



Comportamiento de Temperaturas Top Oil y Hot Spot en Transformadores Sumergidos en Aceite Mediante el Ingreso de Carga de Vehículos Eléctricos

Behavior of Top Oil and Hot Spot Temperatures in Oil-Immersed Transformers by Means of Electric Vehicle Load Input

Fernando Rafael Arias Atiaja | Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador

Armando Salvador Freire Freire | Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador

ARTICLE HISTORY

Received: 7/11/2022

Accepted: 7/12/2022

KEY WORDS

Power transformer, normal load, temperature, load increase, electric vehicles, photovoltaic panels

PALABRAS CLAVE

Transformador de potencia, carga normal, temperatura, incremento de carga, vehículos eléctricos, paneles fotovoltaicos

ABSTRACT

The purpose of the following work is to calculate the top oil and hot spot temperature increases that the 187 MVA power transformer may experience, and to establish the limitations and guidelines within an acceptable level of operation within the IEEE C57. 91-1995, within the study there is a brief exposition of the equations used under the standard used, by means of Matlab code the calculation and study of the different scenarios that the load may have, the text presents the behavior figures under 4 operating conditions such as: normal load, top load, short- and long-term emergency load, through the initial base load profile of the table C.1 of the IEEE C57.91-1995 standard. In addition, the transformer temperature behavior due to the incorporation of distributed generation by means of photovoltaic panels and load increase due to the introduction of electric vehicles to the system is analyzed with reference to the Inov-Grid project carried out in the country of Portugal.

RESUMEN

El siguiente trabajo tiene como finalidad calcular los incrementos de temperaturas top oil y hot spot que puede experimentar el transformador de potencia de 187 MVA, y establecer las limitaciones y guías dentro de un nivel aceptable de funcionamiento dentro de la norma IEEE C57.91-1995. Dentro del estudio se realiza una breve exposición de las ecuaciones empleadas bajo la normativa utilizada; mediante código de Matlab se realiza el cálculo y estudio de los diferentes escenarios que puede tener la carga, se presenta en el texto las figuras de comportamiento bajo cuatro condiciones de operación como son: carga normal, carga superior, carga de emergencia a corto y largo plazo, a través del perfil de carga base inicial de la tabla C.1 de la norma IEEE C57.91-1995, además se analiza el comportamiento de temperatura del transformador debido a la incorporación de generación distribuida mediante paneles fotovoltaicos e incremento de carga por la introducción de vehículos eléctricos al sistema con referencia al proyecto InovGrid llevado a cabo en el país de Portugal.

I. INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre cálculo de temperatura de transformadores sumergidos en aceite son muy importantes ya que estos equipos suelen operar las 24 horas del día, mediante un ciclo normal, donde existen fluctuaciones a lo largo del día, sea para carga normal o en sobrecarga planificada por encima de la placa de identificación.

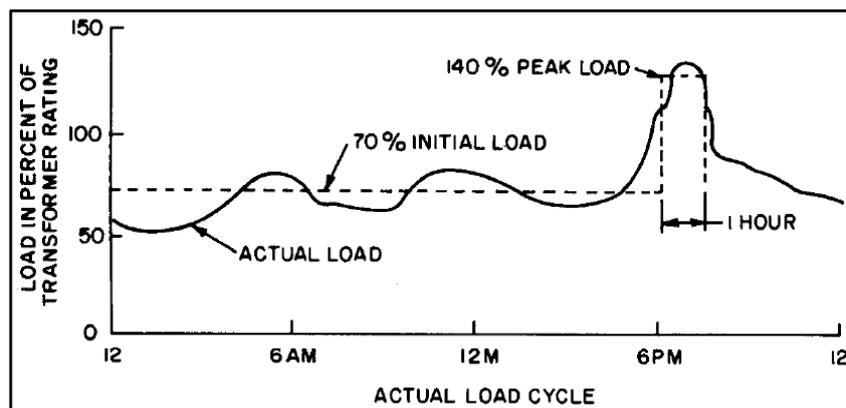
La causa de envejecimiento del aislamiento del transformador obedece a diversos factores, como el diseño, el historial de carga, la calidad del material aislante, la temperatura (devanado ambiente y aceite), eficiencia y mantenimiento del sistema de refrigeración [1].

El cálculo de temperatura en transformadores sirve para determinar la condición operativa del transformador, a su vez la temperatura ayuda a determinar el envejecimiento del papel aislante.

La capacidad de sobrecarga en transformadores, especialmente en transformadores de potencia, bajo condiciones de emergencia del sistema eléctrico, ha sido ampliamente estudiada con procedimientos de cálculo muy precisos, aun cuando los valores de temperatura alcanzados en el transformador son los únicos parámetros considerados.

Figura 1.

Ejemplo de ciclo de carga real y ciclo de carga equivalente



La temperatura ambiente también juega un factor importante para determinar la capacidad de carga de un transformador, los incrementos de carga deben agregarse al ambiente para determinar las temperaturas de funcionamiento. Para la clasificación del transformador se basan en temperatura ambiente promedio de 24 horas de 30 °C [2].

El método empleado para el cálculo de temperatura de aceite y de los devanados por cambios en la carga está simplificado y no requiere de procedimientos iterativos, donde dos exponentes representan cambios de pérdida de la carga y viscosidad del aceite causados por cambios de temperatura, los valores para los exponentes se determinan mediante procedimientos de prueba de sobrecarga [3].

Se proporciona un método alternativo que requiere un procedimiento de cálculo por computadora, el método produce una mayor precisión en la capacidad de carga si se utiliza métodos precisos para determinar la carga, temperatura y modo de refrigeración en funcionamiento.

Los conceptos que a continuación se explicitarán han sido tomados siguiendo como referencia las *Normas IEEE guide for loading: IEEE Std C57-91-1995* [2].

Además, la intención de este trabajo se ve reflejado a través de la integración de vehículos eléctricos (EV), y unidades de micro generación (uG) al sistema, el objetivo es ver cómo se comporta el transformador debido a la integración de estas unidades de carga y generación [4].

El propósito es analizar los posibles cambios de temperatura del transformador con una carga definida y sus cambios, debido a la integración de carga por la inclusión de vehículos eléctricos y, al mismo tiempo, la inyección de potencia al sistema por generación fotovoltaica.

