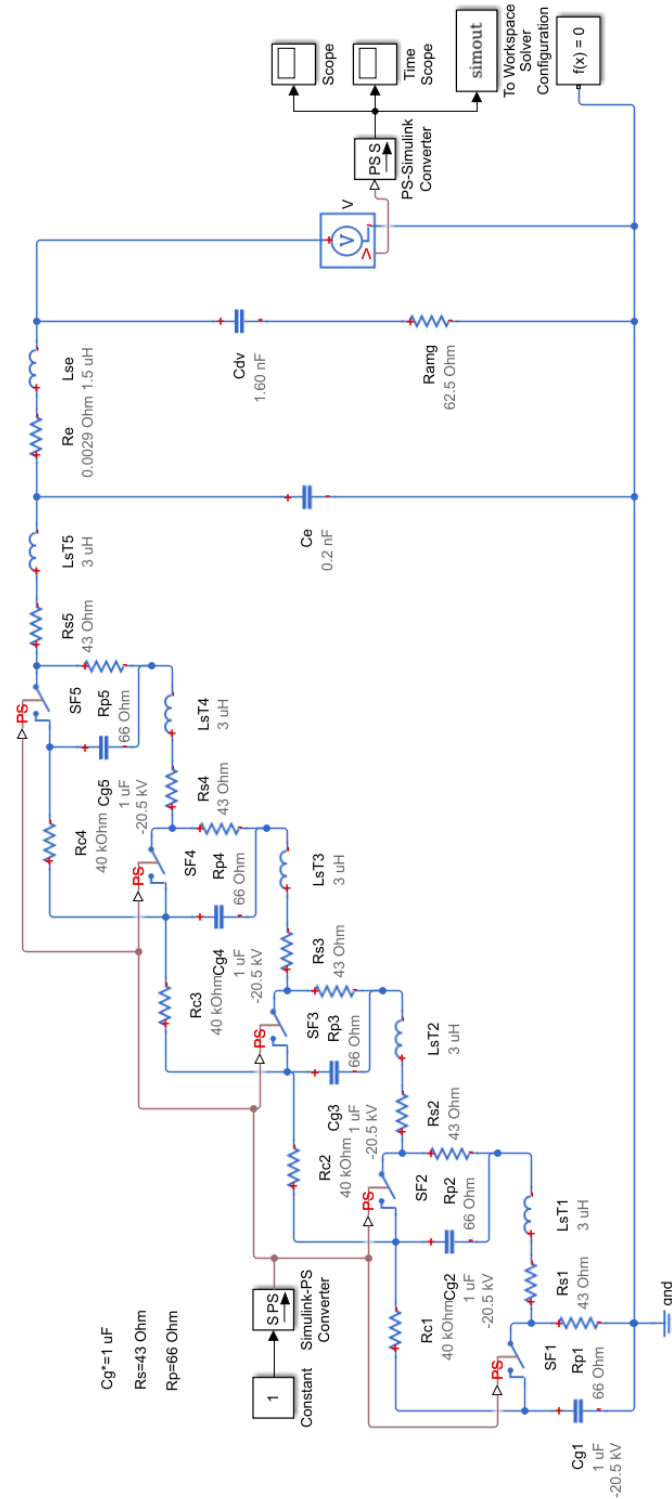


Fig. 40. Circuito para análisis en Simulink – Sin objeto bajo prueba

Cada simulación arroja una matriz de datos de aproximadamente 20 000 x 20 000, en amplitud de voltaje y tiempo, con resoluciones de hasta 7,5 V y 0,007 μ s, respectivamente, los mismos que son enviados a una hoja de cálculo para su representación, como se observa en la figura 41, y determinación normalizada de los tiempos de frente (T1) y cola (T2), para un voltaje de -100 kV.

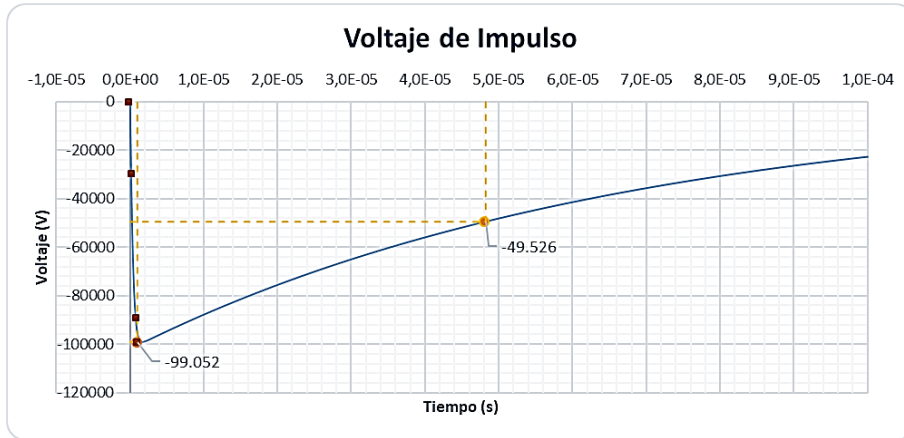


Fig. 41. Forma de onda de impulso para -100 kV, datos de Simulink

El análisis se realizó para un Lse equivalente 1,5 m (columna 5), que es la longitud aproximada de conexiones de AV durante las pruebas realizadas.

Se ejecutaron simulaciones de ensayos de impulso para Ls desde 6 μ H/etapa hasta 1,5 μ H (columna 4), con resistencia de frente de 43 Ω , 30 Ω y 22 Ω (columna 2), para voltajes de pruebas de -100 kV, -200 kV y -300 kV.

En total se realizaron 72 simulaciones (columna 1), 24 para cada voltaje de prueba, en donde los valores de T1 y T2 obtenidos (columnas 8 y 9) son comparados con los valores de T1 y T2 alcanzados (columnas 11 y 12) en los ensayos en vacío en el laboratorio de pruebas, con la finalidad de determinar la desviación existente (tres últimas columnas). Las columnas mencionadas se observan en la tabla indicada en el anexo 2.

Las figuras 42 y 43 presentan gráficamente los resultados obtenidos en cada simulación. Se observa 9 curvas con 8 simulaciones cada una. En la figura 42 que grafica los tiempos de frente, las curvas con menores desviaciones son aquellas con resistencias de frente de 43 Ω y 30 Ω para una Ls de 2,5 μ H (tercer punto); para las mismas resistencias las mayores desviaciones se encuentran en los valores de inductancia entre 5 μ H y 6 μ H (dos últimos puntos). En la figura 43 que grafica los tiempos de cola, la menor desviación se observa entre los puntos 3 y 4, correspondiente a 2,5 μ H y 3 μ H. De la

misma manera las mayores desviaciones se encuentran en los valores de inductancia entre 5 y 6 μH .

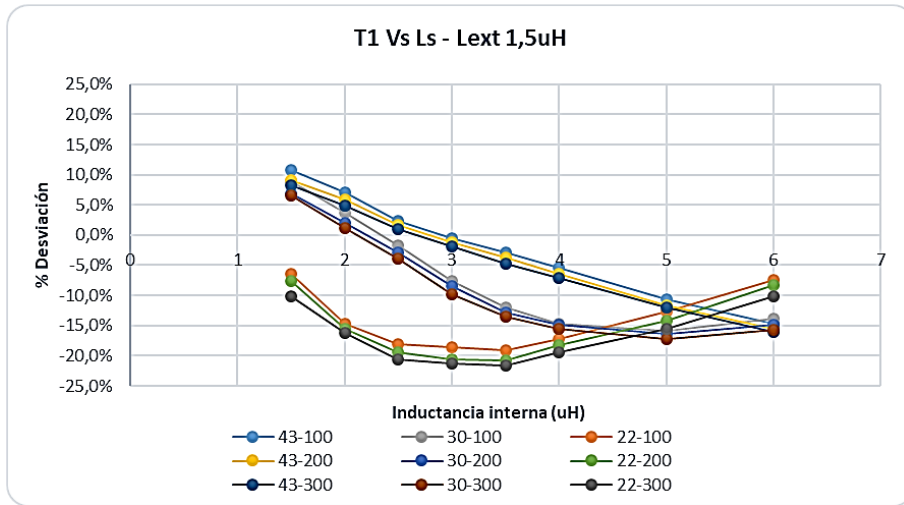


Fig. 42. Desviación en T1 durante la obtención de Le del generador de impulsos

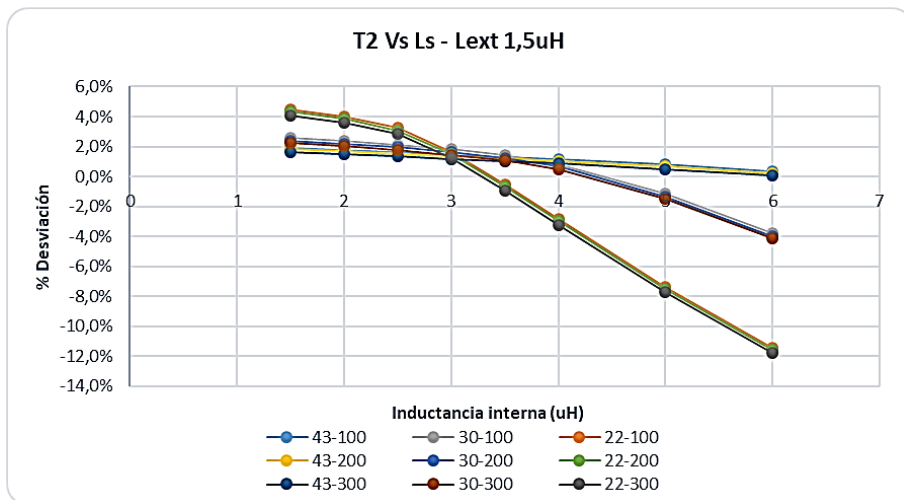


Fig. 43. Desviación en T2 durante la obtención de Le del generador de impulsos

De los resultados dados, se realizaron distribuciones de los datos en las desviaciones especificadas en la segunda fila de la tabla 20, para las diferentes inductancias internas planteadas en la primera columna de la misma tabla. Se puede observar en la figura 44 que la mayor frecuencia de datos para una desviación inferior al 5 % se encuentra para el valor de inductancia interna de 2,5 uH / etapa, para T1.

TABLA 20. Tabla de distribución de desviación de T1

Ls (uH)	Conteo por % desviación - T1				
	≤ 5%	5% - 10%	10% - 15%	15% - 20%	≥ 20%
1,50	0	7	2	0	0
2,00	4	2	1	2	0
2,50	6	0	0	2	1
3,00	3	3	0	1	2
3,50	3	0	3	1	2
4,00	0	3	2	4	0
5,00	0	0	5	4	0
6,00	0	2	4	3	0

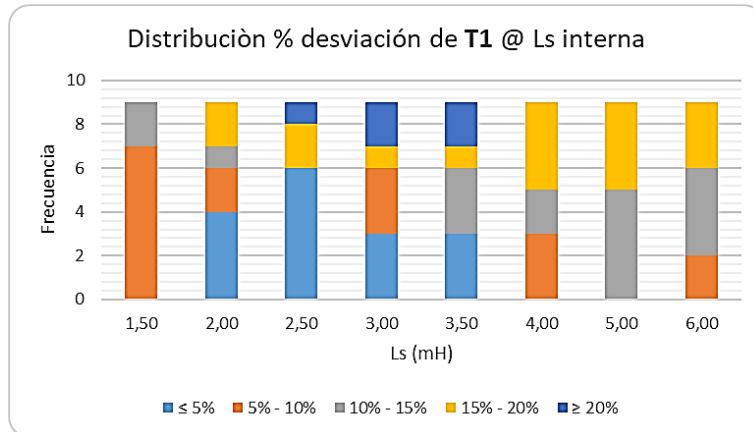


Fig. 44. Distribución de desviación para T1

Los datos de las desviaciones planteadas se observan en la segunda fila de la tabla 21, así como las inductancias internas dadas en la primera columna de la misma tabla. Se puede observar en la figura 45 que la mayor frecuencia de datos para una desviación inferior al 2 % se encuentra en el valor de inductancia interna de 3 uH / etapa, para T2.

TABLA 21. Tabla de distribución de desviación de T2

Ls (uH)	Conteo por % desviación - T2				
	≤ 1%	1% - 2%	2% - 3%	3% - 4%	≥ 4%
1,50	0	3	3	0	3
2,00	0	3	3	2	1
2,50	0	5	2	2	0
3,00	0	9	0	0	0
3,50	3	6	0	0	0
4,00	4	2	1	2	0
5,00	3	3	0	0	3
6,00	3	0	0	2	4

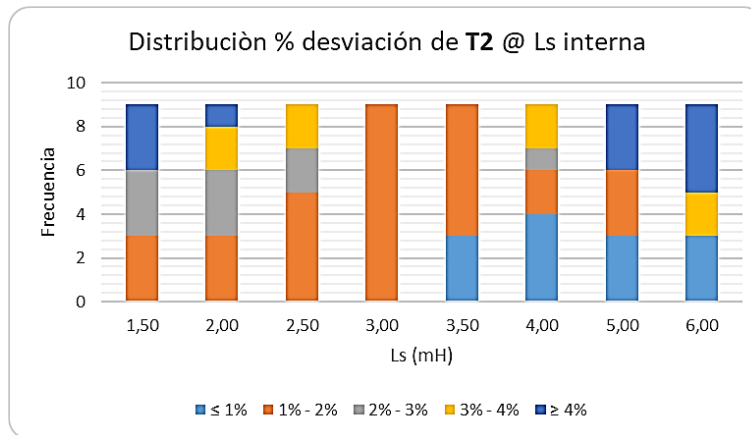


Fig. 45. Distribución de desviación para T2.

