



**EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN  
ESP**

Unidad Centro de Excelencia Técnica Normalización  
y Laboratorios

**GM-02**

**Guía Metodológica cálculo de pérdidas de energía**

**EPM-UCET-NYL-GM-02**

**Agosto 2019**

### Elaboración, Revisión y Aprobación

| Actividad      | Tema   | Nombre                     |
|----------------|--|----------------------------|
| <b>Elaboró</b> | Guía metodológica cálculo de pérdidas de energía | Consultoría Colombiana S.A |
|                | <b>Revisó</b>                                    | José Daniel Acosta Moreno  |
|                | <b>Aprobó</b>                                    | Mónica Rueda Aguilar       |

### Requeridores

| Destinatario                    | Cargo                                      | No. de Copias |
|---------------------------------|--|---------------|
| Johan Sebastián Higuera Higuera | Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería | 1             |
| Gabriel Jaime Romero Choperena  | Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería | 1             |

### Revisiones

| Revisión | Fecha<br>dd/mm/aaaa | Descripción de la revisión |
|----------|---------------------|----------------------------|
| 01       | 23/08/2019          | Versión inicial            |
|          |                     |                            |
|          |                     |                            |
|          |                     |                            |

© Copyright: Empresas Públicas de Medellín ESP. No está permitida su reproducción por ningún medio impreso, fotostático, electrónico o similar, sin la previa autorización escrita del titular de los derechos reservados.

## CONTENIDO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | OBJETO .....  | 6  |
| 2     | ALCANCE.....  | 7  |
| 3     | DOCUMENTOS DE LA REFERENCIA .....                             | 8  |
| 4     | DEFINICIONES .....  | 9  |
| 5     | GENERALIDADES .....   | 11 |
| 5.1   | PÉRDIDAS MÁXIMAS TOLERABLES.....                              | 12 |
| 6     | PÉRDIDAS TÉCNICAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA..... | 13 |
| 6.1   | PÉRDIDAS DE POTENCIA ELÉCTRICA EN LOS CONDUCTORES.....        | 13 |
| 6.2   | PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES .....                             | 15 |
| 6.2.1 | Pérdidas en el núcleo (En vacío o sin carga) – $P_o$ .....    | 16 |
| 6.2.2 | Pérdidas en los devanados (Con carga) - PCCD.....             | 16 |
| 6.2.3 | Porcentaje de pérdidas de potencia en transformadores .....   | 16 |
| 7     | CAMPO DE APLICACIÓN .....                                     | 18 |
| 7.1   | EJEMPLO DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA.....                | 18 |
| 7.1.1 | Pérdidas en transformadores.....                              | 18 |
| 7.1.2 | Pérdidas en alimentadores para medida descentralizada.....    | 19 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Porcentaje de pérdidas máximas tolerables por nivel de tensión para las empresas del grupo EPM.....                     | 12 |
| Tabla 2 Expresiones para el cálculo de pérdidas en tramos de conductores de sistemas trifásicos, bifásicos y monofásicos. ....  | 13 |
| Tabla 3. Transformadores monofásicos de 5 kVA a 167,5 kVA serie AT $\leq$ 15 kV, serie BT $\leq$ 1,2 kV [5]. ....               | 22 |
| Tabla 4. Transformadores monofásicos de 25 kVA a 167,5 kVA 15 kV $\leq$ serie AT $\leq$ 34,5kV/serie BT $\leq$ 1,2 kV [5] ..... | 23 |
| Tabla 5. Transformadores trifásicos de 15 kVA a 3750 kVA, serie AT < 15kV, serie BT $\leq$ 1.2 kV [6] .....                     | 24 |
| Tabla 6. Transformadores trifásicos de 75 kVA a 10 000 kVA, 15 kV < serie AT $\leq$ 46 kV, serie BT $\leq$ 15 kV [6] .....      | 25 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Curva de demanda promedio en Colombia [11] ..... 12



## 1 OBJETO

Establecer una metodología para el cálculo de las pérdidas técnicas en los sistemas de distribución del grupo EPM, como parte del cumplimiento de los requerimientos del RETIE para el diseño de instalaciones eléctricas.

## 2 ALCANCE

La presente guía se enmarca dentro de los lineamientos que se deben tener en cuenta para el cálculo de pérdidas técnicas en los sistemas de distribución de energía del Grupo EPM.

- La guía contiene conceptos y criterios a tener en cuenta en dicho cálculo.
- La guía presenta recomendaciones para reducir las pérdidas de energía.
- Las pérdidas no técnicas no están incluidas en el alcance de esta guía metodológica.

