

Posibilidades de sobrecarga en máquinas eléctricas en Colombia

En el diseño y cálculo de las máquinas eléctricas tienen mucha importancia los flujos de calor producido por las pérdidas de potencia en la transformación de la energía.

Las sobretemperaturas resultantes en los materiales constructivos de la máquina, especialmente los no-metálicos, determinan en forma esencial la vida útil de los aparatos. De ahí resulta la importancia de la temperatura ambiente que fue sumida por la norma nacional e internacional como una magnitud constante, lo cual es exigido para cubrir el clima estacional con sus variaciones significativas durante el transcurso del año.

El clima del trópico es uno diario y el de la región andina colombiana se encuentra además vinculado al lugar sobre el nivel del mar. Así las máquinas eléctricas pueden ser mejor aprovechadas cuando se toma en cuenta la variación real de la temperatura en un clima diario y considerando la altura de instalación, permitiendo por eso una sobrecarga calculable con un modelo matemático adecuado.

HORST MAUDANZ

Ingeniero graduado en Berlín

Gerente de Siemens S.A.

Profesor de la Universidad Nacional

Magister Scientiae en Potencia Eléctrica

Hoy en día, prácticamente todas las máquinas eléctricas utilizadas en Colombia están diseñadas para las condiciones de climas no tropicales. Esto significa que es el clima estacional con sus características típicas, el que influye esencialmente durante el proceso de diseño en el dimensionamiento de éstas por la refrigeración requerida. Especialmente en la región andina de Colombia rige un clima diario que es muy diferente a uno estacional, es decir, las variaciones cíclicas, p. ej., de la temperatura, ocurren según la hora del día, y no según la estación, o bajo otro punto de vista observado, dentro de un plazo corto. La humedad como otro factor climático, cambia en forma significativa con las estaciones, pero no ejerce gran influencia sobre la refrigeración de las máquinas eléctricas.

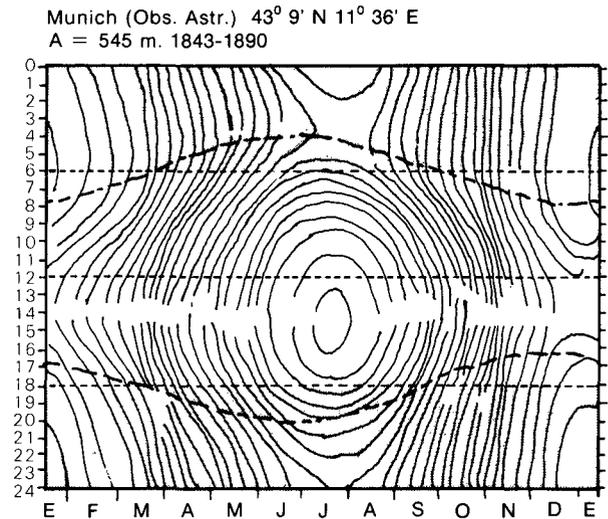
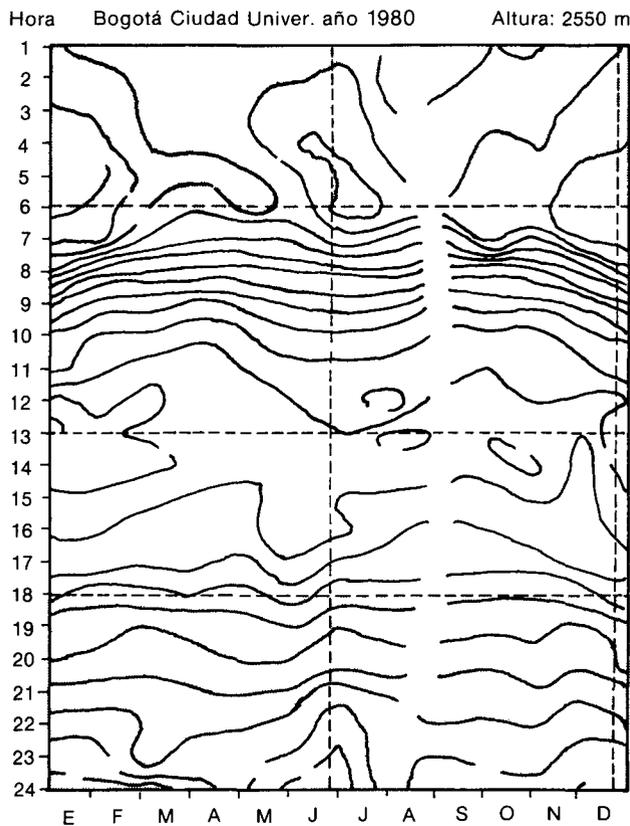
A continuación se presenta una tabla de temperaturas de tres ciudades de la región andina que muestran el comportamiento del clima diario así como un diagrama de la termo isopletas de Guhl (1).