Todos los valores obtenidos se encuentran dentro de la tolerancia del $\pm 30\%$ y $\pm 20\%$, especificados por las Normas Técnicas para T1 y T2, lo cual establece que el dimensionamiento realizado es adecuado.

2.6.3. Evaluación de Simulink con Transformador de Potencia

La figura 46, muestra el circuito eléctrico implementado en software Simulink para pruebas de impulso con transformadores de potencia, en donde se incrementa la capacitancia e inductancia del transformador, indicadas en la tabla 1.

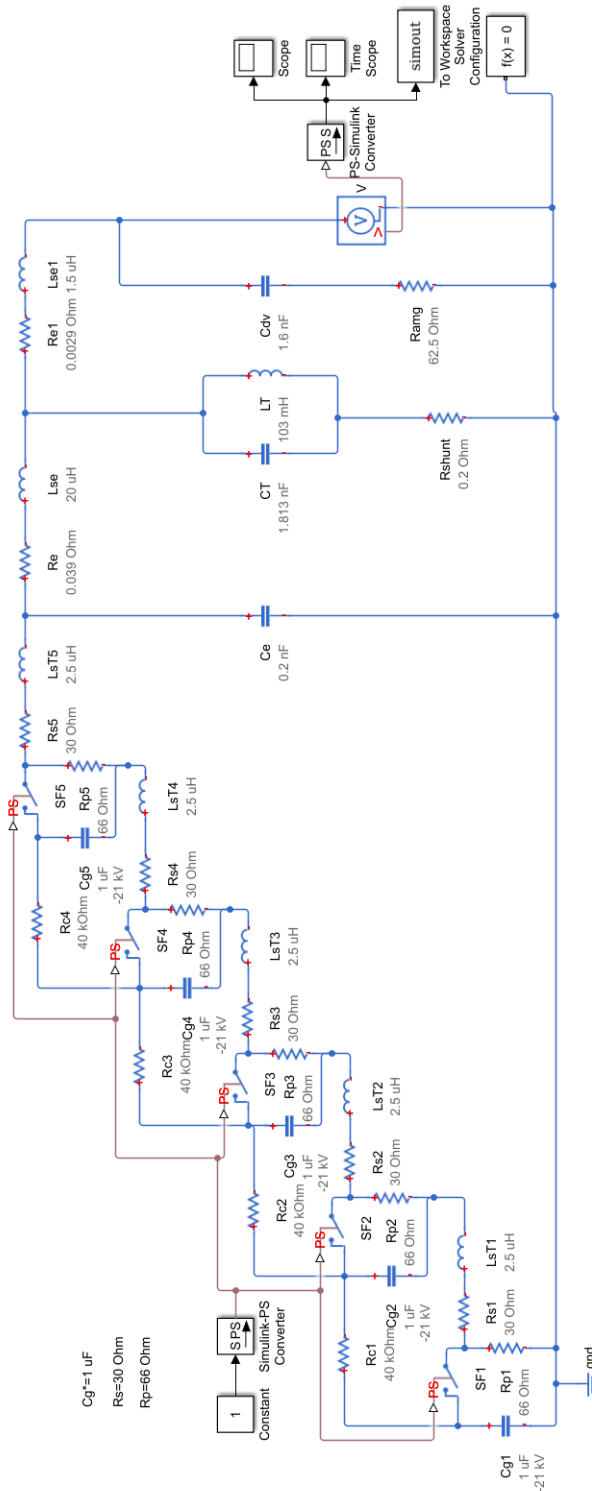


Fig. 46. Circuito para análisis en Simulink – Con transformador de potencia

De la misma forma que en las pruebas en vacío, cada simulación genera una matriz de datos de aproximadamente 20 000 x 20 000, en amplitud de voltaje y tiempo; los resultados calculados son evaluados con los resultados obtenidos en pruebas reales a transformadores de potencia desde 3 MVA hasta 10 MVA, clase 69 kV. En total se realizaron 15 simulaciones (columna 1), 2 por cada potencia de transformador (columna

2), para voltaje de impulso de onda reducida y onda plena (columna 10) según el BIL del voltaje de bobina de alto voltaje (columna 4), en donde los valores de T1 y T2 obtenidos (columnas 12 y 13) son comparados con los valores de T1 y T2 alcanzados (columnas 15 y 16) en las simulaciones y pruebas en laboratorio, respectivamente. Las columnas mencionadas se observan en la tabla indicada en el anexo 3, así también, las curvas obtenidas con los datos de las simulaciones realizadas en Simulink.

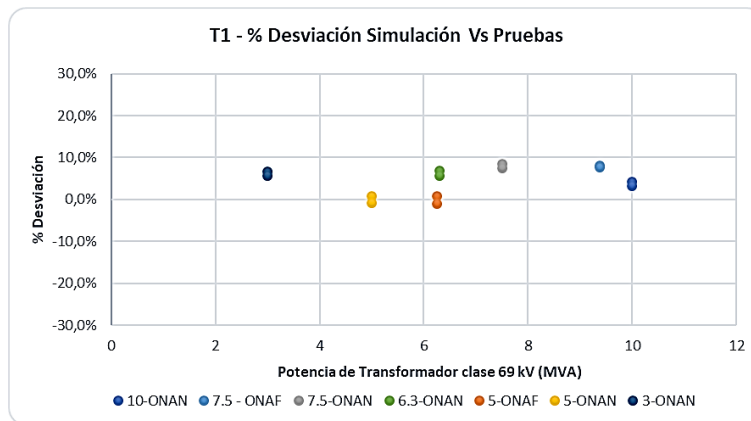


Fig. 47. Desviación de T1 entre la simulación y pruebas reales a transformadores de potencia de hasta 10 MVA clase 69 kV

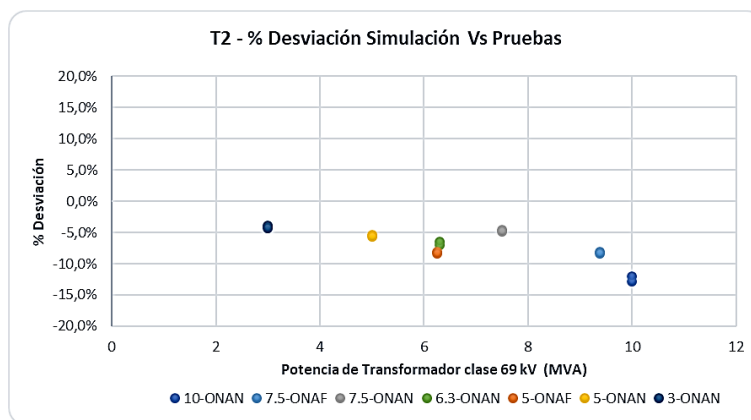


Fig. 48. Desviación de T2 entre la simulación y pruebas reales a transformadores de potencia de hasta 10 MVA clase 69 kV

Nuevamente, todos los valores se encuentran dentro de la tolerancia, como se puede observar en las figuras 47 y 48, del $\pm 30\%$ y $\pm 20\%$ especificados por las Normas Técnicas para T1 y T2, lo cual establece que el dimensionamiento realizado es adecuado.

En la figura 47, las menores desviaciones de T1 se encuentran para los transformadores de 5 y 6,25 MVA, así mismo las mayores desviaciones para 7,5 y 9,38 MVA.

En la figura 48, las menores desviaciones de T2 se encuentran para los transformadores de 2,5 y 7,5 MVA, así mismo la mayor desviación para 10 MVA.

Los reportes de pruebas realizados en el laboratorio de fábrica de los transformadores de potencia evaluados se pueden observar en el anexo 4.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA

La implementación de un sistema de pruebas de voltaje de impulso conlleva una inversión importante para un laboratorio de alto voltaje; ya que, el equipo en sí presenta un precio considerable debido a sus características complejas y cumplimiento de estándares.

El análisis de factibilidad económica desarrollado se enmarca en establecer de manera cuantitativa - monetaria si la implementación del sistema de voltaje de impulso es o no posible ejecutarlo.

3.1. Flujo de caja proyectado

La tabla 23, muestra el flujo de caja de la inversión, cuyo periodo de tiempo está proyectado para 10 años.

Los ingresos operacionales están dados por el ahorro que se tendría en cuanto a realizar los ensayos en el laboratorio implementado y no en un laboratorio tercerizado. Para este caso se ha tomado en cuenta el número de pruebas a transformadores monofásicos y trifásicos de distribución y transformadores trifásicos de potencia en un escenario pesimista, con las tarifas de ensayos dados por el consejo de facultad de ingeniería, resolución 043, febrero 08 2022, de la Universidad del Valle de Cali – Colombia [17], ya que cuenta con un generador de impulsos de voltaje tipo Marx-Goodlet de 1 100 kV y 55 kJ, costos de transporte y logísticos.

Los egresos operacionales considerados son el pago de insumos o servicios, mano de obra directa (en este caso la contratación de 1 operador), gastos de administración (pre operacionales), costos de calibración del equipo con un periodo de 5 años, mantenimiento y reemplazo de accesorios con un periodo de 4 años, previo al servicio de calibración.

Los ingresos no operacionales considerados en este caso es únicamente el financiamiento por el valor total del proyecto.

Dentro de los egresos no operacionales se encuentran el pago del crédito del valor financiado con una tasa de interés máxima dada para julio 2 023 por el Banco Central del Ecuador, como se observa en el anexo 5, para PYMES del 11,26 %, costo de infraestructura, costo del equipo (figura 49 – tomando en cuenta el de origen alemán),

costos de transporte e internacionalización, equipo de oficina y computo, muebles/enseres y la capacitación.

TABLA 22. Resumen de cotizaciones de un generador de impulsos de 500 kV / 25 kJ

EQUIPO	PAÍS	ENTRADA	GARANTÍA	T. ENTREGA	PRECIO (FOB) (USD)
GENERADOR DE IMPULSO	India	30%	12 MESES	3 MESES	110.000,00
	Alemania	30%	12 MESES	6 MESES	148.500,00
	Suiza	100%	12 MESES	5 MESES	222.413,40

TABLA 23. Flujo de caja proyectado

FACTORES	PREOPER.	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
A. INGRESOS OPERACIONALES											
Ahorro en pruebas no Tercerizándolas	\$ -	\$ 105.998	\$ 105.998	\$ 105.998	\$ 124.218	\$ 124.218	\$ 124.218	\$ 147.615	\$ 147.615	\$ 147.615	\$ 147.615
Parcial	\$ -	\$ 105.998	\$ 105.998	\$ 105.998	\$ 124.218	\$ 124.218	\$ 124.218	\$ 147.615	\$ 147.615	\$ 147.615	\$ 147.615
B. EGRESOS OPERACIONALES											
Pago de insumos/servicios	\$ -	\$ 360	\$ 360	\$ 360	\$ 360	\$ 360	\$ 360	\$ 360	\$ 360	\$ 360	\$ 360
Mano de obra directa (1 T)	\$ -	\$ 6.600	\$ 6.600	\$ 6.600	\$ 7.200	\$ 7.200	\$ 7.200	\$ 7.200	\$ 7.800	\$ 7.800	\$ 7.800
Gastos de administración	\$ 1.000										
Calibración de Equipo	\$ -					\$ 10.000					\$ 12.000
Mantenimiento, reemplazo de accesorios	\$ -				\$ 5.000					\$ 7.500	
Parcial	\$ 1.000	\$ 6.960	\$ 6.960	\$ 6.960	\$ 12.560	\$ 17.560	\$ 7.560	\$ 7.560	\$ 8.160	\$ 15.660	\$ 20.160
C. FLUJO OPERACIONAL (A-B)	\$ -1.000	\$ 99.038	\$ 99.038	\$ 99.038	\$ 111.658	\$ 106.658	\$ 116.658	\$ 140.055	\$ 139.455	\$ 131.955	\$ 127.455
D. INGRESOS NO OPERACIONALES											
Capital Social	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Financiamiento	\$ 230.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Otros aportes	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Parcial	\$ 230.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
E. EGRESOS NO OPERACIONALES											
Pago de crédito	\$ -	\$ 60.368	\$ 60.368	\$ 60.368	\$ 60.368	\$ 60.368	\$ 4.984	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Infraestructura e instalación	\$ 11.880	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Maquinaria y Equipo	\$ 148.500	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Transporte, importación e impuestos	\$ 51.975	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Equipo de oficina y computo	\$ 1.485	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Muebles y enseres	\$ 1.188	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Capacitación	\$ 7.500	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Parcial	\$ 222.528	\$ 60.368	\$ 60.368	\$ 60.368	\$ 60.368	\$ 60.368	\$ 4.984	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
F. FLUJO NO OPERACIONAL (D-E)	\$ 7.472	\$ -60.368	\$ -60.368	\$ -60.368	\$ -60.368	\$ -60.368	\$ -4.984	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
G. FLUJO NETO GENERADO (C+F)	\$ 6.472	\$ 38.670	\$ 38.670	\$ 38.670	\$ 51.291	\$ 46.291	\$ 111.674	\$ 140.055	\$ 139.455	\$ 131.955	\$ 127.455
H. SALDO INICIAL DE CAJA	\$ -	\$ 6.472	\$ 45.142	\$ 83.812	\$ 122.483	\$ 173.773	\$ 220.064	\$ 331.738	\$ 471.793	\$ 611.248	\$ 743.203
I. SALDO FINAL DE CAJA (G+H)	\$ 6.472	\$ 45.142	\$ 83.812	\$ 122.483	\$ 173.773	\$ 220.064	\$ 331.738	\$ 471.793	\$ 611.248	\$ 743.203	\$ 870.657

De esta manera se obtiene el flujo neto generado por año para la evaluación financiera del proyecto.