### 3 DOCUMENTOS DE LA REFERENCIA

- [1] Gönen Turan, Electric power distribution system engineering, Taylor & Francis group, 2014.
- [2] H. Lee Willis, Power distribution planning reference book, Marcel Dekker INC, 1997.
- [3] Aguirre Vazquez Guillermo mauricio. Evaluación de los diferentes métodos para el cálculo de las pérdidas técnicas en media tensión para redes de distribución, Universidad de el Salvador, 2016.
- [4] CREG. Circular 015 de marzo de 2017.
- [5] NTC, NTC 818 – Transformadores. Transformadores monofásicos autorefrigerados y sumergidos en líquido. Corriente sin carga, pérdidas y tensión de cortocircuito.
- [6] NTC, NTC 819 – Electrotecnia. Transformadores trifásicos autorefrigerados y sumergidos en líquido. Corriente sin carga, pérdidas y tensión de cortocircuito.
- [7] Pender, H., y W.A. Del Mar: Electrical Engineers' Handbook – Electrical Engineers, 4th ed., Wiley New York, 1962.
- [8] <http://www.xm.com.co/Paginas/Consumo/historico-de-demanda.aspx>
- [9] Ministerio de minas y energía, Reglamento técnico de instalaciones eléctricas – RETIE, 2015.
- [10] RESOLUCIÓN CREG No. 015 DE 2018. COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA. ENERO 29 DE 2018. Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional.
- [11] Criterios para normas de diseño de sistemas de distribución de energía. Consultoría Colombiana S. A. Bogotá, diciembre 1997.
- [12] NTC 380 – Transformadores eléctricos. Ensayos eléctricos. Generalidades.
- [13] NTC 2135 – Electrotecnia. Transformadores. Guía para fórmulas de evaluación de pérdidas



## 4 DEFINICIONES

**Efecto joule:** fenómeno por el cual, si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura de este.

**Factor de carga:** es la relación entre la carga promedio en cierto periodo de tiempo y la carga pico durante este periodo. Indica el grado con que la carga pico se sostiene en el intervalo, este factor se puede calcular a partir de las curvas de duración de carga.

**Factor de pérdidas:** es la relación entre las pérdidas de potencia promedio y las pérdidas de potencia pico, durante un periodo de tiempo. Da una indicación del grado con el cual las pérdidas durante la carga pico se mantienen a través del período de tiempo considerado. Este factor se puede calcular con base en las curvas de duración de pérdidas.

**Histéresis:** es el resultado de la propiedad de un material de conservar su magnetización o de oponerse a la variación del estado magnético.

**Pérdidas por corrientes parásitas:** también conocidas como corrientes de “eddy” o de Foucault, se producen en cualquier material conductor cuando se encuentran sometidos a una variación de flujo magnético, lo que genera una fuerza electromotriz inducida que origina corrientes que circulan en el material. En los transformadores, las pérdidas dependerán del material y forma constructiva del núcleo.

**Pérdidas por histéresis:** es la energía convertida en calor a causa del fenómeno de histéresis, el cual está asociado a una variación cíclica de la fuerza magnetomotriz a la que se somete un material.

**Pérdidas no-técnicas:** son pérdidas de energía debidas a factores externos a los sistemas eléctricos. Principalmente se derivan de conexiones no legalizadas y de problemas en el proceso de medición de consumo de energía eléctrica.

**Pérdidas técnicas:** son pérdidas de energía inherentes a la operación normal de un sistema eléctrico. Se generan por la circulación de corriente por el sistema y dependen solamente de factores técnicos, de materiales y/o constructivos de las redes.

**Pérdidas reconocidas por la CREG:** límites máximos de pérdidas porcentuales que la Comisión de Regulación de Energía y Gas–CREG les reconoce económicamente a los operadores de red. Este valor es único para cada empresa distribuidora de energía. [10]

**Operador de red:** empresa de servicios públicos encargada de la planeación, de la expansión y de las inversiones, operación y mantenimiento de todo o parte de un Sistema de Transmisión Regional o de un Sistema de Distribución Local. [9]

**Profesional competente:** es la persona natural (técnico, tecnólogo o ingeniero formado en el campo de la electrotecnia), que además de cumplir los requisitos de persona calificada cuenta con matrícula profesional vigente y que, según la normatividad legal, lo autorice o acredite para el ejercicio de la profesión y ha adquirido conocimientos y habilidades para desarrollar actividades en este campo. [9]

**Prueba de cortocircuito:** es una técnica utilizada para determinar los parámetros del circuito equivalente de un transformador.

La prueba se lleva a cabo desde el lado de alta tensión del transformador mientras el lado de baja tensión está en cortocircuito. La tensión de suministro requerida para circular la corriente nominal a través del transformador es normalmente muy baja y es aplicada a través de primario. Las pérdidas en el núcleo son muy bajas porque la tensión aplicada es una pequeña fracción de la tensión nominal y pueden ser despreciadas. De esta forma, el vatímetro solo medirá las pérdidas en el cobre.

**Prueba de vacío:** es un método utilizado para determinar la impedancia de vacío en la rama de excitación de un transformador. El ensayo de vacío es esencial a la hora de caracterizar un transformador, puesto que la impedancia de vacío es uno de los parámetros fundamentales de su circuito equivalente.

Si la tensión aplicada es la tensión nominal entonces aparecerá un flujo magnético nominal. Como las pérdidas en el hierro son función de la tensión aplicada, las pérdidas serán nominales. Por ello las pérdidas en el hierro son máximas a tensión nominal. Esta pérdida en el hierro máxima se mide utilizando el vatímetro. Como la impedancia serie del transformador es muy pequeña comparada a la de la rama de excitación, toda la tensión de entrada cae en la rama de excitación. Por ello el vatímetro solo mide las pérdidas en el hierro.

Como el secundario del transformador está abierto, el primario absorbe la corriente de vacío, que incluye ciertas pérdidas en el cobre. Esta corriente de vacío es muy pequeña y como las pérdidas en el cobre en el primario son proporcionales al cuadrado de la corriente, es insignificante. No hay pérdidas en el cobre en el secundario porque no hay corriente en el secundario.

