

MODELO NO LINEAL DEL TRANSFORMADOR DE UTILIZACIÓN POR EFECTO DE ARMÓNICAS

Arreola Soria Oscar, López Villalobos José de Jesús, Conde Enríquez Arturo¹, Pérez Ruvalcaba Manuel,
 Tamez Álvarez Mario Alberto, Salazar Muñoz Zita Xilahutl
 Tecnológico Nacional de México, Campus Nuevo León Departamentos de Eléctrica-Electrónica
 Av. Eloy Cavazos 2001, Col. Tolteca, Guadalupe N.L.
 Tel. +52 81 8157 0500
 e-mail [oscar.as, jose.lv, manuel.pr, mario.ta, zita.sm]@nuevoleon.tecnm.mx
¹Universidad Autónoma de Nuevo León – FIME – DIE1
 e-mail con_de@yahoo.com

RESUMEN

Las subestaciones eléctricas de utilización (SEU) como la parte final para el suministro de energía a los diversos consumidores, y considerando la regulación y normativas para cumplir las características de calidad de la energía a los usuarios. Se realiza un estudio de diagnóstico, monitoreo, análisis de señales eléctricas para evaluar factores de calidad de la energía y con los datos obtenido en el diagnóstico de SED se determina un modelo matemático del transformador (usando Open Modelica©) en condición de carga no lineal y su efecto de distorsión de las señales eléctricas afectando la calidad de energía. Se evalúan los parámetros técnicos, pérdidas (costos) y eficiencia energética del sistema.

Palabras Clave: diagnóstico, distorsión, modelo no lineal, open modelica, calidad de energía

ABSTRACT

The electrical substations for use (SEU) serve as the final part for supplying power to various consumers, considering regulations and standards to meet the quality characteristics of energy to users. A diagnostic study is conducted, including monitoring and analysis of electrical signals to assess quality factors of the energy. With the data obtained from the diagnostic of EDS, a mathematical model of the transformer is determined (using Open Modelica©) under nonlinear load conditions and its effect on the distortion of electrical signals affecting power quality. Technical parameters, losses (costs), and energy efficiency of the system are evaluated.

Keywords: diagnosis, distortion, nonlinear model, open modelica, power quality

1. INTRODUCCIÓN

El transformador es el elemento principal de una subestación eléctrica de utilización porque cumple su función de manejar la potencia eléctrica a niveles diferentes de voltaje que requieren los usuarios, como se muestra en el diagrama unifilar de SEU de figura 1; particularmente esta investigación se centra en el análisis de los elementos de alimentación y transformación de la potencia y principalmente en la subestación eléctrica de utilización SEU [1]. Los transformadores son equipos que tienen un comportamiento no lineal en su funcionamiento debido al núcleo ferromagnético [2], el cual presenta efectos como histéresis, saturación y retentividad del flujo magnético como se muestra en la figura 2,

por lo tanto, la onda de corriente alterna se distorsiona y hay presencia de armónicos como se muestra en la figura 3, lo que conlleva a dar un suministro de energía con un cierto factor de calidad y también provoca el aumento de pérdidas propias.