3.2. Criterios de Evaluación

La presente evaluación de factibilidad económica, considera a los parámetros: TMAR, VAN, TIR y Periodo de Recuperación, como aquellos principales para establecer si el beneficio económico del proyecto a lo largo del tiempo es positivo o negativo, es decir, si es viable o no.

3.2.1. Tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR)

Para el cálculo del valor actual neto (VAN) es necesario considerar a la TMAR o tasa de oportunidad, considerado como el mínimo rendimiento que los accionistas o la empresa espera ganar sobre sus inversiones. Orozco en su libro evaluación financiera de proyectos [18], expresa que la manera más común de determinar esta tasa es considerando a la inflación y una tasa adicional (ecuación 20) que representa el premio al inversionista por asumir el riesgo de entregar el dinero a otra persona como préstamo. Cabe indicar que la TMAR, puede ser fijado por los accionistas, sin embargo, se recomienda realizarlo de manera técnica, con la finalidad de evitar subjetividades.

$$TMAR = i + f \quad (20)$$

Tomando en cuenta una tasa anual de inversión del capital recomendado por el Banco Central del Ecuador para inversiones en más de 361 días del 8,89 % y la inflación del año 2 022 de 3,74 % según datos del INEC, se obtiene un TMAR de 12,63 %. Siendo éste entonces la tasa mínima de rendimiento de la inversión esperada por parte de los accionistas o propietarios de una empresa ante la inversión del proyecto dado.

3.2.2. Tasa interna de retorno (TIR)

La TIR es la tasa de descuento cuando el valor actual neto del flujo de caja de un proyecto es igual a cero (ecuación 22), es decir, representa el rendimiento o tasa de oportunidad que podría alcanzar el proyecto [19].

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+k)^t} \quad (21)$$

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+k)^t} \quad (22)$$

Siendo:

Ft, flujos de dinero para cada periodo t

I₀, inversión inicial (t=0)

n, número de periodos de tiempo

k, es el descuento o interés mínimo, para nuestro caso (TMAR)

La tabla 24, muestra la inversión, el flujo neto generado y el cálculo del TIR obtenido; siendo éste, del 24,48 %, valor superior a la tasa mínima aceptable de rendimiento en aproximadamente 1,9 veces.

TABLA 24. Flujo neto por año - TIR

Inversión	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
\$ -230.000,00	\$ 38.670,24	\$ 38.670,24	\$ 38.670,24	\$ 51.290,57	\$ 46.290,57	\$ 111.674,26	\$ 140.054,84	\$ 139.454,84	\$ 131.954,84	\$ 127.454,84
TIR	24,48%									

Siendo el valor del TIR superior al TMAR, se considera viable la inversión del proyecto ya que el rendimiento es superior al requerido.

3.2.3. Valor Actual Neto (VAN)

El VAN, permite evaluar la inversión inicial con los flujos netos de efectivo generados a valor presente, en un periodo de tiempo [19].

La tabla 25, muestra la inversión, el flujo de caja generado y el valor del VAN obtenido a la tasa de interés esperada (TMAR) por parte de los accionistas.

TABLA 25. Flujo neto por año - VAN

Inversión	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
\$ -230.000,00	\$ 38.670,24	\$ 38.670,24	\$ 38.670,24	\$ 51.290,57	\$ 46.290,57	\$ 111.674,26	\$ 140.054,84	\$ 139.454,84	\$ 131.954,84	\$ 127.454,84
TMAR	12,63%									
VAN	\$ 172.807,63									

Como se puede observar el valor del VAN es > 0 , es decir que, a más de cumplir con la tasa mínima esperada de inversión, el proyecto generará un valor monetario adicional de aproximadamente 172 807 USD en el periodo de 10 años. En tal virtud, el proyecto es viable.

3.2.4. Periodo de recuperación

Otro de los criterios de evaluación es el periodo de recuperación de la inversión, es decir el tiempo que tarda en recuperarse la inversión inicial del proyecto.

La tabla 26, muestra el periodo de recuperación, tomando en cuenta la tasa de descuento TMAR, con la finalidad de traer al presente los valores de flujo y obtener de esta manera el tiempo de recuperación del proyecto, que en este caso es de 6 años 5 meses 6 días.

TABLA 26. Periodo de recuperación

Año	VAN 2024	VAN 2025	VAN 2026	VAN 2027	VAN 2028	VAN 2029	DIF COMPLET	VAN 2030	van 2030 dia	días completar
Valor Acumulado	\$ 34.333,87	\$ 30.483,77	\$ 27.065,41	\$ 31.872,87	\$ 25.540,07	\$ 54.705,20	\$ -25.998,80	\$ 60.914,34	\$ 166,89	-155,8
TOTAL	\$ 204.001,20						6 años 5 meses 6 días			

El periodo de recuperación se encuentra dentro de periodo de 10 años de análisis del proyecto, por lo tanto, es viable.

CONCLUSIONES

- La investigación bibliográfica realizada, a través de la búsqueda, recopilación, revisión de la información de las fuentes primarias y secundarias constituyó la base fundamental para el dimensionamiento adecuado y evaluación del sistema de generación de voltaje de impulso para transformadores de potencia hasta 10 MVA, clase 69 kV hasta 3 000 msnm. Las normativas internacionales del comité electrotécnico internacional (IEC), Instituto de Estandarización Nacional Americano (ANSI) e Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, en sus diferentes capítulos y apartados, presentan las especificaciones y requisitos que los ensayos de impulso a transformadores de potencia, que deben ser cumplidos para dar por aprobado este tipo de ensayos.

Los libros de sistemas de alto voltaje, manuales de fabricantes de equipos y conjuntos de pruebas, fabricantes de transformadores de distribución y potencia, papers, y estudios realizados, constituyen una guía básica en el marco de referencia de la información y experiencias adquiridas para la presente investigación.

- El dimensionamiento realizado, contempla los elementos más relevantes del sistema de generación de voltaje de impulso para las pruebas dieléctricas en transformadores de potencia de hasta 10 MVA, clase 69 kV y con altura de operación de hasta 3 000 msnm, dichos elementos se detallan en el siguiente cuadro:

Generador de impulso	V Total	Etapas	Energía total	Capacitancia	Cap. parásita	Inductancia/etapa	Altura aprox	Largo aprox	Ancho aprox	Peso aprox
	kVp		kJ	nF	nF	uH	m	m	m	kg
	500	5	25	200	0,2	2,5	2,5	1,5	0,9	720
Unidad de Carga	V Total	Etapas	Energía total	Corriente	Fuente	Medio	Altura aprox	Largo aprox	Ancho aprox	Peso aprox
	kVp		kJ	mA	V rms 50/60 Hz	Aislante	m	m	m	kg
	100	1	67,5	30	230	Aire	1,5	1,5	1,2	350
Divisor de Voltaje	V impulso 1,2/50	V impulso 250/2 500	V AC	Capacitancia	Resistencia de amortiguamiento		Altura aprox	Largo aprox	Ancho aprox	Peso aprox
	kVp	kVp	kV rms	pF	Ω		m	m	m	kg
	500	450	125	1600	62,5		1,8	0,7	0,7	65
Resistencias	Resistencia de Frente			Resistencia de Cola			Energía mínima de cada resistencia			
	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	kJ			
	22	32	45	67	80	96	5			

- El voltaje del generador de impulsos, la unidad de carga y divisor de voltaje, contempla los valores de voltaje de cresta que las normativas estipulan para los ensayos de impulso tipo rayo de onda completa, onda recortada e impulso tipo maniobra, a más del factor de corrección de aproximadamente un 20 % debido a la altura de prueba de 3 000 msnm y la eficiencia del propio generador establecido en 0,95 y 0,70 para ensayos tipo rayo y maniobra, respectivamente.
- El análisis de requerimiento de energía toma en cuenta la muestra investigada de marcas de transformadores de potencia existentes en nuestro país con sus diferentes características, tales como la frecuencia, la impedancia de cortocircuito, nivel de impulso, dependiendo de la clase del devanado, la eficiencia del generador, la potencia de cada transformador y las respectivas tolerancias de cada uno de dichos factores; obteniendo una distribución de frecuencia de datos de energía mínima calculada que no sobrepasa los 15 kJ y un porcentaje mínimo se encuentra por debajo de los 30 kJ, sin embargo, aplicando las respectivas tolerancias no sobrepasa los 25 kJ.
- Para la determinación de las resistencias de frente y cola se utilizó la metodología propuesta por el fabricante de transformadores ABB y el libro de Kuffel, que toman en cuenta principalmente la capacitancia de los diferentes elementos del circuito y transformador bajo prueba; obteniendo entre estas dos metodologías diferencias menores al 3,2 % y 0,5 % para las

resistencias de frente y cola respectivamente, durante los valores calculados en ensayos sin objeto bajo prueba, es decir sin transformador de potencia, considerado como carga única la capacitancia parásita del propio generador de impulsos y la capacitancia del divisor del voltaje.

- La misma comparación de las metodologías de ABB y Kuffel se realizó con objeto bajo prueba, para el ensayo de un transformador de 7,5 MVA clase 69 kV, en donde su inductancia es mayor a los 100 mH, como sugiere ABB para la utilización de su método; obteniendo también entre estas dos metodologías diferencias menores al 3,2 % y 0,5 % para las resistencias de frente y cola respectivamente, y los valores de resistencia obtenidos se encuentran dentro del 30 % y 20 % de las tolerancias para los tiempos también de frente y cola, por lo que el dimensionamiento satisface las especificaciones dadas en las normativas.
- La evaluación del sistema de generación de impulsos dimensionado y la metodología utilizada se llevó a cabo a través de simulaciones realizadas en el software Simulink de Matlab e historial de pruebas realizadas en un laboratorio de pruebas de alto voltaje, con y sin objeto bajo prueba.
- Se realizaron simulaciones sin y con objeto bajo prueba. Cada una de las simulaciones generan matrices de 20 000 x 20 000, en tiempo y voltaje, 40 000 datos en total, cuyos resultados son comparados con los datos obtenidos en pruebas reales realizadas.
- Las simulaciones realizadas sin objeto bajo prueba, en total 72, permitieron estimar el valor de inductancia de cada etapa del generador de impulsos dimensionado con uno de semejantes características al utilizado en el laboratorio de pruebas. A través de la realización de la distribución estadística del % de desviación entre los datos simulados para varios valores de inductancia y los de pruebas en laboratorio se determinó que el valor de 2,5 uH alcanzaba mejores resultados con % de desviación menores al 5 % y 2 % para los tiempos de frente y cola respectivamente. Siendo por lo tanto el valor de 2,5 μ H es apropiado para utilizarlo en la evaluación del sistema con transformadores bajo prueba.
- Finalmente, las simulaciones realizadas con transformadores de potencia generaron matrices de datos de aproximadamente 20 000 x 20 000, en

amplitud de voltaje y tiempo; cuyos resultados fueron evaluados con los resultados obtenidos en pruebas reales a transformadores de potencia desde 3 MVA hasta 10 MVA, clase 69 kV, obteniendo buenos resultados, con desviaciones menores al 10 % y 14 % entre los tiempos de frente y cola, respectivamente.

- Los índices de los factores de factibilidad financiera obtenidos son buenos, esto es, la TIR con un 24,48 % (por encima del TMAR), el VAN 172 807 USD (con el TMAR del 12,63 %) y un periodo de recuperación de 6 años 5 meses concluyen que la implementación de un sistema de pruebas de voltaje de impulso en un laboratorio de pruebas de una fábrica de transformadores es viable, para el escenario y flujo de caja planteado.
- La implementación de un sistema de voltaje de impulso debería solo ser concebido con el afán del cumplimiento de requisitos explícitos dados por las normativas y clientes, sino también como una estrategia de mejora de la calidad y confiabilidad de los transformadores puestos en servicio en los sistemas eléctricos de potencia.

