

01190

2ej-7

DETERMINACION DE LIMITES TERMICOS EN LINEAS AEREAS DE TRANSMISION  
MODELOS ESTATICO Y DINAMICO

DIEGO YUGUEROS IZQUIERDO

TESIS

Presentada a la División de Estudios de  
Posgrado de la  
FACULTAD DE INGENIERIA  
de la  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
como requisito para obtener  
el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA  
(ELECTRICA)

CIUDAD UNIVERSITARIA A 7 DE NOVIEMBRE DE 1988.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## CAPITULO I

## INTRODUCCION A LOS LIMITES TERMICOS

1.	Introducción .....	1
2.	Definiciones .....	4
3.	Panorama general sobre selección de conductores .....	6
3.1	Capacidad de transmisión de líneas aéreas .....	6
3.2	El límite térmico en la capacidad de conducción de líneas aéreas .....	7
3.3	Capacidades térmicas estáticas y dinámicas .....	10
3.4	Capacidades de sobrecarga para conductores aéreos .....	13
4.	Aspectos económicos .....	14
4.1	Optimización económica y límite térmico .....	14
4.2	Pérdidas .....	14
4.3	Otros factores que afectan los costos .....	17
	Bibliografía .....	26

## CAPITULO II

## CAPACIDAD CONTINUA DE CORRIENTE PARA CONDUCTORES ACSR

1.	Introducción .....	27
	a.- Claro mínimo a tierra .....	27
	b.- Pérdida de fuerza mecánica .....	27
	c.- Limitaciones en los herrajes de los conductores .....	28
2.	Capacidad continua de corriente .....	28
3.	Ecuación de balance térmico .....	29
4.	Ganancia de calor por efecto Joule .....	30
5.	Ganancia por calentamiento magnético .....	33
6.	Ganancia de calor solar .....	35
7.	Ganancia de calor por efecto corona .....	44
8.	Pérdidas de calor por convección .....	46
8.1	Velocidad del viento y temperatura ambiente .....	48
8.2	Efecto de la dirección del viento .....	50
8.3	Elevación .....	55
9.	Pérdidas de calor por radiación .....	55

	Página
9.1 Coeficiente de emisividad .....	56
10. Enfriamiento por evaporación .....	58
11. Distribución radial de temperatura .....	58
12. Efecto de la lluvia en el conductor .....	59
13. Efecto de conductores agrupados en la capacidad de corriente .....	61
14. Máxima temperatura en el conductor .....	63
15. Determinación de la ampacidad .....	63
16. Experiencia en operación, temperatura del conductor: medidas VS. calculadas .....	64
Bibliografía .....	65

### CAPITULO III

#### CAPACIDAD DE CONDUCCION BAJO CONDICIONES DE SOBRECARGA

1. Introducción .....	68
2. Cálculo de temperatura en condiciones de sobrecarga .....	68
3. Cálculo de pérdida de fuerza mecánica .....	74
4. Alargamiento de líneas de transmisión .....	77
Bibliografía .....	82

### CAPITULO IV

CONCLUSIONES .....	83
--------------------	----

### APENDICE A

1. Uso de modelos para el cálculo de la pérdida de fuerza mecánica .....	A-1
Tabla No. 1 .....	A-4
Tabla No. 2 .....	A-7
2. Ejemplos .....	A-10
Bibliografía .....	A-14

## APENDICE B

## MANUAL DEL USUARIO

1.	Lenguaje utilizado .....	B-1
2.	Forma de entrar datos .....	B-2
2.1	Primera línea .....	B-2
2.2	Segunda línea .....	B-3
2.3	Tercera línea .....	B-6
2.4	Cuarta línea .....	B-8
2.5	Ejemplos .....	B-9
3.	Descripción de bloques y métodos numéricos empleados .....	B-19
3.1	Bloques de identificación .....	B-19
3.2	Bloques de lectura .....	B-20
3.3	Bloques de inicialización .....	B-20
3.4	Bloque de conversión al sistema inglés .....	B-20
3.5	Bloque de validación de datos de entrada .....	B-20
3.6	Programa principal .....	B-21
3.6.1	Bloque de cálculo de corriente dada la temperatura TC ....	B-21
3.6.2	Bloques de cálculo de TC por el método de Steffensen y bisección .....	B-21
3.6.2.1	Método de bisección .....	B-22
3.6.2.2	Método de Steffensen .....	B-24
3.6.3	Bloque de cálculo de TC1 dado TIP .....	B-24
3.6.4	Bloque de cálculo de tiempo TIP dada la temperatura TC1 ..	B-25
3.6.5	Bloque de cálculo de pérdida de fuerza mecánica .....	B-28
3.7	Bloque de impresión de resultados .....	B-28
3.8	Bloque de impresión de manejo de errores .....	B-29
3.9	Subrutina Calgen .....	B-29
3.10	Subrutina CalQC .....	B-29
3.11	Subrutina Fuez .....	B-29
	Bibliografía .....	B-30

## APENDICE C

## DIAGRAMA DE FLUJO

1.	Bloques .....	C-1
2.	Detalles .....	C-3

## 1. Introducción.

En el diseño y planeación de líneas de transmisión de energía eléctrica, el parámetro de mayor importancia es la capacidad de conducción (o ampacidad). Dicha capacidad está determinada por su límite térmico que representa el límite máximo, ya que el rebasarlo implica operar el conductor dentro de la zona de pérdida de vida útil. Este límite térmico a su vez depende principalmente de condiciones climatológicas. Por lo tanto, es necesario tener información de los factores que afectan la ampacidad por límites térmicos con el objeto de diseñar el sistema de transmisión bajo las mejores condiciones técnicas y económicas posibles.

Con base en los desarrollos recientes en el cálculo de la ampacidad por límites térmicos, se buscó desarrollar un modelo que incluya los nuevos aspectos que determinan la corriente que puede transportar una línea en condiciones estáticas o dinámicas (sobrecarga), las cuales dependen a su vez de las condiciones climatológicas de diseño o las condiciones reales de operación.

En la década pasada se iniciaron diversos proyectos para determinar el comportamiento de los conductores en tiempo real. De esto surgió la necesidad de diferenciar entre las capacidades estáticas, las de sobrecarga, en tiempo real, etc., ya que existen marcadas diferencias entre cada una, estas serán estudiadas en el capítulo I.

Los estudios sobre los límites térmicos en tiempo real indican que estos son mayores a los de diseño en un alto porcentaje del tiempo, lo que hace atractiva su implementación.

En la determinación de los límites térmicos ya sean estáticos, dinámicos o en tiempo real, deben tomarse en cuenta as-

pectos tales como pérdida de fuerza mecánica, flechas y comportamiento de los herrajes.

Para desarrollar los modelos que se presentan en ésta tesis se partió de una búsqueda bibliográfica de los artículos relacionados con el tema a partir de 1958, seleccionándose los criterios más ampliamente utilizados por los autores completándose con anotaciones y referencias hechas por otros investigadores.

Una vez completado el modelo se procedió a implementarlo en un algoritmo escrito en lenguaje Fortran, probándose diversos métodos numéricos. Se seleccionaron aquellos que ofrecieron mayor sencillez y velocidad de convergencia.