Con la incorporación de vehículos eléctricos se espera que la carga del transformador vaya aumentando y, con la creciente integración de paneles fotovoltaicos, la carga vaya disminuyendo.

2. MÉTODO

2.1. ESTIMACIÓN DE VIDA ÚTIL DEL TRANSFORMADOR

La vida útil de un transformador de potencia está estimado de 20 a 35 años, pero podría alcanzar hasta unos 60 años según los mantenimientos correctos, existe una cierta incertidumbre en relación con la expectativa de vida y el deterioro progresivo de la máquina de acuerdo con lo que ofrecen los distintos fabricantes, la vida del transformador está relacionado con el proceso de degradación de la resistencia mecánica del papel, conocer el remanente de vida del transformador es un factor importante para la confiabilidad del sistema [5] [6]. Cuando el transformador es incapaz de cumplir con sus funciones de suplir potencia se podría decir que ha llegado al final de su vida útil [5].

El principio de envejecimiento del aislamiento o deterioro es una función temporal de temperatura, el contenido de oxígeno y humedad, aplicando los sistemas de conservación del aceite, la contribución de oxígeno y humedad al deterioro del aislamiento entonces se puede minimizar, llegando a definir la temperatura como parámetro de control [7] [8].

2.2. CICLO DE CARGA

Los transformadores operan con ciclos de carga que se repiten con un período de 24 horas. Un ciclo típico normal de carga es el que se muestra en la figura 1, donde se pueden observar fluctuaciones de carga a lo largo del día [2].

2.3. MÉTODO DE CONVERSIÓN DE CICLOS DE CARGA REALES EN EQUIVALENTES

Un transformador que suministra una carga fluctuante genera una pérdida fluctuante y su efecto es casi el mis-

mo como el que genera una carga constante promedio durante el mismo período de tiempo (ver Figura 1).

La carga equivalente, para todo un ciclo diario de carga puede expresarse por intermedio de la eq. 1 siguiente:

$$\left[\frac{L_1^2 t_1 + L_2^2 t_2 + L_3^2 t_3 + \dots + L_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_N} \right]^{0.5} \quad (1)$$

Donde:

L1, L2 son las diferentes etapas de carga en %, por unidad, kVA reales o en corriente de carga.

N es el número total de cargas consideradas en tantos períodos.

t1, t2 son las duraciones respectivas de estas cargas en horas.

2.4. EQUIVALENTE CONTINUO DE CARGA PREVIA

La carga previa continua equivalente, es la carga eficaz obtenida por medio de la eq. 8 en un período elegido del día. Carga construida para el ciclo de carga real (línea continua).

Continuos equivalentes por períodos de carga de 12 horas = $0,29[L_1^2 + L_2^2 + \dots + L_{12}^2]^{0.5}$

2.5. CÁLCULOS DE TEMPERATURAS

La temperatura del punto caliente (Θ_H) viene dado por la suma de tres condiciones de temperatura en un transformador de potencia, la extensión del punto más caliente del devanado sobre el aceite superior ($\Delta\Theta_H$) el incremento del aceite sobre la temperatura ambiente ($\Delta\Theta_{TO}$) y la temperatura ambiente (Θ_A) [9].

El cálculo de temperaturas top oil y hot spot se basan en la implementación de las ecuaciones de cálculo de temperaturas dictadas por la normativa IEEE C57.91-1995 mediante el perfil de carga.

El método para el cálculo de temperaturas del aceite y del bobinado presentado a continuación para el caso de cambios en el ciclo de cargas es simplificado y no requiere procesos iterativos. Los exponentes m y n utilizados responden a los cambios en la pérdida de carga y en la viscosidad del aceite causadas por cambios de temperatura [2].

2.6. COMPONENTES DE LA TEMPERATURA

La temperatura del punto más caliente del bobinado está dada por la eqs. 2 y 3 [2] [9]:

$$\Theta_H = \Theta_A + \Delta\Theta_{TO} + \Delta\Theta_H \quad (2)$$

Siendo la temperatura de aceite superior:

$$\Theta_{TO} = \Theta_A + \Delta\Theta_{TO} \quad (3)$$

Los cálculos de temperatura suponen una temperatura ambiente constante.

2.7. ELEVACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL ACEITE SUPERIOR POR ENCIMA DE LA TEMPERATURA AMBIENTE

La elevación máxima de la temperatura del aceite en un momento después de un cambio de etapa de carga es dada por la eq. 4 [2]:

$$\Delta\Theta_{TO} = (\Delta\Theta_{TO,U} - (\Delta\Theta_{TO,i})) \left(\frac{-1}{1 - \exp^{-\frac{1}{\tau_{TO}}}} \right) + \Delta\Theta_{TO,i} \quad (4)$$

Para el ciclo de sobrecarga de dos etapas, con una carga previa equivalente constante, la elevación inicial máxima del aceite se muestra en la eq. 5:

$$\Delta\Theta_{TO,i} = (\Delta\Theta_{TO,R}) \left[\frac{(K_i^2 R + 1)}{(R + 1)} \right]^n \quad (5)$$

Para el análisis de ciclos de carga en múltiples etapas con una serie de intervalos de corto tiempo, se usa la elevación máxima de aceite al final de la etapa previa de carga como elevación inicial de la temperatura de aceite superior para el cálculo de la siguiente etapa de carga [9] [10].

El valor máximo alcanzado por la temperatura superior de aceite está dado por la eq. 6:

$$\Delta\Theta_{TO,U} = (\Delta\Theta_{TO,R}) \left[\frac{(K_U^2 R + 1)}{(R + 1)} \right]^n \quad (6)$$

La ecuación se utiliza para calcular la elevación de temperatura del aceite superior para cada etapa de carga.

2.8. CONSTANTE DE TIEMPO DEL ACEITE

La capacidad térmica es dada por la siguiente ecuación para los modos de enfriamiento OA y FA:

C = 0,06 peso del conjunto de núcleo y bobina en libras + 0,04 (peso del tanque y accesorios en libras) + 1,33 (galones de aceite).

C = 0,0272 (peso del conjunto de núcleo y bobina en kilogramos) + 0,01814 (peso del tanque y accesorios en kilogramos) + 5,034 (litros de aceite).