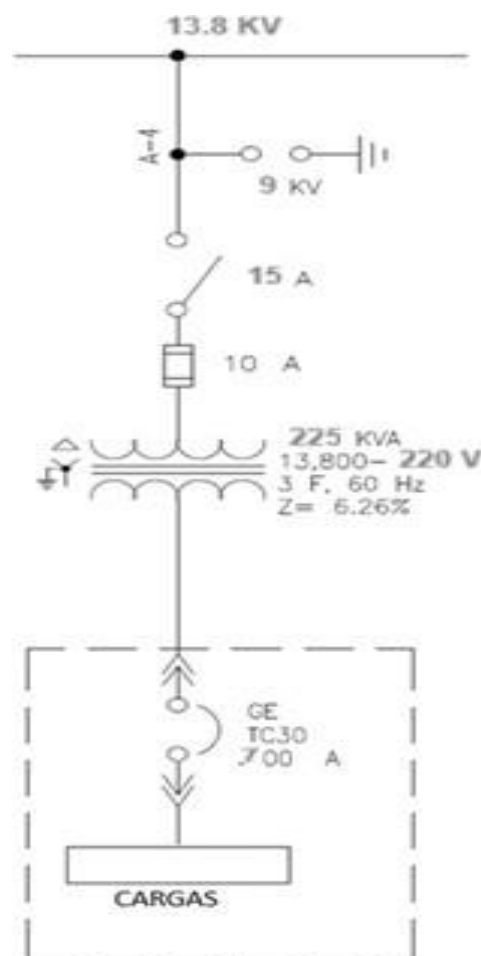


Figura 1. Diagrama unifilar de SEU

Otros trabajos de investigación han encontrado la presencia de armónicos en transformadores de sistemas de alimentación de redes distribución con generación fotovoltaica local, dando como resultado la ampliación de contenidos armónicos adicionales; el estudio se realizó usando SIMULINK 2021 de MATLAB y se ha demostrado que el transformador de distribución del sistema GCPV presenta mayores niveles de distorsión armónica de tensión y corriente en comparación con una red de distribución convencional [3].

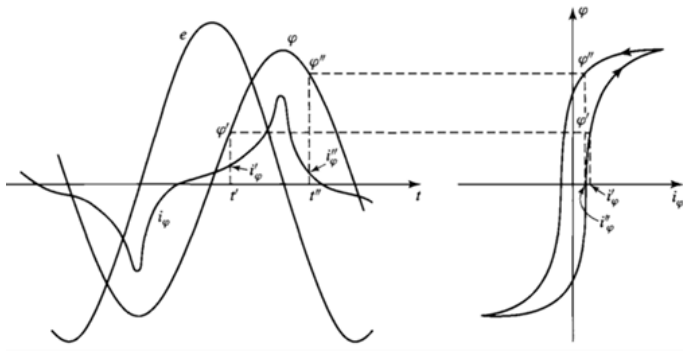


Figura 2. Distorsión en corriente de excitación debido a curva de histéresis y saturación.

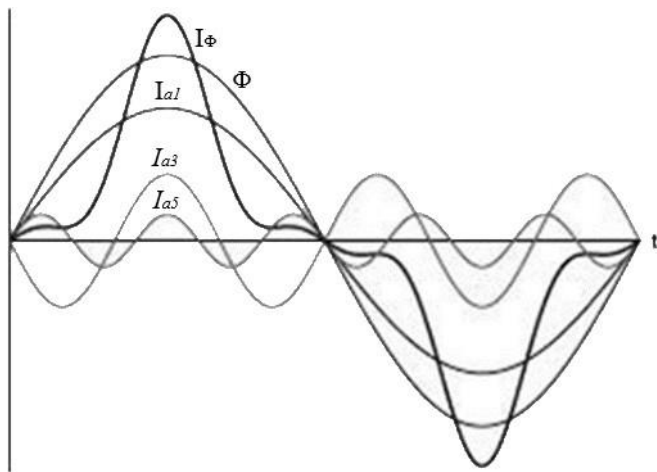


Figura 3. Señales de flujo Φ , corriente de excitación deformada $i\Phi$, la fundamental I_{a1} y sus armónicos I_{a3} e I_{a5} .

Estudio de diseño de transformador de distribución multiobjetivo considerando los armónicos de corriente de la red eléctrica utilizando algoritmo genético de ordenamiento no dominante NSGA III, para el diseño multiobjetivo se consideraron diversas variables continuas y discretas tanto en las funciones objetivo como en las restricciones; realizando varios pasos y cálculos en el diseño: Armónicos y sus efectos en transformadores, Diseño del núcleo y pérdidas en vacío, Diseño del devanado, Diseño de tanque, Cálculo de pérdidas devanados y cálculo del peso total [4].

2. ETAPAS DE DESARROLLO

El alcance de este estudio es obtener las señales de voltaje, corriente y potencia en el dominio del tiempo y observar algunas características o índices de calidad de la energía en este sistema de utilización de energía y específicamente en la subestación de utilización de mediano consumo y mediana-baja tensión; en cuanto al suministro apropiado de energía y su eficiencia energética.

El estudio tiene la finalidad de conocer los valores a través del simulador de la plataforma de software para modelado de sistemas dinámicos Open Modélica en la SED [5,6].

Un transformador de utilización es un transformador que suministra en la última etapa de transformación en la red de distribución de energía eléctrica, al reducir la tensión usada en los circuitos de distribución al nivel de tensión requerido por el cliente.