RECOMENDACIONES

Como producto de la investigación realizada, las siguientes recomendaciones deberían ser tomadas en cuenta en el dimensionamiento de un sistema de voltaje de impulsos con otro alcance de transformadores a ensayar.

- Verificar los requisitos inherentes al alcance de transformadores a ensayar, tanto en la normativa internacional, así como en las especificaciones explícitas a cumplir dadas por los clientes.
- Es necesario recopilar, como así se ha realizado en este estudio, una base de datos de las características técnicas esenciales que están involucradas o son dependientes a los resultados esperados; tales como, impedancia de cortocircuito y capacitancias, principalmente.
- El sistema de pruebas de voltaje de impulso que un proveedor ofrezca o cotice puede ser evaluado con la metodología propuesta en la presente investigación y simulación, con la finalidad de asegurar que el equipo adquirido cumpla y satisfaga el alcance de pruebas especificado.
- El análisis de factibilidad financiera de la implementación del sistema de pruebas de impulso es realizado y dedicado para un fabricante particular de transformadores, por lo que se recomienda tomar muy en cuenta este aspecto si otra empresa lo requiere implementar debe ser tomada en cuenta su capacidad de producción y los escenarios de fabricación y entrega de productos con requisitos de pruebas de este tipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC, 60071-1 Coordinación de Aislamiento, definiciones, principios y reglas, Geneba, 1993.
- [2] IEEE, Std C62.82.1 Standard for Insulation Coordination-Definitions, Principles, and Rules, New York, 2010.
- [3] ABB, Testing of Power Transformers, Zurich, 2003.
- [4] IEEE, Std C57.12.00 Standard of General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, New York, 2015.
- [5] IEC, 60076-1 Power Transformers - Part 1: General, Geneva, 2011.
- [6] IEC, 60076-3 Power Transformers - Part 3: Insulation Levels, dielectric test and external clearances in air, Geneva, 2013.
- [7] IEEE, Std C57.12.90 Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, New York, 2015.
- [8] IEEE, Std C57.98 Guide for Transformer Impulse, New York, 2011.
- [9] IEEE, Std C57.138 Recommended Practice for Routine Impulse Test for Distribution TRansformers, New York, 2016.
- [10] IEEE, Std 4a Standard Techniques for High-Voltage Testing, New York, 2001.
- [11] W. H. -. E. Lemke, High-Voltage Test and Measuring Techniques, Berlin: Springer, 2014.
- [12] IEEE, Std C57.12.10 Standard Requirements for Liquid-Immersed Power Transformers, New York, 2017.
- [13] High_Voltage, Impulse Voltage Generators, Dresden, 2019.
- [14] J. D. Mina, «Construcción y evaluación de un divisor de voltaje para pruebas de impulso tipo rayo,» *Tecnura*, p. 14, 2019.

- [15] M. Abdel-Salam, A. Hussein, Ahbad El-Morshedy y R. Roshdy , High-Voltage Engineering Theory and Parctice, Second ed., M. Dekker, Ed., New York, 2000, p. 743.
- [16] E. Kuffel, W. Zaengl y J. Kuffel, High Voltaje Engineering Fundamentals, Second ed., Great Britain: Butterworth-Heinemann, 2000, p. 552.
- [17] U. d. Valle, «Grupo de Investigación en Alta Tensión - "Tarifas",» 2023. [En línea]. Available: <https://drive.google.com/file/d/1SHpfHz-rEcf67dj83JrqA1kmy4Ybm2R5/view>. [Último acceso: 04 julio 2023].
- [18] J. d. J. M. Orozco, Evaluación financiera de proyectos, Bogotá: Ecoe Ediciones, 2013.
- [19] M. Virreira, Evaluación financiera de proyectos de inversión métodos y aplicaciones, Santa Cruz: DIP - UPSA, 2020.

ANEXOS

Anexo 1. Oscilogramas de ensayos de impulso en laboratorio de pruebas – sin objeto bajo prueba

OSCILOGRAMAS DE IMPULSOS CON $R_S = 43 \Omega$, $R_P = 66 \Omega$		
		<p>Fig.: 1</p> <p>$U_t = -98,456 \text{ kV}$</p> <p>$T_1 = 1,172 \text{ } \mu\text{s}$</p> <p>$T_2 = 48,070 \text{ } \mu\text{s}$</p> <p>$T_c = \text{ } \mu\text{s}$</p> <p>$I_p = 17,96 \text{ A}$</p>
		<p>Fig.: 2</p> <p>$U_t = -146,556 \text{ kV}$</p> <p>$T_1 = 1,177 \text{ } \mu\text{s}$</p> <p>$T_2 = 48,038 \text{ } \mu\text{s}$</p> <p>$T_c = \text{ } \mu\text{s}$</p> <p>$I_p = -22,44 \text{ A}$</p>
		<p>Fig.: 3</p> <p>$U_t = -199,536 \text{ kV}$</p> <p>$T_1 = 1,184 \text{ } \mu\text{s}$</p> <p>$T_2 = 48,115 \text{ } \mu\text{s}$</p> <p>$T_c = \text{ } \mu\text{s}$</p> <p>$I_p = 33,15 \text{ A}$</p>
		<p>Fig.: 4</p> <p>$U_t = -249,693 \text{ kV}$</p> <p>$T_1 = 1,189 \text{ } \mu\text{s}$</p> <p>$T_2 = 48,116 \text{ } \mu\text{s}$</p> <p>$T_c = \text{ } \mu\text{s}$</p> <p>$I_p = -39,55 \text{ A}$</p>

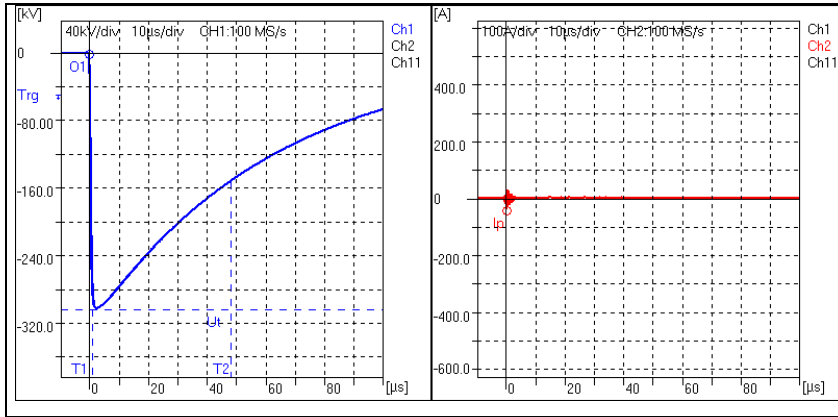


Fig.: 5

$U_t = -303,058 \text{ kV}$

$T_1 = 1,192 \text{ } \mu\text{s}$

$T_2 = 48,199 \text{ } \mu\text{s}$

$T_c = \text{ } \mu\text{s}$

$I_p = -36,95 \text{ A}$

OSCILOGRAMAS DE IMPULSOS CON $R_S = 30 \text{ } \Omega$, $R_P = 66 \text{ } \Omega$

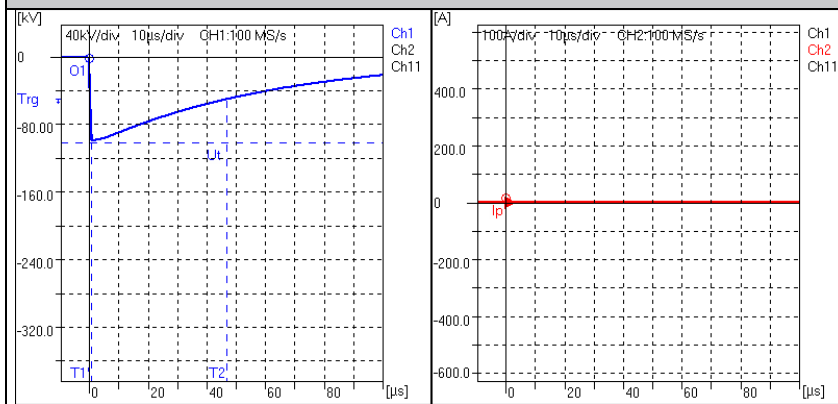


Fig.: 1

$U_t = -99,861 \text{ kV}$

$T_1 = 0,823 \text{ } \mu\text{s}$

$T_2 = 46,998 \text{ } \mu\text{s}$

$T_c = \text{ } \mu\text{s}$

$I_p = 23,43 \text{ A}$

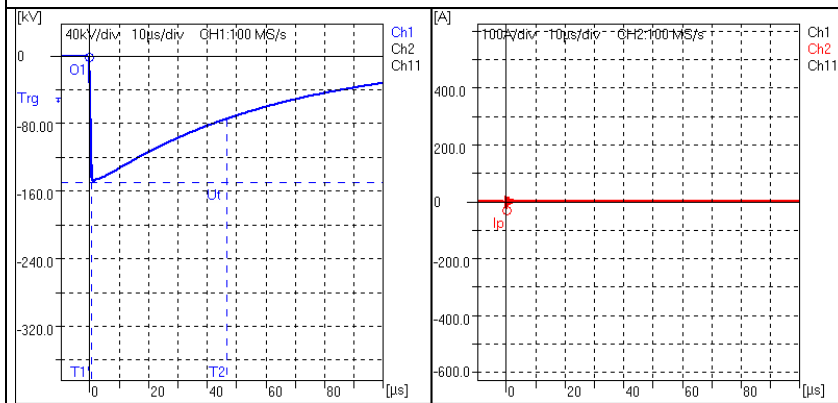


Fig.: 2

$U_t = -148,454 \text{ kV}$

$T_1 = 0,826 \text{ } \mu\text{s}$

$T_2 = 47,001 \text{ } \mu\text{s}$

$T_c = \text{ } \mu\text{s}$

$I_p = -26,96 \text{ A}$

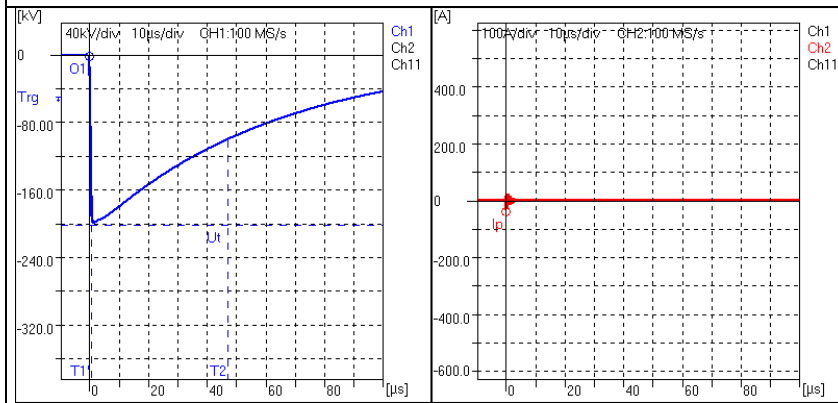


Fig.: 3

$U_t = -199,690 \text{ kV}$

$T_1 = 0,833 \text{ } \mu\text{s}$

$T_2 = 47,088 \text{ } \mu\text{s}$

$T_c = \text{ } \mu\text{s}$

$I_p = -32,84 \text{ A}$

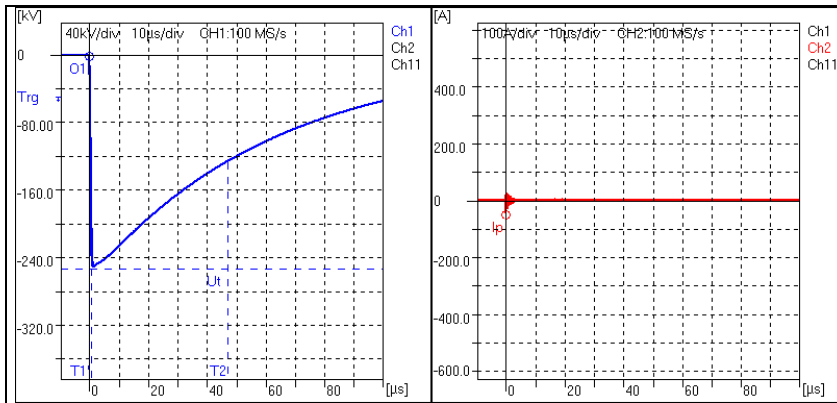


Fig.: 4

$U_t = -251,335 \text{ kV}$
 $T_1 = 0,838 \text{ } \mu\text{s}$
 $T_2 = 47,100 \text{ } \mu\text{s}$
 $T_c = \text{ } \mu\text{s}$
 $I_p = -45,58 \text{ A}$