Zonas climáticas (vertical) para la región andina (Colombia) a mediados del tiempo de lluvia abril/mayo y octubre a mediados del tiempo seco julio y enero/febrero (promedio diario)

500 m (Neiva)							
tiempo de lluvia				tiempo seco			
	O	Min.	Max.		O	Min.	Max.
Oct.	27.4	20.3	32.6	Julio	27.6	20.6	33.5
Abril	27.2	21.3	32.2	Enero	27.3	20.0	33.4
Mayo	27.2	21.0	32.5	Febr.	27.6	20.5	33.6
1500 m (Medellín)							
Oct.	20.7	15.6	27.4	Julio	22.1	15.6	28.8
Abril	21.6	16.3	28.1	Enero	21.8	15.5	27.5
Mayo	21.6	15.6	28.0	Febr.	22.0	15.6	29.0
2500 m (Bogotá)							
Oct.	13.7	8.5	19.3	Julio	13.6	8.4	18.6
Abril	14.2	9.2	19.6	Enero	13.5	6.6	20.1
Mayo	14.3	9.3	19.5	Febr.	13.8	7.3	20.4

Existe además una influencia muy apreciable en razón de la dependencia entre la altura de

La termo isopleteras de Bogotá y Munich



Claramente se destaca en los gráficos, el cambio en cuanto a las diferencias de clima en latitudes ecuatoriales (Bogotá) y latitudes medias estacionales (Munich). Observa la salida y puesta del sol (espacio en blanco) en los lugares a través del año (en el orden horizontal están indicados los meses del año y en el vertical las 24 horas del día).

La parte sombreada del gráfico indica la duración de la noche. Las líneas de igual temperatura (internas) llevan en Bogotá una dirección *horizontal* (no cambian durante el año, pero sí durante el día) (clima diurno ecuatorial).

En el caso de Munich estas líneas llevan una dirección predominante *vertical*. El cambio diurno es poco, pero grande a través del año (Clima estacional-anual).

Según Guhl, E.: "La Sabana de Bogotá, sus alrededores y su vegetación". Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1981.

DIAGRAMA Nº 1.

localización y la temperatura media. La correspondiente función empírica es:

$$T_h = 27 - 0.05 \cdot h \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1)$$

h: altura sobre el nivel del mar (m) ver (2)

Si se aceptan en los valores absolutos aproximaciones del orden de 20% entre las temperaturas calculadas y reales, se puede utilizar la ecuación empírica desarrollada por el método de la regresión no-lineal a partir de las temperaturas medias diarias, medidas en diferentes sitios de la región andina colombiana para las 24 horas del día.

$$T_{RA} = f_c \times (0.99 \times 10^{-3} \times t^4 - 0.056 \times t^3 + 0.98 \times t^2 - 5.3 \times t + 3.1) + 29.1 - 0.0068 \times h \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$f_c = 0.73 + 38.5 \times 10^{-6} \times h : \quad (2)$$

factor de acondicionamiento

Conociendo el sitio de instalación de la máquina eléctrica, es entonces posible calcular para éste la curva de temperaturas durante las 24 horas correspondientes a un clima diario.

Según las normas internacionales y las del ICONTEC (p. ej. No. 276; 316; 356; 426; 801), se ha establecido una temperatura máxima estandarizada de 40°C hasta 1000 m de altura para la

maquinaria eléctrica. Siguiendo el raciocinio presentado ya en 1974, se puede determinar una correlación entre esta temperatura máxima y las máximas calculadas para el sitio de instalación. Así es posible definir desde los valores medidos una curva de temperaturas de tipo extremo, que incluyen las temperaturas máximas y mínimas encontradas en las diferentes localizaciones. A continuación aparece para éstas una ecuación de las temperaturas extremas como propuesta para la utilización en la región andina colombiana:

$$T_{ERA} = 0.99 \times 10^{-3} \times t^4 - 0.056 \times t^3 + 0.98 \times t^2 - 5.3 \times t + 32.2 - 0.0068 \times h \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3)$$