En el proceso de selección de la herramienta computacional para el modelado del transformador, el cual está basado en ecuaciones diferenciales y funciones polinómicas, sabemos que hay opciones clásicas que pueden ayudar (Matlab© y Scilab©), pero su implementación hace complejo la especificación misma, tomando en cuenta [7,8], se ve otra opción pensada en un lenguaje basado en descripción de ecuaciones diferenciales a resolver, que son nuestro caso de análisis directo y de ahí que se considere su uso para el análisis que requerimos hacer del transformador, la herramienta aplicada es Open Modelica©.

2.1. Modelo lineal del transformador y su circuito eléctrico equivalente

En la figura 4 se representa el circuito eléctrico equivalente del transformador definido por el acoplamiento magnético de los devanados en el núcleo con la ley de inducción electromagnética de Faraday X_M , los flujos magnéticos de dispersión en ambos devanados X_p X' , las pérdidas por efecto Joule en las resistencias de ambos devanados R_p R' y la pérdida en el núcleo por resistencia R_C .

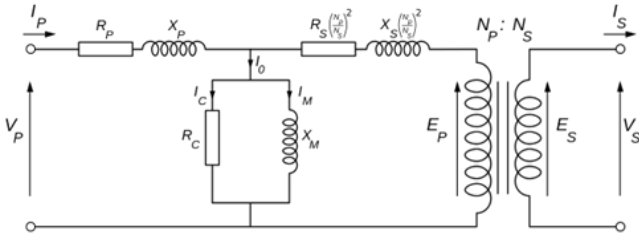


Figura 4. Circuito equivalente eléctrico del transformador

Para analizar el comportamiento eléctrico del transformador, aplicando la ley de tensiones de Kirchhoff al circuito equivalente simplificado referido al lado primario, de la figura 4 se obtiene la siguiente ecuación diferencial.

$$v(t)_p = R_p i(t)_p + L_{lp} \frac{di(t)_p}{dt} + R'_s i(t)'_s + L'_{ls} \frac{di(t)'_s}{dt} + v(t)'_s \quad (1)$$

donde

$$R'_s = R_s \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2 \quad X'_s = X_s \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2 \quad (2)$$

$$v(t)'_s = e(t)_p = v(t)_s \left(\frac{N_p}{N_s} \right) \quad i(t)'_s = i(t)_p = i(t)_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \quad (3)$$

2.1.1 Modelo lineal con Open Modelica

Partiendo de las ecuaciones anteriores, se implementaron varios modelos para resolver las ecuaciones diferenciales descritas anteriormente con el fin de proceder a crear una librería que nos ayude validar el comportamiento de la máquina eléctrica estática en cuestión, teniendo como resultado que la especificación del sistema de ecuaciones diferenciales de 2 variables, 2 ecuaciones y de naturaleza trivial para que se pueda obtener un modelo que se pueda simular y ser usado como modelo en otros proyectos. El modelo del sistema de ecuaciones diferenciales implementado se muestra en la figura 5, note en la parte referente a ecuaciones del código mostrado la implementación directa de las ecuaciones diferenciales. En la figura 6 se estructura en un solo bloque quedando como una herramienta de modelica para cualquier proyecto de estudio lineal del transformador, facilitando el trabajo de entrada y salida de datos.

```
// Constantes
constant Real pi=Modelica.Constants.pi;
constant Real freq=60;

// Parametros
parameter Real Xp=43.2 "Reactancia Inductiva Primario";
parameter Real Rp=5.93 "Resistencia Primaria";
parameter Real Rs=3.39 "Resistencia Secundaria";
parameter Real Xs=40.6 "Reactancia Inductiva Secundario";
parameter Real Rc=244000 "Resistencia de Nucleo";
parameter Real Xm=114000 "Resistencia de Magnetizacion";

//Especificacion de ecuaciones
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput Vsec annotation(
  ...);
Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput Isec annotation(
  ...);
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput Iprim annotation(
  ...);
Modelica.Blocks.Interfaces.RealOutput Vprim annotation(
  ...);

equation
  Iprim = (1/Rc)*Vsec + (1/Xm)*der(Vsec) + Isec;
  Vprim = Rp*Iprim + (Xp/(2*pi*freq))*der(Iprim) + Rs*Isec + (Xs/(2*pi*freq))*der(Isec) + Vsec;
```

Figura 5. Código directo de implementación de las ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento del transformador unifilar basado en las ecuaciones 1 y 4 respectivamente.