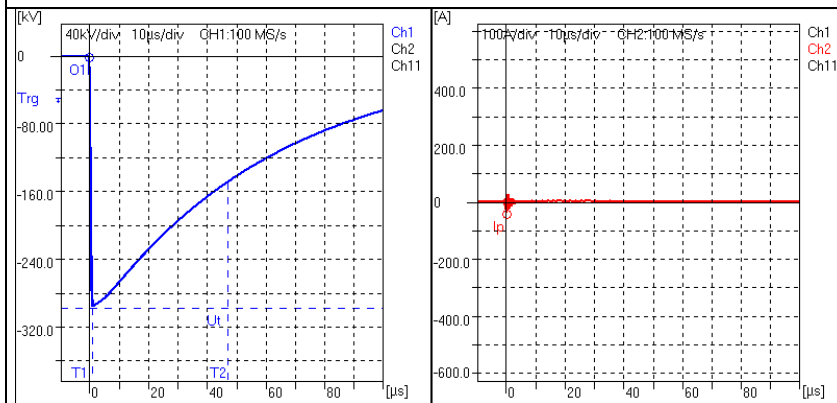


Fig.: 5

$U_t = -296,771 \text{ kV}$
 $T_1 = 0,841 \text{ } \mu\text{s}$
 $T_2 = 47,164 \text{ } \mu\text{s}$
 $T_c = \text{ } \mu\text{s}$
 $I_p = -36,81 \text{ A}$

OSCILOGRAMAS DE IMPULSOS CON $R_S = 22 \text{ } \Omega$, $R_P = 66 \text{ } \Omega$

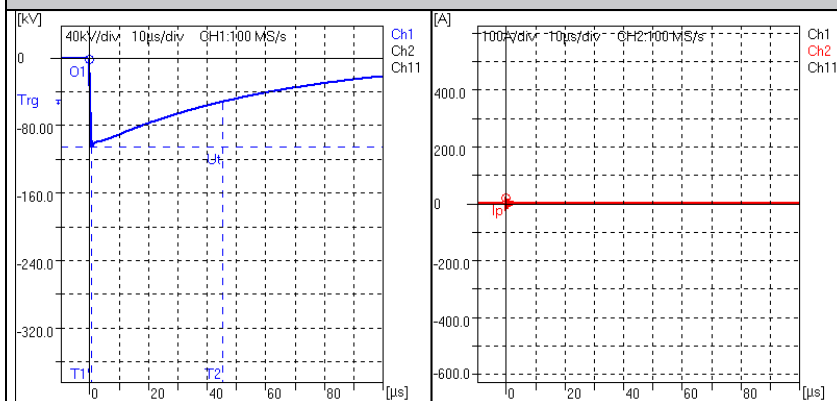


Fig.: 1

$U_t = -103,485 \text{ kV}$
 $T_1 = 0,664 \text{ } \mu\text{s}$
 $T_2 = 45,613 \text{ } \mu\text{s}$
 $T_c = \text{ } \mu\text{s}$
 $I_p = 25,76 \text{ A}$

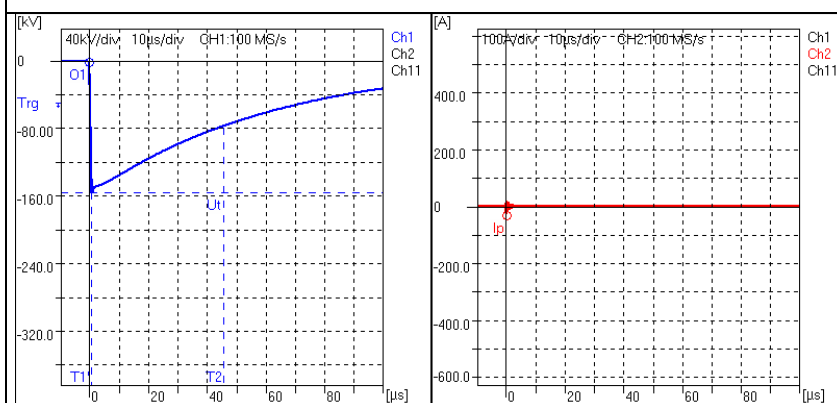


Fig.: 2

$U_t = -154,087 \text{ kV}$
 $T_1 = 0,669 \text{ } \mu\text{s}$
 $T_2 = 45,621 \text{ } \mu\text{s}$
 $T_c = \text{ } \mu\text{s}$
 $I_p = -25,18 \text{ A}$

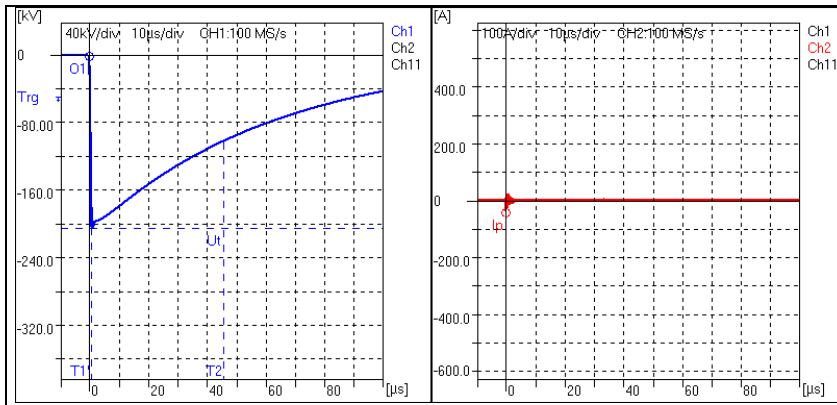


Fig.: 3

$$U_t = -203,732 \text{ kV}$$

$$T_1 = 0,673 \text{ } \mu\text{s}$$

$$T_2 = 45,681 \text{ } \mu\text{s}$$

$$T_c = \text{ } \mu\text{s}$$

$$I_p = -37,22 \text{ A}$$

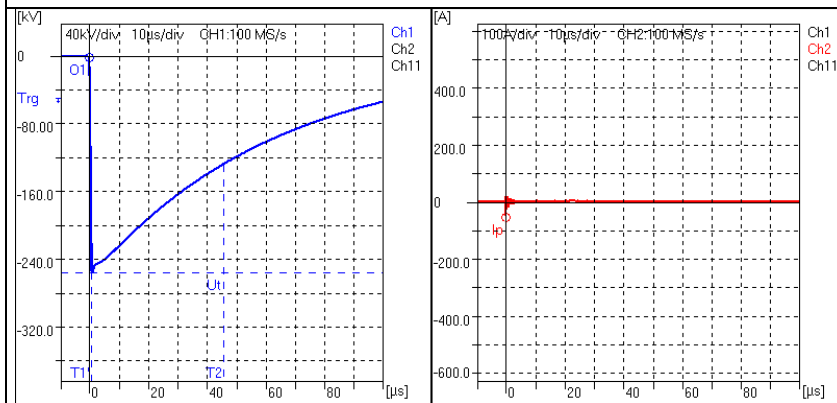


Fig.: 4

$$U_t = -254,777 \text{ kV}$$

$$T_1 = 0,684 \text{ } \mu\text{s}$$

$$T_2 = 45,768 \text{ } \mu\text{s}$$

$$T_c = \text{ } \mu\text{s}$$

$$I_p = -47,63 \text{ A}$$

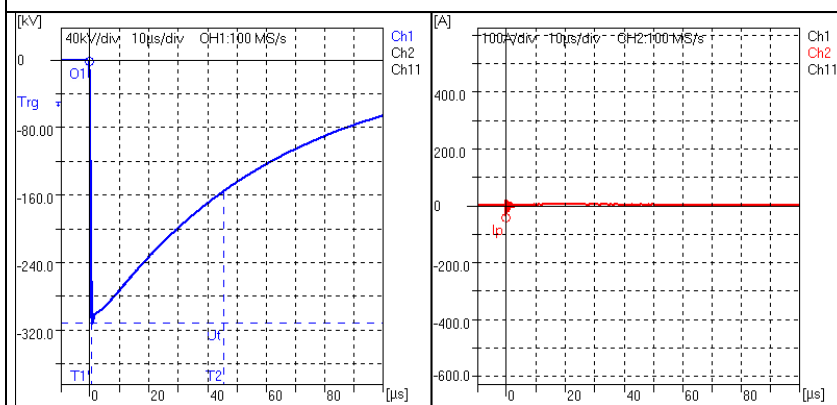


Fig.: 5

$$U_t = -310,085 \text{ kV}$$

$$T_1 = 0,682 \text{ } \mu\text{s}$$

$$T_2 = 45,793 \text{ } \mu\text{s}$$

$$T_c = \text{ } \mu\text{s}$$

$$I_p = -35,86 \text{ A}$$

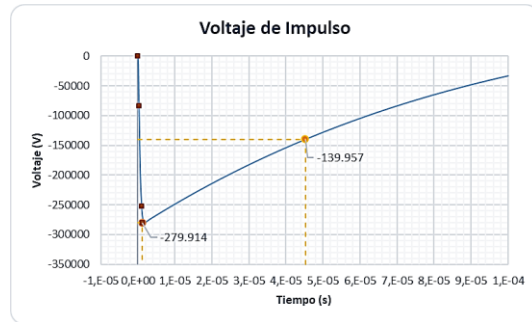
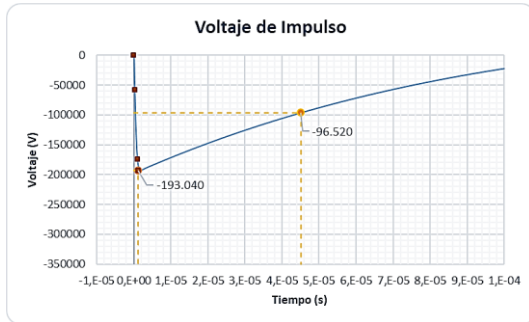
Anexo 2. Hoja de datos de simulaciones y pruebas para 1,5 m de conexión en AT, sin carga