C = 0,06 peso del conjunto de núcleo y bobina en libras + 0,06 (peso del tanque y accesorios en libras) + 1,93 (litros de aceite).

C = 0,0272 peso del conjunto de núcleo y bobina en libras + 0,0272 (peso del tanque y accesorios en kilogramos) + 7,305 (litros de aceite).

El peso a considerar para la cuba y radiadores es de todo aquel material ferroso en contacto con el aceite.

La constante de tiempo del aceite superior para carga nominal resulta por la eq. 7, [2] entonces:

$$\tau_{TO,R} = \frac{C \Delta\Theta_{TO,R}}{P_{T,R}} \quad (7)$$

Y la constante de tiempo para el aceite máximo viene dada por la eq. 8:

$$\tau_{TO} = \tau_{TO,R} \frac{\left(\frac{\Delta\Theta_{TO,U}}{\Delta\Theta_{TO,R}} \right) - \left(\frac{\Delta\Theta_{TO,i}}{\Delta\Theta_{TO,R}} \right)}{\left(\frac{\Delta\Theta_{TO,U}}{\Delta\Theta_{TO,R}} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{\Delta\Theta_{TO,i}}{\Delta\Theta_{TO,R}} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (8)$$

En la deducción de la eq. 8, se parte de la hipótesis de que la elevación extrema de la temperatura de aceite $\Delta\theta_{TO}$ es directamente proporcional con la pérdida de calor q , es decir;

$$\Delta\theta_{TO} = kq^n \quad (9)$$

Cuando $n = 1$, el 63% del cambio de temperatura ocurre en un lapso igual a la constante de tiempo sin importar la relación entre la elevación de la temperatura inicial y la elevación extrema de la temperatura. Cuando n no es igual a 1, entonces el cambio de temperatura en un intervalo de tiempo similar será diferente, dependiendo tanto de la elevación inicial de la temperatura como de la temperatura extrema [2].

2.9. ELEVACIÓN EN LOS PUNTOS CALIENTES DE LOS BOBINADOS

El gradiente de temperatura transitoria en los puntos más calientes del bobinado por encima de la temperatura del aceite superior está dado por la eq. 10:

$$\Delta\theta_H = (\Delta\theta_{H,U} - \Delta\theta_{TO,i}) \left(\frac{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_w}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_w}\right)} \right) + \Delta\theta_{H,i} \quad (10)$$

El valor inicial del punto más caliente por encima del aceite superior muestra la eq. 11:

$$\Delta\theta_{H,i} = \Delta\theta_{H,R} K^{2m} \quad (11)$$

Y la elevación extrema del punto más caliente por encima del aceite máximo está dada por la eq. 12:

$$\Delta\theta_{H,U} = \Delta\theta_{H,R} K_u^{2m} \quad (12)$$

Y el valor nominal del punto más caliente sobre el aceite máximo viene dado por la eq. 13:

$$\Delta\theta_{H,R} = \frac{\Delta\theta_H}{A.R} - \Delta\theta_{TO,R} \quad (13)$$

2.10. EXPONENTES UTILIZADOS EN LAS ECUACIONES DE TEMPERATURA

Los exponentes sugeridos para ser utilizados en las ecuaciones de elevación de temperatura son los indicados en [2], tabla 5.

2.11. AJUSTE DE LOS DATOS DE TEST PARA DIFERENTES POSICIONES DE TAP

Si se desea ajustar los datos de los informes de tests para la operación en una posición de tap sin carga distinta a la que se reportó el ensayo de calentamiento, pueden usarse las ecuaciones 14, 15 y 16 para obtener los datos ajustados.

$$\Delta\theta'_{TO,R} = \Delta\theta_{TO,R} \left[\frac{P'_{T,R}}{P_{T,R}} \right]^n \quad (14)$$

Elevación de temperatura del punto más caliente:

$$\Delta\theta'_{H,R} = \Delta\theta_{H,R} \left[\frac{I'_{R}}{I_{R}} \right]^{2n} \quad (15)$$

Finalmente, la constante de tiempo con carga nominal de tap es:

$$\tau_{TO,R} = \frac{C\Delta\theta'_{TO,R}}{P'_{T,R}} \quad (16)$$

2.12. CARGA DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Como dijimos al comienzo, toda sobrecarga puede exponer el aislamiento a temperaturas mayores a las especificadas por el fabricante.

La IEEE Std C57.91-1995 ha definido 4 tipos diferentes de condiciones de carga, por encima de las especificaciones de placa.

2.13. LIMITACIONES DE TEMPERATURA

En la tabla 6 de [2] se muestran los valores sugeridos por la IEEE Std C57.91.1995 para los límites de temperaturas y cargas para sobrecargar un transformador por encima de los límites de placa.

En la tabla 7 de [2] se dan valores sugeridos de límites de temperatura que ocasionan una pérdida razonable de vida para los cuatro tipos de carga.

Los límites sugeridos de temperatura que dan una pérdida de vida razonable para los cuatro tipos de carga se dan en la tabla 8 de [2].

2.14. GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

La generación distribuida es la energía directamente conectada a la red de distribución o al consumidor, utilizando diversas fuentes de energía [11].

La integración de distintas áreas o disciplinas es muy importante, como el transporte y la electricidad con el fin de lograr un desarrollo sostenible en el tiempo representando un gran reto para los sistemas de potencia y distribución [12].

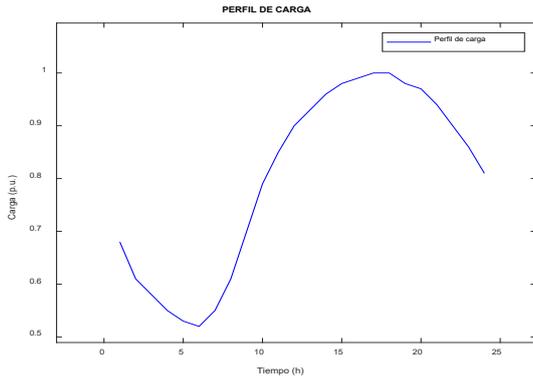
La posibilidad de disponer fuentes nuevas de energías en la red de distribución, además de la inclusión masiva de vehículos eléctricos genera nuevos desafíos en el diseño, operación y gestión del transformador de distribución, requiere de una modernización de las redes eléctricas [13].