**Puntos calientes:** punto de conexión que trabaja a temperatura por encima de la normal, generando pérdidas de energía y en ocasiones riesgo de incendio [9].

## 5 GENERALIDADES

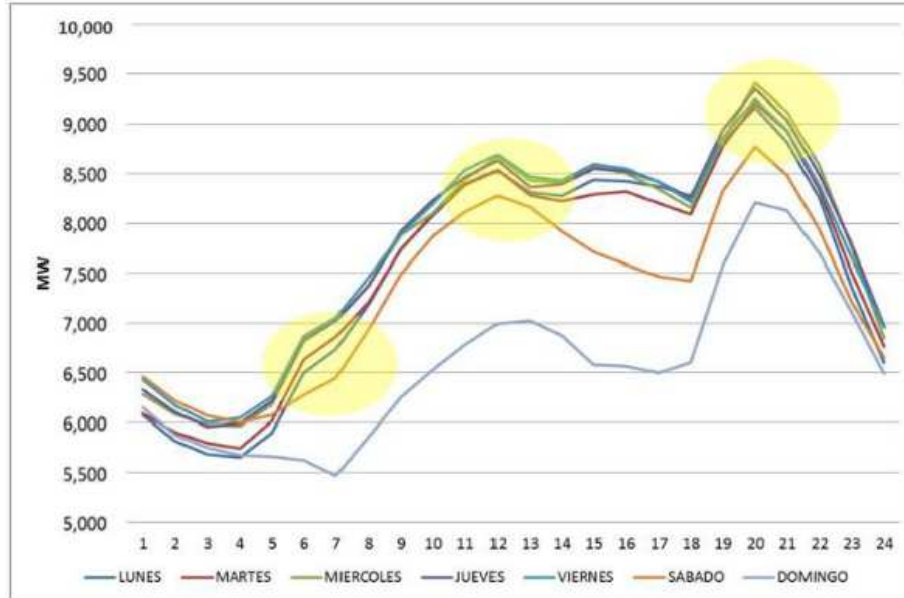
La energía eléctrica consumida por los usuarios finales es el resultado de un proceso de producción, transporte y venta del que hacen parte diversos actores. De manera similar a otras cadenas de abastecimiento de bienes, en las diferentes etapas del proceso se presentan pérdidas, entendiendo estas como la diferencia entre la energía que se entrega a un sistema y la energía que es utilizada por el usuario final. Dichas pérdidas en este caso se clasifican en:

- Pérdidas técnicas, son inherentes a la operación normal de un sistema eléctrico y se generan debido a los aspectos físicos inherentes del fenómeno eléctrico: los efectos de la circulación de corriente, los materiales y métodos constructivos de la infraestructura eléctrica.
- Pérdidas no técnicas, debidas a factores externos a los sistemas eléctricos, como ineficiencias administrativas y comerciales o conexiones no autorizadas.

Adicional a las fuentes señaladas anteriormente, existen otras fuentes de pérdidas técnicas con menor impacto, tales como:

- Los denominados “puntos calientes”. Los cuales se mitigan realizando de manera adecuada las actividades de instalación y mantenimiento de equipos.
- Armónicos. Siendo estos las tensiones y corrientes sinusoidales, cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental para la cual está diseñado el sistema eléctrico y que se originan debido a las características no lineales de las cargas y equipos de dichos sistemas. Las consideraciones a tener en cuenta en materia de armónicos se abordan en detalle en el documento *GM-13 Guía metodológica: análisis de calidad de la potencia redes de distribución*, desarrollada por el grupo EPM, por lo que no serán tratadas en este documento.

Dado que las pérdidas en los sistemas de distribución son proporcionales a la demanda, para la elaboración del cálculo de pérdidas de energía con bastante precisión se debe considerar el comportamiento del sistema eléctrico a lo largo del tiempo. En la Figura 1 se muestran las curvas de demanda promedio en Colombia para todos los días de la semana durante las 24 horas del día.

**Figura 1 Curva de demanda promedio en Colombia [11]**


En el desarrollo de esta guía se emplearán potencias promedio y aproximaciones que en general funcionan para el análisis de pérdidas en instalaciones residenciales, comerciales e industriales. Sin embargo, estas aproximaciones suelen ser insuficientes para el estudio de sistemas de potencia, compuestos por redes de distribución, líneas de transmisión regionales y subestaciones de alta y extra alta tensión, en cuyo caso se debe realizar el estudio a lo largo del tiempo. Debido a la magnitud en los cálculos que este análisis conlleva, se recomienda la utilización de programas computacionales para el estudio de sistemas de potencia. En el mercado se encuentran múltiples opciones, entre las que se destacan DigSILENT, NEPLAN y ETAP. La estimación de pérdidas se debe realizar siguiendo los lineamientos que da la Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG en la circular 015 de marzo de 2017 o la que remplace dicho documento.

