

# Estudio de Sobrecarga de Transformadores de Potencia

## Resumen

Contiene recomendaciones generales para la carga del transformador de subestación Guaracachi, propiedad de TDE

## Palabras claves

Transformador de potencia; sobrecarga

**Marcelo J. Hinojosa Torrico**

[mhinojosa@tde.com.bo](mailto:mhinojosa@tde.com.bo)

**Febrero 2001**

## **INTRODUCCIÓN**

La elaboración del estudio de Sobrecarga de Transformadores de Potencia, consideró todas las consecuencias y riesgos que implica una sobrecarga de transferencia de potencia. Para tal efecto se han realizado diferentes desarrollos matemáticos que encierran el comportamiento del autotransformador de la subestación Guaracachi, tablas comparativas de resultados y de recomendaciones para diferentes estados de precarga y sobrecarga, tomando como referencia la "Guía de Carga del IEEE para transformadores sumergidos en aceite mineral ANSI/IEEE C57.91-1995.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN..... I

CONTENIDO ..... II

### ESTUDIO DE SOBRECARGA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

1	PRÓLOGO.....	1
1.1	<i>Alcance</i> .....	1
1.2	<i>Propósito</i> .....	1
2	DEFINICIONES.....	1
2.1	<i>Factor de aceleración de envejecimiento</i> .....	1
2.2	<i>Pérdida porcentual de vida</i> .....	1
2.3	<i>Vida del aislamiento de transformadores</i> .....	1
3	EFFECTOS DE LA SOBRECARGA.....	2
3.1	<i>Generalidades</i> .....	2
3.2	<i>Consideraciones de voltaje y de frecuencia</i> .....	3
3.3	<i>Efecto de la Sobrecarga en los Bushings</i> .....	3
3.4	<i>Cambiadores de Tap</i> .....	4
3.5	<i>Transformadores de Corriente tipo Bushing</i> .....	4
3.6	<i>Información necesaria para los cálculos de sobrecarga</i> .....	4
4	VIDA DEL AISLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR.....	6
4.1	<i>Generalidades</i> .....	6
4.2	<i>Ecuaciones del envejecimiento</i> .....	6
4.3	<i>Porcentaje de pérdida de vida</i> .....	8
5	TEMPERATURA AMBIENTE Y SU INFLUENCIA EN LA CARGA.....	9
5.1	<i>Generalidades</i> .....	9
5.2	<i>Temperatura ambiente aproximada para transformadores enfriados por aire</i> .....	9
5.3	<i>Influencia de la temperatura ambiente sobre la carga para una expectativa de vida normal</i> .....	9
6	CÁLCULO DE TEMPERATURAS.....	10
6.1	<i>Ciclos de carga</i> .....	10
6.2	<i>Cálculo de Temperaturas</i> .....	12
7	CARGA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.....	17
7.1	<i>Tipos de carga y su interrelación</i> .....	17
7.2	<i>Limitaciones</i> .....	18
7.3	<i>Carga con expectativa de vida normal</i> .....	19
7.4	<i>Carga planificada por encima de las especificaciones de placa</i> .....	21
7.5	<i>Carga de emergencia por largo tiempo</i> .....	21
7.6	<i>Carga de emergencia por corto tiempo</i> .....	21
8	EJEMPLO DE CÁLCULO.....	22

# Estudio de Sobrecarga de Transformadores de Potencia

## 1 Prólogo

### 1.1 Alcance

Causas y recomendaciones específicas para casos de sobrecarga de transformadores de potencia, considerando los efectos térmicos, mecánicos y eléctricos, que tienen lugar en un proceso de sobrecarga y las medidas de control que deben tomarse en cuenta para evitar daños en el transformador.

El estudio está basado en La Guía de Carga de Transformadores Sumergidos en Aceite Mineral ANSI/IEEE Std C57.91-1995.

### 1.2 Propósito

Aplicaciones de cargas que exceden el nivel de las especificaciones de placa involucran cierto grado de riesgo. El propósito de ésta guía es identificar estos riesgos y establecer limitaciones y líneas directrices cuya aplicación minimizará los riesgos hasta un nivel aceptable por el propietario del equipo.

## 2 Definiciones

### 2.1 Factor de aceleración de envejecimiento

Para una temperatura dada en los puntos más calientes, el nivel/grado en que el envejecimiento del aislamiento del transformador es acelerado en comparación con el nivel de envejecimiento a una temperatura de puntos más calientes de referencia. La temperatura de referencia para los puntos más calientes es de 110°C para transformadores con elevación de 65°C en promedio en el bobinado y de 95°C para los con elevación de 55°C en promedio del bobinado (sin aislamiento térmico mejorado).

### 2.2 Pérdida porcentual de vida

El envejecimiento equivalente en horas a la temperatura de referencia en los puntos más calientes por un período de tiempo (usualmente 24 horas) es cien (100) dividido por la vida total normal del aislamiento en horas a la temperatura de referencia en los puntos de más calentamiento.

Se obtiene el envejecimiento equivalente en horas a diferentes temperaturas de los puntos más calientes multiplicando los factores de aceleración del envejecimiento para las temperaturas en los puntos de más calentamiento por los períodos de tiempo de las varias temperaturas en los puntos más calientes.

### 2.3 Vida del aislamiento de transformadores

Para una temperatura dada en el aislamiento de un transformador, el tiempo total entre el estado inicial en que se considera que el aislamiento es nuevo y el estado final en que puede ocurrir un esfuerzo dieléctrico, esfuerzo en cortocircuito o movimiento mecánico, en servicio normal, lo que causaría una falla eléctrica.

## Electric Listas

### 3 Efectos de la Sobrecarga

#### 3.1 Generalidades

La aplicación de cargas que exceden el nivel de las especificaciones de placa (sobrecarga) involucran cierto grado de riesgo. A continuación enumeramos las áreas de riesgo que hay que tomar en consideración cuando se carga grandes transformadores por encima del nivel de las especificaciones de placa.

- a) La evolución de gas libre proveniente del aislamiento del bobinado y de los conductores terminales (conductores aislados) calentados por la carga y por las corrientes de Foucault (corrientes que circulan entre y dentro de los alambres de los conductores aislados) pueden hacer peligrar la integridad dieléctrica
- b) La evolución de gas libre proveniente del aislamiento adyacente a las partes metálicas vinculadas por el flujo electromagnético producido por el bobinado o corrientes de inducidas puede también reducir la rigidez dieléctrica
- c) Los cálculos de pérdida de vida pueden efectuarse como se describe en cláusula 4. Cuando el cálculo de la pérdida porcentual de la vida total se realiza basado en una definición arbitraria de una "vida normal" en horas, uno tiene que reconocer que los resultados calculados no pueden ser tan conservadores para transformadores de más de 100 MVA como lo son para unidades más pequeñas ya que el cálculo no toma en consideración los efectos del desgaste mecánico que puede aumentar con la subida de nivel de potencia (MVA)
- d) La operación a una alta temperatura causará una disminución en la resistencia mecánica tanto del aislamiento del conductor como de la estructura. Estos efectos son más preocupantes durante los períodos de sobrecorriente transitoria (en falla) cuando los esfuerzos mecánicos alcanzan sus niveles más altos.
- e) La expansión térmica de conductores, materiales aislantes, o partes estructurales a altas temperaturas puede dar como resultado deformaciones permanentes que podrían contribuir a ocasionar fallas mecánicas o dieléctricas.
- f) La presión acumulada en los bushings, para corrientes por encima del nivel especificado pueden dar como resultado el filtrado/goteo de empaquetaduras, pérdida de aceite, y finalmente una falla dieléctrica.
- g) Un incremento en la resistencia de contactos en los cambiadores de tap, puede dar como resultado el acumulo de productos de la descomposición del aceite en una región de alta temperatura muy localizada en el punto de contacto cuando el cambiador de tap es sobrecargado. En caso extremo, esto puede dar como resultado una condición de embalamiento térmico con formación de arcos en los contactos y una evolución violenta de gas.
- h) El equipo auxiliar interno dentro del transformador como ser reactores y transformadores de medida, pueden también estar sujetos a algunos de los riesgos identificados anteriormente.
- i) Cuando la temperatura de la parte superior del aceite excede los 105°C (elevación de 65°C por encima de los 40°C de temperatura ambiente de acuerdo con IEEE Std.C57.12.00-1993), existe la posibilidad de que la expansión del aceite sea mayor que la capacidad contenedora del tanque y puede también dar como resultado una presión que ocasione que entre en operación el dispositivo de desahogo de presión expulsando al aceite. La pérdida de aceite puede igualmente crear problemas en el sistema de conservación del aceite o exponer partes eléctricas durante el enfriamiento.

## Electric Listas

### 3.2 Consideraciones de voltaje y de frecuencia

Hay que tomar en consideración las influencias del voltaje y de la frecuencia cuando se determina las limitaciones para la sobrecarga de un transformador. Hay que hacerlo a pesar de que muy probablemente habrá poco control de estos parámetros durante una sobrecarga. Se tiene que reconocer que, en condiciones de sobrecarga, la regulación del voltaje a través del transformador puede incrementarse significativamente (dependiendo de la impedancia del transformador) debido a la carga incrementada de la potencia y la caída posible del factor de potencia.

### 3.3 Efecto de la Sobrecarga en los Bushings

Los Bushings son diseñados normalmente para un límite de temperatura en los puntos más calientes de 105°C en caso de corriente nominal y con una temperatura del aceite superior de 95°C promediado en un periodo de 24 horas. Operarlo por encima de éstos valores puede resultar en temperaturas por encima de éste límite, lo que puede causar la pérdida de vida de los Bushings dependiendo del perfil real de tiempo vs. Temperatura que se observa en el Bushing.

Una serie de factores que reducen la severidad de las sobrecargas en los Bushings comparados con las sobrecargas en el aislamiento del bobinado del transformador comprenden los siguientes:

- a) La temperatura del aceite superior en el transformador puede estar bastante por debajo de 95°C con carga nominal
- b) Los Bushings son unidades selladas que protegen el aislamiento y la integridad térmica
- c) El aislamiento de los Bushings es usualmente más seco que el aislamiento del transformador
- d) El aislamiento de los Bushings no es sometido a un esfuerzo significativo en caso de fuertes corrientes de falla
- e) Los Bushings tienen una capacidad de corriente nominal superior a la de los bobinados

Los posibles efectos de la Sobrecarga pueden ser:

- a) Formación de presión interna
- b) Envejecimiento de los materiales de la empaquetaduras
- c) Incrementos inusuales en el factor de potencia debido a deterioro térmico
- d) Formación de Burbuja gaseosas a causa de puntos muy caliente que sobrepasen los 140°C
- e) Embalamiento térmico a causa de mayores pérdidas dieléctricas a altas temperaturas
- f) Calentamiento de salientes metálicas debido al flujo de dispersión magnética.

#### *Conductores de tracción en los Bushings (Chicotillos)*

El rendimiento térmico del Bushing es determinado por el tamaño del conductor (dentro del Bushing) suministrado como parte del transformador, y puede que las especificaciones de los valores nominales no sean aplicables. Los conductores de tracción pueden limitar la carga del transformador a menos de la capacidad del aislamiento del bobinado del transformador o del Bushing.