2.15. IMPACTO DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS A LA RED

Entre los impactos más significativos desde la red eléctrica esta las caídas de tensión, congestión de líneas e incremento de pérdidas en el sistema de distribución, sobre-

Figura 2.

Perfil de carga en estado normal de operación



cargas en el transformador y modificación de la curva de demanda [14].

El envejecimiento acelerado del transformador por carga de vehículos eléctricos depende del aislamiento, el mismo que tiene una estrecha relación con la temperatura de operación, al efectuar su incorporación su nivel de carga va aumentando, hasta superar su límite de potencia y si no se tiene el acompañamiento de un sistema adecuado de gestión de recarga puede ocasionar además de otros elementos del sistema el porcentaje de pérdida de vida útil del transformador [15].

2.16. IMPACTO EN ESCENARIOS DE MOVILIDAD ELÉCTRICA

Los vehículos eléctricos prometen un campo de investigación exhaustiva en la ingeniería, integrado al acrecentamiento de consumo, en países en vías de desarrollo como países del sur de Asia se aprecia el uso de vehículos eléctricos de baterías similares a la bicicleta eléctrica y el auto Rick Shaw [16].

Debido a la gran demanda de consumo eléctrico que esto genera y la rápida inserción de esta tecnología, se recargan con frecuencia desde las conexiones domésticas, debido a que las estaciones de carga no son suficientes, esto hace que existan mayores pérdidas en todo el sistema eléctrico y disminuya la vida útil del transformador [16].

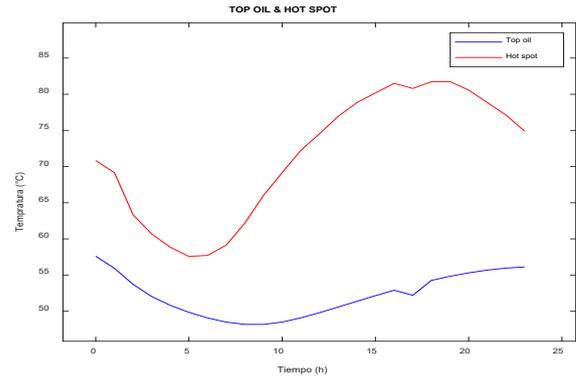
Estudios indican soluciones técnicas de optimización difusa que proporcionan una tasa de carga diferente para estas condiciones, esto ahorra energía y hace que el negocio de vehículos eléctricos sea más rentable para el propietario.

Mientras que en países del sur del continente europeo consideran que el reducir energía primaria, contaminantes atmosféricos tóxicos al aire y gases de efecto invernadero es un reto que tiene la sociedad y es uno de los problemas graves que afectan a la humanidad [17].

El incremento en la utilización de combustibles alternos como biodiésel o electricidad y la última generación en motores de vehículos eléctricos representan una estrategia importante de emisiones y consumos [18].

Figura 3.

Curvas de temperatura top oil y hot spot en estado normal de operación



Se asegura que la combinación de producción de energías renovables y la inserción de vehículos eléctricos desempeñan un papel importante en esta perspectiva.

Entonces se plantea la electromovilidad como un tema de prioridad, esto obliga al despliegue de puntos de carga a lo largo y ancho de la región y, con el fin de tener una perspectiva futura, se debe adoptar ciclos de prueba para vehículos ligeros y así derivar la función de consumo, además de prever la importancia en investigación de escenarios futuros de movilidad de vehículos eléctricos con la finalidad de reubicar demandas de energía y así evitar que se supere la capacidad de la red, sobre todo la capacidad del transformador.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la resolución de cálculo de temperaturas se utiliza el software Matlab, mediante código se procede a plasmar las diferentes ecuaciones mostradas en teoría y mostrar los resultados y gráficos correspondientes a cada uno de ellos.

Siguiendo la metodología descrita anteriormente, en esta sección se presentan los resultados de cálculo e ilustraciones de los incrementos de carga de acuerdo al ejemplo mostrado en la norma IEEE C57.91-1995.

La normativa contempla el perfil de carga de un transformador de 187 MVA que esté sujeto a varios cambios de carga para las siguientes condiciones de operación:

- Carga normal (Normal load)
- Carga superior al valor nominal (PLBN)
- Carga de emergencia de largo plazo (LTE)
- Carga de emergencia de corto plazo (STE)

3.1. CARGA NORMAL (NORMAL LOAD)

Con base en el perfil de carga entregado por la normativa IEEE C57.91-1995 Tabla C.1, se obtienen los siguientes datos (ver Tabla 1).

La figura 2 muestra el perfil de carga en estado normal de operación, caso base de estudio inicial que se toma

Tabla 1.

