

EFICIENCIA Y PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN TÍPICOS.

Jorge Luis Arizpe Islas¹
Luis Huerta-Charles²
Filiberto Candia García³

RESUMEN.

Con el propósito de conocer cuáles han sido las repercusiones económicas de una posible selección arbitraria de transformadores de distribución utilizados en redes eléctricas industriales, se llevaron a cabo los análisis energéticos correspondientes para evaluar cuantitativamente las pérdidas en los transformadores eléctricos de distribución típicos en aras de promover una nueva era de responsabilidad social, con fundamento y en base a cálculos energéticos.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos se pretende socializar un sistema de contabilidad viable, reporte y evaluación de las pérdidas de vacío y totales en transformadores eléctricos típicos de distribución. Esto con la finalidad de establecer una línea base e identificar, clasificar y tipificar un método de selección de transformadores adecuados de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana que permita sugerir acciones reales y económicamente plausibles para disminuir el impacto económico por el uso de energía eléctrica.

Así mismo, se busca que el estudiante analice y aprenda a seleccionar el equipo eléctrico de calidad indispensable en la distribución de energía eléctrica.

Palabras clave: pérdidas, transformador eléctrico de distribución.

Fecha de recepción: 25 de septiembre, 2017.

Fecha de aceptación: 16 de abril, 2018.

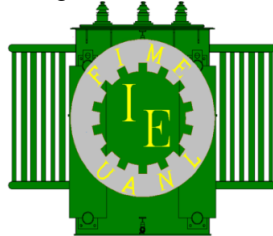
¹ Maestro en Ciencias con Especialidad en Potencia Eléctrica, Profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, jorge.arizpei@uanl.mx

² Is an Associate Professor of Curriculum and Instruction, College of Education, New Mexico State University.

³ Doctor en Educación, Profesor-Investigador de la Universidad Tecnológica de Puebla-UADI, filinc@hotmail.com.

INTRODUCCIÓN.

Es evidente, que el consumo promedio de los habitantes de México y de acuerdo a su poder adquisitivo, muestra tendencias crecientes en todos los órdenes, sobre todo en los países desarrollados e incluso en aquellos emergentes. Por lo que, fluye más energía y materiales hoy que algunas décadas atrás, y no es factible vaticinar un buen auguro para un futuro próximo, cuando la tendencia de este consumo sigue en incremento.



Considerando el inminente incremento en la población de México de 60.8724 millones de habitantes en año de 1975⁴ a 127.0172 millones de habitantes en el 2015⁵, esto equivale a tener una tasa de crecimiento media anual de la población 2.086%, y su respectivo aumento en infraestructura; áreas ocupadas por inmuebles, vialidad, recreación, etc., así como, mayores requerimientos energéticos, tales como: electricidad, combustibles para el transporte y mayor volumen de agua necesaria para riego y para consumo humano. El lado positivo es que esto se debería de traducir en mayores empleos y mayores requerimientos de energía eléctrica.

Infraestructura eléctrica y “consumo” de electricidad: flujo de energía

Una vez que todos los circuitos alimentadores cuenten con medidores de electricidad, lo cual no siempre es factible, ver Figura 1, será posible determinar cuáles son las “entradas” de energía y las “salidas”, ver Figura 2.

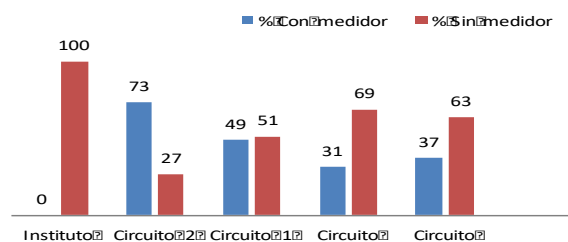


Fig. 1. Medición de energía eléctrica en distintos circuitos alimentadores de una Universidad estatal⁶

Por mencionar un ejemplo de medición, en un año una universidad estatal puede utilizar aproximadamente 80 millones de kilowatts-hora (kWh), lo que se refleja en un gasto de 125MP en el año 2013⁷, y al tomar en cuenta que por cada kWh se generan 0.80Kgr de gases de efecto invernadero y equivale a la tala de cuatro árboles o el consumo de 246 litros de petróleo, además de emitir a la atmosfera 0.596Kg de bióxido de carbono (CO₂)⁸, entonces esto significa que se emitieron casi 48000Tons de CO₂ tan solo en una universidad.