Simulación	Rs Ω	Rp Ω	L/Etapa uH	Lex uH	Re Ω	Vp V	t1 s	t2 s	VpP V	t1P s	t2P s	%e Vp %	%e t1 %	%e t2 %
-100 kV														
1	43	66	6	1,5	0,002	-99052	1,00E-06	4,82E-05	-98456	1,17E-06	4,81E-05	0,6%	-14,7%	0,3%
2	43	66	5	1,5	0,002	-98769	1,05E-06	4,84E-05	-98456	1,17E-06	4,81E-05	0,3%	-10,6%	0,8%
3	43	66	4	1,5	0,002	-98559	1,11E-06	4,86E-05	-98456	1,17E-06	4,81E-05	0,1%	-5,4%	1,1%
4	43	66	3,5	1,5	0,002	-98470	1,14E-06	4,87E-05	-98456	1,17E-06	4,81E-05	0,0%	-2,9%	1,3%
5	43	66	3	1,5	0,002	-98388	1,17E-06	4,88E-05	-98456	1,17E-06	4,81E-05	-0,1%	-0,5%	1,5%
6	43	66	2,5	1,5	0,002	-98312	1,20E-06	4,88E-05	-98456	1,17E-06	4,81E-05	-0,1%	2,4%	1,6%
7	43	66	2	1,5	0,002	-98240	1,25E-06	4,89E-05	-98456	1,17E-06	4,81E-05	-0,2%	7,0%	1,8%
8	43	66	1,5	1,5	0,002	-98173	1,30E-06	4,90E-05	-98456	1,17E-06	4,81E-05	-0,3%	10,8%	1,9%
9	30	66	6	1,5	0,002	-103380	7,09E-07	4,52E-05	-99861	8,23E-07	4,70E-05	3,5%	-13,9%	-3,8%
10	30	66	5	1,5	0,002	-101469	6,92E-07	4,65E-05	-99861	8,23E-07	4,70E-05	1,6%	-16,0%	-1,2%
11	30	66	4	1,5	0,002	-100079	7,01E-07	4,74E-05	-99861	8,23E-07	4,70E-05	0,2%	-14,8%	0,8%
12	30	66	3,5	1,5	0,002	-99694	7,24E-07	4,77E-05	-99861	8,23E-07	4,70E-05	-0,2%	-12,0%	1,4%
13	30	66	3	1,5	0,002	-99452	7,61E-07	4,79E-05	-99861	8,23E-07	4,70E-05	-0,4%	-7,6%	1,8%
14	30	66	2,5	1,5	0,002	-99279	8,08E-07	4,80E-05	-99861	8,23E-07	4,70E-05	-0,6%	-1,8%	2,1%
15	30	66	2	1,5	0,002	-99141	8,54E-07	4,81E-05	-99861	8,23E-07	4,70E-05	-0,7%	3,8%	2,4%
16	30	66	1,5	1,5	0,002	-99023	8,96E-07	4,82E-05	-99861	8,23E-07	4,70E-05	-0,8%	8,9%	2,6%
17	22	66	6	1,5	0,002	-110988	6,15E-07	4,04E-05	-103485	6,64E-07	4,56E-05	7,2%	-7,4%	-11,4%
18	22	66	5	1,5	0,002	-107950	5,80E-07	4,22E-05	-103485	6,64E-07	4,56E-05	4,3%	-12,7%	-7,4%
19	22	66	4	1,5	0,002	-104673	5,50E-07	4,43E-05	-103485	6,64E-07	4,56E-05	1,1%	-17,2%	-2,9%
20	22	66	3,5	1,5	0,002	-103031	5,37E-07	4,54E-05	-103485	6,64E-07	4,56E-05	-0,4%	-19,1%	-0,5%
21	22	66	3	1,5	0,002	-101538	5,41E-07	4,64E-05	-103485	6,64E-07	4,56E-05	-1,9%	-18,6%	1,6%
22	22	66	2,5	1,5	0,002	-100446	5,44E-07	4,71E-05	-103485	6,64E-07	4,56E-05	-2,9%	-18,1%	3,2%
23	22	66	2	1,5	0,002	-99924	5,67E-07	4,75E-05	-103485	6,64E-07	4,56E-05	-3,4%	-14,6%	4,0%
24	22	66	1,5	1,5	0,002	-99671	6,21E-07	4,76E-05	-103485	6,64E-07	4,56E-05	-3,7%	-6,4%	4,5%
-200 kV														
25	43	66	6	1,5	0,002	-195688	1,00E-06	4,82E-05	-199536	1,18E-06	4,81E-05	-1,9%	-15,5%	0,2%
26	43	66	5	1,5	0,002	-195129	1,05E-06	4,84E-05	-199536	1,18E-06	4,81E-05	-2,2%	-11,6%	0,7%
27	43	66	4	1,5	0,002	-194714	1,11E-06	4,86E-05	-199536	1,18E-06	4,81E-05	-2,4%	-6,4%	1,1%
28	43	66	3,5	1,5	0,002	-194538	1,14E-06	4,87E-05	-199536	1,18E-06	4,81E-05	-2,5%	-3,7%	1,2%
29	43	66	3	1,5	0,002	-194376	1,17E-06	4,88E-05	-199536	1,18E-06	4,81E-05	-2,6%	-1,2%	1,4%
30	43	66	2,5	1,5	0,002	-194225	1,20E-06	4,88E-05	-199536	1,18E-06	4,81E-05	-2,7%	1,7%	1,5%
31	43	66	2	1,5	0,002	-194084	1,25E-06	4,89E-05	-199536	1,18E-06	4,81E-05	-2,7%	6,0%	1,7%
32	43	66	1,5	1,5	0,002	-193951	1,29E-06	4,90E-05	-199536	1,18E-06	4,81E-05	-2,8%	9,1%	1,8%
33	30	66	6	1,5	0,002	-204239	7,09E-07	4,52E-05	-199690	8,33E-07	4,71E-05	2,3%	-14,9%	-4,0%
34	30	66	5	1,5	0,002	-200463	6,97E-07	4,65E-05	-199690	8,33E-07	4,71E-05	0,4%	-16,4%	-1,3%
35	30	66	4	1,5	0,002	-197718	7,08E-07	4,74E-05	-199690	8,33E-07	4,71E-05	-1,0%	-14,9%	0,7%
36	30	66	3,5	1,5	0,002	-196957	7,25E-07	4,77E-05	-199690	8,33E-07	4,71E-05	-1,4%	-12,9%	1,2%
37	30	66	3	1,5	0,002	-196478	7,62E-07	4,79E-05	-199690	8,33E-07	4,71E-05	-1,6%	-8,5%	1,6%
38	30	66	2,5	1,5	0,002	-196136	8,08E-07	4,80E-05	-199690	8,33E-07	4,71E-05	-1,8%	-3,0%	1,9%
39	30	66	2	1,5	0,002	-195863	8,50E-07	4,81E-05	-199690	8,33E-07	4,71E-05	-1,9%	2,0%	2,2%
40	30	66	1,5	1,5	0,002	-195631	8,91E-07	4,82E-05	-199690	8,33E-07	4,71E-05	-2,0%	6,9%	2,4%
41	22	66	6	1,5	0,002	-219268	6,17E-07	4,04E-05	-203732	6,73E-07	4,57E-05	7,6%	-8,3%	-11,6%
42	22	66	5	1,5	0,002	-213268	5,77E-07	4,22E-05	-203732	6,73E-07	4,57E-05	4,7%	-14,3%	-7,5%
43	22	66	4	1,5	0,002	-206793	5,50E-07	4,43E-05	-203732	6,73E-07	4,57E-05	1,5%	-18,3%	-3,0%
44	22	66	3,5	1,5	0,002	-203550	5,33E-07	4,54E-05	-203732	6,73E-07	4,57E-05	-0,1%	-20,7%	-0,7%
45	22	66	3	1,5	0,002	-200596	5,34E-07	4,64E-05	-203732	6,73E-07	4,57E-05	-1,5%	-20,6%	1,5%
46	22	66	2,5	1,5	0,002	-198443	5,42E-07	4,71E-05	-203732	6,73E-07	4,57E-05	-2,6%	-19,4%	3,1%
47	22	66	2	1,5	0,002	-197411	5,68E-07	4,75E-05	-203732	6,73E-07	4,57E-05	-3,1%	-15,6%	3,9%
48	22	66	1,5	1,5	0,002	-196912	6,21E-07	4,76E-05	-203732	6,73E-07	4,57E-05	-3,3%	-7,7%	4,3%
-300 kV														
49	43	66	6	1,5	0,002	-292324	1,00E-06	4,82E-05	-303058	1,19E-06	4,82E-05	-3,5%	-16,1%	0,1%
50	43	66	5	1,5	0,002	-291456	1,05E-06	4,84E-05	-303058	1,19E-06	4,82E-05	-3,8%	-12,0%	0,5%
51	43	66	4	1,5	0,002	-290870	1,11E-06	4,86E-05	-303058	1,19E-06	4,82E-05	-4,0%	-7,1%	0,9%
52	43	66	3,5	1,5	0,002	-290606	1,14E-06	4,87E-05	-303058	1,19E-06	4,82E-05	-4,1%	-4,8%	1,0%
53	43	66	3	1,5	0,002	-290364	1,17E-06	4,88E-05	-303058	1,19E-06	4,82E-05	-4,2%	-1,9%	1,2%
54	43	66	2,5	1,5	0,002	-290139	1,20E-06	4,88E-05	-303058	1,19E-06	4,82E-05	-4,3%	1,0%	1,3%
55	43	66	2	1,5	0,002	-289928	1,25E-06	4,89E-05	-303058	1,19E-06	4,82E-05	-4,3%	4,9%	1,5%
56	43	66	1,5	1,5	0,002	-289729	1,29E-06	4,90E-05	-303058	1,19E-06	4,82E-05	-4,4%	8,3%	1,7%
57	30	66	6	1,5	0,002	-305098	7,09E-07	4,52E-05	-296771	8,41E-07	4,72E-05	2,8%	-15,7%	-4,1%
58	30	66	5	1,5	0,002	-299457	6,96E-07	4,65E-05	-296771	8,41E-07	4,72E-05	0,9%	-17,2%	-1,5%
59	30	66	4	1,5	0,002	-295356	7,10E-07	4,74E-05	-296771	8,41E-07	4,72E-05	-0,5%	-15,6%	0,5%
60	30	66	3,5	1,5	0,002	-294219	7,27E-07	4,77E-05	-296771	8,41E-07	4,72E-05	-0,9%	-13,6%	1,1%
61	30	66	3	1,5	0,002	-293503	7,59E-07	4,79E-05	-296771	8,41E-07	4,72E-05	-1,1%	-9,7%	1,5%
62	30	66	2,5	1,5	0,002	-292993	8,08E-07	4,80E-05	-296771	8,41E-07	4,72E-05	-1,3%	-3,9%	1,8%
63	30	66	2	1,5	0,002	-292586	8,50E-07	4,81E-05	-296771	8,41E-07	4,72E-05	-1,4%	1,1%	2,0%
64	30	66	1,5	1,5	0,002	-292239	8,97E-07	4,82E-05	-296771	8,41E-07	4,72E-05	-1,5%	6,6%	2,2%
65	22	66	6	1,5	0,002	-327548	6,13E-07	4,04E-05	-310085	6,82E-07	4,58E-05	5,6%	-10,1%	-11,8%
66	22	66	5	1,5	0,002	-318586	5,77E-07	4,22E-05	-310085	6,82E-07	4,58E-05	2,7%	-15,5%	-7,7%
67	22	66	4	1,5	0,002	-308913	5,50E-07	4,43E-05	-310085	6,82E-07	4,58E-05	-0,4%	-19,4%	-3,2%
68	22	66	3,5	1,5	0,002	-304074	5,35E-07	4,54E-05	-310085	6,82E-07	4,58E-05	-1,9%	-21,6%	-0,9%
69	22	66	3	1,5	0,002	-299656	5,37E-07	4,64E-05	-310085	6,82E-07	4,58E-05	-3,4%	-21,3%	1,2%
70	22	66	2,5	1,5	0,002	-296439	5,41E-07	4,71E-05	-310085	6,82E-07	4,58E-05	-4,4%	-20,7%	2,8%
71	22	66	2	1,5	0,002	-294898	5,71E-07	4,75E-05	-310085	6,82E-07	4,58E-05	-4,9%	-16,3%	3,6%
72	22	66	1,5	1,5	0,002	-294152	6,13E-07	4,76E-05	-310085	6,82E-07	4,58E-05	-5,1%	-10,1%	4,0%

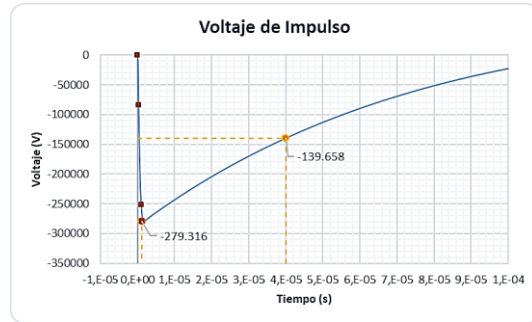
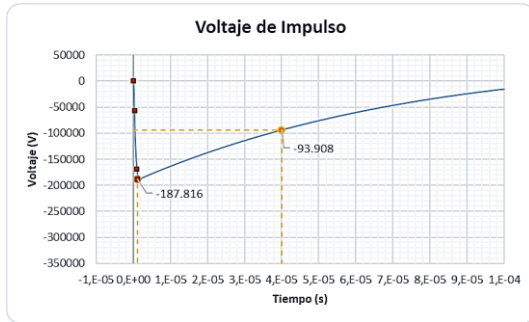
Anexo 3. Hoja de datos de simulaciones y pruebas con transformadores de potencia – Oscilogramas con datos de Simulink

Sim.	Transfor MVA	ENF.	AT kV	Rs Ω	Rp Ω	L/Etapa uH	LexH uH	Re Ω	Vp %	Vp V	t1 s	t2 s	VpP V	t1P s	t2P s	%e Vp	%e t1	%e t2
1	10,00	ONAN	69	30	79	2,5	20	0,002	50	-193040	1,17E-06	4,51E-05	-193650	1,13E-06	5,18E-05	-0,3%	4,1%	-12,9%
2	10,00	ONAN	69	30	79	2,5	20	0,002	100	-279914	1,18E-06	4,53E-05	-276600	1,14E-06	5,16E-05	1,2%	3,2%	-12,1%
3	9,38	ONAF	69	30	66	2,5	20	0,002	50	-187752	1,15E-06	3,86E-05	-187571	1,07E-06	4,20E-05	0,1%	8,1%	-8,1%
4	9,38	ONAF	69	30	66	2,5	20	0,002	100	-279220	1,16E-06	3,86E-05	-282282	1,08E-06	4,21E-05	-1,1%	7,6%	-8,3%
5	7,50	ONAN	69	30	66	2,5	20	0,002	50	-187816	1,16E-06	4,00E-05	-187571	1,07E-06	4,20E-05	0,1%	8,5%	-4,6%
6	7,50	ONAN	69	30	66	2,5	20	0,002	100	-279316	1,16E-06	4,00E-05	-282282	1,08E-06	4,21E-05	-1,1%	7,4%	-4,8%
7	7,50	ONAN	13,8	43	120	100	10	0,002	100	-103623	1,08E-06	4,35E-05	-103290	1,06E-06	5,01E-05	0,3%	1,6%	-13,2%
8	6,30	ONAN	69	30	66	2,5	20	0,002	50	-207800	1,12E-06	4,08E-05	-208500	1,05E-06	4,38E-05	-0,3%	7,0%	-7,1%
9	6,30	ONAN	69	30	66	2,5	20	0,002	100	-304450	1,12E-06	4,07E-05	-304967	1,06E-06	4,35E-05	-0,2%	5,6%	-6,4%
10	6,25	ONAF	69	30	66	2,5	20	0,002	50	-184618	1,07E-06	4,01E-05	-182637	1,06E-06	4,37E-05	1,1%	0,8%	-8,1%
11	6,25	ONAF	69	30	66	2,5	20	0,002	100	-296360	1,07E-06	4,01E-05	-297326	1,08E-06	4,38E-05	-0,3%	-1,0%	-8,4%
12	5,00	ONAN	69	30	66	2,5	20	0,002	50	-184658	1,07E-06	4,13E-05	-182637	1,06E-06	4,37E-05	1,1%	0,7%	-5,3%
13	5,00	ONAN	69	30	66	2,5	20	0,002	100	-296425	1,07E-06	4,13E-05	-297326	1,08E-06	4,38E-05	-0,3%	-0,9%	-5,6%
14	3,00	ONAN	69	30	66	2,5	20	0,002	50	-164938	1,08E-06	4,30E-05	-166818	1,01E-06	4,48E-05	-1,1%	6,6%	-4,0%
15	3,00	ONAN	69	30	66	2,5	20	0,002	100	-276516	1,08E-06	4,30E-05	-277928	1,03E-06	4,49E-05	-0,5%	5,7%	-4,3%