Ciclos de carga y aumentos de temperatura para un transformador de 187 MVA

CARGA NORMAL						PLBN				LTE				STE			
Hora	Carga (p.u.)	$\Delta \Theta_{to}$ (°C)	$\Delta \Theta_{to}$ (°C)	$\Delta \Theta_H$ (°C)	Θ_H (°C)	Carga (p.u.)	$\Delta \Theta_{to}$ (°C)	$\Delta \Theta_H$ (°C)	Θ_H (°C)	Carga (p.u.)	$\Delta \Theta_{to}$ (°C)	$\Delta \Theta_H$ (°C)	Θ_H (°C)	Carga (p.u.)	$\Delta \Theta_{to}$ (°C)	$\Delta \Theta_H$ (°C)	Θ_H (°C)
1	0,68	29,94	29,94	13,22	73,20	0,86	43,78	21,15	94,90	0,86	45,23	21,15	96,40	0,86	45,54	21,15	96,70
2	0,61	27,42	27,42	10,64	68,10	0,77	39,85	16,96	86,80	0,77	40,94	16,96	87,90	0,77	41,17	16,96	88,10
3	0,58	24,86	24,86	9,62	64,50	0,73	35,82	15,24	81,10	0,73	36,63	15,24	81,90	0,73	36,81	15,24	82,10
4	0,55	22,67	22,67	8,65	61,30	0,69	32,35	13,62	76,00	0,69	32,96	13,62	76,60	0,69	33,09	13,62	76,70
5	0,53	20,78	20,78	8,03	58,80	0,67	29,33	12,84	72,20	0,67	29,78	12,84	72,60	0,67	29,88	12,84	72,70
6	0,52	19,20	19,20	7,73	56,90	0,66	26,86	12,46	69,30	0,66	27,20	12,46	69,70	0,66	27,27	12,46	69,70
6	0,52	18,14	19,20	7,73	56,90	0,66	26,86	12,46	69,30	0,66	26,86	12,46	69,30	0,66	26,86	12,46	69,30
7	0,55	17,14	17,94	8,65	56,60	0,69	24,91	13,62	68,50	0,69	24,91	13,62	68,50	0,69	24,91	13,62	68,50
8	0,61	16,63	17,23	10,63	57,90	0,77	23,75	16,96	70,70	0,77	23,75	16,96	70,70	0,77	23,75	16,96	70,70
9	0,70	16,76	17,21	14,01	61,20	0,88	23,74	22,15	75,90	0,88	23,74	22,15	75,90	0,88	23,74	22,15	75,90
10	0,79	17,74	18,07	17,85	65,90	1,00	25,08	28,60	83,70	1,00	25,08	28,60	83,70	1,00	25,08	28,60	83,70
11	0,85	19,47	19,71	20,66	70,40	1,07	27,76	32,74	90,50	1,07	17,76	32,74	90,50	1,07	27,76	32,74	90,50
12	0,90	21,49	21,67	23,17	74,80	1,13	30,85	36,52	97,40	1,13	30,85	36,52	97,40	1,13	30,85	36,52	97,40
13	0,93	23,66	23,79	24,74	78,50	1,17	34,14	39,15	103,30	1,29	34,14	39,15	103,30	1,92	34,14	39,15	103,30
14	0,96	25,69	25,79	26,36	82,20	1,21	37,29	41,87	109,20	1,33	39,48	50,59	120,10	1,33	46,76	50,59	127,40
15	0,98	27,64	27,71	27,47	85,20	1,23	40,36	43,27	113,60	1,36	44,27	52,90	127,20	1,36	49,73	52,90	132,60
16	0,99	29,39	29,44	28,03	87,50	1,25	43,03	44,69	117,70	1,38	48,46	54,47	132,90	1,38	52,55	54,47	137,00
17	1,00	30,84	30,88	28,60	89,50	1,26	45,40	45,41	120,80	1,39	52,01	55,26	137,30	1,39	55,07	55,26	140,30
18	1,00	32,08	32,11	28,60	90,70	1,26	47,36	45,41	122,80	1,39	54,87	55,26	140,10	1,39	57,17	55,26	142,40
19	0,98	33,01	33,03	27,47	90,50	1,23	48,83	43,27	122,10	1,23	57,02	55,26	142,30	1,23	58,74	55,26	144,00
20	0,97	33,41	33,43	26,91	90,30	1,22	49,38	42,57	122,00	1,22	55,52	42,57	128,10	1,22	56,81	42,57	129,40
21	0,94	33,57	33,58	25,27	88,90	1,18	49,61	39,82	119,40	1,18	54,21	39,82	134,00	1,18	55,18	39,82	125,00
22	0,90	33,26	33,27	23,17	86,40	1,13	49,07	36,52	115,60	1,13	52,52	36,52	119,00	1,13	53,25	36,52	119,80
23	0,86	32,49	32,49	21,15	83,60	1,08	47,81	33,36	111,20	1,08	50,39	33,36	113,80	1,08	50,94	33,36	114,30
24	0,81	31,39	31,39	18,76	80,20	1,02	46,04	29,76	105,80	1,02	47,98	29,76	107,70	1,02	48,39	29,76	108,20

Nota. [3].

en cuenta para la incorporación de generación distribuida con paneles fotovoltaicos y carga de vehículos eléctricos (ver Figura 2).

Utilizando las ecuaciones mencionadas anteriormente en la sección cálculo de temperaturas se procede, mediante código realizado en programación Matlab, a calcular las temperaturas top oil y hot spot para carga normal, obteniendo los siguientes resultados para una temperatura ambiente de 30 °C (ver Tabla 2) top oil & hot spot - carga normal.

Además, se visualiza (ver Figura 3) las curvas de temperatura top oil y hot spot calculadas para la carga normal de operación.

3.2. CARGA SUPERIOR AL VALOR NOMINAL (PLBN)

En la figura 4 se muestra el perfil de carga en base al incremento de carga al valor nominal (ver Figura 4).

De la misma forma, se procede al respectivo cálculo, correspondiente al perfil de carga entregado para este caso de estudio, obteniendo los siguientes resultados (ver

Tabla 2) top oil & hot spot - PLBN.

En la figura 5 se puede apreciar el incremento de temperatura considerable por encima de los 100 °C en hot spot y cercano a los 70 °C en top oil debido al incremento de carga prolongado de 12 horas superior a la carga 1 p.u. del caso de estudio (ver Figura 5).

3.3. CARGA DE EMERGENCIA DE LARGO PLAZO (LTE)

En la figura 6 se observa el incremento de carga de largo plazo de aproximadamente de siete horas menor al caso PLBN (ver Figura 6).

De la misma forma, se procede al respectivo cálculo correspondiente al perfil de carga entregado para este caso de estudio, obteniendo los siguientes resultados (ver Tabla 2) top oil & hot spot - LTE.

Podemos visualizar en la figura 7 las temperaturas de hot spot aumentan su valor al caso PLBN, pero disminuye el tiempo a 4 horas los valores picos de temperatura (ver Figura 7).