## Electric Listas

### 3.4 Cambiadores de Tap

#### *Cambiadores de Tap para una operaciones en vacío (TCDO)*

La elevación de temperatura dependerá del diseño de los contactos y de la condición de éstos cuando ocurre una carga. A pesar que tienen una cierta capacidad de sobrecarga cuando son nuevos, ésta capacidad puede disminuir debido a la formación de una película fina en los contactos que ocurre durante servicio normal.

Una vez que un contacto alcance una temperatura crítica, puede producirse una condición de embalamiento térmico. Los contactos se sobrecalientan y se forma un depósito alrededor de los contactos, lo que incrementa la resistencia del contacto hasta que finalmente alcanza una temperatura que genera gas. Mínimamente, esto producirá una alarma de gas. Máximamente, el gas puede ocasionar la interrupción dieléctrica del transformador.

#### *Cambiador de Tap en carga (LTC)*

Las especificaciones actuales para un LTC incluye lo siguiente:

- a) Límite de elevación de temperatura de 20°C para cualquier corriente que lleva contacto con aceite cuando opera a 1.2 veces la corriente nominal máxima del LTC
- b) Capacidad de soportar 40 operaciones de ruptura a dos veces la corriente y kVA máximos. Los oscilogramas sacados en cada operación indicarán que en ningún caso el momento de producir arcos es tal que haga peligrar la operación del aparato.

Las normas permiten a los contactos de los cambiadores de Tap a funcionar en aceite a 100°C con una elevación de temperatura de 20°C a 1.2 veces las especificaciones nominales. Además la experiencia ha mostrado que comienza a formarse carbono en los contactos en el aceite a temperaturas elevadas (del orden de 120°C). La gravedad de ésta formación de carbono depende de la acción de fricción de los contactos de conmutación, de la frecuencia con que tiene lugar la operación de conmutación, y del tiempo en que persiste ésta temperatura.

### 3.5 Transformadores de Corriente tipo Bushing

Los transformadores de corriente tipo Bushing tienen el aceite superior como temperatura ambiente, la que es limitada a 105°C de temperatura total con salida nominal para los transformadores con elevación de temperatura de 65°C.

### 3.6 Información necesaria para los cálculos de sobrecarga

Cuando se pretende efectuar cálculos para determinar la capacidad de carga de un transformador, es necesario buscar la siguiente información de las especificaciones o en el reporte de ensayo final:

- a) Elevación de la temperatura del aceite superior por encima de la temperatura ambiente en caso de carga especificada (nominal)
- b) Elevación de la temperatura del aceite de la parte inferior por encima de la temperatura ambiente en caso de carga especificada
- c) Elevación promedio de la temperatura en el conductor por encima de la temperatura ambiente en caso de carga especificada
- d) Elevación de la temperatura en el punto más caliente del bobinado por encima de la temperatura ambiente a carga nominal

## Electric Listas

- e) Pérdidas de carga a carga nominal
- f) Pérdida en el núcleo en vacío
- g) Pérdida total a carga nominal
- h) Peso del conjunto de núcleo y bobina
- i) Peso del tanque y accesorios

NOTA - Para propósitos de cálculo térmico transitorio, el peso del tanque y los accesorios que se utilizará será únicamente de aquellas porciones que están en contacto con aceite calentado.

- j) Volumen del aceite en el tanque y en el equipo de refrigeración (excluyendo los Compartimentos LTC, los tanques de expansión del aceite, etc.)

Para toda la información citada de a) a f), hay que indicar las condiciones bajo las que se hicieron las mediciones (carga, temperatura ambiente, tap, etc.). Si se provee datos de tests provenientes de unidades térmicamente similares, entonces los datos indicados en el reporte del test tienen que corregirse por el fabricante utilizando las características reales del diseño (pérdidas, superficie refrigerante, etc.) del transformador suministrado.

Cálculos más precisos de la capacidad de carga pueden realizarse utilizando la siguiente información adicional:

- k) Pérdida de carga en caso de carga nominal y extremos de tap ó todas las combinaciones de tap posibles
- l) Resistencia del bobinado en caso de los extremos del tap ó todas las combinaciones de tap posibles
- m) Pérdida total por dispersión y corrientes de Foucault como porcentaje de la pérdida total de carga y pérdida estimada por dispersión y por corrientes parásitas
- n) Pérdida por corrientes de Foucault por unidad en un lugar de punto caliente
- o) Altura del bobinado por unidad hasta el lugar del punto caliente

El test de elevación de temperatura (calentamiento) se realiza en la posición de tap de pérdida máxima. Estos datos dan como resultado predicciones conservadoras de la capacidad de carga cuando el transformador está operando en otra toma que la de pérdida máxima. Para lograr predicciones más precisas de la capacidad de un transformador basadas en el ciclo real de carga y las conexiones de tap, se podrá efectuar varios ajustes en los datos presentados en el informe de prueba antes de utilizar los datos como punto de partida en cálculos de carga. Estos ajustes se dan en lo siguiente:

- p) Ciclo de carga en kVA en la combinación real de las conexiones de tap
- q) Utilice las pérdidas de carga medidas o calculadas para la conexión de tap
- r) Corrija los datos del test de elevación de temperatura para las pérdidas menores o corriente nominal diferente
- s) Determine si el gradiente del bobinado cambia en los puntos más calientes cuando cambian las conexiones de tap.



## Electric Listas

El cálculo del efecto de la operación del cambiador de tap bajo carga (LTC) en las predicciones de carga es un tema extremadamente complicado y controversial, y su efecto puede variar según el fabricante. Para algunos diseños el efecto de la operación del cambiador de tap bajo carga puede tener un efecto insignificante sobre la elevación de la temperatura en el bobinado del transformador.

### 4 Vida del Aislamiento de un Transformador

#### 4.1 Generalidades

El envejecimiento o deterioro del aislamiento está en función del tiempo, de la temperatura, el contenido de humedad, y el contenido de oxígeno. Con los sistemas modernos de conservación de aceite, se puede minimizar las contribuciones de la humedad y del oxígeno al deterioro del aislamiento, dejando la temperatura del aislamiento como parámetro de control.

En la mayoría de los transformadores, la distribución de la temperatura no es uniforme, la parte que está operando a la mayor temperatura sufrirá normalmente el mayor deterioro. Por eso, es usual en estudios del envejecimiento tomar en consideración los efectos de envejecimiento producidos por la mayor temperatura (en los puntos más calientes). Ya que muchos factores influyen el efecto acumulativo de la temperatura con el tiempo, causando deterioro del aislamiento del transformador, no es posible predecir con cierto grado de precisión cual es la vida útil del aislamiento en un transformador, incluso en condiciones constantes o controladas de cerca, y mucho menos en condiciones de servicio muy variadas. Cada vez que utilizamos la palabra "vida" en esta guía, quiere decir vida calculada del aislamiento, no la vida real del transformador.

#### 4.2 Ecuaciones del envejecimiento

La evidencia experimental indica que la relación del deterioro del aislamiento con el tiempo sigue una adaptación de la teoría de la velocidad de reacción de Arrhenius bajo la forma siguiente:

$$\text{Por unidad de vida} = A \cdot EXP \left[ \frac{B}{\Theta_H + 273} \right]$$

en que

$\Theta_H$  es la temperatura del punto más caliente del bobinado, en °C

A es una constante

B es una constante

La curva de vida por unidad del aislamiento del transformador de la figura 1 relaciona la vida del aislamiento del transformador por unidad con la temperatura de los puntos más calientes del bobinado. El uso de esta curva aísla la temperatura como principal variable que afecta la vida térmica; Indica también el grado hasta el cual el nivel de envejecimiento es acelerado por encima de lo normal para temperaturas por encima de una temperatura de referencia de 110°C y se reduce debajo de lo normal para temperaturas debajo de 110°C. La ecuación para esta curva es la siguiente:

$$\text{Por unidad de vida} = 9.80 \times 10^{-18} EXP \left[ \frac{1500}{\Theta_H + 273} \right] \quad (1)$$

y para un aislante cuya elevación de temperatura promedio de 55°C (95°C), es:

$$\text{Por unidad de vida} = 2.00 \times 10^{-8} EXP \left[ \frac{1500}{\Theta_H + 273} \right] \quad (1')$$

## Electric Listas

La curva de vida por unidad del aislamiento del transformador (figura 1) puede usarse de las siguientes dos maneras:

Es la base para el cálculo de un factor de aceleración del envejecimiento ( $F_{AA}$ ) para una carga y temperatura dada o para un perfil de carga variable y temperatura por un período de 24h. En la figura 2 se muestra una curva de  $F_{AA}$  versus temperatura del punto más caliente para un sistema de aislamiento con elevación de 65 °C. La ecuación para  $F_{AA}$  es la siguiente:

$$F_{AA} = EXP \left[ \frac{1500}{383} \frac{1500}{\Theta_H + 273} \right] \quad (2)$$

y para un aislante cuya elevación de temperatura promedio de 55°C (95°C), es:

$$F_{AA} = EXP \left[ \frac{1500}{368} \frac{1500}{\Theta_H + 273} \right] \quad (2')$$

La ecuación 2 puede utilizarse para calcular el envejecimiento equivalente del transformador.

La vida equivalente (en horas o días) a la temperatura de referencia que se consumirá en un período de tiempo dado para el ciclo de la temperatura dada es la siguiente:

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA,n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (3)$$

donde

- $F_{EQA}$  es el factor de envejecimiento equivalente para el período total de tiempo
- $n$  es el índice del intervalo de tiempo, t
- $N$  es el número total de intervalos de tiempo
- $F_{AA,n}$  es el factor de aceleración del envejecimiento para la temperatura que existe durante el intervalo de tiempo  $\Delta t_n$ .
- $\Delta t_n$  es el intervalo de tiempo, horas