⁴ Número de habitantes en el 2010, en Estados Unidos Mexicanos

<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/di/poblacion/default.aspx?tema=me&e=09>

⁵ Datos de Banco Mundial, Última actualización: 6 feb. 2017

<http://www.bancomundial.org/>

⁶ Secretaría de Investigación, Innovación y Sustentabilidad, UANL.

<http://sds.uanl.mx>

⁷ CFE > Industria > Conoce tu tarifa > Consulta tu tarifa

http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_industria.asp?Tarifa=CMAMT&Anio=2013

⁸ Cálculo del FIDE con datos de Comisión Federal de Electricidad

www.cfe.gob.mx/2006.

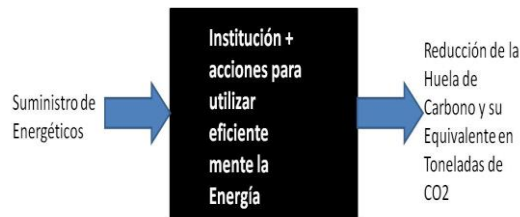


Fig. 2. Flujo de energía en una Institución

Evidentemente, la tendencia al incremento de la población en un futuro próximo hace que la tendencia del requerimiento de energía eléctrica esté al alza. Empero, al modificar los patrones de conducta y hábitos de consumo, así como poner más atención en la adquisición de equipo de alta eficiencia energética, esta tendencia podrá mejorarse. De esta forma, se tendrá una disminución en los gastos asociados a las pérdidas en energía eléctrica.

En este documento se analiza uno de los circuitos de la universidad con transformadores eléctricos cuyas características son mostradas en la Tabla 1. Cabe mencionar que por definición un transformador de distribución es aquel que cumple con las características específicas de los transformadores eléctricos de distribución de 10 hasta 500kVA⁹.

Es en este sentido, es que se tiene que mejorar la forma en cómo se selecciona un transformador de distribución utilizado en la mayoría de las subestaciones eléctricas para instituciones educativas del país ya que el costo de operación está directamente relacionado con las pérdidas totales del mismo.

Tabla 1. Capacidad de los Transformadores trifásicos, Clase de Aislamiento < 15KV Típico

Capacidad en kVA	Cantidad
75	1
225	4
300	5
500	3
750	2
1000	1
Total	16

METODOLOGÍA

Energía Eléctrica y costo de Pérdidas totales y de vacío

Considerando que, de manera general, el concepto de Potencia está determinada por la expresión

$$P = E/t \tag{1}$$

donde:

t es el tiempo en segundos(s);

E es la energía es Joules(J);

P es la potencia en Joules/segundo (J·s⁻¹).

Al definir 1Joule= 1Newton·m, entonces 1 J·s⁻¹=1 Newton·m ·s⁻¹, por lo que 1Newton·m ·s⁻¹=1Watt. De esta forma, en términos de Electricidad, la Energía Eléctrica está determinada por

$$\therefore E = Pt \tag{2}$$

donde:

⁹ Productos eléctricos-Transformadores-Transformadores de distribución tipo poste y tipo subestación-Especificaciones.

http://www.ance.org.mx/documentos/DATCER-56_R4.pdf

t es el tiempo en múltiplos de 3,600s(h);
 P_s es la potencia en miles de Watts (kW);
 E es la energía eléctrica en kWh.

Se debe observar que la energía eléctrica, como cualquier otra energía, cumple con el precepto popular de la Conservación de la energía **“la energía no se crea ni se destruye...”** a lo que yo agregaría ni se ahorra, ya que si se requiere energía eléctrica el termino t en la expresión (2) es distinto de cero y en caso de no requerirla t sería cero y por ende E también.

En este trabajo se maneja la expresión (2) para determinar las pérdidas de vacío y totales en transformadores de distribución.

Eficiencia y Pérdidas

El porcentaje la eficiencia en transformadores de distribución de acuerdo a la NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución, está determinado por la siguiente expresión η

$$Eficiencia(\eta) = (P_s/P_e) \times 100 \quad (3)$$

$$y P_e = (P_s + p_c + p_v)$$

donde:

P_s es la potencia de salida en W (capacidad nominal);
 P_e es la potencia de entrada en W;
 p_c son las pérdidas debidas a la carga en W;
 p_v son las pérdidas en vacío en W.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En la Figura 1, se muestran los resultados del cálculo de las pérdidas en transformadores y el porcentaje la eficiencia en transformadores de distribución de acuerdo a la NORMA Oficial Mexicana.