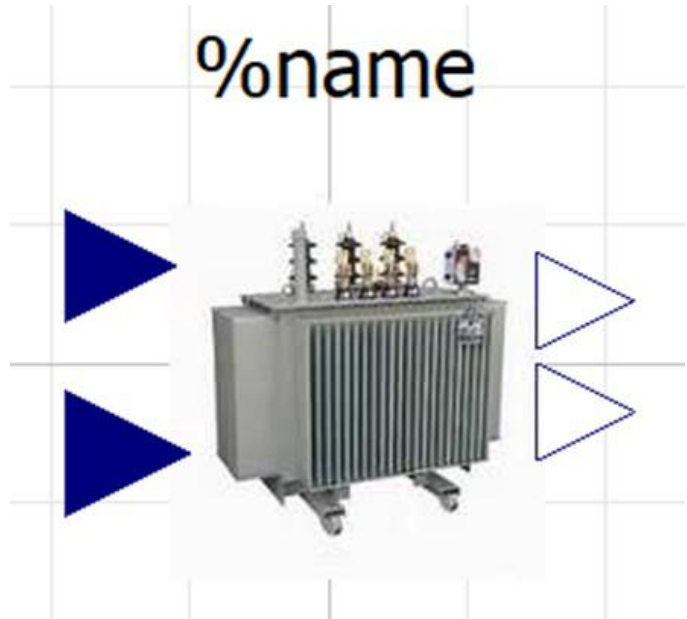


Figura 6. Bloque de aplicación que puede ser usado en cualquier modelo a desarrollar en Open Modelica© para referir el transformador.

Para fines de aplicación práctica del caso evaluado en campo se tomó en consideración el transformador de utilización como

monofásico 75 kVA, 7967 V: 127 V, 60 Hz; tiene los siguientes parámetros referidos al lado alto-voltaje:

$$R_p = 5.93 \, \Omega \quad X_p = 43.2 \, \Omega \quad R' = 3.39 \, \Omega \quad X' = 40.6 \, \Omega$$

$$R_c = 244 \, k\Omega \quad X_m = 114 \, k\Omega$$

Donde

$$L_p = \frac{X_p}{2\pi f} = \frac{43.2}{2\pi \times 60} = 0.1146 \, H. \quad (5)$$

$$L'_s = \frac{X'_s}{2\pi f} = \frac{40.6}{2\pi \times 60} = 0.1077 \, H \quad (6)$$

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{114000}{2\pi \times 60} = 320.39 \quad (7)$$

Asumiendo que el transformador trifásico está suministrando 225 kVA en sus terminales de bajo-voltaje para una carga con factor de potencia de 0.87 atrasado; que en este caso se puede aplicar para su evaluación.

2.2. Determinar la función no lineal para la curva de histéresis

Modelo no lineal del transformador debido la distorsión y generación de armónicas, usando Open Modelica©. Teniendo la tabla de datos de la curva de histéresis B-H usando interpolación de mínimos cuadrados a través del excel se obtiene una función polinómica de grado 6 que representa la curva histéresis B-H y por relación de variables magnéticas a eléctricas se obtiene la curva de histéresis $e-i$.

2.2.1 Modelo no lineal con Open Modelica©

El procedimiento para estructurar este nuevo modelo no lineal se obtiene con la unión del modelo lineal y la función no lineal de la curva de histéresis del transformador, lo cual se implementó a través de open Modelica. La figura 7 presenta el bloque de esta estructura.

3. RESULTADOS EN CAMPO Y CALCULADOS

3.1 Medición y diagnóstico de calidad de la energía

Pruebas de campo realizadas a la SEU con una analizador de calidad de la energía de redes eléctricas y monitoreando las señales de corriente y voltaje; obteniendo los porcentajes de distorsión total de las armónicas y la magnitud del factor K del transformador para soportar el calentamiento adicional causado por las corrientes armónicas generadas por cargas no lineales o conmutadas.

3.2 Casos de estudio en estado estable de transformador trifásico SEU

Con los datos y parámetros dados del transformador en el apartado 2.1 y con su circuito equivalente aproximado referido alta tensión, como se muestra en la figura 8.