De ahí, es posible ahora la función de temperaturas de referencia con respecto a 40°C y 0 m para máquinas eléctricas, que a su vez es el punto de partida para la investigación sobre las capacidades de sobrecarga sin disminución de la vida útil o para diseños optimizados, destinados al mercado colombiano o lo del grupo andino. La ecuación de referencia para la curva de temperaturas extremas aquí propuesta será:

$$T_{RERA} = T_{ERA} + 4.8 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4)$$

La cual se basa en los 40°C y con 0 m de altura. Los diagramas Nº 2-5 muestran para diferentes

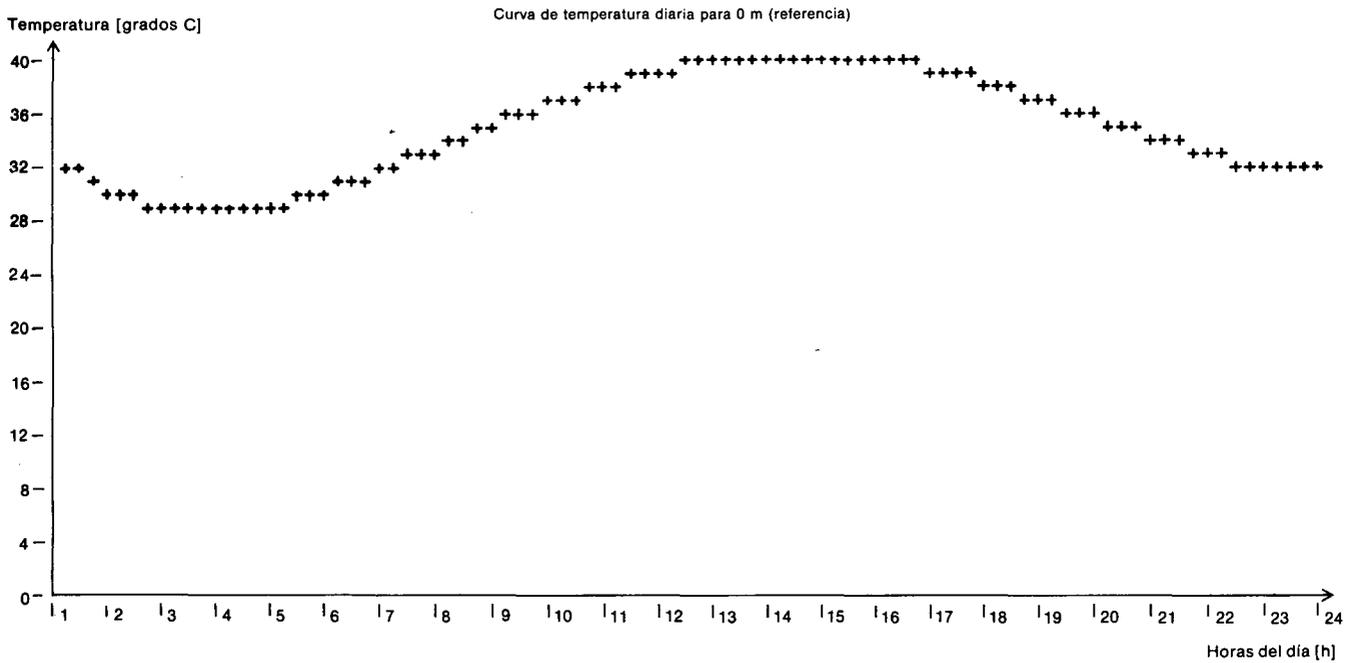


DIAGRAMA N° 2.