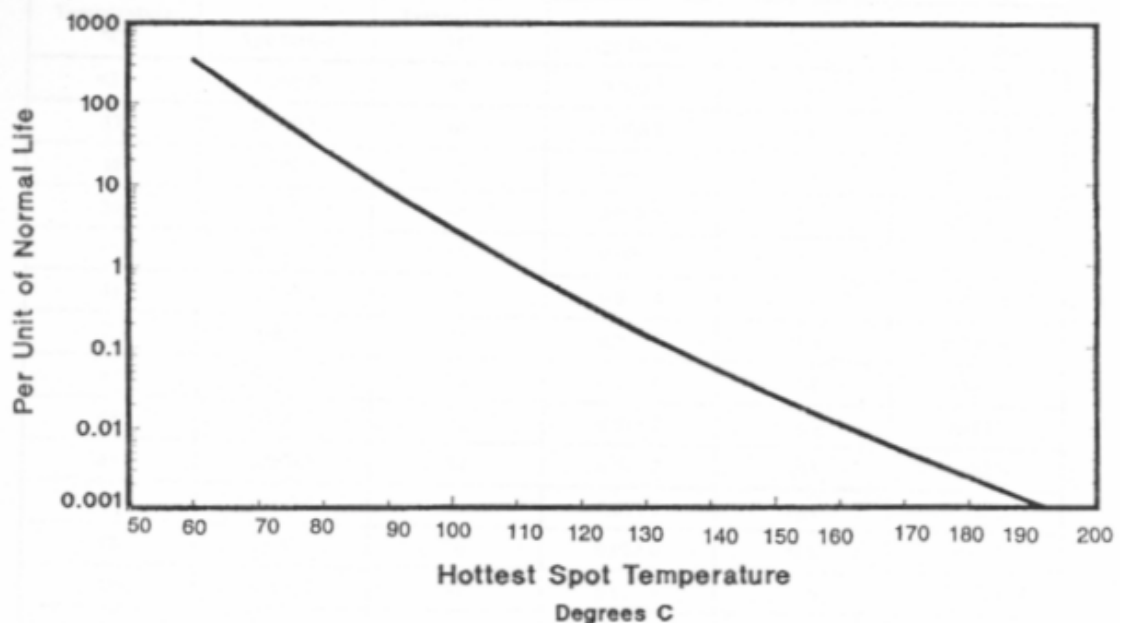


Figura 1 - Vida del aislamiento del transformador

Horizontal: Temperatura del Punto más caliente - Grados C

Vertical: Por unidad de Vida Normal

## Electric Listas

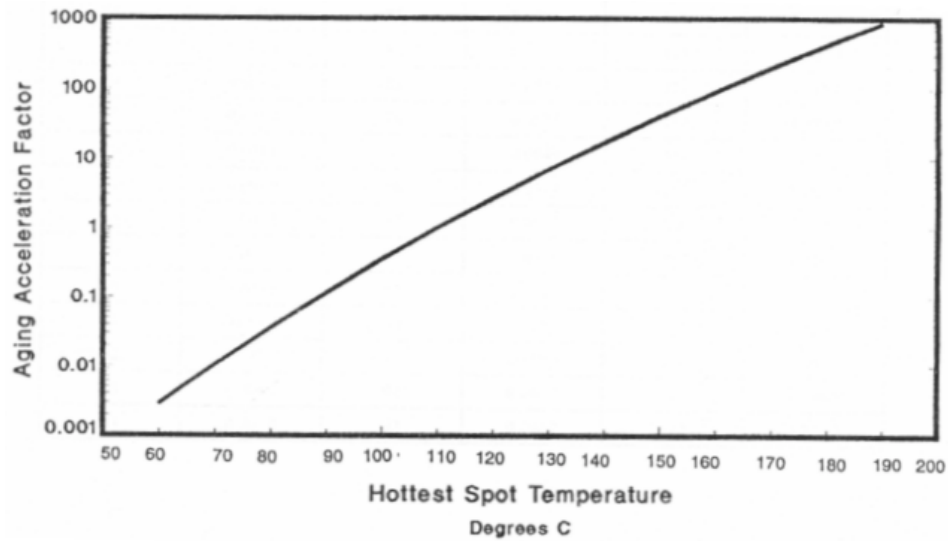


Figura 2 - Factor de aceleración del envejecimiento (relativo hasta 110 °C)

Horizontal: Temperatura del Punto más caliente - Grados C  
Vertical: Factor de aceleración del Envejecimiento

### 4.3 Porcentaje de pérdida de vida

La curva de vida por unidad del aislamiento (figura 1) puede utilizarse también para calcular el porcentaje de pérdida total de vida. Para hacerlo, es necesario definir arbitrariamente la vida normal del aislamiento a la temperatura de referencia en horas o años. En la tabla 2 se puede seleccionar los valores Benchmark de la vida normal del aislamiento para un sistema bien seco, libre de oxígeno. Luego se determina las horas de vida perdidas en el período total de tiempo multiplicando el envejecimiento equivalente determinado en ecuación 4 por el período de tiempo (t) en horas. Esto da las horas equivalentes de vida a la temperatura de referencia que son consumidas en el período de tiempo. El porcentaje de pérdida de vida del aislamiento en el período de tiempo son las horas equivalentes de vida dividido por la definición de la vida total normal del aislamiento y multiplicado por 100. Generalmente el período total de tiempo utilizado es de 24 h. La ecuación es dada como sigue:

$$\% \text{ Pérdida de vida} = \frac{F_{EQA} \cdot t \cdot 100}{\text{Vida normal de aislamiento}} \quad (4)$$

**Tabla 1 - Vida normal del aislamiento de un sistema de aislamiento bien seco, libre de oxígeno con elevación de temperatura promedio de 65 °C en el bobinado a la temperatura de referencia de 110 °C**

Base	Vida normal del aislamiento	
	Horas	Años
50% resistencia a la tracción conservada del aislamiento.(criterio del anterior IEEE Std C57.92-1981)	65 000	7.42
25% resistencia a la tracción conservada del aislamiento	135 000	15.41
200 grado de polimerización conservado en aislamiento	150 000	17.12
Interpretación de Datos de Tests de la vida funcional del transformador de distribución (criterio del anterior IEEE Std C57.91-1981)	180 000	20.55

NOTA

Los valores de conservación de la Resistencia a la tracción ó grado de polimerización (D.P.) fueron determinados por medio del envejecimiento en tubos sellados con muestras bien secas en aceite libre de oxígeno.

## Electric Listas

Definiciones posibles de la vida normal a 110 °C de tabla 2 son las siguientes:

Vida Normal	
Horas	Días
180 000	7500
150 000	6250
135 000	5625
65 000	2708

El tiempo de duración para una operación continua a temperaturas del punto más caliente, dan diferentes porcentajes de pérdida de vida, puede calcularse utilizando la ecuación 4.

### 5 Temperatura Ambiente y su Influencia en la Carga

#### 5.1 Generalidades

La temperatura ambiente es un factor importante para determinar la capacidad de carga de un transformador ya que las elevaciones de temperatura para cualquier carga tienen que añadirse a la temperatura ambiente para determinar las temperaturas de operación. Las especificaciones de un transformador están basadas en una temperatura ambiente promedio sobre 24 Hrs. de 30 °C.

Siempre que la temperatura ambiente real pueda ser medida, hay que sacar el promedio de esas temperaturas sobre 24 Hrs. y, luego se las puede utilizar para determinar la temperatura del transformador y su capacidad de carga. La temperatura ambiente es la temperatura del aire en contacto con sus radiadores o intercambiadores de calor.

#### 5.2 Temperatura ambiente aproximada para transformadores enfriados por aire

A menudo es necesario pronosticar la carga que un transformador pueda soportar con toda seguridad para el futuro en una temperatura ambiente desconocida.

- Temperatura promedio:* Utilice la temperatura diaria promedio para el mes en cuestión, promediado sobre varios años.
- Temperatura máxima diaria:* Utilice el promedio de las temperaturas diarias máximas para el mes en cuestión, promediadas sobre varios años.

Estas temperaturas ambientes se deben utilizar como sigue:

- Para cargas con una expectativa de vida normal, utilice a) la temperatura promedio como temperatura ambiente para el mes en cuestión.
- Para cargas de corto tiempo con sacrificio moderado de la expectativa de vida, utilice b), la temperatura diaria máxima para el mes en cuestión.

Durante un día cualquiera, el promedio sobre 24 Hrs. de la temperatura puede exceder el valor derivado de a) ó b) antes mencionados. Para ser conservador se recomienda incrementar estas temperaturas en un 5°C ya que el envejecimiento en caso de temperaturas mayores que el promedio no es plenamente recompensado en caso de menor envejecimiento a una temperatura más baja que el promedio. Con éste margen la temperatura promedio aproximada en 24 Hrs. no será sobrepasada más que unos cuantos días al mes, y cada vez que se sobrepase, la pérdida adicional de vida no será seria.

#### 5.3 Influencia de la temperatura ambiente sobre la carga para una expectativa de vida normal

Las temperaturas ambientes promedio deben cubrir períodos de 24 horas. Las temperaturas máximas asociadas no deberían estar más de 10 °C por encima de las temperaturas promedio para transformadores enfriados por aire. Como la temperatura ambiente es un factor importante para determinar la capacidad de carga de un transformador, tiene que ser controlada en caso de instalaciones interiores por medio de

## Electric Listas

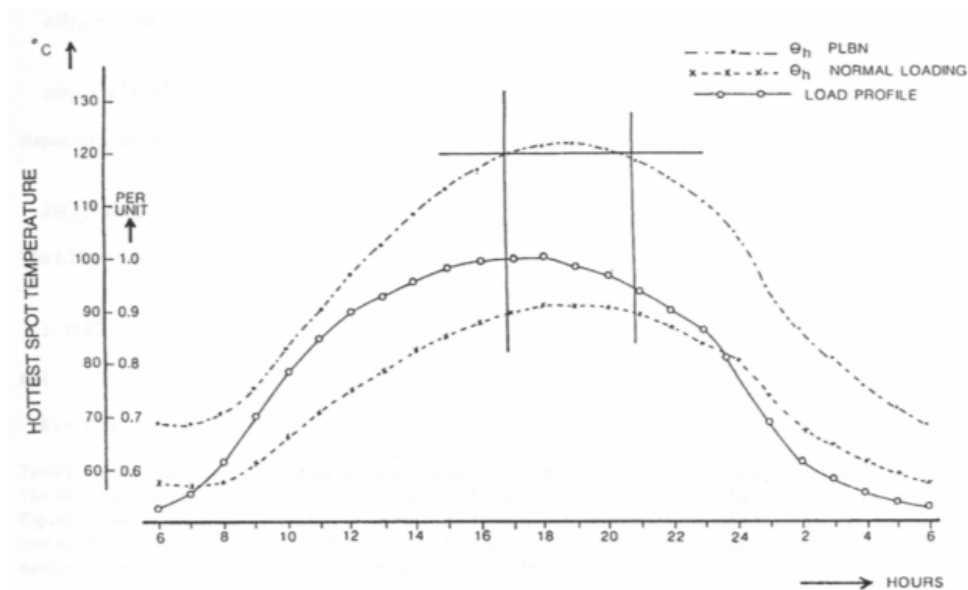
una ventilación adecuada y siempre tiene que ser tomada en consideración para instalaciones exteriores.

### 6 Cálculo de Temperaturas

#### 6.1 Ciclos de carga

##### 6.1.1 Ciclos de carga, generalidades

Los transformadores operan generalmente con un ciclo de carga que se repite cada 24 horas. Un ciclo de carga normal típico como el que se muestra en figura 3, consiste en fluctuaciones a lo largo del día.



**Figura 3 - Ciclos de carga para carga normal y carga planificada por encima de las especificaciones de placa**

Para una carga normal o una sobrecarga planificada por encima de las especificaciones de placa, se utiliza generalmente un ciclo de carga de múltiples etapas. Se puede describir el perfil de carga para 24 hs como una serie de cargas constantes de corta duración (usualmente 1/2 hora ó 1 hora).

Un ciclo equivalente de dos etapas como muestra la figura 4 puede ser utilizado para determinar la capacidad de sobrecarga de emergencia utilizando las ecuaciones 5 al 22. El ciclo de carga equivalente de dos etapas consiste en una carga previa (pre - carga) y una carga pico (de punta). Se utiliza también ésta figura con el propósito de describir cálculos para determinar ciclos equivalentes de carga. Hay usualmente un período en el ciclo diario de carga cuando la carga aumenta hasta un nivel considerablemente mayor que cualquier otro alcanzado en otro momento, así como se muestra por medio de la línea sólida del ciclo de sobrecarga de figura 4. Generalmente, el valor máximo del pico de carga no es alcanzado ni pasado repentinamente, sino que aumenta y disminuye gradualmente. Los cálculos que utilizan el ciclo de carga de múltiples - etapas, pueden efectuarse también si se desea en ciclos de sobrecarga de emergencia.