Con la ayuda de ésta herramienta digital, se elaboraron gráficas que ayudan a la selección de los diversos parámetros que intervienen en los cálculos de los límites térmicos y pérdida de fuerza mecánica. Las gráficas antes mencionadas se compararon con los resultados presentados por diversos autores para verificar su validez.

Al desarrollar las diversas ecuaciones que afectan el cálculo de los límites térmicos, se discuten los factores más importantes de éstas y se dan criterios para su selección.

De la parte del cálculo de los límites térmicos en estado dinámico, se presentan diversas curvas que nos muestran el comportamiento del conductor ante condiciones de sobrecarga que deben tomarse en cuenta, tanto en la etapa de diseño como en la de operación.

En el capítulo II se desarrolla un modelo para el cálculo de la capacidad térmica de los conductores en estado estable te

niendo en cuenta los diversos factores que afectan la ganancia y la pérdida de calor, tales como velocidad y dirección del viento, emisividad, altitud, orientación de la línea, radiación solar y temperatura ambiente. Con base en el modelo desarrollado se realizaron diversas curvas para los conductores ACSR Oriole (336.4 MCM), Drake (795.0 MCM) y Falcon --- (1590 MCM), en los cuales se puede observar como afectan los diversos parámetros la ampacidad y la temperatura en los conductores.

En el capítulo III se desarrollan modelos para el cálculo de los límites térmicos dinámicos y el cálculo de pérdida de fuerza mecánica. Con el modelo dinámico se realizaron diversas curvas para los conductores Oriole, Drake y Falcon donde podemos observar como se comportan los conductores a cambios de carga, los tiempos de estabilización a altas temperaturas y el efecto de las distintas magnitudes de sobrecarga.

La operación a elevadas temperaturas ocasiona una pérdida de fuerza mecánica, la cual determina la vida útil del conductor. Con el objeto de observar como se afectó ésta, se realizaron diversas curvas para los conductores mencionados.

En el apéndice A se incluyen ejemplos para el cálculo de pérdida de fuerza mecánica para diversas condiciones de estudio, lo mismo que tablas para determinar los parámetros que intervienen.

El apéndice B presenta un diagrama de bloques de programa utilizado.

El apéndice C contiene el manual del usuario, lo mismo que la descripción de los métodos numéricos empleados.

## 2. Definiciones.

Temperatura máxima permisible en el conductor.-(Maximum Allowable conductor temperature) es la máxima temperatura que un conductor puede alcanzar estando dentro de los criterios de flechas y/o pérdida de fuerza mecánica.

Capacidad (límite) térmica estática STR.-(Static thermal rating) es la corriente de diseño que puede transportar una línea como resultado de la máxima temperatura permisible en el conductor para un conjunto particular de parámetros climatológicos seleccionados en forma conservadora (baja velocidad del viento, alta temperatura ambiente, etc.)

Capacidad (límite) térmica dinámica DTR.-(Dynamic thermal rating) es la corriente que puede transportar una línea de --- transmisión dada, como resultado de la máxima temperatura -- permisible en el conductor en tiempo real, ésta depende de - los parámetros del clima en o cerca de los conductores, gene -- ralmente el DTR es mayor que el STR.

Capacidad de conducción en estado estable SSR.-(Steady state rating) es la corriente correspondiente para la máxima temperatura permitida en el conductor bajo el supuesto de equilibrio térmico (calor que entra al conductor igual a pérdida - de calor del conductor). Esta capacidad es frecuentemente -- llamada capacidad de carga continua o normal, así como capa -- cidad de emergencia para períodos largos. La formulación de estado estable se usa en el cálculo de la capacidad térmica- estática y ciertas capacidades dinámicas.

Capacidad de conducción transitoria TR.-(Transient rating) - es la capacidad de corriente que incrementa la temperatura -

hasta el máximo permisible, en un período de tiempo especificado (por ejemplo 15 mins. TR). El cálculo de la capacidad transitoria no asume que el conductor está en equilibrio térmico, se considera la inercia térmica (cambio del calor almacenado) del conductor. Un ejemplo común de TR en la industria eléctrica es la capacidad de emergencia para períodos cortos.

Capacidad de transporte de corriente.-(Ampacidad) es la máxima corriente que un conductor puede llevar bajo condiciones específicas. Estas condiciones pueden ser determinadas por la estabilidad del sistema, regulación de voltaje, pérdidas de potencia, flecha máxima, pérdida de fuerza mecánica como resultado del recocimiento, etc.

Capacidad (límite) térmica.-Es la corriente estable o transitoria que ocasiona la máxima temperatura en el conductor bajo condiciones específicas. Por ejemplo, viento perpendicular de 0.6 m/seg., temperatura ambiente de 30°C, intensidad de radiación solar 1 Kw/m<sup>2</sup>.

Capacidad de corriente de diseño.- Ver capacidad térmica estática.

Viento paralelo.- Viento que fluye a lo largo del claro paralelo al conductor.

Viento perpendicular.- Viento que fluye de frente al claro.

Claro.-(Span) distancia entre dos torres o puntos de apoyo de la línea.

Flecha.-(Sag) es la distancia mínima del conductor a tierra a la mitad del claro.

### 3. Panorama general sobre selección de conductores.

3.1 Capacidad de transmisión de líneas aéreas.- La capacidad de transmisión de una línea aérea está determinada por su límite térmico que es su límite máximo y depende principalmente de condiciones climatológicas.

Sin embargo, en muchos casos las líneas aéreas no pueden ser cargadas hasta su límite térmico por problemas relacionados con la calidad y la estabilidad del voltaje que impone restricciones a la carga. En éste caso los límites no dependen de cada línea individual, sino del sistema en su conjunto. - Es imposible determinar los límites generales para la capacidad de una línea sin un conocimiento de la estructura del sistema que rodea la línea, esto es, la localización de las plantas de generación, la compensación de potencias reactivas, etc.

En un sistema con distancias de transmisión cortas y adecuadamente mallado podría no ser un problema el voltaje o la estabilidad, de tal forma que la capacidad de transmisión pueda determinarse con base en las restricciones térmicas únicamente.

En sistemas con distancias de transmisión grandes y poco mallados, especialmente con alimentadores radiales, se le debe dar particular importancia a los problemas de voltaje y estabilidad, que pueden resolverse en cierto grado usando reguladores de voltaje o capacitores conectados en serie.

El problema de estimar la capacidad de transmisión puede ser ampliado de modo que se incluyan factores tanto técnicos como económicos.

En cuanto a los niveles de tensión, el manejo de grandes bloques de potencia, especialmente en los países industriales, - han hecho viables los estudios para la introducción de sistemas de voltaje entre 1000-1500 Kv ultra alto voltaje (U.H.V.) en vez de usar los convencionales de 400-765 Kv extra alto -- voltaje (E.H.V.).

3.2 El límite térmico en la capacidad de conducción de líneas aéreas. Este límite depende de la máxima temperatura permisible en el conductor, la que a su vez depende de dos factores principales:

- a) El tipo de materiales usados que determinan la fuerza mecánica y la vida en servicio de conductores, abrazaderas de suspensión, empalmes, etc. La vida útil también depende de la cantidad de tiempo que el conductor se someta a altas temperaturas.
- b) Optimización técnica/económica de la línea de modo que la temperatura se selecciona teniendo en cuenta flechas y distancias entre torres. Cualquier incremento en ésta temperatura podría significar que el costo de la línea sea mayor a los beneficios obtenidos en ampacidad.