## 5.1 PÉRDIDAS MÁXIMAS TOLERABLES

Las pérdidas estimadas durante el diseño de sistemas eléctricos de baja y media tensión deben ser inferiores a los máximos tolerables definidos para cada operador de red que se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1 Porcentaje de pérdidas máximas tolerables por nivel de tensión para las empresas del grupo EPM**

| % de pérdidas máximas tolerables        |      |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|------|
| Nivel de tensión                        | EPM  | ESSA | CENS | CHEC | EDEQ |
| Nivel I ( $V < 1$ kV)                   | 3.88 | 5.22 | 5.17 | 3.42 | 4.93 |
| Nivel II ( $1$ kV $\leq V < 30$ kV)     | 1.12 | 1.36 | 1.10 | 1.81 | 1.54 |
| Nivel III ( $30$ kV $\leq V < 57.5$ kV) | 1.21 | 3.42 | 2.52 | 1.36 | 1.55 |

## 6 PÉRDIDAS TÉCNICAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA

Las pérdidas técnicas en sistemas de distribución de energía se presentan principalmente en los transformadores y conductores debido a la circulación de corrientes y la interacción entre los diferentes materiales que los conforman.

Como se mencionó en el numeral anterior, el cálculo de las pérdidas de energía depende del comportamiento de la demanda en el tiempo (curvas de demanda) para el sistema considerado. Sin embargo, cuando se realizan proyectos de instalaciones eléctricas de pequeña y mediana potencia es conveniente aplicar los factores de carga y de pérdidas, para trabajar con ecuaciones atemporales que presentan resultados muy cercanos a la realidad y simplifican los cálculos.

### 6.1 PÉRDIDAS DE POTENCIA ELÉCTRICA EN LOS CONDUCTORES

La potencia eléctrica activa y reactiva que se pierde cuando se hace circular corriente por los sistemas de distribución está dada por las expresiones de la Tabla 2.

**Tabla 2 Expresiones para el cálculo de pérdidas en tramos de conductores de sistemas trifásicos, bifásicos y monofásicos.**

| Tipo de sistema     | Tipo de pérdidas              | Expresión para cálculo                               |                   |
|---------------------|-------------------------------|--|-------------------|
| Trifásico           | Pérdidas de potencia activa   | $p = 3 * i^2 * R * l * F_{pérdidas} [W]$             | <b>Ecuación 1</b> |
|                     | Pérdidas de potencia reactiva | $q = 3 * i^2 * X * l * F_{pérdidas} [VAR]$           | <b>Ecuación 2</b> |
| Monofásico Trifilar | Pérdidas de potencia activa   | $p = \frac{3}{2} * i^2 * R * l * F_{pérdidas} [W]$   | <b>Ecuación 3</b> |
|                     | Pérdidas de potencia reactiva | $q = \frac{3}{2} * i^2 * X * l * F_{pérdidas} [VAR]$ | <b>Ecuación 4</b> |
| Monofásico bifilar  | Pérdidas de potencia activa   | $p = 2 * i^2 * R * l * F_{pérdidas} [W]$             | <b>Ecuación 5</b> |
|                     | Pérdidas de potencia reactiva | $q = 2 * i^2 * X * l * F_{pérdidas} [VAR]$           | <b>Ecuación 6</b> |

Donde:

- p : pérdida de potencia activa [W]
- q : pérdida de potencia reactiva [VAR]
- i : corriente nominal por el conductor [A]
- R : resistencia del conductor [Ohm/km]
- X : reactancia inductiva del conductor [Ohm/km]
- l : longitud del tramo considerado [km]
- $F_{pérdidas}$  : factor de pérdidas

De acuerdo con la expresión experimental desarrollada por Buller y Woodrow [7] el factor de pérdidas se calcula con la siguiente expresión aproximada:

$$F_{p\acute{e}rdidas} = 0.7Fc^2 + 0.3Fc \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

Fc : factor de carga

$$Fc = \frac{\text{Potencia promedio (kVA)}}{\text{Potencia máxima (kVA)}} \quad \text{Ecuación 8}$$

A partir de las expresiones anteriores se define el porcentaje de pérdidas del sistema considerado, como:

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{\text{Pérdidas promedio en el conductor}}{\text{Potencia promedio total transportada}} * 100 \quad \text{Ecuación 9}$$

A continuación, se define el porcentaje de pérdidas para los diferentes tipos de sistemas.

- **Trifásico**

$$\text{Pérdidas prom} = NCF * 3 * \left(\frac{i}{NCF}\right)^2 * R * l * F_{p\acute{e}rdidas} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\text{Potencia promedio total transportada} = \sqrt{3} * V_L * i * FP * Fc \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{\sqrt{3} * i * R * l * (0.7 * Fc + 0.3) * 100}{V_L * FP * NCF} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde,

FP: factor de potencia del sistema considerado.

V<sub>L</sub>: tensión de línea en voltios.

NCF: número de conductores por fase

Con base en la expresión anterior, se puede definir la longitud del conductor en función del porcentaje de pérdidas permisibles en sistemas trifásicos como:

$$l = \frac{\% \text{ Pérdidas} * V_L * FP * NCF}{\sqrt{3} * i * R * (0.7 * Fc + 0.3) * 100} \quad \text{Ecuación 13}$$

De la ecuación 13 se puede obtener, también, una expresión que permite determinar la resistencia máxima para una longitud específica que cumpla con el porcentaje de pérdidas dado, definiendo así el calibre de conductor mínimo requerido.

$$R = \frac{\% \text{ Pérdidas} * V_L * FP * NCF}{\sqrt{3} * i * l * (0.7 * Fc + 0.3) * 100} \quad \text{Ecuación 14}$$

De manera similar, se tienen las siguientes expresiones para los sistemas bifásicos y monofásicos.