## Electric Listas

### 6.1.2 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 mismo como el que genera una carga intermedia constante durante el mismo período de tiempo. Esto es debido a las grandes características de almacenamiento de los materiales del transformador. Se supone que una carga constante genera las mismas pérdidas totales como la carga fluctuante, una carga equivalente desde el punto de cierta temperatura. La carga equivalente para todas las partes de un ciclo diario de carga puede expresarse por medio de ecuación 5.

$$\left[ \frac{L_1^2 t_1 + L_2^2 t_2 + L_3^2 t_3 + \dots + L_N^2 t_N}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_N} \right]^{0.5} \quad (5)$$

en que

$L_1, L_2$  son las diferentes etapas de carga en %, por unidad, ó en kVA reales o corrientes

$N$  es el número total de cargas consideradas

$t_1, t_2$  son las duraciones respectivas de estas cargas, en horas

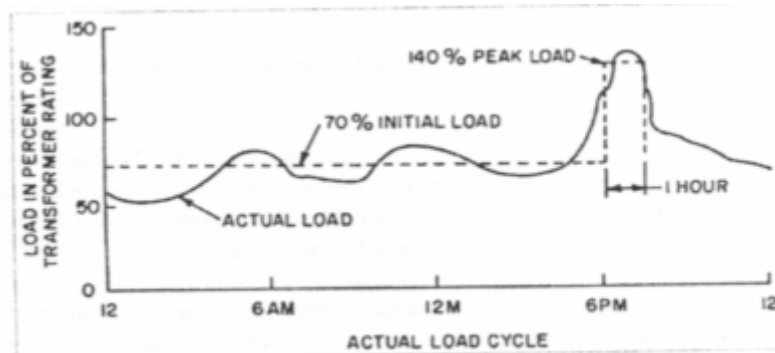


Figura 4 - Ejemplo de un ciclo de carga real y un ciclo de carga equivalente

### 6.1.3 Pico equivalente de carga

El pico de carga equivalente de un ciclo usual de carga es la carga rms obtenida por medio de la ecuación 5 para el período limitado en el cual parece ocurrir la mayor parte del pico irregular real. La duración estimada del pico tiene una influencia considerable sobre el valor pico rms. En caso en que la duración sea sobrestimada, el valor rms pico puede estar considerablemente por debajo de la demanda pico máxima. Para evitar sobrecalentamiento debido a grandes y breves sobrecargas durante el pico de sobrecarga, el valor rms para el período pico de carga no debería ser menor que el 90% de la demanda máxima integral por 1/2 h.

### 6.1.4 Equivalente continuo de carga previa (Pre - carga)

La carga previa continua equivalente es la carga rms obtenida por medio de la ecuación 5 en un período elegido del día. La experiencia nos dice que se obtiene resultados bastante satisfactorios si se toman en cuenta períodos de 12 Hrs que preceden o siguen el pico y se selecciona el mayor de los dos valores rms producidos de esta manera. Se sugiere intervalos de tiempo ( $t$ ) de 1 hora para una mayor simplificación de la ecuación, lo que para un período de 12 Hrs se vuelve la ecuación 6. La línea segmentada de figura 4 muestra el ciclo de carga equivalente construida para el ciclo de carga real.

$$\text{Carga previa equivalente continua de 12 hs.} = 0.29 \left[ L_1^2 + L_2^2 + \dots + L_{12}^2 \right]^{0.5} \quad (6)$$

# Electric Listas

## 6.2 Cálculo de Temperaturas

### 6.2.1 Generalidades

El método para el cálculo de temperaturas del aceite y del bobinado en caso de cambios de carga ha sido simplificado. Los exponentes  $m$  y  $n$ , responden a los cambios en la pérdida de carga y en la viscosidad del aceite causadas por cambios de temperatura. En la tabla 2 se muestra valores para los exponentes utilizados en estas ecuaciones. Los valores exactos de los exponentes para transformadores específicos pueden determinarse por medio de procedimientos de tests de sobrecarga del IEEE PC57.119.

### 6.2.2 Lista de símbolos

Las temperaturas son marcadas con  $\Theta$  y las elevaciones de temperatura con  $\Delta\Theta$ . Las elevaciones de puntos calientes del bobinado están por encima de la temperatura máxima del aceite a menos que haya otras especificaciones. Las elevaciones máximas del aceite están por encima de la temperatura ambiente.

$C$	es la capacidad térmica del transformador, Vatios-horas/°C
$EXP$	es 2.71828 (base de logaritmo natural)
$I_R$	es la corriente especificada (nominal)
$K$	es la relación de la carga $L$ con la carga especificada, por unidad
$L$	es la carga en cuestión, kilovoltamperios ó amperios
$m$	es un exponente empíricamente obtenido utilizado para calcular la variación de $\Delta\Theta_H$ en caso de cambios en la carga. El valor de $m$ ha sido elegido para cada modo de enfriamiento para que responda a los efectos de los cambios en resistencia y pérdida de viscosidad en caso de cambios en la carga.
$n$	es un exponente obtenido empíricamente utilizado para calcular la variación de $\Delta\Theta_{TO}$ en caso de cambios en la carga. El valor de $n$ ha sido elegido para cada modo de enfriamiento para que responda aproximadamente a los efectos de cambios en la resistencia en caso de cambio en la carga
$P_{T,R}$	es la pérdida total en caso de carga nominal, en vatios
$R$	es la relación de la pérdida de carga con la pérdida en vacío de carga en la posición de tap que se está estudiando
$t$	es la duración de la carga, en horas
$\Theta$	es la temperatura, en °C
$\Theta_A$	es la temperatura ambiente promedio durante el ciclo de carga que se está estudiando, °C
$\Theta_{A,R}$	es la temperatura ambiente promedio en caso de carga especificada, en °C
$\Theta_H$	es la temperatura en los puntos más calientes del bobinado, en °C
$\Theta_{H,R}$	es la temperatura en los puntos más calientes del bobinado en caso de carga especificada en la posición de tap que se está estudiando, en °C

## Electric Listas

- $\Theta_{H,U}$  es la temperatura extrema en los puntos más calientes del bobinado en caso de una carga L, en °C
- $\Theta_{TO}$  es la temperatura superior del aceite, en °C
- $\Delta\Theta_H$  es la elevación en los puntos más calientes del bobinado por encima de la temperatura máxima del aceite (parte superior), en °C
- $\Delta\Theta_{H,i}$  es la elevación inicial en los puntos más calientes del bobinado por encima de la temperatura máxima del aceite para  $t = 0$ , en °C
- $\Delta\Theta_{H,R}$  es la elevación en los puntos más calientes del bobinado por encima de la temperatura del aceite superior en caso de carga especificada en la posición de tap que se está estudiando, en °C
- $\Delta\Theta_{H,U}$  es la elevación extrema en los puntos más calientes del bobinado por encima de la temperatura del aceite en caso de una carga L, en °C
- $\Delta\Theta_{H/A,R}$  es la elevación en los puntos calientes del bobinado por encima de la temperatura ambiente en caso de carga especificada en la posición de toma que se está estudiando, en °C
- $\Delta\Theta_{TO}$  es la elevación de temperatura del aceite superior por encima de la temperatura ambiente, en °C
- $\Delta\Theta_{TO,R}$  es la elevación de temperatura del aceite superior por encima de la temperatura ambiente en caso de carga especificada en la posición de tap que se está estudiando, en °C
- $\Delta\Theta_{TO,i}$  es la elevación inicial superior del aceite por encima de la temperatura ambiente para  $t = 0$ , en °C
- $\Delta\Theta_{TO,U}$  es la elevación extrema superior del aceite por encima de la temperatura ambiente para una carga L, en °C
- $\tau_{TO}$  es la constante de tiempo del aceite del transformador para cualquier carga L y para cualquier diferencia específica de temperatura entre la elevación extrema superior del aceite y la elevación inicial superior del aceite
- $\tau_{TO,R}$  es la constante de tiempo para una carga nominal que comienza con una elevación inicial máxima del aceite de 0 °C, en horas
- $\tau_w$  es la constante de tiempo del bobinado en el lugar de sobrecalentamiento, en horas

Subíndices:

- A es temperatura ambiente
- R es especificado
- U es extremo (último, final)
- i inicial
- H es punto más caliente del bobinado



## Electric Listas

TO es el aceite superior (de la parte superior)

W es bobinado

I por encima

Superíndices:

(') indica ajustes en los datos de informes de tests para una posición de toma diferente.

### 6.2.3 Componentes de la temperatura

Se supone que la temperatura en los puntos más calientes está compuesta por tres componentes dadas por la siguiente ecuación

$$\Theta_H = \Theta_A + \Delta\Theta_{TO} + \Delta\Theta_H \quad (7)$$

La temperatura del aceite superior es dada por la siguiente ecuación:

$$\Theta_{TO} = \Theta_A + \Delta\Theta_{TO} \quad (8)$$

Los cálculos de temperatura suponen una temperatura ambiente constante. El efecto de una temperatura ambiente variable puede considerarse conservadoramente como sigue:

- Para temperaturas ambientes que se incrementan durante el ciclo de carga, hay que utilizar la temperatura ambiente instantánea cuando se considera ciclos de carga.
- Para temperaturas ambientes que disminuyen, hay que utilizar la temperatura ambiente máxima durante un ciclo previo largo de alrededor de 12 Hrs.

### 6.2.4 Elevación de 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 siguiente expresión exponencial que comprende una constante de tiempo del aceite.

$$\Delta\Theta_{TO} = \left( \Delta\Theta_{TO,U} - \Delta\Theta_{TO,i} \right) \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t}{\tau_{TO}} \right) \right] + \Delta\Theta_{TO,i} \quad (9)$$

Para el ciclo de sobrecarga de dos etapas con una carga previa equivalente constante, la elevación inicial máxima del aceite es dada por lo siguiente:

$$\Delta\Theta_{TO,i} = \Delta\Theta_{TO,R} \left[ \frac{(K_i^2 R + 1)}{(R + 1)} \right]^n \quad (10)$$

Para el análisis del ciclo de carga múltiples etapas con una serie de intervalos de corto tiempo, se utiliza ecuación 9 para cada etapa de carga, y se usa la elevación máxima del aceite al final de la etapa previa de carga como elevación inicial superior del aceite para el cálculo de la siguiente etapa de carga.

## Electric Listas

La elevación extrema superior del aceite es dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta\Theta_{TO,U} = \Delta\Theta_{TO,R} \left[ \frac{(K_U^2 R + 1)}{(R + 1)} \right]^n \quad (11)$$

Se utiliza ecuación 11 para calcular la elevación de temperatura del aceite superior para cada etapa de carga. Excepto para cargas constantes de muy larga duración, nunca se alcanza la elevación máxima extrema del aceite calculada por medio de ecuación 11.