La temperatura del conductor en un tiempo dado depende del -- flujo de potencia en la línea (nivel, duración), la naturaleza y estructura del conductor y las condiciones climatológicas (temperatura ambiente, velocidad del viento, luz solar, - etc.).

El cálculo del límite térmico en las capacidades de las li -- neas de transmisión es por lo tanto muy complejo y para propó -- sitos de planeación o diseño es necesario un modelo adecuado que permita la determinación de los límites térmicos en la -- forma más sencilla y exacta posible.

El cálculo de límites térmicos está basado en dos diferentes tipos de modelos:

- 1) Modelos determinísticos
- 2) Modelos probabilísticos

1) Modelos determinísticos: La mayoría de trabajos utilizan modelos determinísticos para calcular el límite térmico de la capacidad de transmisión.

Este límite térmico está determinado por tres diferentes condiciones de operación:

- a) Operación normal.- Esta es la carga que la línea debe ser capaz de transportar por períodos largos. Los factores decisivos son: condiciones ambientales y máxima temperatura en el conductor. Para determinar el límite térmico en diferentes épocas del año se utilizan las máximas temperaturas esperadas por época.
- b) Operación de emergencia: Esta es la carga que la línea debe ser capaz de soportar por períodos cortos, o sea sobrecargas. Los factores decisivos son los mismos que para operación normal, pero en algunos países se permite tener una temperatura durante las operaciones de emergencia mayor que la de operación normal. Durante períodos muy cortos cuando hay sobrecargas (menos de 20 minutos), algunos países permiten cargas muy grandes pero que no excedan una temperatura máxima en el conductor.

De Ericsson, Johansson y Chambon (1) se han tomado los anexos 1, 2, 3, donde se puede observar los diferentes criterios de operación para líneas aéreas en países de América, Europa y Sudafrica.

c) Corriente de falla: La máxima corriente de falla es determinada con base en la máxima temperatura del conductor durante o después de la falla. Los factores decisivos son: - la temperatura del conductor antes y después de la falla, - nivel y duración de la corriente de falla. Sin embargo, para líneas de UHV, la máxima corriente permisible de fallas es limitada por otros componentes de sistema, incluyendo - interruptores, seccionadores, transformadores, etc.

2) Modelos probabilísticos: El modelo probabilístico está basado en el hecho de que la carga y las condiciones ambientales sufren fluctuaciones que siguen ciertos patrones. Por lo tanto, por ejemplo, la probabilidad de que la máxima carga coincida con la máxima temperatura ambiente es muy baja.

El comportamiento del sistema se simula y la distribución de la carga sobre la línea se determina, la temperatura ambiente respectiva, velocidad del viento, luz solar y otros factores - se combinan en una distribución probabilística, que junto con la distribución de carga de la línea, permiten graficar una curva de duración de temperatura para el conductor. Esta curva hace posible estimar la pérdida de fuerza mecánica en el conductor y también el riesgo de falla en el aislamiento.

El modelo probabilístico puede utilizarse también para atacar problemas de calidad en el voltaje (4, 5, 6).

Como se ha comentado, la capacidad térmica de transmisión para líneas aéreas se determina usando modelos que a su vez dependen de otros factores como la máxima temperatura de operación y las condiciones climatológicas esperadas. Estos factores varían de país a país de modo que una misma sección de conductor puede tener diversas capacidades térmicas dependen

do del país. También varía por el hecho de que algunos países utilizan un mismo modelo climatológico para todo el año, mientras otros lo varían dependiendo de la época.

3.3 Capacidades térmicas estáticas y dinámicas. Las capacidades térmicas de los conductores han sido estudiadas por décadas en la industria eléctrica, los trabajos hasta épocas recientes se han enfocado al diseño y a la planeación.

El surgimiento de la capacidad térmica dinámica ha obligado a la industria a diferenciar entre capacidades de diseño y operación.

El diseño general de una línea está basado en la optimización de todos los factores que afectan la temperatura del conductor y en consecuencia se usan los promedios máximos esperados.

La capacidad térmica estática (STR) usada para el diseño, es conservadora con la intención de que los límites (flecha, pérdida de fuerza mecánica) para el diseño de la línea no se exceden bajo las combinaciones esperadas de clima y carga.

Se sabe que las capacidades de diseño son conservadoras en un alto porcentaje del tiempo, porque las condiciones meteorológicas realmente existentes en todos los puntos a lo largo de la línea de transmisión no se conocen. Las capacidades de diseño están basadas en baja velocidad del viento y una alta temperatura ambiente, el peor caso para carga máxima al conductor.

Las condiciones climatológicas tienen un profundo efecto sobre la capacidad térmica de los conductores aéreos desnudos principalmente a causa de las pérdidas de calor por convección en el aire circundante.

El grado de enfriamiento depende entre otros de la temperatura del aire (fig.1), velocidad del viento y dirección (fig.2). La velocidad del viento y dirección son los más importantes.

Si las condiciones reales del ambiente fueran monitoreadas, la capacidad de la línea de transmisión podría incrementarse significativamente durante un alto porcentaje del tiempo.

En condiciones ambientales favorables, el incremento de la capacidad es significativo como lo ilustra la fig.3, esto es, la máxima capacidad térmica dinámica (DTR) es tres veces la capacidad térmica estática (STR) en un punto y hasta un 50% mayor en promedio.

El factor crítico en la determinación de la capacidad es la máxima temperatura permisible en el conductor. Los parámetros en la determinación de ésta temperatura son: radiación solar, temperatura del aire, dirección y velocidad del viento.

Actualmente la mayoría de las compañías emplean la metodología de la capacidad térmica estática. Esta, con valores conservadores para velocidad del viento, radiación solar y temperatura ambiente, pero asumiendo un valor nada conservador; de dirección del viento perpendicular al conductor, en el cálculo del estado estable para determinar la corriente que produce la máxima temperatura permisible en el conductor.