De la Figura 3, que se obtuvo a partir de la NOM-002-SEDE-1999, se debe observar que las pérdidas en vacío de los transformadores monofásicos y trifásicos no guardan una relación lineal con las totales o la eficiencia, ver Figura 3. Por lo que, tener una eficiencia relativamente alta es una condición necesaria pero no suficiente para tener pérdidas totales relativamente bajas. Así mismo, los seis transformadores cuya capacidad es menor a 75kVA disminuyen sus pérdidas en vacío conforme se aumenta su eficiencia, empero para el caso de 75kVA o más estas pérdidas se incrementan aún más que en aquellos transformadores de menor capacidad.

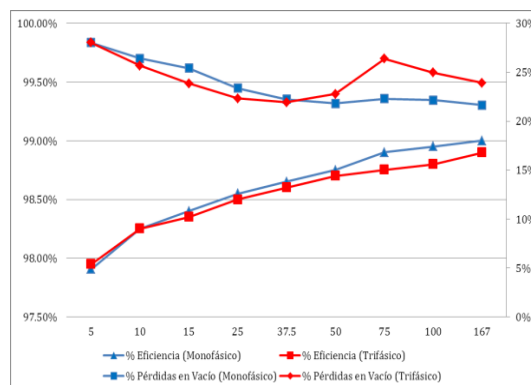


Fig. 3. Porcentaje de eficiencia y Pérdidas Totales máximas permitidas en Transformadores de Distribución¹⁰

¹⁰NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.

Datos obtenidos del Diario Oficial de la Federación

http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5224693&fecha=15/12/2011

En la Figura 4 se muestran los resultados de los cálculos de eficiencia en los distintos transformadores trifásicos utilizados en este documento de acuerdo a su capacidad para distintas condiciones de operación de acuerdo a la cantidad de pérdidas máximas permitidas, las cuales van desde un ciento por ciento hasta un doscientos por ciento.

Se debe observar que el rango de valores para la eficiencia no es menor a un 97% llegando a ser de hasta un 99%. Lo cual es un valor muy elevado a pesar de que se tienen como máximo un 200% de las pérdidas permitidas por la NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.

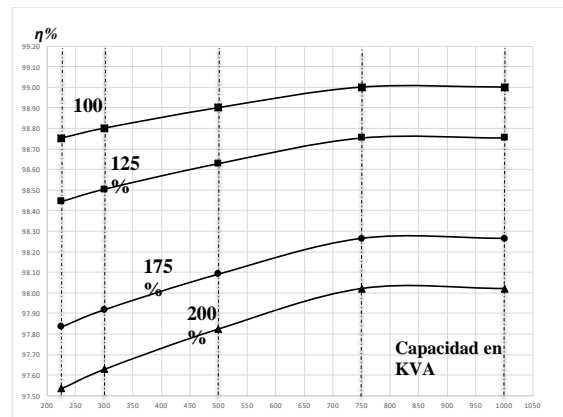


Fig. 4. Eficiencia Vs capacidad en transformadores trifásicos

De esta forma, es necesario evaluar el costo de estas pérdidas en función de la tarifa eléctrica. En la figura 5, se muestran las pérdidas en kWh por mes en los distintos transformadores para las mismas condiciones de diseño.

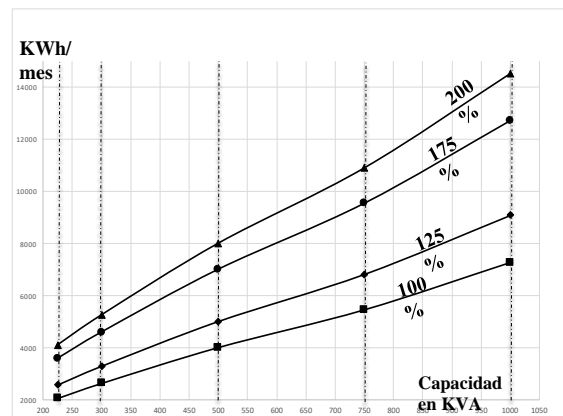


Fig. 5. Pérdidas de Energía Eléctrica Vs capacidad en transformadores trifásicos

En la Figura 6, se muestran las tendencias de la eficiencia y pérdidas totales en función de la capacidad de los transformadores trifásicos con distintas condiciones de diseño.