Figura 4.
Perfil de carga superior al valor nominal (PLBN)

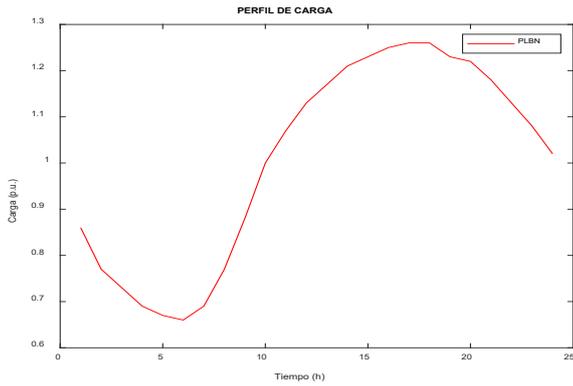


Figura 5.
Curvas de temperatura top oil y hot spot en estado de carga superior al nominal

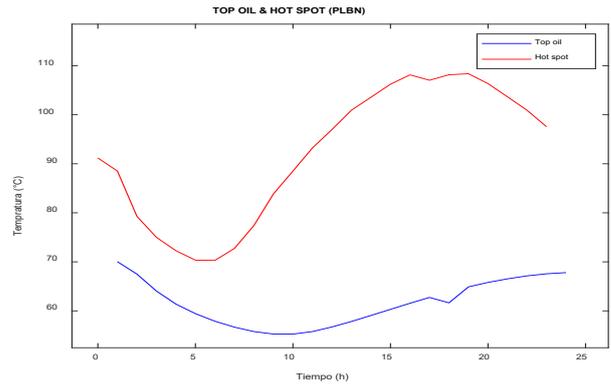


Figura 6.
Perfil de carga de emergencia de largo plazo (LTE)

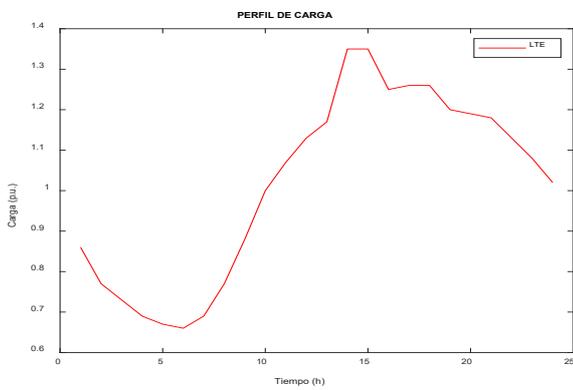


Figura 7.
Curvas de temperatura top oil y hot spot en estado de carga de emergencia de largo plazo nominal

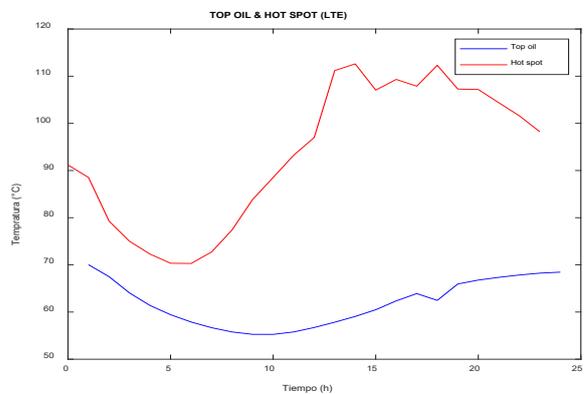


Figura 8.
Perfil de carga de emergencia de corto plazo (STE)

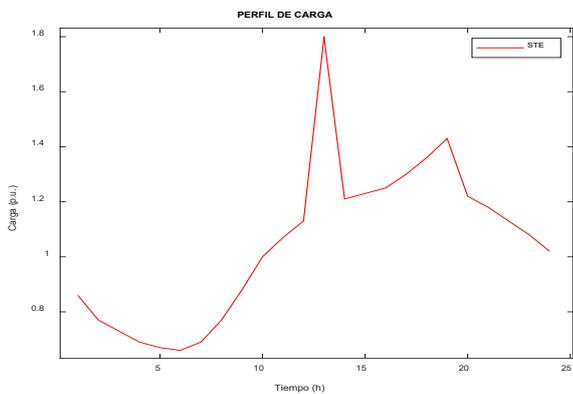
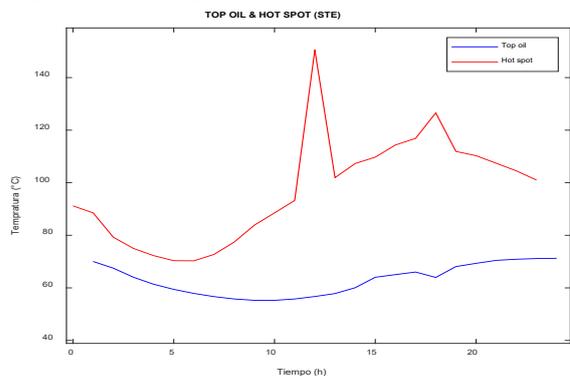


Figura 9.
Curvas de temperatura top oil y hot spot en estado de carga de emergencia de corto plazo



3.4. CARGA DE EMERGENCIA DE CORTO PLAZO (STE)

En la figura 8 se observa el incremento de carga en corto plazo provocando un pico en la curva de perfil de carga (ver Figura 8).

Los resultados obtenidos de cálculo se muestran (ver Tabla 2) top oil & hot spot - STE.

En la figura 9 se observa un drástico pico de aumento de temperatura por corto tiempo que sobrepasa a los casos de estudio vistos hasta el momento con un punto

máximo superior a los 150 °C y luego regresa a valores que se presentan al caso LTE (ver Figura 9).

3.5. INCORPORACIÓN DE CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

El siguiente caso de estudio, es el incremento de carga mediante la incorporación de vehículos eléctricos y la generación distribuida mediante paneles fotovoltaicos. La nue-

Tabla 2.