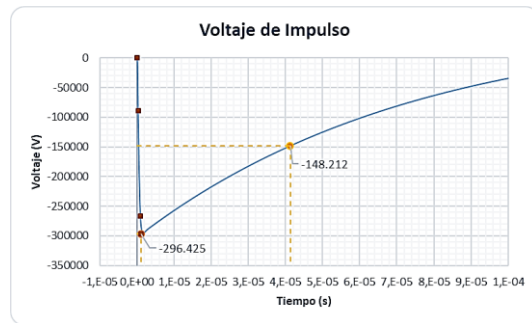
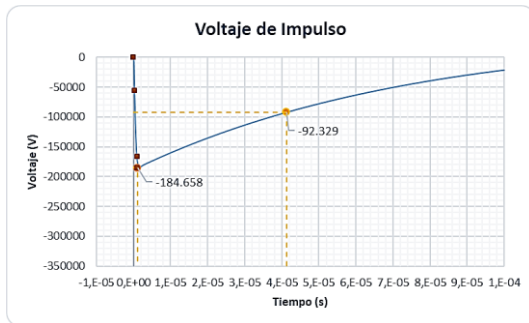
10 MVA



7,5 MVA



5 MVA



Anexo 4. Reportes de pruebas de transformadores de potencia en laboratorio

10 MVA

LIGHTNING IMPULSE



Reference: 10 MVA
 Tester: E.CARRILLO
 Serial N.: 0497582018
 Test ~~number~~: 3000

TEST RESULTS						
Fig.	Comment	U_t / kV	T_1 / μ s	T_2 / μ s	T_c / μ s	I_p / A
1	H1 70% LI RW	-193.851	1.124	51.444		-13.91
2	H1 100% LI FW	-278.617	1.135	51.526		-18.47
3	H1 100% LI FW	-278.644	1.132	51.517		-18.47
4	H1 100% LI FW	-278.646	1.133	51.515		17.27
5	H2 70% LI RW	-193.577	1.128	51.973		-13.91
6	H2 100% LI FW	-278.378	1.135	52.080		18.37
7	H2 100% LI FW	-278.284	1.134	52.086		-19.15
8	H2 100% LI FW	-278.254	1.134	52.086		18.37
9	H3 70% LI RW	-193.516	1.140	50.977		-14.65
10	H3 100% LI FW	-278.817	1.148	51.081		18.78
11	H3 100% LI FW	-278.573	1.148	51.056		18.64
12	H3 100% LI FW	-278.789	1.148	51.052		18.23

PICTURES	
<p>H1 30% LI RW</p>	<p>Fig.: 5 $U_t = -193.851$ kV $T_1 = 1.124$ μs $T_2 = 51.444$ μs $T_c = \mu$s $I_p = -13.91$ A $C_{05} = 3$</p>
<p>H1 100% LI FW</p>	<p>Fig.: 6 $U_t = -278.617$ kV $T_1 = 1.135$ μs $T_2 = 51.526$ μs $T_c = \mu$s $I_p = -18.47$ A $C_{05} = 3$</p>

LIGHTNING IMPULSE



Reference: 10 MVA
 Tester: E.CARRILLO
 Serial N.: 0497582018
 Test 3000

		<p>Fig.: 7 $U_1 = -276.644 \text{ kV}$ $T_1 = 1.132 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 51.517 \text{ } \mu\text{s}$ $T_c = \text{ } \mu\text{s}$ $I_{pk} = -18.47 \text{ A}$ $\cos\phi = 3$</p>
<p>H1 100% LI FW</p>		<p>Fig.: 8 $U_1 = -276.646 \text{ kV}$ $T_1 = 1.133 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 51.515 \text{ } \mu\text{s}$ $T_c = \text{ } \mu\text{s}$ $I_{pk} = 17.27 \text{ A}$ $\cos\phi = 3$</p>
		<p>Fig.: 10 $U_1 = -193.577 \text{ kV}$ $T_1 = 1.128 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 51.973 \text{ } \mu\text{s}$ $T_c = \text{ } \mu\text{s}$ $I_{pk} = -13.91 \text{ A}$ $\cos\phi = 1$</p>
<p>H2 70% LI RW</p>		<p>Fig.: 11 $U_1 = -276.378 \text{ kV}$ $T_1 = 1.135 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 52.080 \text{ } \mu\text{s}$ $T_c = \text{ } \mu\text{s}$ $I_{pk} = 18.37 \text{ A}$ $\cos\phi = 1$</p>

LIGHTNING IMPULSE



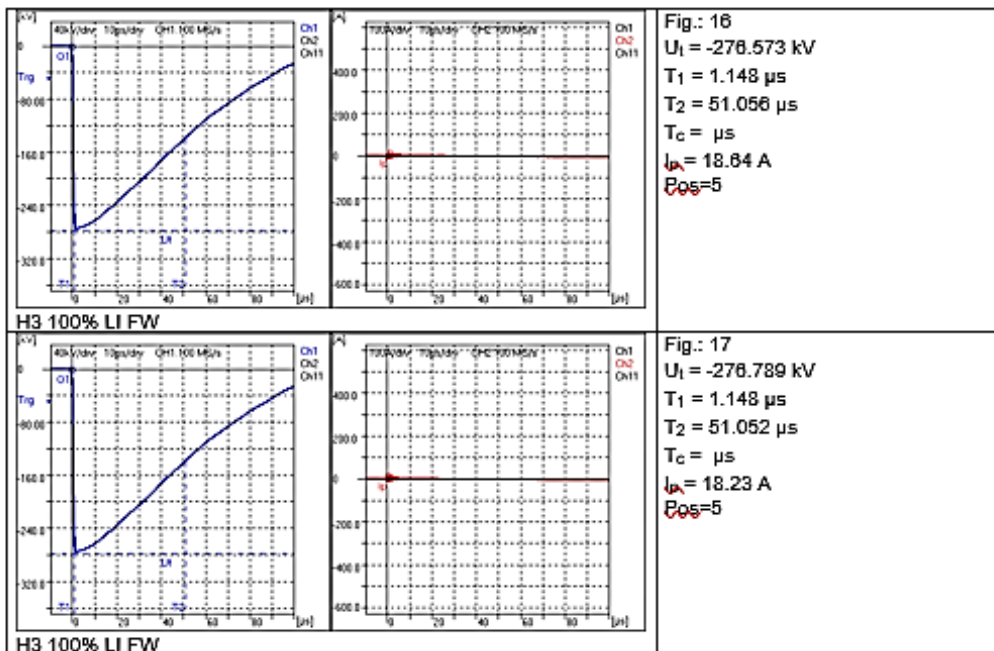
Reference: 10 MVA
 Tester: E.CARRILLO
 Serial N.: 0497582018
 Test mmm: 3000

		<p>Fig.: 12 $U_1 = -278.284 \text{ kV}$ $T_1 = 1.134 \mu\text{s}$ $T_2 = 52.086 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -19.15 \text{ A}$ $P_{os} = 1$</p>
		<p>Fig.: 13 $U_1 = -278.254 \text{ kV}$ $T_1 = 1.134 \mu\text{s}$ $T_2 = 52.086 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = 18.37 \text{ A}$ $P_{os} = 1$</p>
		<p>Fig.: 14 $U_1 = -193.516 \text{ kV}$ $T_1 = 1.140 \mu\text{s}$ $T_2 = 50.977 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -14.65 \text{ A}$ $P_{os} = 5$</p>
		<p>Fig.: 15 $U_1 = -276.817 \text{ kV}$ $T_1 = 1.148 \mu\text{s}$ $T_2 = 51.081 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = 18.78 \text{ A}$ $P_{os} = 5$</p>

LIGHTNING IMPULSE



Reference: 10 MVA
 Tester: E.CARRILLO
 Serial N.: 0497582018
 Test ~~msm~~: 3000



Nota.- La prueba ha pasado satisfactoriamente.

Ing. Renato Almache F.

Signature

7.5 MVA

LIGHTNING IMPULSE



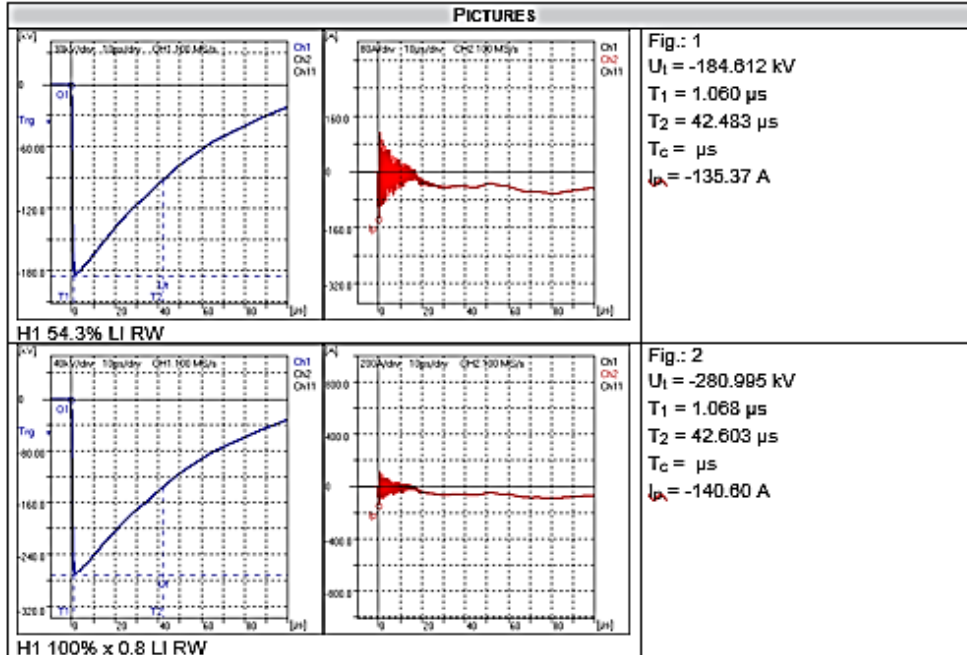
Reference: 7.5 MVA
 Tester: Manuel Cadena
 Serial N.: 1366932018
 Test number: 3000

TEST RESULTS						
Fig.	Comment	U_t / kV	T_1 / μ s	T_2 / μ s	T_c / μ s	I_p / A
1	H1 54.3% LI RW Tap 1	-184.612	1.060	42.483		-135.37
2	H1 100% x 0.8 LI RW	-280.995	1.068	42.603		-140.60
3	H1 100% x 0.8 LI RW	-281.037	1.068	42.610		-123.90
4	H1 100% x 0.8 LI RW	-280.822	1.066	42.624		-124.72
5	H2 54.3% LI RW Tap 3	-189.032	1.065	42.058		-71.46
6	H2 100 % x 0.8 LI RW	-285.505	1.071	42.162		-122.68
7	H2 100 % x 0.8 LI RW	-285.537	1.072	42.141		-121.16
8	H2 100 % x 0.8 LI RW	-285.435	1.072	42.166		-119.65
9	H3 54.3% LI RW Tap 5	-189.089	1.080	41.319		-81.18
10	H3 100 % x 0.8 LI RW	-280.347	1.090	41.443		-117.19
11	H3 100 % x 0.8 LI RW	-280.349	1.088	41.425		-118.91
12	H3 100 % x 0.8 LI RW	-280.456	1.089	41.437		-117.05

CONFIGURATION

Primary: 67 kV
 Rseries: 30 Ω
 Rparallel: 66 Ω
 Shunt: SMW 2 500
 Config: 1P5S
 V / reduced: 39 kV
 V / full: 58 kV

PICTURES



LIGHTNING IMPULSE



Reference: 7.5 MVA
 Tester: Manuel Cadena
 Serial N.: 1366932018
 Test ~~MSR~~: 3000