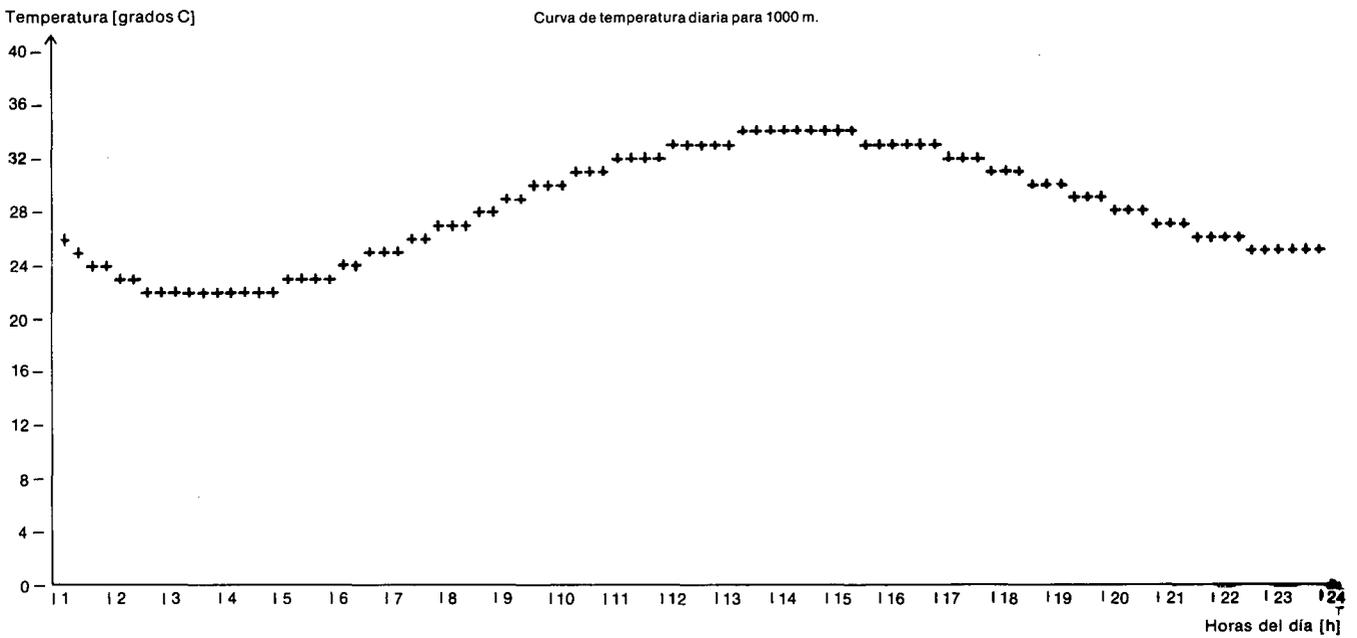


DIAGRAMA N° 3.

alturas las temperaturas resultantes, siendo la de 0 m la referencia a 40°C.

Para la máquina eléctrica rige la carga nominal acompañada por su correspondiente aumento de temperatura (permisible) para el estado estacionario y según lo establecido en la norma respectiva (clase de aislamiento).

Generalmente significa esto que un "cuerpo" dado (la máquina eléctrica) es la fuente de energía calórica (producida por una parte de energía eléctrica recibida y transformada en calor) que fluye desde su interior hacia el ambiente, causando caídas de temperatura hasta

llegar a la temperatura ambiente. Además resulta una temperatura máxima (permisible) dentro del "cuerpo" por el gradiente (no lineal) de la temperatura involucrada. Esta temperatura máxima es el punto clave que determina la vida útil del aparato. Desafortunadamente, para el gradiente de temperatura arriba mencionado es imposible encontrar exactitud absoluta en una formulación matemática universal que represente estas caídas de temperatura. Lo que se conoce de un aparato es su clase de aislamiento con sus respectivas temperaturas máximas permisibles.