### 6.2.5 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 de los accesorios en libras)

(12A)

+1.33 (galones de aceite)

ó

C = 0.0272 (peso del conjunto de núcleo y bobina en kilogramos)

+0.01814 (peso del tanque y de los accesorios en kilogramos)

(12B)

+5.034 (litros de aceite)

La deducción de la ecuación exponencial de calentamiento está basada en la elevación promedio de temperatura de la masa concentrada. En el caso del transformador esto sería la temperatura promedio del aceite. Sin embargo, el aceite superior es la variable medida por los indicadores de temperatura o termocuplas durante los tests térmicos. En ecuación 12A para la capacidad térmica, se utilizó dos tercios del peso del tanque y 86% del calor específico del aceite.

Para el cálculo de la constante de tiempo, el peso del tanque y de los accesorios que se utiliza solamente toma en cuenta aquellas porciones que están en contacto con el aceite calentado. Algunos transformadores, pueden presentar una construcción de ebanistería como base del tanque con un peso considerable que no contribuye a la masa térmica para la determinación de la constante de tiempo de la elevación del aceite.

La constante de tiempo del aceite superior en caso de los kVA especificados es la siguiente:

$$\tau_{TO,R} = \frac{C\Delta\Theta_{TO,R}}{P_{T,R}} \quad (14)$$

La constante de tiempo del aceite superior es

## Electric Listas

$$\tau_{TO} = \tau_{TO,R} \frac{\left( \frac{\Delta\Theta_{TO,U}}{\Delta\Theta_{TO,R}} \right) - \left( \frac{\Delta\Theta_{TO,i}}{\Delta\Theta_{TO,R}} \right)}{\left( \frac{\Delta\Theta_{TO,U}}{\Delta\Theta_{TO,R}} \right)^{\frac{1}{n}} - \left( \frac{\Delta\Theta_{TO,i}}{\Delta\Theta_{TO,R}} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (15)$$

En la deducción de ecuación 9 se supone que la elevación extrema de la temperatura del aceite  $\Delta\Theta_{TO}$  es directamente proporcional con la pérdida de calor  $q$ , ó en forma de ecuación,

$$\Delta\Theta_{TO} = kq^n$$

en que  $n$  es: 1.0

Cuando  $n$  es igual a 1.0, el 63% del cambio de temperatura ocurre en un lapso de tiempo 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 la unidad, 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.

### 6.2.6 Elevación en los puntos calientes de la bobina

El gradiente de temperatura transitoria en los puntos más calientes del bobinado por encima de la temperatura del aceite superior es dada por:

$$\Delta\Theta_H = \left( \Delta\Theta_{H,U} - \Delta\Theta_{H,i} \right) \left[ 1 - \exp \left( -\frac{t}{\tau_w} \right) \right] + \Delta\Theta_{H,i} \quad (16)$$

La elevación inicial en los puntos calientes por encima del aceite superior es dada por:

$$\Delta\Theta_{H,i} = \Delta\Theta_{H,R} K_i^{2m} \quad (17)$$

La elevación extrema en los puntos calientes por encima del aceite superior es dada por

$$\Delta\Theta_{H,U} = \Delta\Theta_{H,R} K_u^{2m} \quad (18)$$

El valor especificado de la elevación en los puntos calientes por encima del extremo del aceite es dado por

$$\Delta\Theta_{H,R} = \Delta\Theta_{H/A,R} - \Delta\Theta_{TO,R} \quad (19)$$

El valor de la elevación en los puntos calientes de la bobina por encima de la temperatura ambiente  $\Delta\Theta_{H/A,R}$  se obtiene de la siguiente manera, en orden de preferencia:

- Por medio de un test real utilizando detectores incorporados
- El valor calculado suministrado por el fabricante en su informe del ensayo, ó
- Suponga que  $\Delta\Theta_{H/A,R} = 80$  °C para una elevación promedio de 65 °C en la bobina y 65 °C para una elevación promedio de 55 °C en la bobina

El valor de la elevación del aceite superior por encima de la temperatura ambiente  $\Delta\Theta_{TO,R}$  es determinado por

- Un test real de acuerdo con IEEE Std C57.12.90-1993, ó
- Un valor calculado suministrado por el fabricante en su informe del ensayo

La constante de tiempo del bobinado es el tiempo que toma para que la elevación de la temperatura del bobinado por encima de la elevación de la temperatura del aceite alcance 63.2% de la diferencia entre la elevación final y la elevación inicial durante un cambio de carga. La constante de tiempo del bobinado puede estimarse a partir de la curva de enfriamiento de la resistencia durante los tests térmicos o puede haber sido calculada por el fabricante utilizando la masa de los materiales del conductor. La

## Electric Listas

constante de tiempo del bobinado varía según la viscosidad del aceite y el exponente  $m$ . Para sobrecargas moderadas se acostumbra pasar por alto la constante de tiempo del bobinado y suponer que la elevación en los puntos calientes del bobinado por encima del extremo del aceite es dada por ecuación 18.

### 6.2.7 Exponentes para ecuaciones de elevación de temperatura

Los exponentes sugeridos para ser utilizados en las ecuaciones de elevación de temperatura son dados en la tabla 2.

**Tabla 2 - Exponentes utilizados en ecuaciones para determinación de temperaturas**

Tipo de enfriamiento	m	n
OA	0.8	0.8
FA	0.8	0.9
FOA no directo ó FOW	0.8	0.9
FOA directo ó FOW	1.0	1.0

### 6.2.8 Ajustes de los datos de tests 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 que sea otra que la que se reportó en el informe del ensayo, entonces se puede usar las siguientes ecuaciones. El primer símbolo (') indica valores en la posición de toma diferente.

Elevación del aceite superior por encima de la temperatura ambiente.

$$\Delta\Theta'_{TO,R} = \Delta\Theta_{TO,R} \left[ \frac{P'_{T,R}}{P_{T,R}} \right]^n \quad (20)$$

Elevación en los puntos más calientes por encima del aceite de la parte superior:

$$\Delta\Theta'_{H,R} = \Delta\Theta_{H,R} \left[ \frac{I'_R}{I_R} \right]^{2m} \quad (21)$$

Constante de tiempo con carga especificada:

$$\tau'_{TO,R} = \frac{C\Delta\Theta'_{TO,R}}{P'_{T,R}} \quad (22)$$

## 7 Carga de Transformadores de Potencia

### 7.1 Tipos de carga y su interrelación

Toda sobrecarga puede exponer el aislamiento a temperaturas mayores a las especificadas por el fabricante. Se ha definido cuatro diferentes condiciones de carga por encima de las especificaciones de placa. Existiendo la probabilidad de mayor riesgo en cada carga sucesiva con su temperatura incrementada respectiva. Por cada mayor temperatura, se puede suponer que hay que añadir una condición de carga de mayor riesgo a toda condición de bajo riesgo aceptada por el usuario excepto para la carga de emergencia de corto tiempo. Los cuatro tipos de carga son los siguientes:

*Expectativa de vida normal*

- Carga con expectativa de vida normal

*Expectativa de sacrificio de vida*

- Carga planificada por encima de las especificaciones de placa
- Carga de largo tiempo de emergencia
- Carga de corto tiempo de emergencia

Ejemplos de cargas que caen en estas categorías son ilustrados en figura 5.

## Electric Listas

### 7.2 Limitaciones

#### 7.2.1 Limitaciones de temperatura y de carga

En la tabla 3 damos sugerencias de límites de temperaturas y cargas para cargar por encima de las especificaciones de placa. En la tabla 4 damos sugerencias de límites de temperatura que ocasionan una pérdida razonable de vida para los cuatro tipos de carga.

**Tabla 3 - Sugerecias de límites de temperatura y de carga para cargar transformadores de potencia con elevación de 65 °C por encima de las especificaciones de placa**

Temperatura del aceite superior	110 °C
Temperatura en los puntos más calientes del conductor	180 °C
Carga máxima	200%

**Tabla 7 - Sugerecias de límites máximos de temperatura para los cuatro tipos de carga**

	Carga con expectativa normal de vida	Carga planificada por encima de especific. De placa	Carga de largo tiempo de emergencia	Carga de corto tiempo de emergencia
Temperatura en los puntos más calientes del conductor aislado, en °C	120*	130	140	180†
Otra temperatura en puntos calientes metálicos (en contacto o no en contacto con el aislamiento), en °C	140	150	160	200
Temperatura del aceite superior, en °C	105	110	110	110

\* 100 °C sobre una base continua de 24 hs

† El burbujeo puede producir un riesgo potencial para la rigidez dieléctrica del transformador. Hay que tomar este riesgo en cuenta cuando se aplica esta guía.

Usualmente los límites de la temperatura en los puntos calientes en otras partes metálicas que no estén en contacto con el aislamiento son límites del diseño y son calculados por el fabricante cuando se somete una especificación de sobrecarga como parte de las especificaciones de compra.

#### 7.2.2 Componentes auxiliares

Los bushings de los cambiadores de tap, conductores, y otro equipo auxiliar pueden restringir la carga a niveles por debajo de los calculados a través de las ecuaciones de cláusula 6. El usuario puede querer especificar que el equipo auxiliar no restringe la carga a niveles por debajo de los permitidos en los puntos calientes del conductor aislado y otras partes metálicas.

#### 7.2.3 Consideraciones de riesgo

Se considera que la carga con expectativa de vida normal está libre de riesgos; sin embargo, los otros tres tipos de carga se asocian con algún grado indeterminado de riesgo. Específicamente, el nivel de riesgo está basado en la cantidad de gas libre, el contenido de humedad en aceite y aislamiento, y el voltaje. La presencia de gas libre, podría ocasionar una falla dieléctrica durante una condición de sobrevoltaje y posiblemente en caso de voltaje de frecuencia con potencia nominal. Se asume que las temperaturas indicadas en tabla 4 para cada tipo de carga dan como resultado un grado aceptable de riesgo en las circunstancias especiales que requiere una carga por encima de las especificaciones de placa. Además, hay otros factores importantes que pueden afectar cualquier reducción, como ser el contenido de humedad del aislamiento del bobinado y el gradiente de elevación de temperatura en los conductores.

## Electric Listas

### 7.3 Carga con expectativa de vida normal

#### 7.3.1 Generalidades

La carga base de un transformador de potencia para una expectativa de vida normal es una carga continua con potencia nominal de salida en las condiciones usuales tales como las indicadas en 4.1 del IEEE Std C57.12.00-1993. Se supone que la operación en estas condiciones es equivalente a la operación a una temperatura ambiente promedio de 30 °C para el aire refrigerante ó 25 °C para el agua refrigerante. La expectativa de vida normal es el resultado de una operación a una temperatura continua en los puntos más calientes de los conductores de 110 °C (ó una temperatura variable equivalente con un máximo de 120 °C en cada período de 24 horas). La temperatura de 110 °C en los puntos más calientes está basada en la elevación de 80 °C en los puntos más calientes sumada a la temperatura ambiente promedio estándar de 30 °C.

Los transformadores pueden operarse por encima de la temperatura promedio en los puntos más calientes de 110 °C durante períodos cortos siempre que se los opera durante períodos mucho más largos a temperaturas por debajo de 110 °C. Esto es debido al hecho de que el envejecimiento térmico es un proceso acumulativo y por consiguiente permite que cargas por encima de las especificaciones se lleven a cabo en forma segura en condiciones múltiples sin afectar la expectativa de vida normal del transformador. Las ecuaciones dadas en cláusula 6 pueden utilizarse para calcular las temperaturas en los puntos más calientes y las temperaturas del aceite superior como una función de la carga para una expectativa de vida normal.