- **Monofásico trifilar**

La expresión final para el cálculo de pérdidas

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{3 \cdot i \cdot R \cdot l \cdot (0.7 \cdot Fc + 0.3)}{4 \cdot V_{Ln} \cdot FP \cdot NCF} * 100 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$l = \frac{4 \cdot \% \text{ Pérdidas} \cdot V_{Ln} \cdot FP \cdot NCF}{3 \cdot i \cdot R \cdot (0.7 \cdot Fc + 0.3) * 100} \quad \text{Ecuación 16}$$

- **Monofásico bifilar**

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{2 \cdot i \cdot R \cdot l \cdot (0.7 \cdot Fc + 0.3)}{V_{Ln} \cdot FP \cdot NCF} * 100 \quad \text{Ecuación 17}$$

$$l = \frac{\% \text{ Pérdidas} \cdot V_{Ln} \cdot FP \cdot NCF}{2 \cdot i \cdot R \cdot (0.7 \cdot Fc + 0.3) * 100} \quad \text{Ecuación 18}$$

Siendo:

$V_{Ln}$  : tensión de fase (Línea-neutro) en voltios.

En un sistema con una topología más compleja las pérdidas se calculan de la siguiente forma:

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{(P_{total \text{ de entrada}} - P_{demandada}) \cdot F_{pérdidas}}{P_{total \text{ de entrada}} \cdot FC} * 100 \quad \text{Ecuación 19}$$

El cálculo de pérdidas de energía se realiza a partir de la siguiente expresión:

$$P_{E \text{ Conductor}} = 8760 * p \text{ [kWh - año]} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde p son las pérdidas de potencia en el conductor, expresadas en kilovatios [kW].

Tal como establece el documento *GM-01 Guía metodológica: cálculo de conductor económico*, durante el dimensionamiento técnico de conductores además de evaluar las pérdidas de energía se debe considerar los cálculos de capacidad de corriente, regulación y capacidad de cortocircuito.

## 6.2 PÉRDIDAS EN TRANSFORMADORES

El transformador es el otro elemento principal de las redes de distribución en el que se presentan altos índices de pérdidas de energía, las cuales se clasifican en:

- Pérdidas en el núcleo (en vacío o sin carga).
- Pérdidas en los devanados (con carga).

- Pérdidas por reactivos (Sin cargas debidas a la componente reactiva de la magnetización y con carga producidas por la carga). Estas pérdidas se desprecian para el propósito de esta guía.

### 6.2.1 Pérdidas en el núcleo (En vacío o sin carga) – $P_o$

Las pérdidas en el núcleo de un transformador se generan por corrientes parásitas e histéresis, producidas por la corriente de excitación. Estas pérdidas son constantes para todos los periodos de operación.

Las pérdidas en el núcleo del transformador son suministradas por el fabricante y obtenidas a partir de la prueba de vacío.

### 6.2.2 Pérdidas en los devanados (Con carga) - PCCD

Estas pérdidas se generan por efecto Joule en los devanados del transformador.

Las pérdidas con carga varían con el cuadrado de la carga en el transformador y se calculan de la siguiente forma [12]:

$$PCCD = Fu * PCC * F_{pérdidas} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$Fu = \left( \frac{D}{S * FP} \right)^2 \quad \text{Ecuación 22}$$

Dónde:

|           |  |
|-----------|--|
| PCC       | : pérdidas con carga a potencia nominal [kW] |
| Fu        | : factor de utilización                      |
| D         | : demanda estimada [kW]                      |
| S         | : capacidad nominal del transformador [kVA]  |
| FP        | : factor de potencia de la carga             |
| Fpérdidas | : factor de pérdidas.                        |

Las pérdidas en el devanado (con carga) del transformador son suministradas por el fabricante y obtenidas a partir de la prueba de cortocircuito.

### 6.2.3 Porcentaje de pérdidas de potencia en transformadores

El porcentaje de pérdidas totales en transformadores se definen de la siguiente forma:

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{\text{Pérdidas en el transformador}}{\text{Potencia total demandada}} * 100 \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\text{Pérdidas totales en el transformador} = P_o + PCCD \quad \text{Ecuación 24}$$



$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{P_o + \left(\frac{D}{S * FP}\right)^2 * PCC * (0.7Fc^2 + 0.3Fc)}{D * Fc} * 100 \quad \text{Ecuación 25}$$

Las pérdidas de energía estarían dadas por:

$$P_{E \text{ Transformador}} = 8760 * p \text{ [kWh - año]} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde p son las pérdidas de potencia totales en el transformador considerado, expresadas en kilovatios (kW).

## 7 CAMPO DE APLICACIÓN

En este capítulo se incluyen ejemplos de los cálculos presentados en la presente guía metodológica junto con información complementaria para el propósito de esta.

### 7.1 EJEMPLO DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA

A continuación, se incluye un ejemplo para ilustrar el uso de los conceptos y ecuaciones incluidas en la presente guía, sin embargo, dado que el cálculo de pérdidas en conductores es uno de los criterios y análisis intermedios a tener en cuenta para seleccionar el conductor óptimo, como se detalle en *GM-01 Guía metodológica: cálculo de conductor económico*, es posible que la selección final del calibre difiera del aquí presentado.