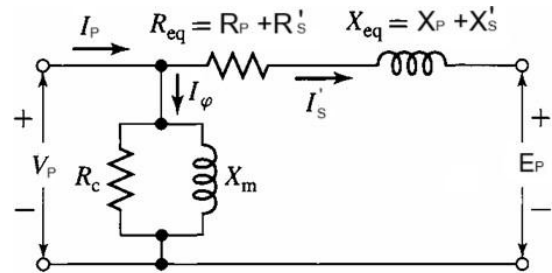


Figura 8. Circuito equivalente del transformador aproximado.

3.3 Resultados de simulaciones lineal y no lineal

Dentro del desarrollo del proyecto se tiene primero que establecer que nuestro modelo descriptivo de las ecuaciones diferenciales del transformador monofásico pueda arrojar resultados debido a su propia descripción de este, para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados que validan dicha funcionalidad en la figura 9 de corrientes y figura 10 de voltajes.



Figura 9. Resultado de la respuesta de la ecuación de corriente del primario y secundario del transformador, que valida el comportamiento de su ecuación diferencial.

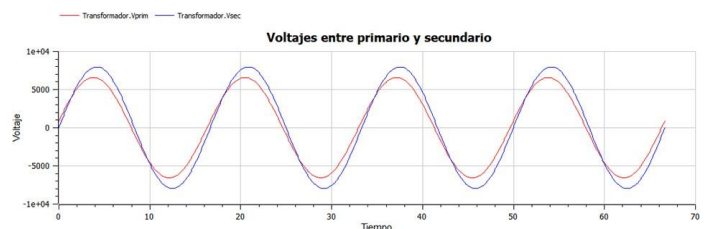


Figura 10. Respuestas de voltajes primario y secundario en el tiempo usando solución de ecuaciones diferenciales con Open Modelica.

En este nuevo modelo no lineal se continúa analizando el desarrollo del proyecto con open modélica, se presenta la parte anterior lineal más el efecto de histéresis y aplicando series de Fourier como se muestra en el esquema de la figura 11 y la integración de los armónicos impares se obtiene la onda corriente deformada, mostrada en la figura 12.

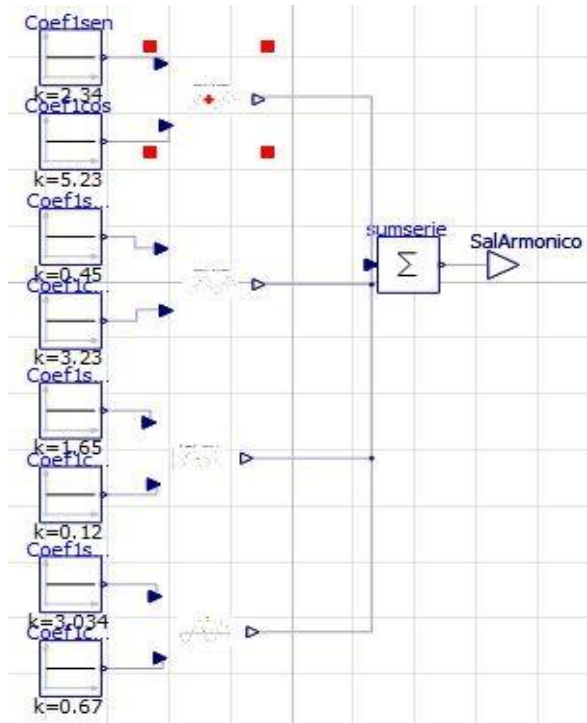


Figura 11. Esquema de sumatoria de armónicos impares.

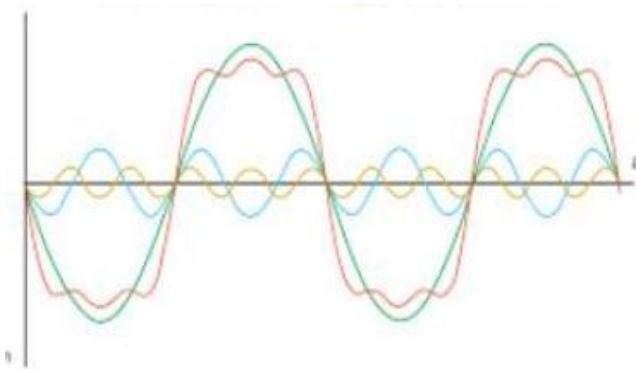


Figura 12. Forma de onda del corriente distorsionado en el transformador.