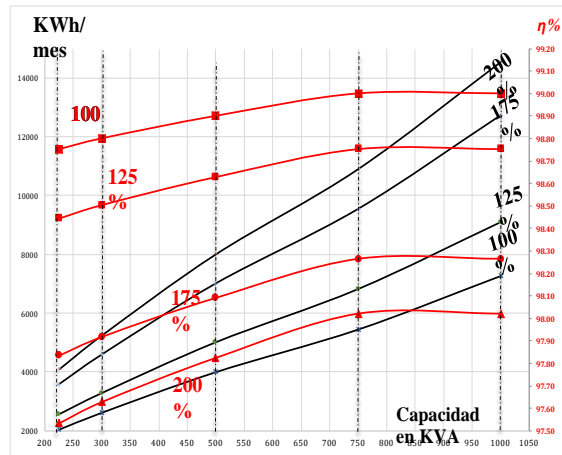


Figura 6. Eficiencia y Pérdidas de Energía Eléctrica Vs capacidad en transformadores

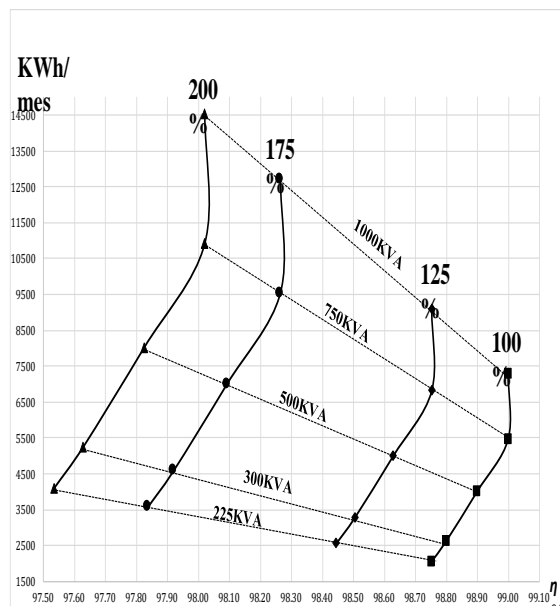


Fig. 7. Pérdidas de Energía Eléctrica Vs eficiencia en transformadores trifásicos

En la Figura 7, se muestra como las pérdidas está en función de la eficiencia para las distintas capacidades de los transformadores trifásicos bajo diferentes condiciones de diseño.

Costo de la Energía Eléctrica

Pese de los intentos de disminuir el costo de la energía eléctrica por parte de órganos gubernamentales históricamente éste obedece al precio de la fuente primaria de energía y que en México ésta la constituye el petróleo y sus derivados, por lo que su precio determina el de la energía eléctrica.

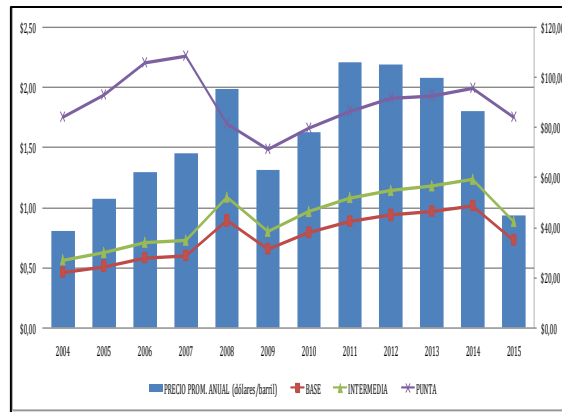


Fig. 8. Cuotas promedio (MN) aplicables a una de las Tarifas de Electricidad H-M¹¹ y Precio Anual (dólares/barril) del Petróleo Crudo 2004-2015¹²

En la Figura 8, se muestra la evolución del precio del barril de petróleo en México y su evidente influencia sobre el precio de la electricidad.

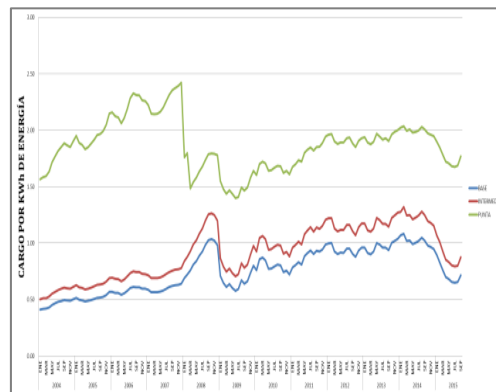


Fig.9. Cuotas aplicables por mes de la Tarifa H-M (2004-2015)

En la Figura 9 se puede apreciar como el requerimiento de energía eléctrica en un periodo de tres años para el mismo ejemplo que se está tratando en este documento.