Además, se podría asumir con cierta aproxima-

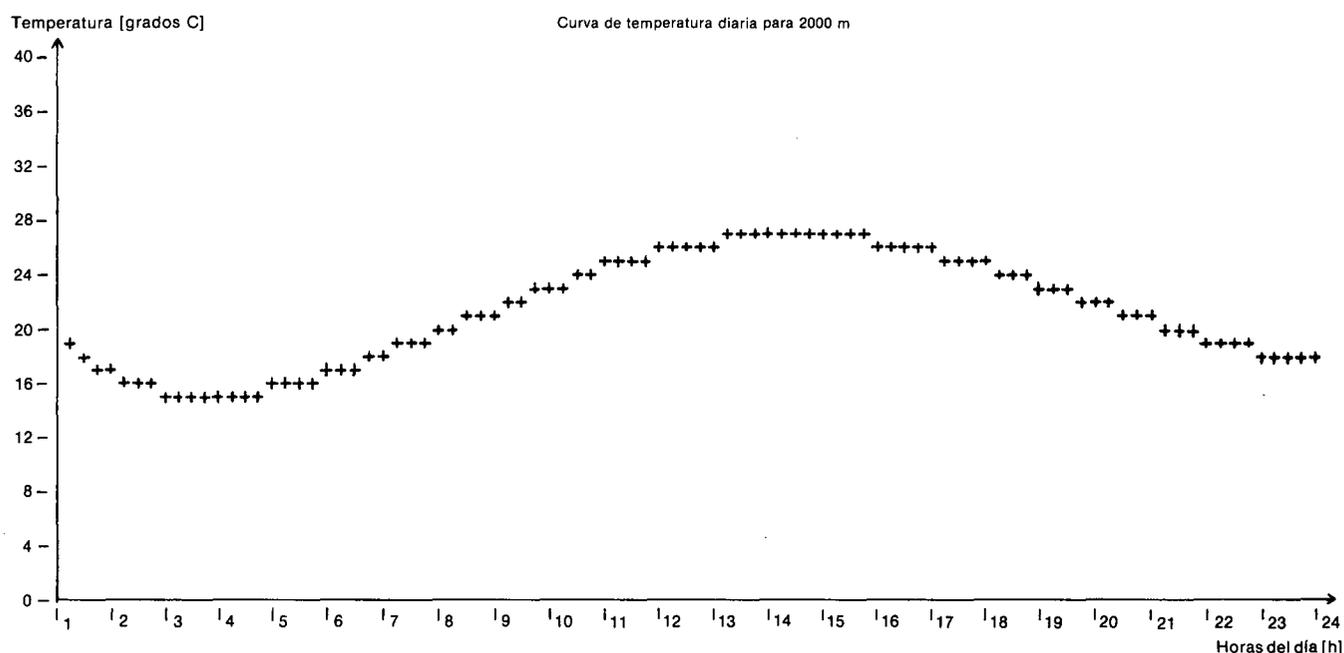


DIAGRAMA Nº 4.

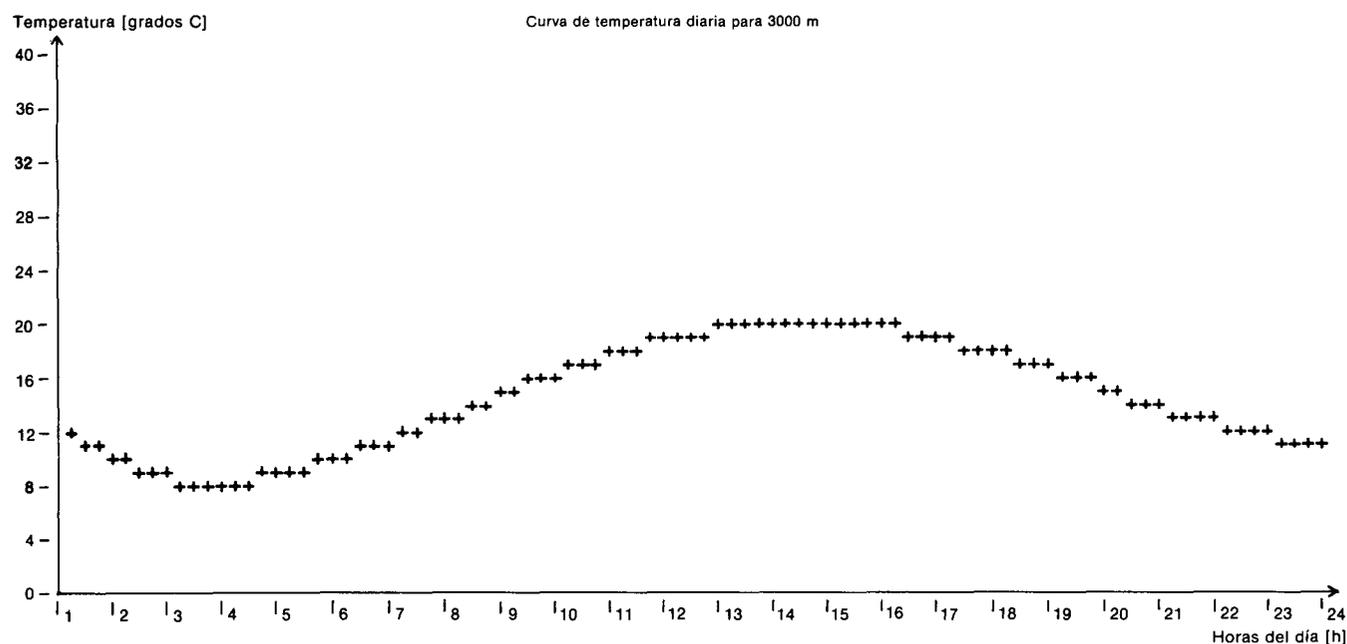


DIAGRAMA Nº 5.

ción, una función realista de aumento del calor producido en forma adicional por sobrecarga. Este último fenómeno está vinculado estrechamente al tipo de máquina y se refleja en la curva de eficiencia en función de la carga. A continuación aparecen unas gráficas correspondientes a un transformador de distribución y de 2 motores asíncronos como ejemplos, ver diagramas Nº 6-8.