Hecho lo anterior se procede al desarrollo del bloque exportable para ser usado en cualquier otro modelo de sistema eléctrico en cual el efecto de las cargas y de los voltajes de alimentación puedan ser ajustados bajo las diversas condiciones que nos ayuden a estudiar el comportamiento transitorio y estable de una SEU. El resultado del desarrollo de la propuesta se pudo validar y hacer pruebas iniciales en donde se pudo variar el voltaje aplicado, la carga y su característica de histéresis; y poder hacer mediciones de sus efectos de corriente, como quedando el esquema de prueba de la figura 13. Así tener un esquema generalizado, como se muestra en la figura 13, cuando se tenga que hacer un análisis y solo aplicar la fuente de voltaje que ayuden a conocer las respuestas transitorias iniciales, en el entendido que cuando se tengan que realizar más pruebas de las diversas condiciones de alimentación de cargas que se conectan a través del transformador en cuestión.

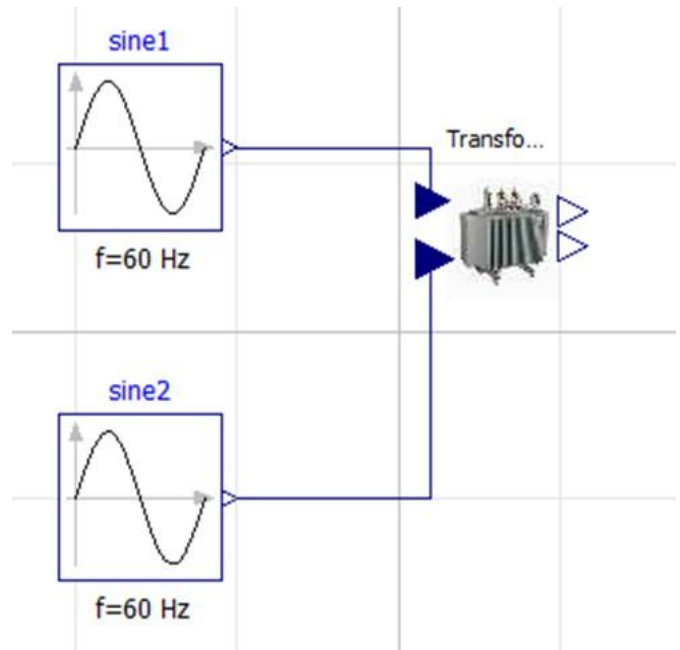


Figura13. Modelo de ambiente de prueba de la SEU con ajuste de carga en corriente y voltaje de secundario, especificado a manera de módulos de prueba.

3.4 Evaluación de la calidad de la energía con ETAP®

Estándar IEEE 519 2014 como documento de referencia de cumplimiento de los valores nominales de señales de corriente, voltaje, frecuencia y factores de calidad de la energía como los parámetros claves de calidad de la energía THD distorsión armónica total y TDD distorsión de demanda total [8], También tiempos de monitoreo a través de los analizadores de calidad de la energía en los puntos de acoplamiento común PCC de los suministradores y usuarios, del Estándar IEEE 519 2022 [9] se muestran las tablas 1 y 2 los índices y valores que la norma fija que se tienen que cumplir para una adecuada operación del sistema de utilización y beneficios propios de los usuarios y compañía suministradora; estos beneficios son: mayor tiempo de vida útil, menores pérdidas con reducción de la facturación, operación adecuada de los equipos, protección apropiada a las personas y equipos, etc.

Tabla 1. Límites de distorsión de voltaje. IEEE 519 2022

Voltaje del Bus V a PCC	Armónica individual (%)	Distorsión Total de Armónicas THD %
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5*

Tabla 2. Límites de distorsión de corriente para sistemas 120 V a 69 kV, IEEE 519 2022

ISC/ IL	Límites de armónicas a,b $2 \leq h \leq 11$	Límites de armónicas a,b $11 \leq h \leq 17$	Límites de armónicas a,b $17 \leq h \leq 23$	Límites de armónicas a,b $23 \leq h \leq 35$	Límites de armónicas a,b $35 \leq h \leq 50$	TDD Requerido
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Del análisis con el programa ETAP de la subestación eléctrica de distribución como caso de estudio se obtuvieron los resultados de las armónicas presentes mostradas en la figura 12, el cálculo de corriente de corto circuito ICC en PCC y corriente a plena carga IL; tomando en cuenta los resultados THDV y THDI de inciso 3.1; RV y η de inciso 3.2. Validando estos parámetros con los fijados por la norma de calidad de la energía dados en las tablas 1 y 2 se concluye que no cumplió y se requiere atender para lograr una adecuada calidad de la energía, una mejor eficiencia energética y regulación de voltaje. En la tabla 3 se muestra la comparación de los resultados de la subestación eléctrica de utilización en estudio y su validación con los parámetros claves de calidad de la energía dados en la norma IEEE 519 2022 y otros índices que se deben cumplir.