Cálculo de temperaturas top oil y hot spot con programación Matlab para el perfil de carga de la tabla C.1 - IEEE C57.91-1995

TOP OIL & HOT SPOT - CARGA NORMAL				TOP OIL & HOT SPOT - PLBN			TOP OIL & HOT SPOT - LTE			TOP OIL & HOT SPOT - STE		
Hora	Carga (p.u.)	$\Delta\Theta_H$ (°C)	Θ_H (°C)	Carga (p.u.)	$\Delta\Theta_H$ (°C)	Θ_H (°C)	Carga (p.u.)	$\Delta\Theta_H$ (°C)	Θ_H (°C)	Carga (p.u.)	$\Delta\Theta_H$ (°C)	Θ_H (°C)
6	0.52	49.85	57.58	0.66	57.89	70.34	0.66	57.89	70.34	0.66	57.89	70.34
7	0.55	49.08	57.73	0.69	56.68	70.3	0.69	56.68	70.3	0.69	56.68	70.3
8	0.61	48.5	59.14	0.77	55.78	72.73	0.77	55.78	72.73	0.77	55.78	72.73
9	0.7	48.18	62.2	0.88	55.27	77.42	0.88	55.27	77.42	0.88	55.27	77.42
10	0.79	48.18	66.03	1	55.26	83.86	1	55.26	83.86	1	55.26	83.86
11	0.85	48.5	69.17	1.07	55.78	88.52	1.07	55.78	88.52	1.07	55.78	88.52
12	0.9	49.09	72.25	1.13	56.72	93.24	1.13	56.72	93.24	1.13	56.72	93.24
13	0.93	49.8	74.54	1.17	57.84	96.99	1.29	57.84	96.99	1.92	57.84	150.5
14	0.96	50.58	76.94	1.21	59.06	100.94	1.33	59.06	111.19	1.33	60.06	101.93
15	0.98	51.37	78.84	1.23	60.31	103.58	1.36	60.48	112.61	1.36	64.03	107.3
16	0.99	52.15	80.19	1.25	61.55	106.24	1.38	62.36	107.05	1.38	65.04	109.73
17	1	52.91	81.51	1.26	62.74	108.14	1.39	63.91	109.32	1.39	66.02	114.36
18	1	52.2	80.8	1.26	61.64	107.04	1.39	62.47	107.88	1.39	63.97	116.87
19	0.98	54.26	81.73	1.23	64.9	108.17	1.23	65.95	112.3	1.23	68.1	126.59
20	0.97	54.83	81.74	1.22	65.8	108.37	1.22	66.77	107.27	1.22	69.34	111.91
21	0.94	55.3	80.57	1.18	66.53	106.36	1.18	67.35	107.18	1.18	70.47	110.29
22	0.9	55.69	78.86	1.13	67.14	103.66	1.13	67.85	104.37	1.13	70.9	107.42
23	0.86	55.96	77.12	1.08	67.56	100.92	1.08	68.24	101.6	1.08	71.16	104.51
24	0.81	56.12	74.89	1.02	67.81	97.56	1.02	68.46	98.21	1.02	71.25	101.01
1	0.68	57.6	70.83	0.86	70.03	91.19	0.86	70.03	91.19	0.86	70.03	91.19
2	0.61	55.95	69.17	0.77	67.5	88.52	0.77	67.5	88.52	0.77	67.5	88.52
3	0.58	53.72	63.34	0.73	64.05	79.29	0.73	64.05	79.29	0.73	64.05	79.29
4	0.55	52.04	60.69	0.69	61.38	75	0.69	61.38	75	0.69	61.38	75
5	0.53	50.82	58.85	0.67	59.43	72.27	0.67	59.43	72.27	0.67	59.43	72.27

Figura 10.

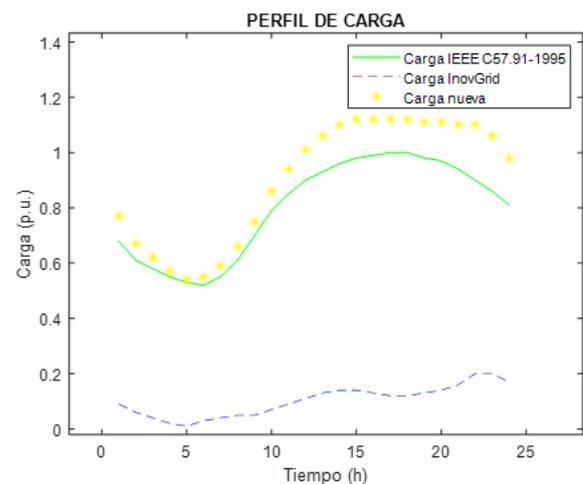
Perfil de carga InovGrid



Fuente. [2].

Figura 11.

Perfil de carga InovGrid



va carga se obtiene del proyecto InovGrid de Portugal, el perfil de carga se visualiza en la figura 10 (ver Figura 10).

Incrementando la carga InovGrid más la de estudio inicial se tiene el siguiente aumento de perfil de carga

para el análisis de temperatura del transformador de 187 MVA (ver Figura 11).

Como se observa en la figura 11, el perfil de carga tiene casi el mismo escenario al de estudio inicial. En base al

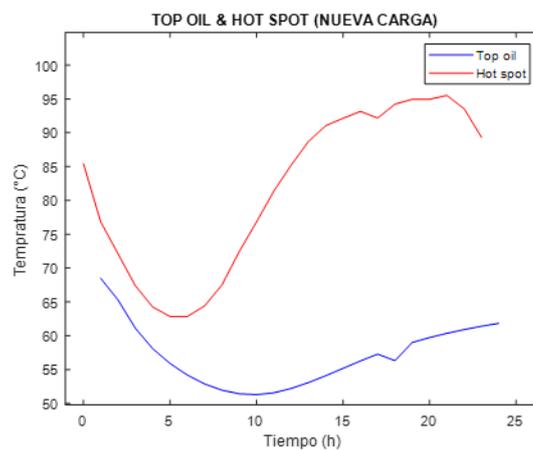
Tabla 3.

Cálculo de temperatura top oil & hot spot al nuevo perfil de carga con integración de generación distribuida y carga de vehículos eléctricos

TOP OIL & HOT SPOT - NUEVA CARGA				
Hora	Carga (p.u.)	Θ_A (°C)	$\Delta\Theta_{to}$ (°C)	$\Delta\Theta_H$ (°C)
6	0.55	30.00	54.19	62.85
7	0.59	30.00	52.87	62.83
8	0.66	30.00	51.95	64.41
9	0.75	30.00	51.42	67.51
10	0.86	30.00	51.29	72.44
11	0.94	30.00	51.56	76.83
12	1.01	30.00	52.20	81.37
13	1.06	30.00	53.07	85.21
14	1.10	30.00	54.09	88.70
15	1.12	30.00	55.18	91.05
16	1.12	30.00	56.26	92.14
17	1.12	30.00	57.28	93.16
18	1.12	30.00	56.31	92.18
19	1.11	30.00	59.00	94.24
20	1.11	30.00	59.72	94.96
21	1.10	30.00	60.35	94.96
22	1.10	30.00	60.92	95.52
23	1.06	30.00	61.41	93.55
24	0.98	30.00	61.84	89.30
1	0.77	30.00	68.48	85.44
2	0.67	30.00	65.28	76.83
3	0.62	30.00	61.11	72.11
4	0.57	30.00	58.10	67.39
5	0.54	30.00	55.92	64.25

Figura 12.