La tarea resultante es entonces formular un modelo matemático análogo, en forma generalizada y simplificada para calcular con suficiente

exactitud el probable aumento de temperatura en función de la sobrecarga. Para algunos tipos de máquinas se encuentran informaciones valiosas al respecto en normas escogidas de otros países o los mismos fabricantes de las máquinas en cuestión pueden facilitar informaciones adecuadas.

La refrigeración de la máquina eléctrica se realiza en 3 formas:

- conducción en cuerpos sólidos,
- convección en líquidos y gases y
- radiación hacia espacios libres.

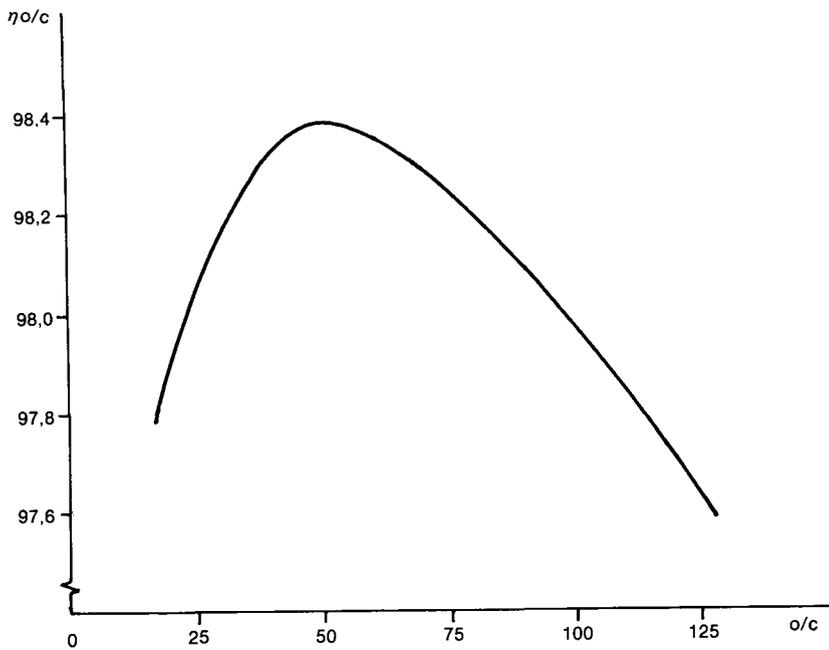


DIAGRAMA Nº 6.
Eficiencia de un transformador trifásico de distribución 150 KVA

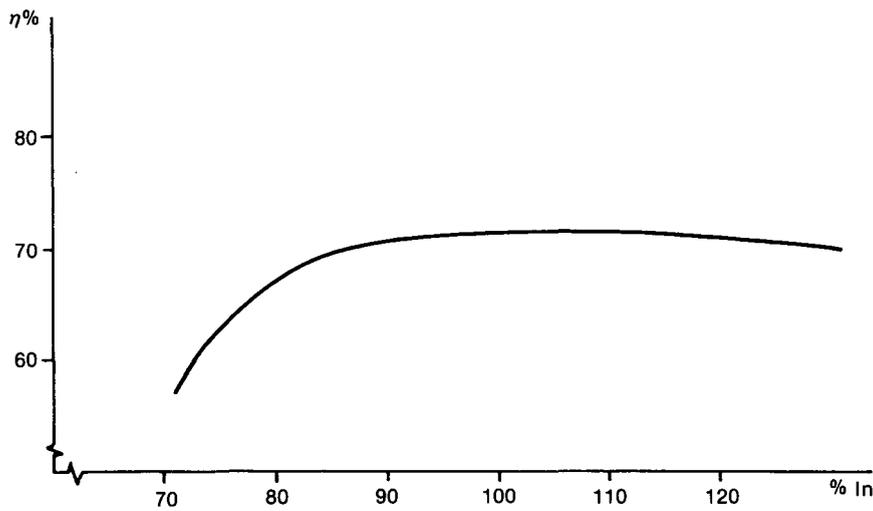


DIAGRAMA Nº 7.
Eficiencia de un motor trifásico 0,9 HP - 1800 r.p.m.