Tabla 3. Validación de resultados SEU vs índices según norma

Parámetro / índice	IEEE 519 2022	Resultados de SEU
THD_V	5%	1.8 %
THD_I	3%	12.25 %
TDD	10	
Factor K	4	1.33
η Eficiencia energética	No hay	98.36 %
RV Regulación de voltaje	No hay	5.8 %

4. CONCLUSIONES

Como proyecto en su etapa inicial, se consideran que los resultados al momento son parciales y todavía requieren un trabajo adicional, que está en desarrollo, pero en lo específico es un modelo que cumpla las expectativas matemáticas de las ecuaciones diferenciales se cumplieron al 100 % dando la posibilidad del desarrollo de los bloques funcionales que se aplican en las SEUs de las características de mediana tensión y baja capacidad; otro aspecto interesante fue la creación de una herramienta computacional que nos ayuda a analizar el efecto transitorio de nuestra máquina eléctrica, que otras herramientas solo hacen el desarrollo de un análisis en estado estacionario o estable, con lo anterior se abre la posibilidad de poder contar con un análisis completo desde el momento que se energiza nuestra subestación. También la obtención de un nuevo modelo no lineal al considerar todos los efectos operativos presentes de un transformador en condiciones reales, logrando implementar la idea de sincronizar el análisis lineal y la función no lineal de histéresis.

Por otro lado, se tiene la creación de un modelo “exportable” a otros modelos que la herramienta Open Modelica® ofrece mediante su interface gráfica facilitando la variación de condiciones como lo son la carga y la alimentación del transformador de una manera funcional y práctica, adecuando su aplicación de acuerdo al cliente a quien abastecer energía, tomando en cuenta la distorsión de señales y las consecuencias en la calidad de energía, aumento de pérdidas y la necesidad de regulación de voltaje.

4.1 Trabajo futuro

En esta primera etapa se tienen resultados en la modelación completa, en el estudio con la presencia de armónicos y en la valoración de sus efectos de calidad de la energía del transformador de utilización. Como próximo trabajo se abordará el diseño e instalación de filtros; y evaluar la mejora operativa de esta subestación eléctrica de utilización SEU.

5. REFERENCIAS

[1] IEEE Std 141-1993, “IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 345 East 47th Street, New York, NY 10017-2394, USA.

[2] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Stephen D. Umans, “Electric Machinery”, McGraw-Hill, 2003, ISBN 0-07-366009-4.

[3] Muhammad Haziq Mohd Wazir^{1*}, Dalila Mat Said¹, Norazliani Md Sapari¹ and Mohamed Shahrman Mohamed Yunus² (2024). Harmonics Assessment of Distribution Transformer with Photovoltaic Integration and Unbalance Loads (pp. 81-87). *Elektrika.utm.my* ISSN 0128-4428.

[4] Mohammad Hassan Hashemia, Ulas Kilicb, (2024). Multi-objective design optimization of hermetically sealed core-type distribution transformer considering current harmonics of power grid using NSGAIII, *ELSEIVER Engineering Science and Technology, an International Journal* 55 (2024) 101745.

[5] Michael M. Tiller, “Introduction to Physical Modeling with Modelica”, Klumer Academic Publishers, 2004, ISBN 978-0-7923-7367-4.

[6] Burhenne S., Wystrcil D., Elci M., Narmsara S. & Herkel S. (2013, August). Building performance simulation using Modelica: Analysis of the current state and application areas. In *proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Chambéry, France, August (pp. 22-28)

[7] Casella, F. (2015). Simulation of large-scale models in modelica: State of the art and future perspectives. In the 11th *International Modelica Conference* (pp. 459-468).

[8] Ian Wallace, Chief Engineer – Power Quality Solutions, Key Changes and Differences between the New IEEE 519 2014 Standard and IEEE 519-1992.

[9] 519-2022 – IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems Power Quality. Published by Comsys AB, website: comsys.se, ADF Technology: *Power quality – IEEE 515-2022*.