#### 7.3.2 Influencia del ambiente sobre la carga con expectativa de vida normal

En cláusula 6 tratamos de la influencia del ambiente sobre la carga con expectativa de vida normal.

#### 7.3.3 Carga con expectativa de vida normal a la temperatura del aceite superior

La temperatura del aceite superior sola no debe utilizarse como guía para cargar transformadores de potencia. El gradiente en los puntos más calientes y el gradiente del aceite superior en caso de plena carga tiene que ser determinado por medio de tests en la fábrica ó, si faltan datos hay que suponer un valor. El gradiente en los puntos más calientes y el gradiente del aceite superior con plena carga tiene que corregirse de acuerdo con la carga real utilizando ecuación 18. El gradiente restado de 110 °C dará la temperatura máxima permisible para una expectativa de vida normal. Hay que reconocer que, debido a la inercia térmica en la elevación del aceite, un transformador necesita tiempo para alcanzar una temperatura estable después de cada cambio en la carga.

#### 7.3.4 Carga con expectativa de vida normal en caso de elevación de temperatura promedio de los tests de bobinado

Por cada 1°C que exceda de 5°C en que la temperatura promedio del test de bobinado esté por debajo de 65°C. Se toma un margen de 5°C para proveer una tolerancia en la medición de la elevación de la temperatura. La carga obtenida de esta manera es la que el transformador puede soportar en caso de una elevación de 65°C. Como esto puede incrementar la carga por encima de la que había sido contemplada por el diseñador, se debe chequear las limitaciones dadas en tablas 3 y 4 antes de aplicar por completo de esta capacidad incrementada de carga.

## Electric Listas

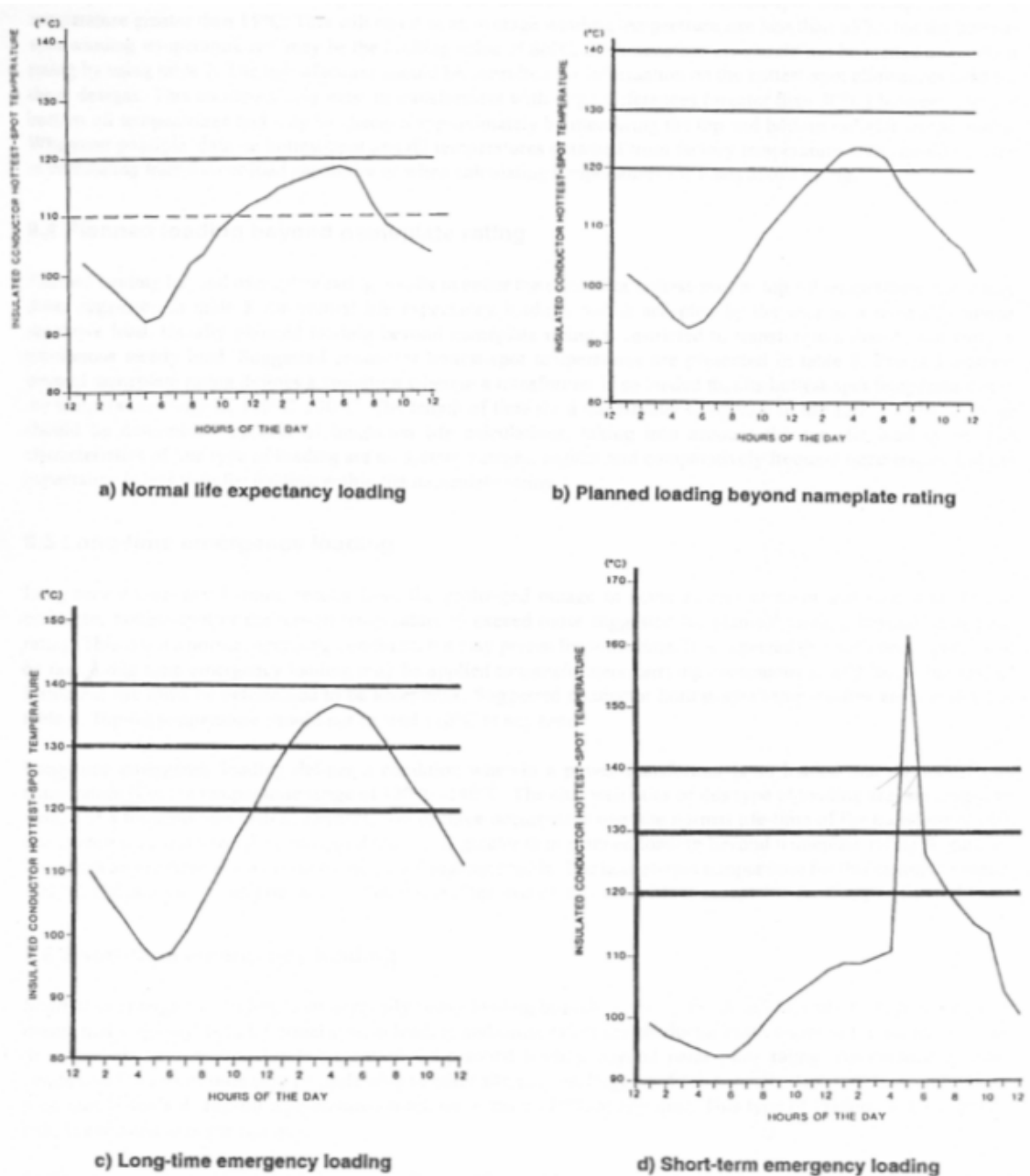


Figura 5 - Tipos de carga

- a) Carga con expectativa de vida normal
- b) Carga planificada por encima de las especificaciones de placa
- c) Carga de emergencia por tiempo largo
- d) Carga de emergencia por tiempo corto

Algunos transformadores de potencia han sido diseñados para que la diferencia entre la temperatura en los puntos más calientes y la temperatura promedio en los conductores sea mayor que 15°C. Esto resulta en una elevación promedio de la temperatura en el bobinado de menos de 65°C, pero la temperatura en los puntos más calientes del bobinado puede estar en el valor límite de 80°C. Transformadores de esta clase no tienen que cargarse por encima de sus especificaciones sin antes consultar al fabricante en cuanto a la temperatura permisible en los puntos más calientes que se utiliza en estos diseños. Esta condición puede existir para transformadores con diferencias grandes (de más de 30°C) entre la temperatura superior del aceite y la inferior y puede chequearse aproximadamente midiendo la temperatura superior e inferior del radiador.

## Electric Listas

Siempre que sea posible, se tiene que utilizar las temperaturas en los puntos más calientes y temperaturas del aceite obtenidas de los tests en la fábrica para calcular la capacidad de carga del transformador o cuando se calcula las temperaturas para cargas por encima de las especificaciones.

### 7.4 Carga planificada por encima de las especificaciones de placa

La carga planificada por encima de las especificaciones de placa da como resultado que ó la temperatura de los conductores en los puntos más calientes ó la temperatura del aceite superior excedan las temperaturas sugeridas en tabla 4 para cargas con expectativa de vida normal, y el usuario la acepta como una carga normal, planificada repetitiva. Usualmente la carga planificada por encima de las especificaciones de placa está restringida para transformadores que no llevan una carga continua estable. En la tabla 4 presentamos las temperaturas sugeridas en los puntos más calientes de los conductores. La carga planificada por encima de las especificaciones de placa es determinada por una condición en que un transformador es cargado de tal forma que su temperatura en los puntos más calientes quede dentro del rango de 120°C-130°C. El lapso de tiempo en que un transformador opere dentro del rango de 120°C-130°C tiene que determinarse a través de los cálculos de pérdida de vida del aislamiento, tomando en cuenta el ciclo específico de carga. Las características de este tipo de carga son fallas no sistemáticas, incidencias regulares y comparativamente frecuentes y, la expectativa de vida es menor que en caso de carga dentro de las especificaciones de placa.

### 7.5 Carga de emergencia por largo tiempo

Una carga de emergencia por largo tiempo es el resultado de la falla prolongada de algún elemento de la red y causa que ó la temperatura en los puntos más calientes de los conductores ó la temperatura del aceite superior excedan la temperatura sugerida para una carga planificada por encima de las especificaciones de placa. Esta no es una condición normal de operación, pero puede persistir durante algún tiempo. Se espera que ocurrencias de esta clase sean poco frecuentes. Se puede aplicar cargas de emergencia por largo tiempo en transformadores que llevan cargas continuas estables, pero hay que determinar si la pérdida de vida del aislamiento es aceptable. La temperatura máxima del aceite no debe nunca exceder los 110°C.

La carga de emergencia por largo tiempo es determinada por una condición en que un transformador de potencia es cargado de tal forma que su temperatura en los puntos más calientes quede dentro del rango de temperatura de 120°C-140°C. Las características de este tipo de carga son una falla de largo tiempo de un elemento de transmisión de la red, dos o tres ocurrencias por encima del tiempo de vida normal del transformador en que cada ocurrencia puede durar varios meses, y el riesgo es mayor que en caso de carga planificada por encima de las especificaciones de placa. La figura 5c) ilustra un ejemplo de un perfil de carga de emergencia por largo tiempo. La temperatura en los puntos más calientes en este ejemplo excede los 120°C. Se tiene que realizar cálculos para determinar si la pérdida de vida del aislamiento es aceptable para el ciclo específico de carga.

### 7.6 Carga de emergencia por corto tiempo

Una carga de emergencia por corto tiempo es una carga excepcionalmente grande originada por la ocurrencia de uno o varios acontecimientos improbables que disturben seriamente la carga normal de la red y causan que ó la temperatura en los puntos más calientes de los conductores ó la temperatura del aceite superior exceda los límites de temperatura sugeridos para cargas planificadas por encima de las especificaciones de placa. La aceptación de estas condiciones por tiempo breve puede ser preferible a otras alternativas. En tabla 4 presentamos las temperaturas sugeridas para los puntos más calientes de los conductores. La temperatura del aceite superior no tiene que exceder nunca los 110°C. Esperamos que este tipo de carga, con su riesgo mayor, ocurra con poca frecuencia.

Una carga de emergencia por corto tiempo es determinada por una condición de carga en que el transformador es cargado de tal forma que su temperatura en los puntos más calientes esté hasta de 180°C durante un tiempo breve. Las características de este tipo de carga son una serie de condiciones improbables en el sistema de transmisión (segunda o



## Electric Listas

tercera eventualidad), una o dos ocurrencias por encima del tiempo de vida normal del transformador, y el riesgo es mayor que en caso de carga de emergencia por largo tiempo. Hay que realizar cálculos para determinar si la pérdida de vida del aislamiento durante la emergencia de corto tiempo es aceptable para el ciclo específico de carga. La figura 5d) ilustra un ejemplo de un perfil de carga de emergencia por corto tiempo. Esta figura presenta una curva de temperatura que había bajado de rango durante el día hasta las 4 p.m. cuando ocurrió una condición en la red que cargó el transformador de tal forma que su temperatura en los puntos más calientes haya subido rápidamente hasta 163°C en 1 hora.