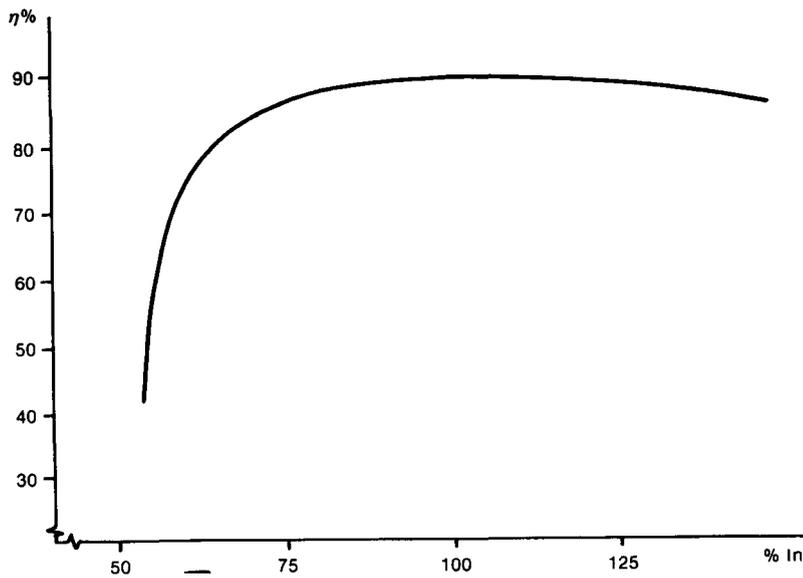


DIAGRAMA Nº 8.
Eficiencia de un motor trifásico 18 HP - 1800 r.p.m.

TABLA 1
Relación Peso/Potencia transformadores

Potencia KVA	Peso (kg)	
	Serie 15 KV	Serie 30 KV
225	900	1390
300	1125	1600
400	1355	2250
500	1575	2450
600	1770	2800
800	2140	3500
1000	2595	3770
1250	3365	4250
1600	3500	5000

TABLA 2
Relación peso/Potencia Motores a 60 HZ

Potencia (HP)	Peso (kg)			
	r.p.m.			
	3600	1800	1200	900
0.6	5.0	6.0	7.5	10.2
0.9	6.6	8	9.4	13.2
1.2	8.2	9.4	12.2	18
1.8	9.9	12	15.7	20
2.4	12.6	15.6	22	35
3.6	15.7	22	35	49
4.8	21	24	49	59
6.6	38	42	56	76
9.0	54	50	64	85
12.0	61	66	91	108
18.0	89	92	119	185
24	100	110	180	275

Para que se pueda producir un flujo de calor (energía calórica) es indispensable la existencia de una caída de temperatura en la dirección de este flujo; así las temperaturas en los diferentes sitios de una máquina corresponden en una forma análoga a los potenciales existentes en una red eléctrica activa con sus componentes pasivos, donde los corrientes tienen una semejanza con los flujos de calor en la máquina. La fuente de calor puede ser representada por una fuente de corriente y la temperatura ambiente por una fuente de tensión.

Con respecto a la conducción de calor, la analogía con la conductancia en un circuito eléctrico es obvia. Esto no es ciento por ciento correcto con la convección y la radiación. Pero dentro de las gamas de temperaturas comunes en las máquinas eléctricas, es posible linearizar por lo menos la convección específica y con cierta aproximación también la radiación específica, ver (3) pág. 16-18, (4) pág. 19-62, (5) pag. 227-263, (6) pag. 504-547.

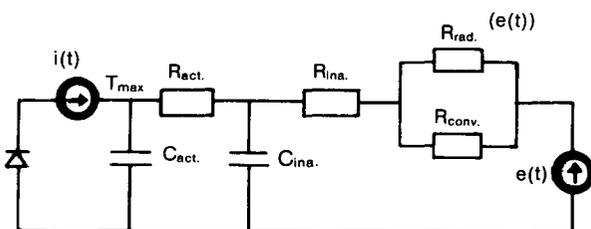
Como ya se ha dicho, la temperatura ambiente no es una constante, como lo asume la norma. La consecuencia para la máquina eléctrica consiste no solamente en una dinámica de flujos de calor

hacia las superficies utilizadas para la refrigeración, sino también en la capacidad de acumulación o pérdida de calor en los cuerpos sólidos y líquidos (despreciando los gases por las magnitudes muy inferiores) que representa la máquina en cuestión.