#### 7.1.1 Pérdidas en transformadores

Durante el diseño de las redes de energía de una unidad de vivienda compuesta por 90 apartamentos en estrato 4, se estimó que el transformador a instalar debe tener las siguientes características:

|                              |               |
|------------------------------|---------------|
| Nivel de tensión primario    | : 7.621 kV    |
| Nivel de tensión secundarios | : 120 – 240 V |
| Potencia                     | : 75 kVA      |
| Carga estimada               | : 61.64 kVA   |
| Factor de carga              | : 0.636       |

Las pérdidas en el transformador se calculan de la siguiente forma:

Teniendo en cuenta que las pérdidas sin carga ( $P_0$ ) son iguales a las pérdidas del ensayo de vacío del transformador (PSC), estas pérdidas deben ser suministradas por el fabricante del equipo; cuando no se disponga de esta información se puede usar los valores máximos permisibles para las pérdidas presentadas en el Anexo A y el Anexo B.

El transformador por instalar presenta las siguientes pérdidas:

|                  |                 |
|------------------|-----------------|
| Potencia nominal | : 75 kVA        |
| $I_0$            | : 1.7% de $I_n$ |
| $P_0$            | : 210 W         |
| PCC              | : 710 W         |
| $U_z$            | : 3.0%          |

Por lo tanto, las pérdidas en el núcleo corresponden a:

$$P_0 = 210 \text{ W}$$

De la ecuación 20 se obtiene:

$$P_{CCD} = F_u * P_{CC} * F_{pérdidas}$$

$$F_{pérdidas} = 0.7 * F_c^2 + 0.3 * F_c$$

$$F_{p\acute{e}rdidas} = 0.4739472$$

Remplazando Fu de la ecuación 21 se tiene:

$$PCCD = \left( \frac{D}{S * FP} \right)^2 * PCC * F_{p\acute{e}rdidas}$$

Remplazando los valores conocidos en la expresión anterior se obtiene:

$$PCCD = \left( \frac{61.64 * 0.9}{75 * 0.9} \right)^2 * 710 * 0.4739472$$

$$PCCD = 227.1481331W$$

De la Ecuación 25 se obtiene el porcentaje de pérdidas de energía en el transformador:

$$\% P\acute{e}rdidas = \frac{P_o + \left( \frac{D}{S * FP} \right)^2 * PCC * (0.7Fc^2 + 0.3Fc)}{D * Fc} * 100$$

$$\% P\acute{e}rdidas = \frac{0.2271481331 + 0.210}{61.64 * 0.9 * 0.636} * 100$$

$$\% P\acute{e}rdidas = 1.2389\%$$

Las pérdidas máximas reconocidas por la CREG en transformadores de distribución son de 1.72%. Las pérdidas calculadas para el transformador estudiado son 1.2389%, por lo que el transformador seleccionado operaría dentro de los valores tolerables.

### 7.1.2 Pérdidas en alimentadores para medida descentralizada

Durante el diseño eléctrico de un edificio de 22 pisos con cuatro apartamentos por piso, se deben diseñar los barrajes que salen de los bornes de baja del transformador y llegan a los medidores de energía, en la instalación se implementará medida descentralizada. Se procede a realizar el cálculo de pérdidas de energía para el alimentador de los apartamentos del piso 22, se debe tener en cuenta que cada piso tiene una altura de 3 m, que el edificio está ubicado en un barrio estrato 5 y que se emplea un factor de carga de 0.636.

De acuerdo con lo definido, para 88 usuarios se tiene una carga por usuario de 0.97 kVA, por lo tanto:

$$Carga \text{ por piso} = 0.97 \text{ kVA} * 4$$

$$Carga \text{ por piso} = 3.88 \text{ kVA}$$

Con la carga calculada se procede a hacer el cálculo de la corriente para el barraje del piso 22.

$$I = \frac{3.88 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 0.220 \text{ kV}}$$

$$I = 10.18 \text{ A}$$

Se procede entonces a utilizar los criterios técnicos de capacidad y regulación descritos en el documento *GM-01 Guía metodológica: cálculo de conductor económico*, por lo que, para un nivel de corriente de 13 A, se selecciona un conductor calibre 8 THHN y con las características eléctricas de este conductor se procede a realizar el cálculo del porcentaje de pérdidas así:

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{\sqrt{3} * i_n * R * l * (0.7 * Fc + 0.3)}{V_l * FP * NCF} * 100$$

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{\sqrt{3} * 10.18 * 2.5591 * 0.066 * (0.7 * 0.636 + 0.3)}{220 * 0.9} * 100$$

$$\% \text{ Pérdidas} = 1.12\%$$

Las pérdidas presentadas son menores al 1.38% por lo que el conductor operaría dentro de los límites que define la CREG por este concepto.