### 8. Ejemplo de cálculo

Se necesita estudiar la posibilidad de sobrecarga de un banco de transformadores de 3x25 MVA, 230kV/69kV, con estados de precarga (carga previa a la sobrecarga) variable, por lapsos de 15 y 30 minutos, con una temperatura promedio de 30-40 °C. Establecer así mismo, recomendaciones propias al transformador para el tratamiento de la sobrecarga.

#### Resumen General de Datos

#### DATOS

##### GENERALES (TUSA F.B. 341 255)

Elev. Temp.del punto más caliente del aceite	50 °C
Elev. Temp. del Aceite de la parte Inferior	-- °C
Elevación media de Temp. de los Devanados	55 °C
Elev. Temp. del punto más caliente de los devanados	65 °C
Pérdidas en Carga	65000 W
Pérdidas en Vacío	17800 W
Pérdidas Totales	82800 W
Sistema de Refrigeración	OA/FA
Peso Conjunto Nucleo-Devanados	28200 kgs.
Peso Conjunto Tanque-Accesorios	11500 kgs.
Volumen Aceite Tanque y Radiadores	17310 Lts.
Pérd.Carga pos Tap	Nominal Cond.
Resist.Bob.pos Tap	Nominal Cond.
Pérd.Disper-Parasitas	Nominal Cond.
Pérd.Foucault	Nominal Cond.

##### VIDA ÚTIL (C57.91-1995 Pag. 10)

Tiempo de Vida 20.55 años	180000 Horas
---------------------------	--------------

##### LÍMITES DE TEMPERATURA (C57.91-1995 Pag. 26, Anexo D Pag. 53-54)

Clase de Aislación de 55 °C	150 °C
Temperatura de Inicio de Burbujeo en Aislamiento	140-160 °C
Valor Nominal Máximo a Ser Alcanzado	95 °C

##### LIMITES DE PÉRDIDA DE VIDA ÚTIL (C57.91-1995 Pag. 10)

Pérdida de Vida Diaria Normal	0,0133 %
-------------------------------	----------

## Electric Listas

### Resumen General de Resultados

#### TEMPERATURA DEL PUNTO MÁS CALIENTE °C

TIEMPO	% PRECARGA	% SOBRECARGA					
		110	120	130	140	150	160
15 Minutos	50		110,21	118,70	<b>127,75</b>	<b>137,34</b>	147,48
	70		113,73	<b>122,22</b>	<b>131,27</b>	140,86	151,00
	80	107,83	115,75	<b>124,24</b>	<b>133,29</b>	142,89	153,02
	100	112,35	<b>120,27</b>	<b>128,76</b>	<b>137,81</b>	147,41	157,54
30 Minutos	50		<b>125,38</b>	<b>136,64</b>	148,59	161,21	174,50
	70		<b>125,38</b>	<b>136,64</b>	148,59	161,21	174,50
	80	114,83	<b>125,38</b>	<b>136,64</b>	148,59	161,21	174,50
	100	<b>114,83</b>	<b>125,38</b>	<b>136,64</b>	148,59	161,21	174,50

MHT/2001

#### TEMPERATURA DEL ACEITE DE LA PARTE SUPERIOR (TOP-OIL) °C

TIEMPO	% PRECARGA	% SOBRECARGA					
		110	120	130	140	150	160
15 Minutos	50		104,51	112,86	121,77	131,21	141,19
	70		104,68	113,03	121,94	131,38	141,36
	80	96,98	104,78	113,13	122,04	131,48	141,46
	100	97,22	<b>105,02</b>	113,37	122,28	131,73	141,70
30 Minutos	50		<b>105,30</b>	113,82	122,89	132,52	142,68
	70		<b>105,30</b>	113,82	122,89	132,52	142,68
	80	97,36	<b>105,30</b>	113,82	122,89	132,52	142,68
	100	<b>97,36</b>	<b>105,30</b>	113,82	122,89	132,52	142,68

MHT/2001

#### % PÉRDIDA DE VIDA DIARIA

TIEMPO	% PRECARGA	% SOBRECARGA					
		110	120	130	140	150	160
15 Minutos	50		0,00004	0,00007	0,00017	0,00040	<b>0,00095</b>
	70		0,00007	0,00013	0,00026	<b>0,00057</b>	<b>0,00130</b>
	80	0,00009	0,00012	<b>0,00019</b>	<b>0,00035</b>	<b>0,00071</b>	<b>0,00158</b>
	100	<b>0,00053</b>	<b>0,00058</b>	0,00069	<b>0,00093</b>	<b>0,00147</b>	<b>0,00272</b>
30 Minutos	50		0,00016	0,00044	<b>0,00120</b>	<b>0,00329</b>	0,00903
	70		0,00020	<b>0,00049</b>	<b>0,00129</b>	<b>0,00346</b>	0,00938
	80	0,00014	<b>0,00025</b>	<b>0,00055</b>	<b>0,00137</b>	<b>0,00361</b>	0,00966
	100	<b>0,00056</b>	0,00069	<b>0,00104</b>	<b>0,00194</b>	<b>0,00435</b>	0,01078

MHT/2001

#### POSIBILIDAD DE SOBRECARGA

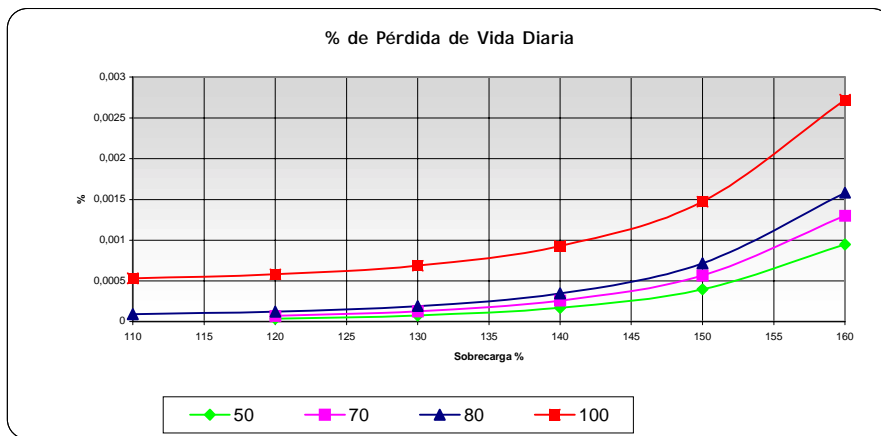
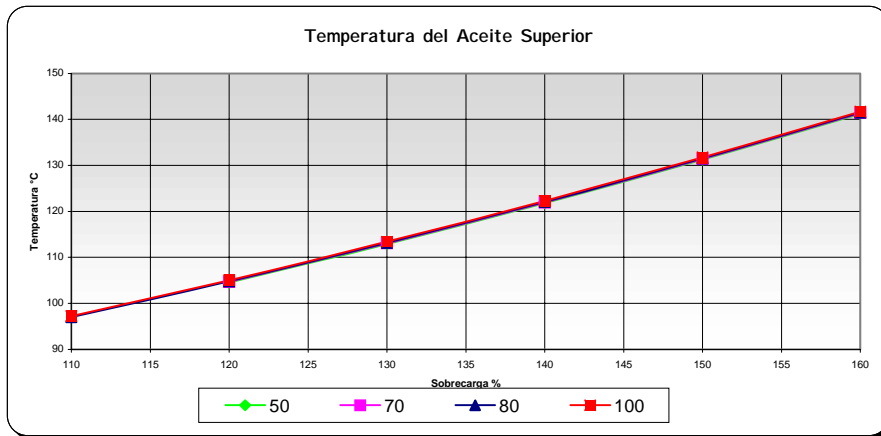
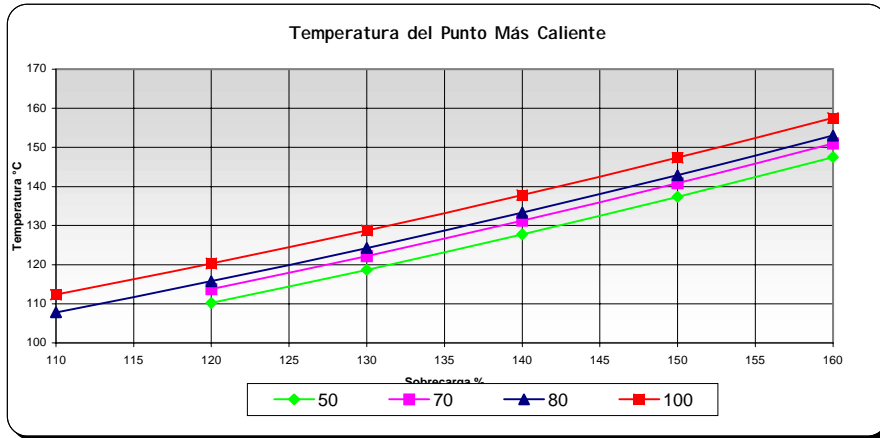
TIEMPO	% PRECARGA	% SOBRECARGA					
		110	120	130	140	150	160
15 Minutos	50	SI	SI	SI	SI*	NO	NO
	70	SI	SI	SI	NO	NO	NO
	80	SI	SI	NO	NO	NO	NO
	100	SI	SI	NO	NO	NO	NO
30 Minutos	50	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	70	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	80	SI	NO	NO	NO	NO	NO
	100	SI	NO	NO	NO	NO	NO

\* Se aconseja por un tiempo menor a 15 minutos

MHT/2001

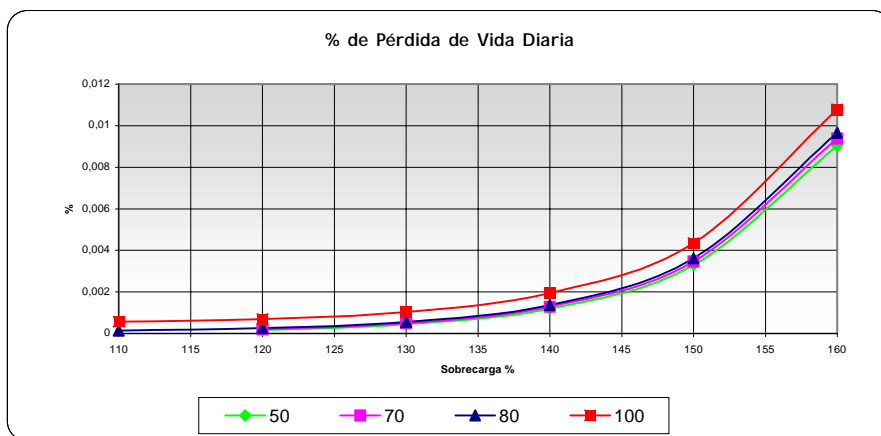
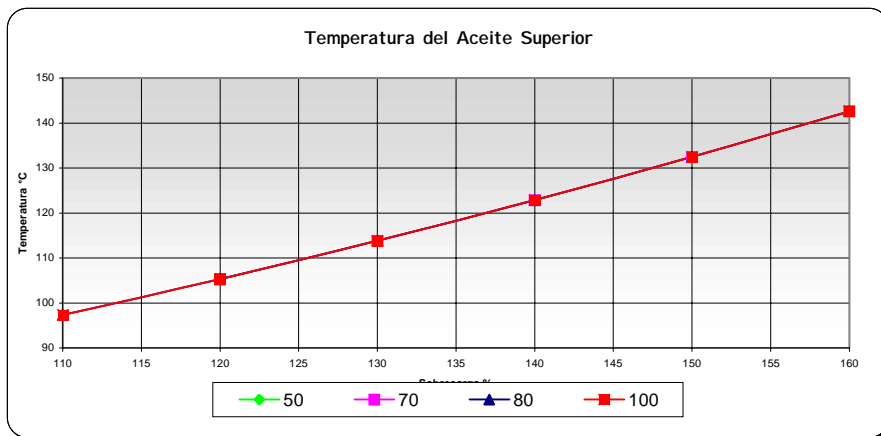
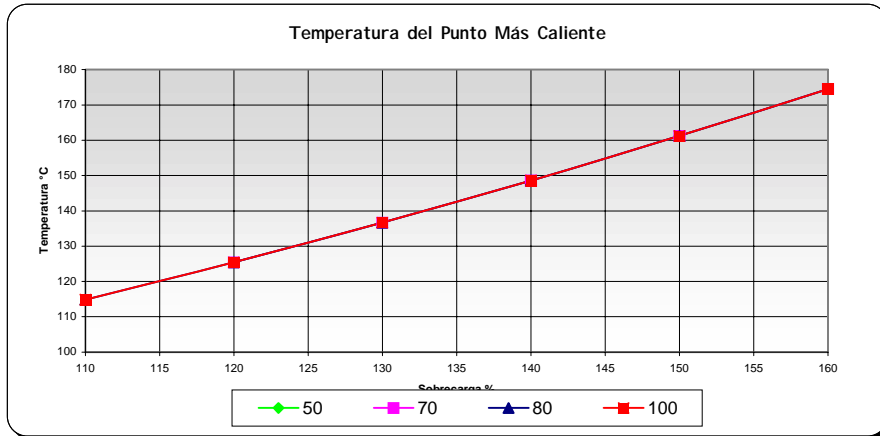
# Electric Listas