En la Figura 10, se aprecia que el promedio la energía Base es del 16.25% mientras que en Intermedia y Punta son de un 74.5% y 9% respectivamente, por lo que su costo no es una función directa ni constante.

¹¹ CFE > Industria > Conoce tu tarifa > Consulta tu tarifa

http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_industria.asp?Tarifa=CMAMT&Anio=2015

¹² EXPORTACIONES DE PETRÓLEO CRUDO 1974 - 2015.

<http://www.mexicomaxico.org/Voto/PetroCrudo.htm>

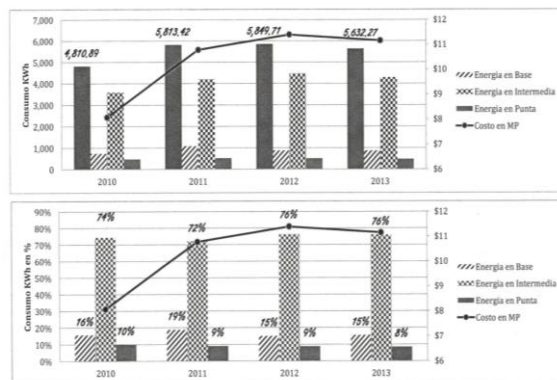


Fig. 10. Desglose del requerimiento de Energía Eléctrica

Para este documento se considera un costo promedio de la energía eléctrica de 1.1177 (\$/kWh). La Tarifa horaria (Tarifa H-M) para servicio general en media tensión, con demanda de 100 kW o más¹³. Se recomienda ver el concepto de **Tensión eléctrica** de la Norma Oficial Mexicana¹⁴.

Costo de las Pérdidas de Energía Eléctrica

Los costos de las pérdidas de vacío en un transformador trifásico de 225kVA y 500kVA, Clase de Aislamiento < 15KV Típicos, utilizados en este ejemplo, se muestran en las Tabla 2, 4, 3 y 5 respectivamente.

Tabla 2. Costos de Pérdidas de Vacío en Transformador trifásico de 225KVA

Pérdidas en vacío		Eficiencia	Energía Mensual	Costo Mensual	Costo en 15 años
(%)	(Watts)	(%)	(KWh)	(MN)	(MN)
100	750	99.01	540	\$603.61	\$108,650.08
125	938	98.77	675	\$754.51	\$135,812.60
175	1313	98.28	945	\$1,056.32	\$190,137.64
200	1500	98.04	1080	\$1,207.22	\$217,300.16

Tabla 3. Costos de Pérdidas de Vacío en Transformador trifásico de 500kVA

Pérdidas en vacío		Eficiencia	Energía Mensual	Costo Mensual	Costo en 15 años
(%)	(Watts)	(%)	(KWh)	(MN)	(MN)
100	1330	98.26	957.6	\$1,070.40	\$192,672.81
125	1663	97.83	1197	\$1,338.01	\$240,841.02
175	2328	96.99	1675.8	\$1,873.21	\$337,177.42
200	2660	96.57	1915.2	\$2,140.81	\$385,345.63

Tabla 4. Costos de Pérdidas Totales en Transformador trifásico de 225kVA

Pérdidas Totales		Energía Mensual	Costo Mensual	Costo en 15 años
(%)	(Watts)	(KWh)	(MN)	(MN)
100	2,844	2047.68	\$2,288.90	\$412,001.11
125	3,555	2559.60	\$2,861.12	\$515,001.39
175	4,977	3583.44	\$4,005.57	\$721,001.95
200	5,688	4095.36	\$4,577.79	\$824,002.22

¹³ Tarifa H-M, que se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso... http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=HM

¹⁴ NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5224693&fecha=15/12/2011

Tabla 5. Costos de Pérdidas Totales en Transformador trifásico de 500kVA

Pérdidas Totales		Energía Mensual	Costo Mensual	Costo en 15 años
(%)	(Watts)	(KWh)	(MN)	(MN)
100	5,561	4003.92	\$4,475.58	\$805,604.14
125	6,951	5004.90	\$5,594.47	\$1,007,005.18
175	9,732	7006.86	\$7,832.26	\$1,409,807.25
200	11,122	8007.84	\$8,951.16	\$1,611,208.29

En la Figura 10, se contabilizan las pérdidas totales en transformadores de distribución analizados en este documento y se debe observar que tan solo para el transformador de 500kVA se pueden llegar a tener pérdidas por 2.4MP o de 4.8MP en tan solo 15 años.