## **ANEXOS**

## Anexo A Valores máximos de pérdidas de transformadores monofásicos auto refrigerados y sumergidos en líquido, declarados admisibles [5]

**Tabla 3. Transformadores monofásicos de 5 kVA a 167,5 kVA serie AT ≤ 15 kV, serie BT ≤ 1,2 kV [5].**

| Valores máximos permisibles de corriente sin carga ( $I_0$ ), pérdidas sin carga ( $P_0$ ), pérdidas con carga a 85°C ( $P_c$ ), y tensión de cortocircuito a 85°C ( $U_z$ ) |                  |         |         |         |
|--|------------------|---------|---------|---------|
| Potencia Nominal kVA   | $I_0$ % de $I_n$ | $P_0$ W | $P_c$ W | $U_z$ % |
| 5  | 2,5              | 30      | 90      | 3,0     |
| 10   | 2,5              | 50      | 140     | 3,0     |
| 15   | 2,4              | 70      | 195     | 3,0     |
| 25   | 2,0              | 100     | 290     | 3,0     |
| 37,5   | 2,0              | 135     | 405     | 3,0     |
| 50   | 1,9              | 160     | 510     | 3,0     |
| 75   | 1,7              | 210     | 710     | 3,0     |
| 100  | 1,6              | 260     | 900     | 3,0     |
| 167,5  | 1,5              | 375     | 1365    | 3,0     |

**NOTAS:**

1. El valor máximo admisible de corriente sin carga ( $I_0$ ), pérdidas sin carga ( $P_0$ ) y pérdidas con carga ( $P_c$ ) ya incluye la tolerancia especificada en la Tabla 2 de la NTC - 380 [12].
2. El valor máximo admisible de la tensión de cortocircuito a 85 °C ( $U_z$ ) es el valor máximo que puede ser garantizado o declarado por el fabricante. Al valor declarado se le debe aplicar la tolerancia especificada en la Tabla 2 de la NTC 380.
3. Los valores máximos admisibles de  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $P_c$  y  $U_z$  para transformadores monofásicos con potencias inferiores a 5 kVA y superiores a 167,5 kVA serie de tensión correspondiente al numeral 2.2.1 de la NTC - 818 [5], deben ser establecidos por acuerdo entre el comprador y el fabricante.

**NOTA GENERAL:** Los datos en la tabla 3 del presente anexo, deben ser validados con la última versión de la norma NTC – 818 [5] y los datos que allá se citen.

**Tabla 4. Transformadores monofásicos de 25 kVA a 167,5 kVA 15 kV ≤ serie AT ≤ 34,5kV/serie BT ≤ 1,2 kV [5]**

| Valores máximos permisibles de corriente sin carga ( $I_0$ ), pérdidas sin carga ( $P_0$ ), pérdidas con carga a 85°C ( $P_c$ ), y tensión de cortocircuito a 85°C ( $U_z$ ) |                  |         |              |         |
|--|------------------|---------|--------------|---------|
| Potencia Nominal kVA   | $I_0$ % de $I_n$ | $P_0$ W | $P_c^{1)}$ W | $U_z$ % |
| 25   | 2,4              | 185     | 360          | 4,0     |
| 37,5   | 2,0              | 230     | 490          | 4,0     |
| 50   | 2,0              | 265     | 605          | 4,0     |
| 75   | 1,9              | 330     | 820          | 4,0     |
| 100  | 1,7              | 385     | 1020         | 4,0     |
| 167,5  | 1,6              | 510     | 1500         | 4,0     |

**NOTAS:**

1. El valor máximo admisible de corriente sin carga ( $I_0$ ), pérdidas sin carga ( $P_0$ ) y pérdidas con carga ( $P_c$ ) ya incluye la tolerancia especificada en la Tabla 2 de la NTC - 380 [12].
2. Las pérdidas con carga ( $P_c$ ) en transformadores con corrientes superiores a 1 200 A, en cualquiera de sus devanados, se deben aumentar en un 5 %.
3. El valor máximo admisible de la tensión de cortocircuito a 85 °C ( $U_z$ ) es el valor máximo que puede ser garantizado o declarado por el fabricante. Al valor declarado se le debe aplicar la tolerancia especificada en la Tabla 2 de la NTC - 380 [12].
4. La cuantificación del valor económico de las pérdidas de energía eléctrica debe estar de acuerdo con la norma NTC 2135 [13].

NOTA GENERAL: Los datos en la tabla 4 del presente anexo, deben ser validados con la última versión de la norma NTC – 818 [5] y los datos que allá se citen.

**Anexo B Valores máximos de pérdidas en transformadores trifásicos auto refrigerados y sumergidos en líquido, declarados admisibles. [6]**
**Tabla 5. Transformadores trifásicos de 15 kVA a 3750 kVA, serie AT<15kV, serie BT ≤ 1.2 kV [6]**

| Valores máximos declarados permisibles de corriente sin carga ( $I_0$ ), pérdidas sin carga ( $P_0$ ), pérdidas con carga ( $P_c$ ) y tensión de cortocircuito a 85°C ( $U_z$ ) |                     |            |            |            |
|---|---------------------|------------|------------|------------|
| Potencia kVA  | $I_0$<br>% de $I_n$ | $P_0$<br>W | $P_c$<br>W | $U_z$<br>% |
| 15  | 4,4                 | 80         | 310        | 3,0        |
| 30  | 3,6                 | 135        | 515        | 3,0        |
| 45  | 3,5                 | 180        | 710        | 3,0        |
| 75  | 3,0                 | 265        | 1090       | 3,5        |
| 112,5   | 2,6                 | 365        | 1540       | 3,5        |
| 150   | 2,4                 | 450        | 1960       | 4,0        |
| 225   | 2,1                 | 615        | 2890       | 4,0        |
| 300   | 2,0                 | 765        | 3675       | 4,5        |
| 400   | 1,9                 | 930        | 4730       | 4,5        |
| 500   | 1,7                 | 1090       | 5780       | 5,0        |
| 630   | 1,6                 | 1285       | 7140       | 5,0        |
| 750   | 1,6                 | 1450       | 8380       | 5,0        |
| 800   | 1,6                 | 1520       | 8900       | 5,0        |
| 1000  | 1,6                 | 1780       | 11100      | 5,0        |
| 1250  | 1,5                 | 2090       | 13500      | 6,0        |
| 1600  | 1,5                 | 2520       | 16700      | 6,0        |
| 2000  | 1,5                 | 3010       | 20400      | 6,0        |
| 2500  | 1,5                 | 3620       | 25000      | 6,0        |
| 3000  | 1,5                 | 4230       | 29700      | 6,0        |
| 3750  | 1,5                 | 5160       | 36600      | 6,0        |