## CURVAS RESUMEN DE CALCULOS A 15 MINUTOS



# Electric Listas

## CURVAS RESUMEN DE CALCULOS A 30 MINUTOS



# Electric Listas

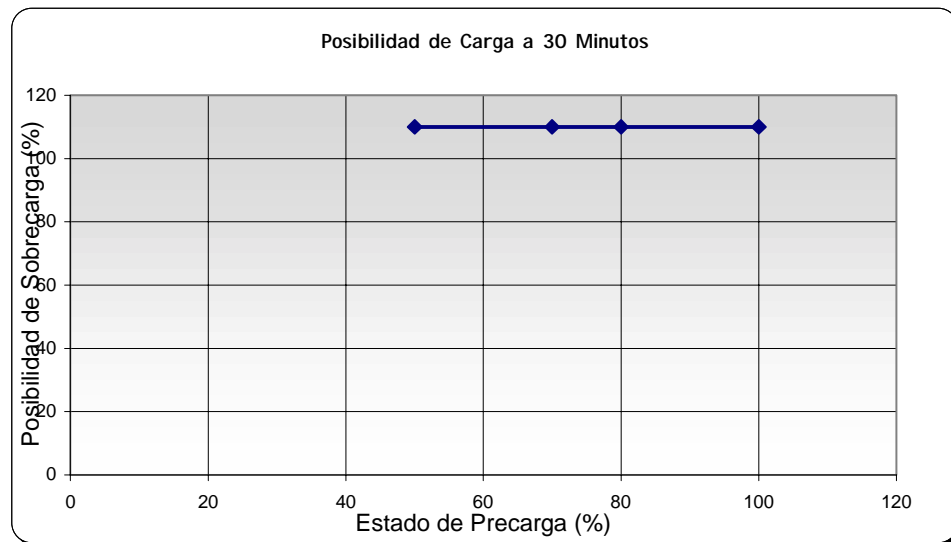
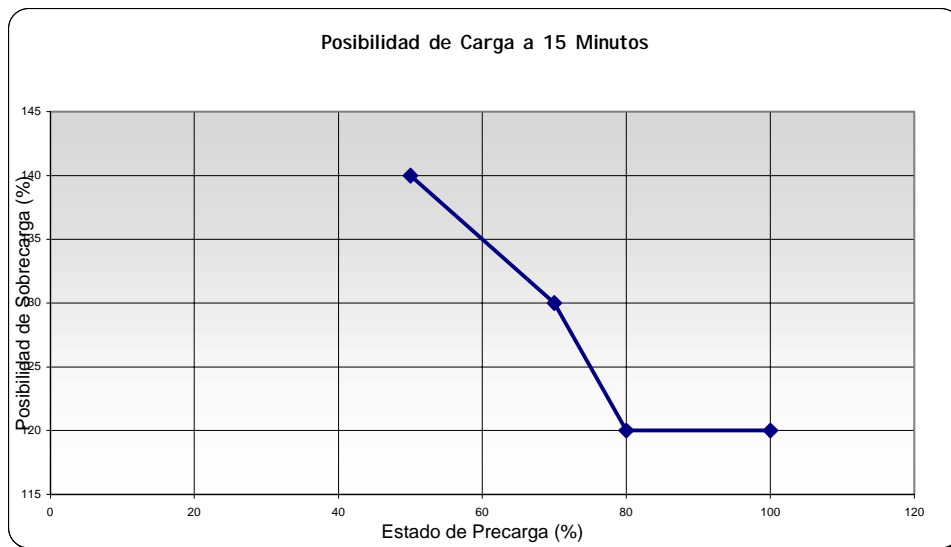
## CURVAS DE CAPACIDAD DE SOBRECARGA

A 15 MINUTOS

Precarga	Sobrecarga
50	140
70	130
80	120
100	120

A 30 MINUTOS

Precarga	Sobrecarga
50	110
70	110
80	110
100	110



## Electric Listas

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### PREMISAS

1. La clase del aislamiento del transformador marca TUSA, ubicado en la subestación Guaracachi es de 55°C
2. La temperatura normal de operación de éste tipo de aislamiento es 95°C ( 55°C+40°C )
3. La máxima temperatura del punto más caliente del devanado según ANSI/IEEE C57.91-1995 para sobrecargas de corta duración (15 y 30 minutos) es 150°C
4. La máxima temperatura del punto más caliente del devanado según ANSI/IEEE C57.91-1995 para sobrecargas de larga duración (180 minutos) es 140°C
5. La temperatura a la cual se forman burbujas en el aislamiento según ANSI/IEEE C57.91-1995 es 140°C
6. La temperatura máxima sugerida por el fabricante (ABB) del punto más caliente del devanado es 120°C
7. La temperatura ambiente máxima del día es 40°C
8. La temperatura a la cual la expansión térmica del aceite comienza a ser peligrosa según ANSI/IEEE C57.91-1995 es 105 °C (peligro de operación de válvulas de sobrepresión)
9. La temperatura máxima del aceite de la parte superior según ANSI/IEEE C57.91-1995 es de 110°C
10. El porcentaje de pérdida de vida diario máximo para una vida normal del aislamiento de 20.55 años (Según IEEE C57.91-1995) es 0.0133%:

$$\frac{100\%}{(20.55 \text{ años} \times 365 \text{ días})} = 0.0133 \%$$

11. La pérdida de vida del aislamiento es un proceso acumulativo.

#### DETERMINACIÓN

La temperatura límite del punto más caliente del devanado para cualquier tipo de sobrecarga es 120°C, siguiendo el consejo dado por el fabricante.

#### CONCLUSIONES

Las condiciones anteriores se cumplen para:

1. Casos de precarga del 100% y sobrecarga del 120% por 15 minutos
2. Casos de precarga del 100% y sobrecarga del 110% por 30 minutos
3. Casos de precarga del 100% y sobrecarga de 110% por 180 minutos (tres horas)
4. La precarga tiene incidencia pero no relevancia en la temperatura del devanado en los primeros 15 minutos. Durante los siguientes 15 minutos no es relevante debido a que la constante de tiempo de los devanados (que incide en el gradiente de temperatura del devanado) es pequeña, lo que implica que para estos lapsos de tiempo relativamente cortos, la temperatura del devanado se estabiliza

## Electric Listas

5. Se comprueba que con las limitaciones puestas anteriormente, la temperatura del aceite superior no alcanza temperaturas peligrosas
6. La pérdida porcentual de vida debido a los estados de sobrecarga citados en 1 y 2, no es de consideración

### RECOMENDACIONES

Relaciones estadísticas muestran que el 85% de las fallas en los Transformadores de Potencia ocurren generalmente por problemas en el aislamiento, y el 15% por otras causas como defectos de fabricación, problemas en el transporte o en la instalación. Por ésta razón los métodos de mantenimiento preventivo se concentra en monitorear y controlar la integridad del aislamiento.

Se establecen entonces las siguientes recomendaciones:

1. El banco de transformadores de la subestación en cuestión pueden someterse a regímenes de sobrecarga en su explotación en la medida en que las unidades tengan una carga variable en el ciclo diario de 24 horas (factor de carga inferior a 1), y en que la temperatura promedio anual sea inferior a los 30°C que supone la norma
2. Las asignaciones de capacidad de sobrecarga con un gasto controlado de vida útil, duran lo que duren las características de la carga atendida por el transformador. Un mejoramiento del factor de carga de un transformador significaría una disminución de su capacidad de sobrecarga o viceversa.
3. La aplicación de regímenes de sobrecarga a un transformador debe tomar debida cuenta de las condiciones del entorno – capacidades de los equipos asociados – para hacer las adaptaciones previas requeridas por las nuevas solicitudes
4. Es necesario comprobar el estado de los contactos del cambiador de Taps bajo carga (LTC), por lo tanto se sugiere registrar un oscilograma de tensiones y corrientes en el momento de su operación, y/o cumplir los criterios de inspección del estado de contactos detallados en el manual del fabricante
5. Para preservar la integridad de los transformadores sometidos a regímenes de sobrecarga frecuentes, resulta indispensable realizar una rigurosa verificación del sistema de imagen térmica de cada unidad para asegurar su conformidad con las condiciones reales de temperatura de devanados
6. Una vez hecha la verificación anterior, como asimismo la del resto de los accesorios indicadores, debe elaborarse un esquema de seguimiento cuidadoso de las temperaturas del aceite y de los devanados para prevenir calentamientos excesivos y/o disparos no planificados por estos sistemas de protección
7. Dado que un transformador en régimen de sobrecarga hará un uso casi continuo de su sistema de refrigeración forzada (termómetros, microswitches, ventiladores), debe considerarse la necesidad de mayores recursos humanos y de repuestos en las áreas de mantenimiento para garantizar un óptimo estado del sistema de refrigeración
8. Como parte del cálculo de pérdida de vida útil (temperatura de los devanados, aceite y ambiente), y para obtener un diagnóstico más detallado de la condición actual y futura del

## Electric Listas

transformador, deben hacerse regularmente (con un cierto criterio de frecuencia), pruebas como:

En el aceite:

- Rigidez dieléctrica
- Acidez
- Cromatografía de gases disueltos
- Compuestos furánicos
- Contenido de agua – Saturación Relativa.

En el aislamiento sólido:

- Mediciones de aislamiento
- Tangente delta ( $\tan \delta$ ) ó Factor de potencia ( $\cos \phi$ )
- Grado de polimerización.

**Marcelo J. Hinojosa Torrico**  
Ingeniero Eléctrico