Esta capacidad de almacenar calor durante el aumento de temperatura de un cuerpo es cuantificable por el calor específico típico para cada material. En un circuito eléctrico análogo y representativo para la máquina eléctrica con sus flujos de calor y temperatura, la capacitancia puede simular esta capacidad de acumulación de energía calórica.

Las tablas con la relación entre peso y potencia muestran la relativa disminución de esta capacidad de acumulación de calor con el aumento de la potencia, ver Tablas 1 y 2.

Otra condición importante es la unidireccionalidad del flujo de calor producido por las "pérdidas" (de energía transformada) en la máquina y que puede ser garantizada por un rectificador en un circuito análogo. Quedan por



$i(t)$: fuente de calor representado por potencia variable (W) que da una energía calórica (Wh) al ser integrada sobre el tiempo.

$e(t)$: temperatura ambiente según la ecuación empírica (4)

T_{max} : temperatura máxima resultante (°C) en el punto más caliente de la máquina eléctrica.

R_{rect} : la inversa de la conducción de calor en los cuerpos sólidos activos (°C/W)

R_{ina} : la inversa de la conducción y convección de calor en los cuerpos sólidos y líquidos inactivos (°C/W)

R_{rad} : la inversa de la radiación de calor de superficies en contacto con el ambiente (°C/W)

R_{conv} : la inversa de la convección de calor sobre cuerpos sólidos en contacto con el ambiente (°C/W)

C_{act} : capacidad de acumulación de calor en los cuerpos sólidos activos (Wh/°C)

C_{ina} : capacidad de acumulación de calor en los cuerpos sólidos y líquidos inactivos (Wh/°C)

GRAFICA N° 1.
Circuito análogo generalizado propuesto

definir para un circuito análogo generalizado para todas las máquinas, los tres conjuntos básicos que normalmente existen:

- la parte activa que realiza la transformación de la energía
- la parte pasiva que sostiene mecánicamente la anterior y
- la parte intercomunicativa (con el ambiente) que son las superficies disponibles para la refrigeración.

De ahí se puede construir el circuito análogo generalizado como modelo para el flujo de calor en la máquina eléctrica y presentada en la gráfica N° 1.

Si se analiza ahora este circuito descriptivo, se encuentra una buena representación de todos los fenómenos que rigen para el comportamiento térmico de las máquinas eléctricas durante su servicio dinámico real.

Dada la máquina, todos los componentes activos y pasivos de este circuito son determinables (siempre y cuando que sean aproximaciones aceptables), además, el circuito permite cualquier

sofisticación posterior, p. ej. representar la capacidad y la resistencia simuladoras de la parte activa de la máquina por un circuito más complejo y mejor representativo. Podría decirse que prácticamente no hay límite en el mejoramiento del modelo análogo, sino solamente por razones económicas o de tiempo utilizable en su desarrollo y cálculo. En la forma mostrada se trata de una representación unidimensional del modelo; con una posterior sofisticación se vuelve generalmente multidimensional, pero hoy en día manejable con las ecuaciones de estado y la utilización del computador.

Es lógico que se requieren cálculos para cada tipo de máquina y las diferentes características constructivas de ella para encontrar los valores de las componentes correspondientes. Pero una vez calculados éstos para una gama de productos, parece asumible y probable una generalización y asignación de valores característicos que pueden ser válidos para determinados grupos de máquinas, permitiendo así su mejor aprovechamiento en el servicio diario con un beneficio económico prometedor.

BIBLIOGRAFIA

- 1) GUHL, E.: "La Sabana de Bogotá, sus alrededores y su vegetación", IGAC. Bogotá 1981.
- 2) MAUDANZ, H.: "Refrigeración de máquinas eléctricas en alturas y con temperaturas diferentes a 1000 m y 40°C", presentado ante ICONTEC. 1974.
- 3) MAUDANZ, H.: "Investigación sobre la ley de crecimiento del entrehierro en motores asíncronos tipo estándar", UN-Bogotá, Agosto 1983.
- 4) GOTTER, G.: "Erwaermung und Kuehlung elektrischer Maschinen", Springer Verlag, Berlin 1954.
- 5) KUECHLER, R.: "Die Transformatoren", Springer Verlag, Berlin 1956.
- 6) CORRALES M., J.: "Cálculo industrial de máquinas eléctricas", Tomo 1, Marcombo, Barcelona 1976.