Los valores de velocidad del viento más usados generalmente son: 0.02-0.12 mts./seg. (2-5 pies/seg.), mientras el rango de temperatura es de 30-40°C para el período de verano. Estas aproximaciones que usan las velocidades del viento y temperaturas más desfavorables que las que en promedio existen, ocasionan en el conductor temperaturas por debajo de las máximas permisibles cuando éste transporta corriente. Sin em--

Fig. 1

Temperatura de la línea  
vs.  
Temperatura ambiente

Conductor: Linnet  
velocidad del viento: 0.6 m/seg  
Angulo de incidencia: 90°

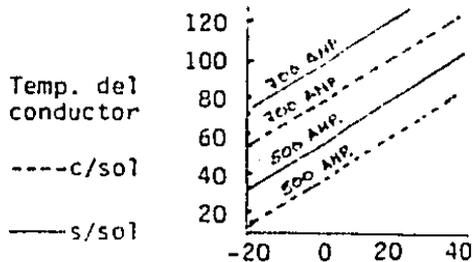


Fig.2

Temperatura de la línea  
vs.  
velocidad del viento y dirección

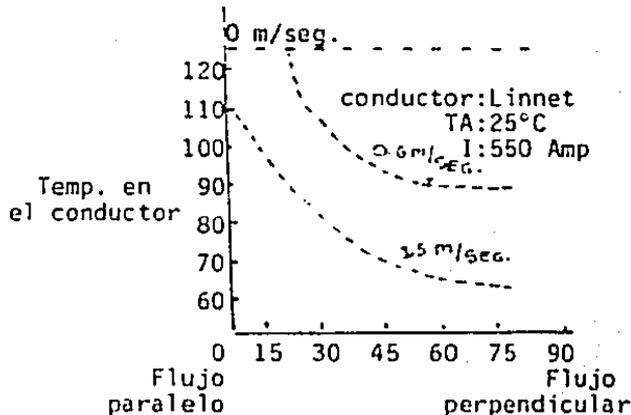


Fig.3

Distribución acumulada de la frecuencia de la ampacidad en % del STR -- usando condiciones climatológicas típicas.

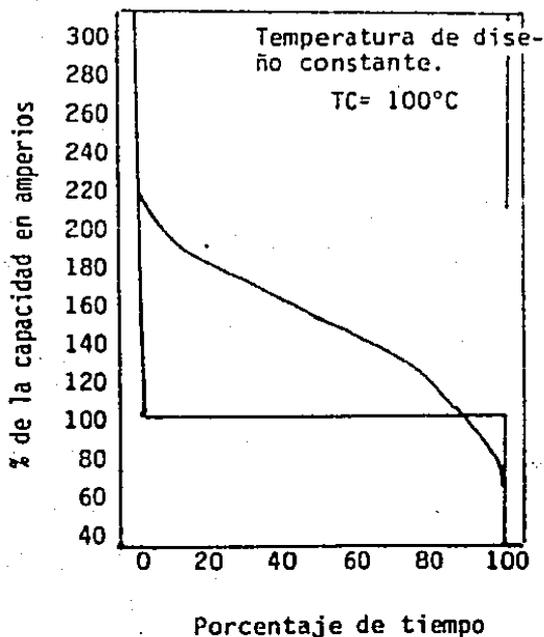
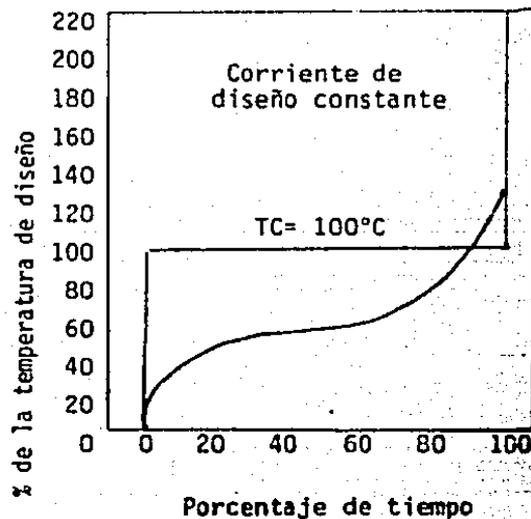


Fig.4

Distribución acumulada de la frecuencia de la temperatura del conductor - en % de la máxima permitida usando - condiciones climatológicas anuales típicas.



bargo, el viento no siempre fluye perpendicular al conductor y de vez en cuando la velocidad del viento cae debajo de la asumida, si en éste caso el conductor está llevando su capacidad de carga, ésta podrá ocasionar un exceso de temperatura sobre la máxima permisible. Ambas situaciones pueden ser vistas en la fig.4; en ésta gráfica se supone que el conductor está llevando su máxima capacidad de carga todo el tiempo. Una línea con un ciclo normal de carga deberá ocasionar una temperatura aún más baja que la de la fig.4 y no excederá su máxima temperatura permisible en un 5-10% del tiempo.

Las variaciones en las condiciones del tiempo diarias, por horas o instantáneas y su consecuente ajuste en la capacidad del conductor se conoce como capacidad dinámica. Este concepto toma en cuenta la ventaja de incrementar la capacidad cuando -- las condiciones climatológicas así lo permitan. Estos incrementos de carga no deben exceder la máxima temperatura permisible en el conductor, más importante aún es prevenir sobrecargas bajo condiciones climatológicas extremas. La implementación de ésta técnica puede tomar dos formas generales:

- 1) Monitoreo del clima
- 2) Monitoreo del clima con instrumentación del conductor.

Ambos sistemas requieren del monitoreo de la corriente en la línea.

3.4 Capacidades de sobrecarga para conductores aéreos. Las líneas de transmisión a menudo requieren llevar cargas mayores que aquellas para las cuales están diseñadas. Cuando esto sucede, se deben estudiar los criterios que fueron usados para determinar la capacidad de la línea. Por ejemplo, algunas se han determinado para que la corriente en estado estable ocasiona una temperatura en el conductor de 50°C sobre la tempe-

ratura ambiente de 25°C (algunos usan temperatura ambiente - de 40°C), con un viento de 0.05 m/seg. (2 pies/seg.). Como - estas condiciones raramente ocurren, se ve la ventaja de usar relaciones más exactas entre las variables que afectan la ca- pacidad del conductor.

Se presenta en éste punto un problema y es el de determinar cuál deber ser la temperatura del conductor para líneas nue- vas, así como para líneas en operación. Sin embargo, no está definida una reglamentación para las ampliaciones de las ca- pacidades en las líneas de transmisión existentes, a pesar - de que hay muchas propuestas para el uso más eficiente de -- las líneas de transmisión.

#### 4. Aspectos económicos.

4.1 Optimización económica y límite térmico. El límite térmi- co descrito anteriormente no es el único parámetro que afec- ta la selección de los conductores en líneas aéreas. Por -- ejemplo, la optimización de las sumas de inversión más pérdi- das puede producir capacidades de conducción económicas en - las líneas mucho menores que el límite térmico de la línea.

En cualquier caso, la planeación busca un punto óptimo entre la calidad de la transmisión, inversión y pérdidas, tomando- en cuenta todos los factores en la formulación y solución -- del problema. En el caso de líneas de EHV también se deben-- asegurar niveles aceptables de pérdidas corona, ruido e in- terferencias en radio y televisión.