Perfil de carga InovGrid



incremento de nueva carga se analiza el comportamiento de temperatura que sufre el transformador (ver Tabla 3). Las curvas de temperatura top oil y hot spot sobrepasan el valor del caso de estudio y esto es aceptable debido al aumento de nueva carga de vehículos eléctricos y generación distribuida con paneles fotovoltaicos (ver Figura 12).

4. CONCLUSIÓN

Se realiza el análisis de cálculo de temperatura con referencia a la norma IEEE C57.91-1995, bajo el perfil de carga de caso inicial se pudo evidenciar que el transformador de 187 MVA se encuentra al 100% de la cargabilidad en el horario de 17:00 a 18:00, donde la temperatura

top oil alcanza los 58 °C y la temperatura hot spot los 82 °C, en esas condiciones el transformador no presenta sobrecargas y su vida útil no es afectada al tener un período de recuperación de 23 horas al bajar su cargabilidad y temperatura, cabe señalar que el transformador deberá tener refrigeración de aceite forzado (FOA) para alcanzar entregar los 187 MVA máximos de capacidad instalada.

Para el cálculo de temperaturas se utiliza el software Matlab, mediante código se pudo evidenciar que el caso de estudio más relevante con mayores temperaturas fue el de carga de emergencia en corto plazo alcanzando una cargabilidad del 180% en el incremento de carga instantáneo con temperaturas de hot spot de 150 °C y manteniendo valores normales en top oil debido a que solo es un incremento de la carga por un tiempo corto, en estos casos se evidencia un aumento excesivo y se debe tomar en cuenta que solo puede ser por tiempos muy cortos de sobrecarga, debido a que el uso prolongado de sobrecarga puede afectar la vida útil del transformador.

La implementación de nueva carga de vehículos eléctricos y generación distribuida con paneles fotovoltaicos, se procede al tomar el perfil de carga del proyecto InovGrid de Portugal sumado al perfil de carga de la tabla C.1 de la normativa IEEE C57.91-1995, dando como resultado un aumento de la cargabilidad del transformador hasta en un 110% debido a que el perfil de carga InovGrid coincide con el perfil de carga de caso inicial, cabe mencionar que la carga nueva tiene una demanda máxima de 1 hora de 22:00 a 23:00, en consecuencia, el transformador se mantendrá en condiciones normales de operación al contar con un tiempo restante de recuperación a fin de que no sea afectada su vida útil.

REFERENCIAS

- [1] A. Naderian, P. Patabbi and L. Lamarre, «Improving the assessment of remaining life of service aged power transformers», Electrical Insulation Conference, Calgary, Alberta, Canada, junio, 2019.
- [2] IEEE Std C57.91-1995, «IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed transformers», Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, Nueva York, 1996.
- [3] IEEE PC57.119 (P838) (D13.1/1-29-96), Draft recommended practice for performing temperature rise tests on oil-immersed power transformers at loads beyond nameplate rating5.
- [4] A. Messias, «The inovgrid project: distribution network evolution as a decisive answer to the new challenges in the electrical», Sector. Edp Distribuição, 2009.
- [5] I. Juárez, V. Larind, N. Vásquez, «Estudio de la vida útil del transformador de potencia en servicio», Universidad de El Salvador, Escuela de Ingeniería Eléctrica, El Salvador, 2018.
- [6] J. Castro, G. Gómez, O. Mata, «Índice de estimación de la vida residual en transformadores eléctricos de potencia basado en condición», *Tecnología en Marcha*, vol. 35, n.º 4, octubre-diciembre, 2022, pp. 71-83
- [7] Guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators, IEEE Standard C57.91, 2011.
- [8] K. Lingming, M. Wenxiong, G. Xinyuan, L. Tian, Z. Fanke, C. Haitao, «Application of insulation aging evaluation method for distribution transformers in practice», *IEEE Xplore*, 2021.
- [9] IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step voltage regulators, IEEE Standard C57.91, 2011.
- [10] ASTM D3487-82a, Standard specification for mineral oil in electrical apparatus.
- [11] J. Chávez, «Análisis de generación distribuida a través del diseño de un sistema fotovoltaico conectado al AMT chs031-Hidrandina U. N. Chimbote», Universidad Nacional del Santa, Nuevo Chimbote, Perú, 2022.
- [12] Pérez-Arriaga, I., Knittle, C., «Utility of the future: an MIT energy initiative response to an industry in transition», MIT Energy Initiative, Cambridge, MA, USA, 2016.
- [13] IEA, «Global ev outlook: to electric mobility», IEA: París, France, 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>.
- [14] A. Bazurto, J. Zuñiga, D. Echeverría, C. Lozano, «Perspectiva del transformador de distribución en redes eléctricas con alta penetración de generación distribuida y vehículos eléctricos», Universidad Militar de Nueva Granada, vol. 26, n.º 2, 2016, pp. 35-48.
- [15] Trovão, J. and Pereirinha, P. (2011). Electric vehicles chargers characterization: Load demand and harmonic distortion. En 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, Lisbon, pp. 1-7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/epqu.2011.6128871>
- [16] A. K. Karmaker, M. R. Ahmed, «Fuzzy logic based optimization for electric vehicle charging station in Bangladesh», 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology 2019, pp.1-5. IEEE.
- [17] M. Seredynski and F. Viti, «A survey of cooperative ITS for next generation public transport systems», in Proc. 19th Int. Conf. Intell. Transp. Syst. (ITSC), nov. 2016, pp. 1229-1234.
- [18] E. L. Karfopoulos, I. Athanasoglou, and N. Hatziargyriou, «Efficient integration of electric vehicles in distribution networks with high share of renewable energy sources», in Proc. Medit. Conf. Power Generat., Transmission, Distrib. Energy Convers. (MedPower), 2016, pp. 1-7.