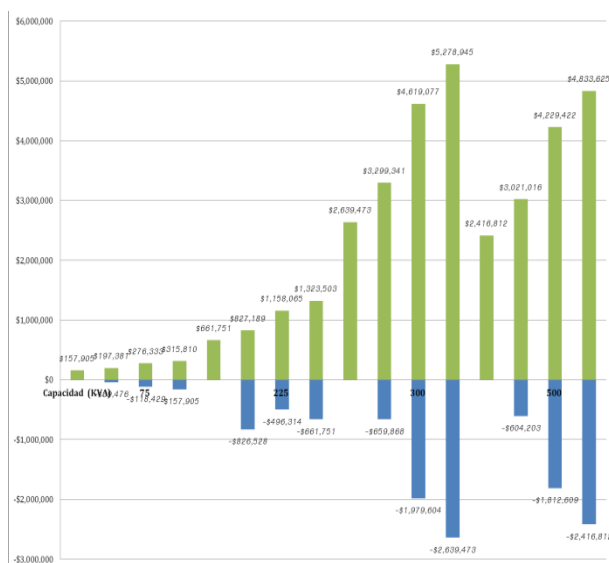


Fig. 10. Costo de las pérdidas totales del total de unidades en 15 años

Por lo que, para el circuito bajo estudio se tendrían pérdidas con un costo total de 508MP en 15 años y si no se presta atención a estos detalles estas pueden ascender a 11.7MP incrementando significativamente el gasto por concepto de suministro de energía eléctrica.

CONCLUSIONES

Al tener un mayor requerimiento de energía eléctrica en el país mayor deberá ser el compromiso en los ingenieros de diseño de proyectos, contratistas y docentes, ya que el seleccionar un transformador eléctrico de forma casi arbitraria tomando como referencia la capacidad del mismo puede cometerse un error que a la larga puede repercutir en millones de pesos. Para este documento, el costo diferencial en 15 años entre seleccionar un conjunto de transformadores con bajas pérdidas y otro que no puede llegar a ser de 5.8MP.

Es necesario contar con sistema completo de medición en cada uno de los circuitos ya que de otra forma no será posible determinar el efecto de la selección el transformador más adecuado para la instalación, es decir, se puede sobre dimensionar la capacidad del mismo sin considerar el efecto de las pérdidas analizado en este documento cuidando solo la eficiencia.

Es en este sentido que se debe tener especial atención en la relación que existe entre la capacidad del transformador, las pérdidas y la eficiencia ya que por definición esta siempre va a ser un número que oscila entre 95 y 100% lo cual es aparentemente muy bueno.

BIBLIOGRAFÍA

- Secretaría de Investigación, Innovación y Sustentabilidad, UANL.
<http://sds.uanl.mx>
- CFE > Industria > Conoce tu tarifa > Consulta tu tarifa
http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_industria.asp?Tarifa=C MAMT&Anio=2013
- Cálculo del FIDE con datos de Comisión Federal de Electricidad
www.cfe.gob.mx 2006.
- Productos eléctricos-Transformadores-Transformadores de distribución tipo poste y tipo subestación-Especificaciones.
http://www.ance.org.mx/documentos/DATCER-56_R4.pdf
- NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución. Datos obtenidos del Diario Oficial de la Federación
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5224693&fecha=15/12/2011
- CFE > Industria > Conoce tu tarifa > Consulta tu tarifa
http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_industria.asp?Tarifa=C MAMT&Anio=2015
- EXPORTACIONES DE PETRÓLEO CRUDO 1974 - 2015.
<http://www.mexicomaxico.org/Voto/PetroCrudo.htm>
- Tarifa H-M, que se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso...
http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=H M
- NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SEDE-2010, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5224693&fecha=15/12/2011
- Número de habitantes en el 2010, en Estados Unidos Mexicanos
<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/default.aspx?tema=me&e=09>
- Datos de Banco Mundial, Última actualización: 6 feb. 2017
<http://www.bancomundial.org/>