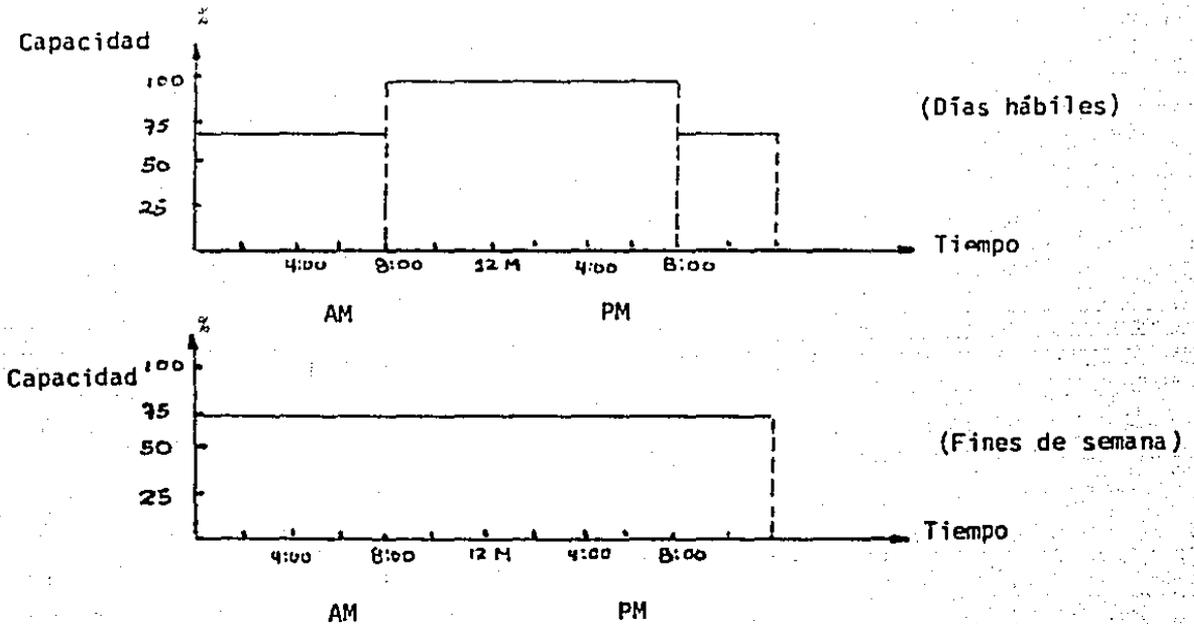
4.2 Pérdidas. Las pérdidas en un conductor están dadas por -  $I^2R$ . Aquí surge el problema de determinar cual es la corrien- te a utilizar para calcular las pérdidas, pues en operación-

normal una línea no transporta carga uniforme igual a la de diseño, debido a los ciclos de carga. Existen varias aproximaciones para solucionar el problema, que a su vez afecta el cálculo de los costos de operación de la línea.

Findlay y Bonsl (3) proponen escoger tres o cuatro días fijos de cada mes y utilizar éstos para calcular las pérdidas a través de todo el año; por ejemplo, los días 4, 11, 18 y 25 de cada mes.

Otra aproximación puede ser suponer un modelo de carga para los días hábiles y otro para los fines de semana así:

Fig. 5



Las pérdidas  $I^2R$  en una línea generalmente no exceden el 10% de la capacidad de carga de la línea.

Se debe tener en cuenta que las pérdidas también son función de la resistencia del conductor por unidad de longitud. La resistencia por unidad de longitud es función a su vez de la resistividad y la sección del conductor.

Las pérdidas eléctricas disminuyen con el aumento del tamaño de el conductor, lo que origina aumento no solo en los costos de construcción por el conductor sino también por las estructuras. El tamaño óptimo del conductor es aquel cuyo costo de construcción más el valor presente de las pérdidas durante la vida esperada de la línea sean mínimos. Este conductor óptimo debe cumplir además con requerimientos tales como: corona, -- ruido audible e interferencias en radio y televisión.

Para voltajes menores de 400 Kv, el diámetro del conductor en el diseño de líneas de transmisión está basado en límites térmicos y configuración del sistema. A voltajes más altos el -- diámetro mínimo del conductor, número de subconductores por -- fase y distancia entre ellos, se seleccionan teniendo en cuenta además factores como: corona, ruido audible e interferencias en radio y televisión.

La práctica común en el mundo indica que los conductores de -- aluminio reforzado con acero (ACSR), son usualmente escogidos para líneas de EHV y UHV. Pero es posible que para algún caso en particular se pueda encontrar ventajoso utilizar otro tipo de conductor. Por ejemplo, aluminio, aluminio reforzado o -- ACSR de diferente contenido en acero.

El costo del conductor en una línea de transmisión depende de sus características eléctricas y mecánicas como las si--

güentes:

- 1) Diámetro del conductor
- 2) Peso por unidad de longitud
- 3) Conductividad del material(es)
- 4) Sección transversal
- 5) Modulo de elasticidad
- 6) Resistencia a la rotura (fuerza)
- 7) Coeficiente de elongación térmica
- 8) Costo de material(es)
- 9) Máxima tensión sin carga (% de fuerza de rotura)

Estos parámetros en general no son independientes unos de otros.

4.3 Otros factores que afectan los costos. El costo de las estructuras de las líneas de transmisión es función principalmente de :

- 1) Espaciamiento entre fases
- 2) Carga transversal
- 3) Carga longitudinal
- 4) Carga vertical
- 5) Claro mínimo a tierra
- 6) Flecha máxima

El espaciamiento entre los subconductores depende básicamente de dos factores:

- a) Estabilidad aerodinámica. Espacios pequeños entre los subconductores pueden ocasionar inestabilidades con las consecuentes oscilaciones. Es conveniente adoptar distancias entre 10-12 veces el diámetro del conductor para minimizar las inestabilidades.

- b) La distancia entre subconductores sea tal que los gradientes de voltaje cumplan con los valores críticos.

La fig. 6 muestra la influencia del espacio entre subconductores en el gradiente superficial para dos voltajes y diversos diámetros de subconductores. De ahí se puede observar que -- las consideraciones eléctricas requieren distancias más pequeñas que aquellas debidas a consideraciones aerodinámicas.

En la actualidad se están desarrollando proyectos con el fin de mejorar la capacidad de autoamortiguamiento y comportamiento dinámico de los conductores aéreos.

La utilización de este tipo de conductores implicará que la selección del espacio entre subconductores sea hecho en base a el diámetro y número de subconductores por fase en líneas de UHV, influenciado principalmente por niveles de interferencia en radio y televisión.

La flecha máxima es la mayor entre la flecha ocasionada por la máxima temperatura permisible en el conductor y la flecha bajo la máxima carga por viento y hielo. La altura de la estructura está determinada por la suma de la flecha máxima y el claro mínimo a tierra.

La pérdida de fuerza mecánica de los conductores, ocasionada por operación a elevadas temperaturas afecta la vida útil de la línea. La cantidad de pérdida de fuerza mecánica es función del tiempo y temperatura.

El alargamiento de los conductores es continuo y ocurre a todas las temperaturas, pero se incrementa conforme aumenta la temperatura. La determinación del alargamiento es un proceso complicado y se debe tener en cuenta que puede haber una gran

divergencia entre el alargamiento estimado y el existente, dependiendo del tipo de conductor, el proceso de fabricación y las condiciones de operación. El principal efecto del alargamiento es un aumento de la flecha y en consecuencia se deben hacer previsiones de la altura de las estructuras o tener en cuenta éste hecho para modificar las flechas en el futuro, -- cuando la distancia a tierra así lo requiera. Los costos por las alturas adicionales en las estructuras debido a las previsiones por alargamiento son relativamente pequeñas.