**NOTAS [6]:**

1. El valor máximo admisible de corriente sin carga ( $I_0$ ), pérdidas sin carga ( $P_0$ ), pérdidas con carga ( $P_c$ ) ya incluye la tolerancia especificada en la Tabla 2 de la NTC - 380 [12].
2. Las pérdidas con carga ( $P_c$ ) en transformadores de corriente superiores a 1 200 A, en uno u otro devanado, se deben aumentar en 5 %.
3. El valor máximo admisible de la tensión de cortocircuito el 85 °C ( $U_z$ ) es el valor máximo que puede ser garantizado o declarado por el fabricante. Al valor declarado se le debe aplicar la tolerancia especificada en la Tabla 2 de la NTC - 380 [12].
4. La cuantificación del valor económico de las pérdidas de energía eléctrica debe estar de acuerdo con la NTC 2135 [13].
5. Los valores máximos de  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $P_c$  y  $U_z$  para transformadores trifásicos con potencias inferiores a 75 kVA y superiores a 10 000 kVA serie de tensión correspondiente al numeral 2.2.2. de la NTC - 819 [6] deben ser establecidos por acuerdo entre el comprador y el fabricante.



**Tabla 6. Transformadores trifásicos de 75 kVA a 10 000 kVA, 15 kV < serie AT ≤ 46 kV, serie BT ≤ 15 kV [6]**

| Valores máximos declarados permisibles de corriente sin carga ( $I_o$ ), pérdidas sin carga ( $P_o$ ), pérdidas con carga ( $P_c$ ) y tensión de cortocircuito a 85°C ( $U_z$ ) |                  |         |         |         |
|---|------------------|---------|---------|---------|
| Potencia Nominal kVA  | $I_o$ % de $I_n$ | $P_o$ W | $P_c$ W | $U_z$ % |
| 75  | 3,5              | 390     | 1370    | 6,0     |
| 112,5   | 2,6              | 500     | 1890    | 6,0     |
| 150   | 2,5              | 610     | 2400    | 6,0     |
| 225   | 2,5              | 790     | 3330    | 6,0     |
| 300   | 2,0              | 950     | 4210    | 6,0     |
| 400   | 2,0              | 1150    | 5320    | 6,0     |
| 500   | 1,7              | 1330    | 6370    | 6,0     |
| 630   | 1,7              | 1540    | 7690    | 6,0     |
| 750   | 1,5              | 1730    | 8860    | 6,0     |
| 800   | 1,5              | 1800    | 9330    | 6,0     |
| 1000  | 1,2              | 1980    | 12000   | 6,0     |
| 1250  | 1,0              | 2370    | 14300   | 6,0     |
| 1600  | 1,0              | 2880    | 17400   | 6,0     |
| 2000  | 1,0              | 3430    | 20900   | 6,0     |
| 2500  | 1,0              | 4100    | 25000   | 6,5     |
| 3000  | 1,0              | 4740    | 29000   | 6,5     |
| 3750  | 1,0              | 5650    | 34400   | 6,5     |
| 4000  | 0,8              | 5950    | 36100   | 6,5     |
| 5000  | 0,8              | 7100    | 42600   | 6,5     |
| 6000  | 0,8              | 8200    | 48200   | 7,15    |
| 7500  | 0,8              | 9790    | 55100   | 7,15    |
| 10000   | 0,8              | 12300   | 63000   | 7,15    |

**NOTAS:**

1. El valor máximo admisible de corriente sin carga ( $I_o$ ), pérdidas sin carga ( $P_o$ ), pérdidas con carga ( $P_c$ ) ya Incluye la tolerancia especificada en la Tabla 2 de la NTC - 380 [12].
2. Las pérdidas con carga ( $P_c$ ) en transformadores con corrientes superiores a 1 200 A, en uno u otro devanado, se deben aumentar en 5 %.
3. El valor máximo admisible de la tensión de cortocircuito a 85 °C ( $U_z$ ) es el valor máximo que puede ser garantizado o declarado por el fabricante. Al valor declarado se le debe aplicar la tolerancia especificada en la Tabla 2 de la NTC - 380 [12].
4. La cuantificación del valor económico de las pérdidas de energía eléctrica debe estar de acuerdo con la NTC 2135 [13].

NOTA GENERAL: Los datos en la tabla 5 y la tabla 6 del presente anexo, deben ser validados con la última versión de la norma NTC - 819 [6] y los datos que allá se citen.