		<p>Fig.: 3 $U_1 = -281.037 \text{ kV}$ $T_1 = 1.068 \mu\text{s}$ $T_2 = 42.610 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -123.90 \text{ A}$</p>
<p>H1 100% x 0.8 LI RW</p>		<p>Fig.: 4 $U_1 = -280.822 \text{ kV}$ $T_1 = 1.068 \mu\text{s}$ $T_2 = 42.624 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -124.72 \text{ A}$</p>
<p>H1 100% x 0.8 LI RW</p>		<p>Fig.: 5 $U_1 = -189.032 \text{ kV}$ $T_1 = 1.065 \mu\text{s}$ $T_2 = 42.058 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -71.48 \text{ A}$</p>
<p>H2 54.3% LI RW</p>		<p>Fig.: 6 $U_1 = -285.505 \text{ kV}$ $T_1 = 1.071 \mu\text{s}$ $T_2 = 42.162 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -122.66 \text{ A}$</p>
<p>H2 100% x 0.8 LI RW</p>		

LIGHTNING IMPULSE



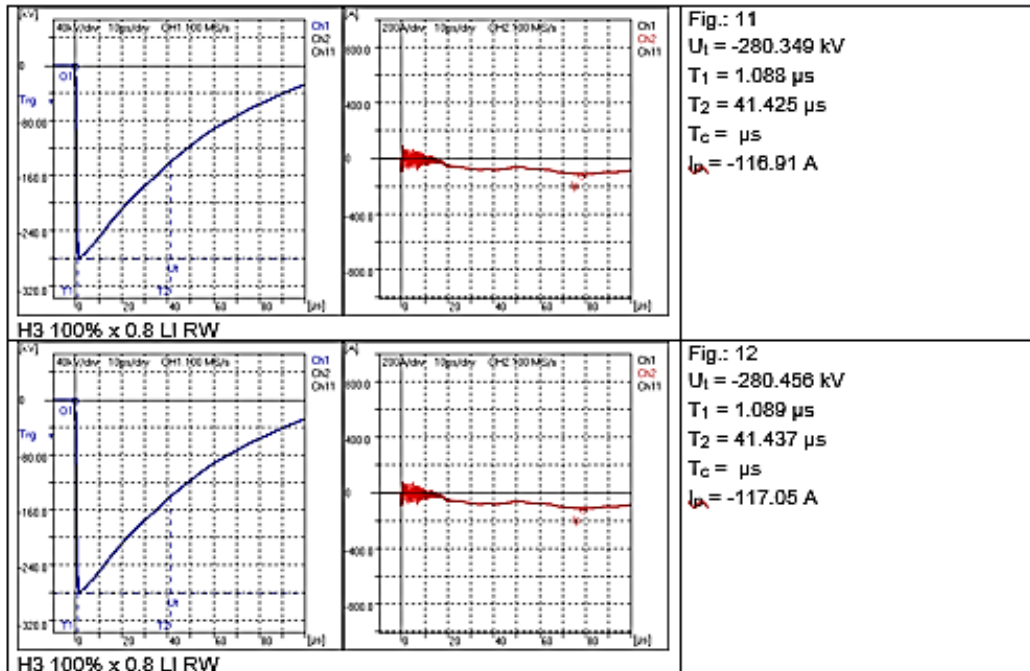
Reference: 7.5 MVA
 Tester: Manuel Cadena
 Serial N.: 1366932018
 Test : 3000

		<p>Fig.: 7 $U_1 = -285.537 \text{ kV}$ $T_1 = 1.072 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 42.141 \text{ } \mu\text{s}$ $T_c = \text{ } \mu\text{s}$ $I_{pk} = -121.16 \text{ A}$</p>
<p>H2 100% x 0.8 LI RW</p>		<p>Fig.: 8 $U_1 = -285.435 \text{ kV}$ $T_1 = 1.072 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 42.166 \text{ } \mu\text{s}$ $T_c = \text{ } \mu\text{s}$ $I_{pk} = -118.65 \text{ A}$</p>
<p>H2 100% x 0.8 LI RW</p>		<p>Fig.: 9 $U_1 = -189.089 \text{ kV}$ $T_1 = 1.080 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 41.319 \text{ } \mu\text{s}$ $T_c = \text{ } \mu\text{s}$ $I_{pk} = -81.18 \text{ A}$</p>
<p>H3 54.3% LI RW</p>		<p>Fig.: 10 $U_1 = -280.347 \text{ kV}$ $T_1 = 1.090 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 41.443 \text{ } \mu\text{s}$ $T_c = \text{ } \mu\text{s}$ $I_{pk} = -117.19 \text{ A}$</p>

LIGHTNING IMPULSE



Reference: 7.5 MVA
 Tester: Manuel Cadena
 Serial N.: 1366932018
 Test : 3000



Nota.- La prueba ha pasado satisfactoriamente.

Ing. Renato Almache F.

.....
 Signature

5 MVA

LIGHTNING IMPULSE



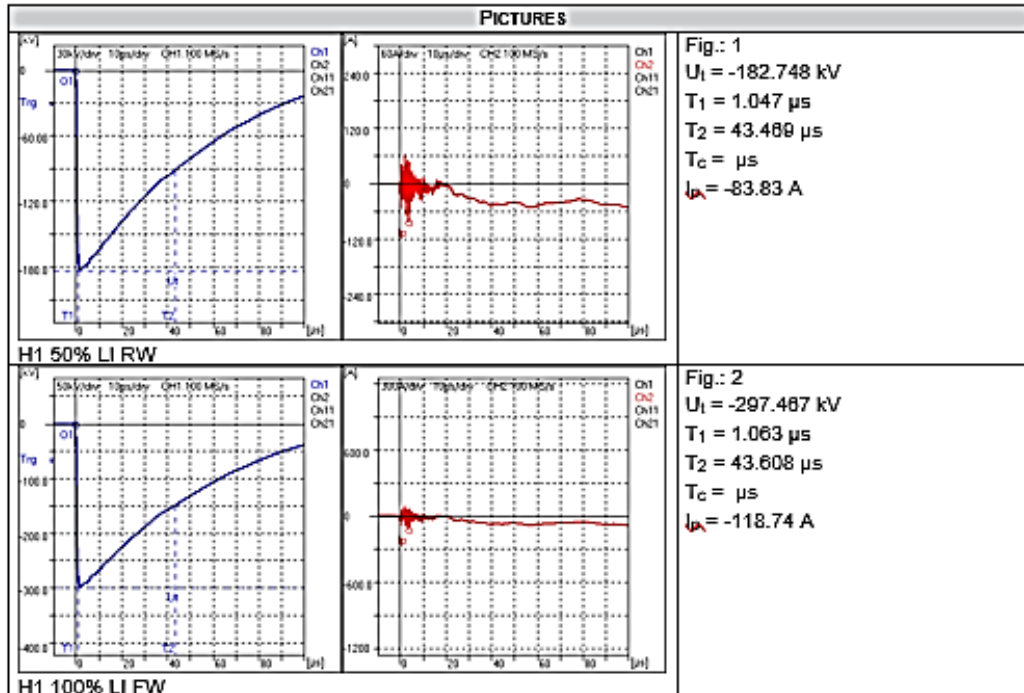
Reference: 5 MVA
 Tester: Johnny Villagomez
 Serial N.: 0476062018
 Test ~~RRR~~: 3000

TEST RESULTS						
Fig.	Comment	U_t / kV	T_1 / μ s	T_2 / μ s	T_c / μ s	I_p / A
1	H1 50% LI RW	-182.748	1.047	43.489		-83.83
2	H1 100% LI FW	-297.487	1.063	43.608		-118.74
3	H1 100% LI FW	-297.178	1.060	43.644		-120.45
4	H2 50% LI RW	-182.541	1.043	44.245		-42.84
5	H2 100% LI FW	-292.417	1.058	44.377		-65.99
6	H2 100% LI FW	-292.421	1.058	44.377		-67.01
7	H3 50% LI RW	-182.622	1.059	43.295		-70.76
8	H3 100% LI FW	-292.602	1.069	43.438		-113.68
9	H3 100% LI FW	-292.573	1.068	43.435		-113.00

CONFIGURATION

Primary: 69 kV
~~R~~series: 30 Ω
~~R~~parallel: 66 Ω
 Shunt: SMW 2 500
 Config: 1P5S
~~V~~ / reduced: 38 kV
~~V~~ / full: 61 kV

PICTURES



LIGHTNING IMPULSE



Reference: 5 MVA
 Tester: Johnny Villagomez
 Serial N.: 0476062018
 Test name: 3000

		<p>Fig.: 3 $U_1 = -297.178 \text{ kV}$ $T_1 = 1.060 \mu\text{s}$ $T_2 = 43.644 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -120.45 \text{ A}$</p>
<p>H1 100% LI FW</p>		<p>Fig.: 4 $U_1 = -182.541 \text{ kV}$ $T_1 = 1.043 \mu\text{s}$ $T_2 = 44.245 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -42.84 \text{ A}$</p>
<p>H2 50% LI RW</p>		<p>Fig.: 5 $U_1 = -292.417 \text{ kV}$ $T_1 = 1.058 \mu\text{s}$ $T_2 = 44.377 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -65.99 \text{ A}$</p>
<p>H2 100% LI FW</p>		<p>Fig.: 6 $U_1 = -292.421 \text{ kV}$ $T_1 = 1.058 \mu\text{s}$ $T_2 = 44.377 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -67.01 \text{ A}$</p>

LIGHTNING IMPULSE



Reference: 5 MVA
 Tester: Johnny Villegomez
 Serial N.: 0476062018
 Test ~~1500V~~: 3000

		<p>Fig.: 7 $U_1 = -182.622 \text{ kV}$ $T_1 = 1.059 \mu\text{s}$ $T_2 = 43.295 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -70.78 \text{ A}$</p>
<p>H3 50% LI RW</p>		<p>Fig.: 8 $U_1 = -292.602 \text{ kV}$ $T_1 = 1.069 \mu\text{s}$ $T_2 = 43.438 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -113.88 \text{ A}$</p>
<p>H3 100% LI FW</p>		<p>Fig.: 9 $U_1 = -292.573 \text{ kV}$ $T_1 = 1.068 \mu\text{s}$ $T_2 = 43.435 \mu\text{s}$ $T_c = \mu\text{s}$ $I_p = -113.00 \text{ A}$</p>

Nota.- La prueba ha pasado satisfactoriamente.

Ing. Renato Almache F.

Signature

Anexo 5. Tasas de interés activas máximas y recomendadas del Banco Central del Ecuador

TASAS DE INTERÉS ACTIVAS EFECTIVAS MÁXIMAS VIGENTES PARA EL SISTEMA FINANCIERO NACIONAL		
JULIO 2023		
SEGMENTO ¹	SUB-SEGMENTO	TASA ACTIVA EFECTIVA MÁXIMA
Productivo	Corporativo ²	10.01
	Empresarial ²	10.74
	PYMES ³	11.26
Consumo ³		16.77
Educativo	Educativo ³	9.5
	Educativo Social ³	7.5
Vivienda	Vivienda de Interés Social ³	4.99
	Vivienda de Interés Público ³	4.99
Inmobiliario ³		10.4
Microcrédito	Minorista ³	28.23
	Acumulación Simple ³	24.89
	Acumulación Ampliada ³	22.05
Inversión Pública ³		9.33

1. Resolución 603-2020-F del 22 de septiembre de 2020, de la ex Junta de Política y Regulación Monetaria y Financiera.

2. Resolución JPRF-F-2023-070 del 22 de junio de 2023, de la Junta de Política y Regulación Financiera.

3. Resolución JPRF-F-2022-031 del 29 de junio de 2022, de la Junta de Política y Regulación Financiera.

2. TASAS DE INTERÉS PASIVAS EFECTIVAS PROMEDIO POR INSTRUMENTO			
Tasas Referenciales	% anual	Tasas Referenciales	% anual
Depósitos a plazo*	7,13	Depósitos de Ahorro	1,41
Depósitos monetarios	1,10	Depósitos de Tarjetahabientes	1,11
Operaciones de Reporto	1,50		
3. TASAS DE INTERÉS PASIVAS EFECTIVAS REFERENCIALES POR PLAZO			
Tasas Referenciales	% anual	Tasas Referenciales	% anual
Plazo 30-60	5,83	Plazo 121-180	7,28
Plazo 61-90	6,49	Plazo 181-360	7,30
Plazo 91-120	6,73	Plazo 361 y más	8,89
4. OTRAS TASAS REFERENCIALES			
Tasa Pasiva Referencial	7,13	Tasa Legal	9,02
Tasa Activa Referencial	9,02	Tasa Máxima Convencional	10,01

* **DEFINICIONES:** Tasas de Interés Pasiva Referencial (TPR): Corresponde al promedio ponderado por monto, de las tasas de interés pasivas efectivas remitidas por las entidades del sistema financiero nacional al Banco Central del Ecuador, para todos los rangos de plazos. Mayor información, diríjase a:
https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/SectorMonFin/TasasInteres/Met_TasasReferenciales.pdf

5. [INFORMACIÓN HISTÓRICA DE TASAS DE INTERÉS REFERENCIALES](#)
 Para mayor información, contáctenos: pub.econ@bce.ec