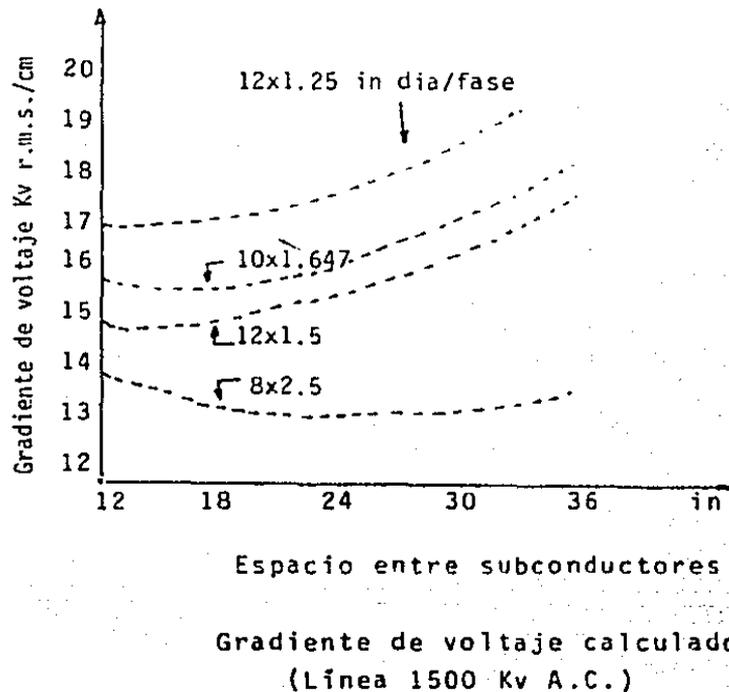


Fig. 6

## ANEXO 1

Capacidad térmica de líneas aéreas. Valores usados en diferentes países.

	R.F.A.	Inglaterra	Irlanda	Francia	Bélgica	Suecia	Hungría
1. Máxima temperatura del conductor.							
a) Servicio normal.	80	75(1)	80	60(4)	75	50:80	80
b) Operación de -- emergencia.	80	75(1)	80	75	75	70:100	110(5)
c) Corriente de falla.	200	--	80	--	150	200	150(7)
2. Temperatura ambiente.							
a) Valor nominal.	35	--	--	--	25	--	--
b) Valor de verano.	--	18	25	30	--	30	30
c) Valor de otoño y primavera.	--	5-18	15	--	--	--	--
d) Valor de invierno.	--	5	5	15	--	10	10
3. Otras condiciones de operación							
a) Velocidad del viento (m/s).	0,6	0,9:1,8 (2)	0,89	1,0	0,5	0,6	1,0
b) Radiación solar (W/m <sup>2</sup> ).	si	670,870 990	si	900	1000	si	1000
c) Coeficiente de emisividad y absorción.		abs:1,0 em:1,0	--	abs:0,5 em:0,6	abs:1,0 em:1,0	em:1,0	1,0

Observaciones.

- 1) Máxima temperatura para líneas futuras. Las existentes son 50°C a 65°C.
- 2) Valores para días nublados y soleados respectivamente.
- 3) Invierno, primavera/otoño y verano respectivamente.
- 4) Sobre los 1000 metros sobre el nivel del mar el valor usado es 50°C, pero la temperatura ambiente es asumida 10°C más baja.
- 5) Máximo para 1 hora y 36 veces al año.
- 6) Durante el primer año de operación el coeficiente de emisividad es 0.6.
- 7) La capacidad de resistencia del conductor es considerada para un periodo-corto.

## ANEXO 1-BIS

Capacidad térmica de líneas aéreas. Valores usados en diferentes países.

	Brasil (a)	(10) (b)	Países Bajos	España	Sur Africa	U.S.A. (9)	Canada
1. Máxima temperatura en el conductor (°C).							
a) Servicio normal.	60	75	70/80(8)	75	75	95(85 si ferrous clamps.)	--
b) Operación de emergencia.	90	92	70/80(8)	--	90	Depende de las condi- ciones.	--
c) Corriente de falla	90	92	195/165(8)	--	--	IDEM (b)	--
2. Temperatura ambiente.							
a) Valor nominal.	30	40	20	30	40	--	--
b) Valor de verano.	--	--	30	--	--	35	30
c) Valor de primavera y otoño.	--	--	15	--	--	18	--
d) Valor de invierno	--	--	10	--	--	2	0
3. Otras condiciones de operación.							
a) Velocidad del viento (m/s).	0,6	0,6	0,6	0,5	0,45	0,89	--
b) Radiación solar (w/m <sup>2</sup> ).	1037	1000	1000	--	1100	--	--
c) Coeficiente de absorción y emisión.	abs: 0,7 ems: 0,5	abs: 0,5 ems: 0,5	abs: 0,6 ems: 0,6	-- ems: 0,5	abs: 1,0 ems: 1,0	abs: 0,8 ems: 0,8	-- --

8) Primer valor: cobre

Segundo valor: aluminio

9) Valores para sistema AEP

10) Valores extrapolados del reporte de ELETROBRAS de dos compañías (a) y (b), que tienen en operación actualmente redes a 500 kv.

ANEXO 2Capacidad térmica de transporte de un conductor 1x593 mm<sup>2</sup> ACSR en verano.

Valores usados en la planeación.

Capacidad de corriente en Amperes.

Valores de operación normal (x temperatura en el conductor °C).

(y temperatura ambiente °C).

Sobrecargas aceptadas.

Sobrecargas aceptadas bajo ciertas condiciones.

- |              |                |            |
|--------------|----------------|------------|
| - Bélgica    | - Inglaterra   | - Hungría  |
| - Sur Africa | - España       | - Irlanda  |
| - Brasil     | - Países Bajos | - Alemania |
| - Italia     | - Suecia       |            |

Notas:

- 1) La distribución de la potencia generada debe cambiarse con el objetivo de minimizar la carga excesiva de la línea.
- 2) Máximo por 1 hora y 36 veces al año.
- 3) Capacidad estimada. Este tipo de conductor no es usado en Inglaterra o Escocia.
- 4) Capacidad estimada a partir de un conductor (acero 37.1 mm<sup>2</sup>, aluminio 423.1 mm<sup>2</sup>), aplicada en la práctica en configuración 3x38/420.
- 5) Extrapolación realizada a partir de un reporte del EPRI. Las sobrecargas no están especificadas.
- 6) Extrapolación realizada a partir de un reporte de ELETROBRAS, basándose en las dos compañías que tienen en operación redes de 500 kv en áreas tropicales.
- 7) De un reporte de Hydro-Quebec, con extrapolación a partir de un conductor de 865 mm<sup>2</sup>.

ANEXO 3Capacidad térmica de transporte de un conductor 1x593 mm<sup>2</sup> ACSR durante -  
invierno.

Valores usados en la planeación.

Capacidad de corriente en Amperes

Valores de operación normal (x temperatura en el conductor °C)  
(y temperatura ambiente °C).

Sobrecargas aceptadas.

Sobrecargas aceptadas bajo ciertas condiciones.

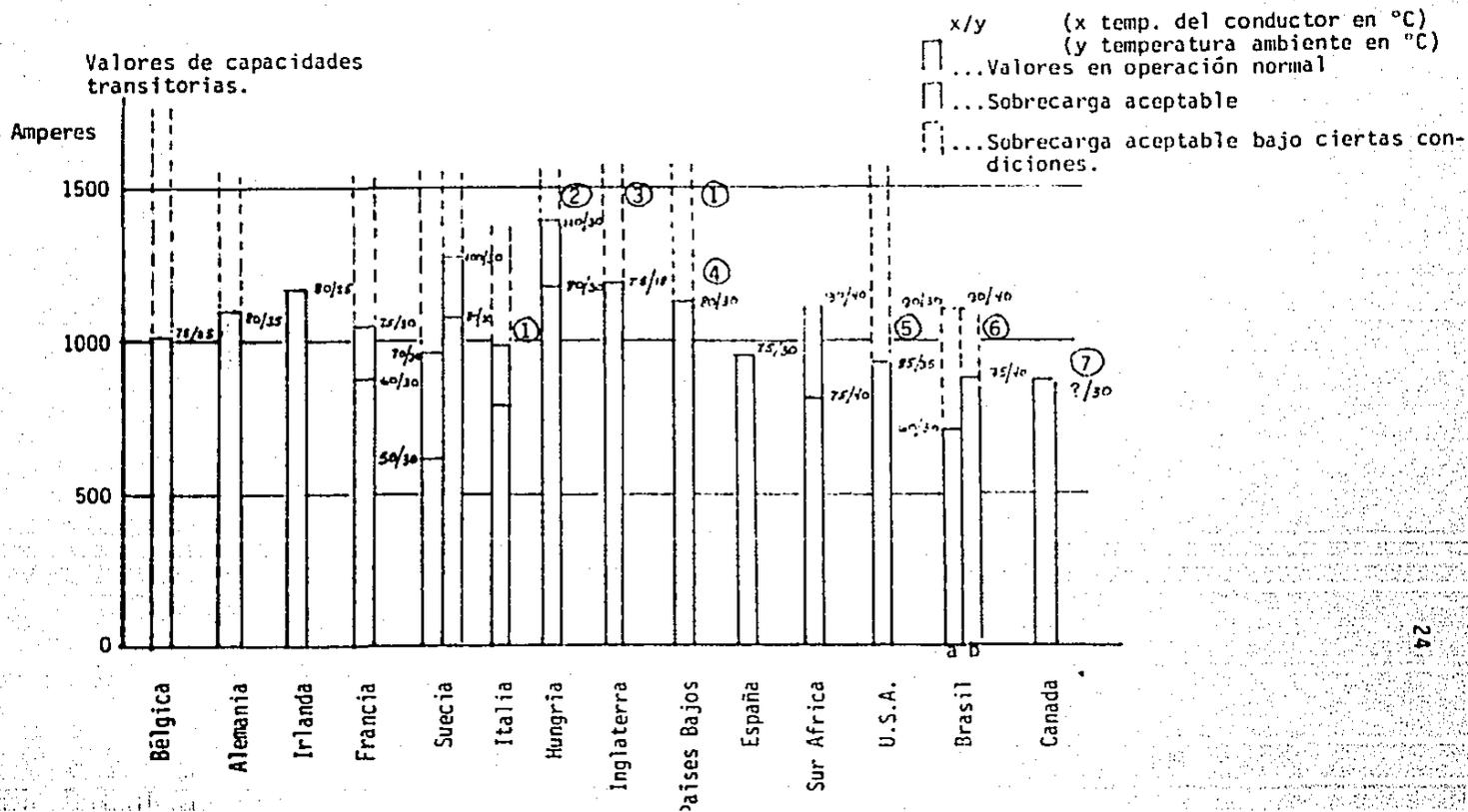
- |              |                |            |
|--------------|----------------|------------|
| - Bélgica    | - Inglaterra   | - Hungría  |
| - Sur Africa | - España       | - Irlanda  |
| - Brasil     | - Países Bajos | - Alemania |
| - Italia     | - Suecia       |            |

Notas:

- 1) La distribución de la potencia generada debe cambiarse con el objetivo de minimizar la carga excesiva de la línea.
- 2) Máximo por 1 hora y 36 veces al año.
- 3) Capacidad estimada. Este tipo de conductor no es usado en Inglaterra o Escocia.
- 4) Capacidad estimada a partir de un conductor (acero 37.1 mm<sup>2</sup>, aluminio 423.1 mm<sup>2</sup>, aplicada en la práctica en configuración 3x38/420.
- 5) Extrapolación realizada a partir de un reporte del EPRI. Las sobrecargas no están especificadas.
- 6) Extrapolación realizada a partir de un reporte de ELETROBRAS, basándose en las dos compañías que tienen en operación redes de 500 kv en -- áreas tropicales.
- 7) De un reporte de Hydro-Quebec, con extrapolación a partir de un conductor de 865 mm<sup>2</sup>.

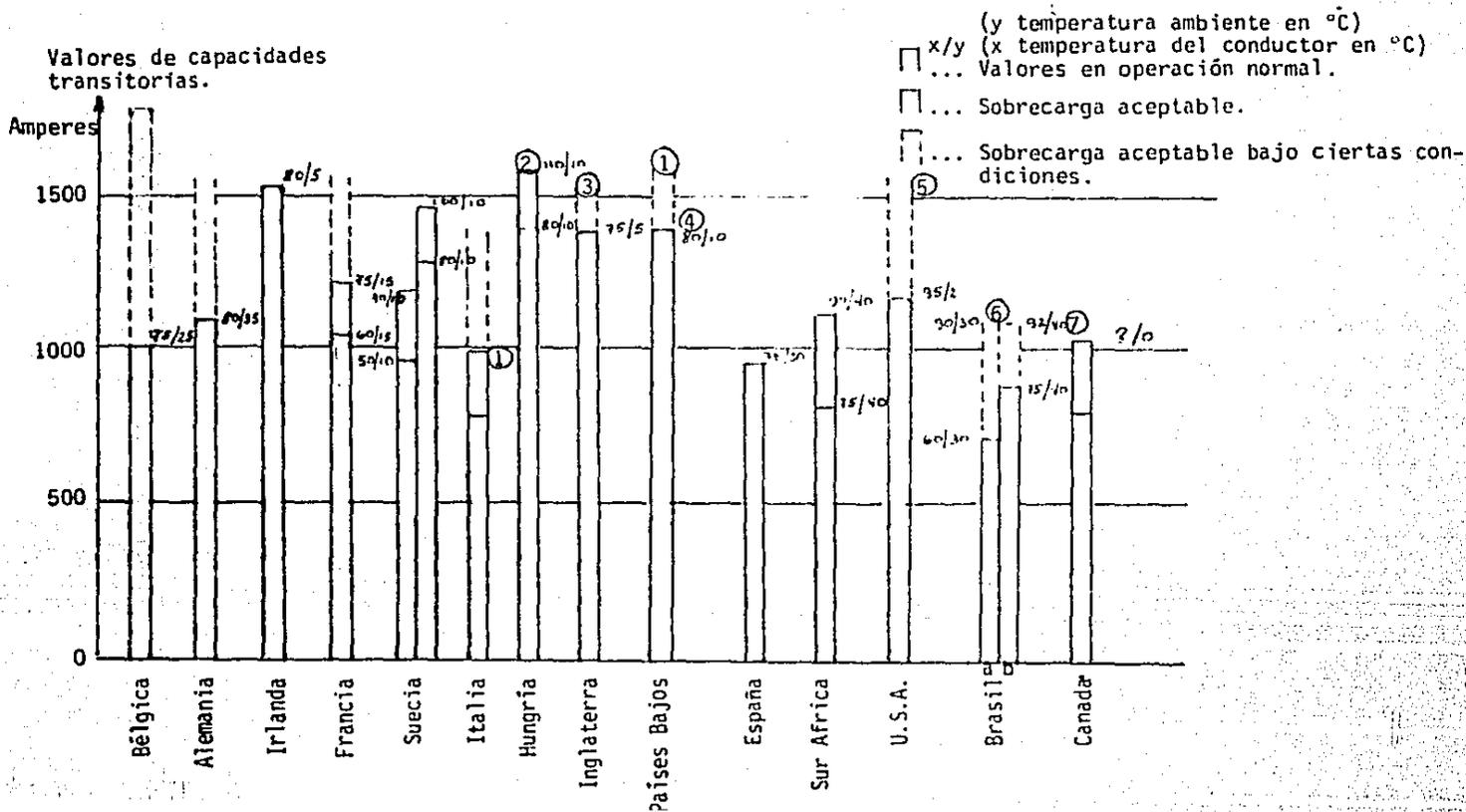
Capacidad térmica de un conductor ACSR 1 x 593 mm<sup>2</sup> durante el verano.

Fig. del anexo 2



Capacidad térmica de un conductor ACSR 1 x 593 mm<sup>2</sup> durante el invierno.

Fig. del anexo 3.



## BIBLIOGRAFIA

- (1) "Transmission capacity of overhead lines"  
Ericsson T, Johansson T & Chambon H.  
Electra No. 74 January, 1981
- (2) "Dynamic thermal rating"  
Summary and status of the state of the art technology  
Task force chairman G.F. Roman  
IEEE Trans on power July, 1987
- (3) "Economics of ACSR conductor"  
R.D. Findlay & A.K. Bransal  
Canadian communications and power conference  
Montreal, Canada 18-20 October, 1978
- (4) "A statistical approach to the design of transmission  
line conductors"  
F. Numajiri - Elect. Eng. Japan Vol. 85, No. 9, 1965
- (5) "Determination of transmission line ampacities by proba-  
bility and numerical methods"  
D.O. Koval, Roy Billinton  
IEEE Trans pas 89 No. 7 Sep/Oct, 1970
- (6) "Statistical approach to thermal rating of overhead lines  
for power transmission and distribution"  
C.F. Price, R.R. Gibbon  
IEEE Proceedings Vol 130 No. 5 September, 1983

## CAPITULO II

## CAPACIDAD CONTINUA DE CORRIENTE PARA CONDUCTORES ACSR

(Método determinístico)

1. Introducción.

La máxima temperatura permitida en el conductor se llama límite térmico o capacidad térmica. Se deben considerar los siguientes aspectos cuando se especifique el límite térmico de una línea:

- a) Claro mínimo a tierra (o flecha)
- b) Pérdida de fuerza mecánica
- c) Limitaciones en los herrajes de los conductores

a) Claro mínimo a tierra (o flecha).- Esta relacionado con la distancia a tierra y entre fases de la línea. Al incrementar el conductor su temperatura, éste se elonga debido a la dilatación térmica, su longitud se incrementa y la distancia a objetos bajo la línea decrece. El diseño de la línea está basado sobre una temperatura máxima en el conductor. Conociendo la flecha del conductor a una temperatura, la altura de la estructura requerida se calcula para suministrar seguridad. Las limitaciones en la temperatura de diseño debido a las flechas son usualmente conocidas para una línea determinada. Una vez obtenida la temperatura de diseño, ésta no se debe exceder.

b) Pérdida de fuerza mecánica.- Esta ocurre durante la operación a elevadas temperaturas, cuando las aleaciones de aluminio se someten a temperaturas mayores de 90°C pero menores que la de recristalización de la aleación. Esta pérdida de fuerza mecánica ocurre por un proceso que algunas veces es llamado de recocimiento.

Harvey de Alcoa Research Laboratories (1) desarrolló un modelo matemático que puede utilizarse para calcular la pérdida de fuerza mecánica sufrida por un conductor a elevadas temperaturas de operación.

c) Limitaciones en los herrajes de los conductores.- Howitt y Simpkins (2) encontraron que los herrajes correctamente diseñados y seleccionados no son un factor limitante para establecer la máxima temperatura en una línea de transmisión bajo condiciones de emergencia. Investigaciones adicionales -- realizadas por Dallas Power and Light Company (3) resultaron en una conclusión similar. Sin embargo, las limitaciones en los herrajes deberán ser cuidadosamente evaluadas para cada caso.

La evaluación y consideración de los límites térmicos de una línea de potencia debido al claro mínimo a tierra, pérdida de fuerza mecánica y limitaciones en los herrajes, da como resultado la máxima temperatura permisible en el conductor o la capacidad térmica de la línea de transmisión.

La capacidad de transporte de un conductor es una función de la temperatura del conductor, temperatura ambiente, velocidad del viento, altitud y radiación solar incidente. Estas relaciones serán examinadas en las siguientes secciones.

## 2. Capacidad continua de corriente.

En la determinación de la capacidad continua de corriente se encuentran en la literatura diversos métodos, unos con más variables que otros, por lo que para la presentación de esta parte partiremos de modelos que incluyan la mayoría de éstas, mediante diversas suposiciones derivaremos a los modelos más

frecuentemente presentados.

### 3. Ecuación de balance térmico.

La temperatura de un conductor puede calcularse por la ecuación de balance térmico. La forma de esta ecuación depende del modo de calentamiento, ya sea por carga continua, intermitentes o sobrecarga y cortocircuitos. Primeramente estudia<sub>re</sub>mos el caso de la capacidad continua de corriente.

El conductor de una línea de transmisión es siempre mucho -- más largo que ancho y el contacto de éste con los aisladores de suspensión en cada torre de soporte de la línea es mínimo, de modo que las pérdidas de calor por conducción pueden despreciarse para todo fin práctico.

Bajo condiciones estables de velocidad del viento, temperatura, radiación solar y corriente eléctrica se cumple la siguiente ecuación de balance térmico (4): (por unidad de longitud, por unidad de tiempo)

$$QJ+QM+QS+KI\dot{Q}I = \dot{Q}C+\dot{Q}R+\dot{Q}W \text{ -----(1)}$$

donde:

- QJ = Ganancia de calor por efecto Joule
- QM = Ganancia por calentamiento magnético
- QS = Ganancia por calor solar
- QI = Ganancia de calor por efecto corona
- KI = Factor que toma en cuenta la difusión térmica
- QC = Pérdida de calor por convección
- QR = Pérdida de calor por radiación
- QW = Pérdida de calor por evaporación

Consideremos estas cantidades con más detalle.

#### 4. Ganancia de calor por efecto Joule.

La ganancia de calor por efecto Joule se puede calcular como:

$$QJ = K_J I^2 R_{dc} (1 + \alpha_o TC) \text{ ----- (2)}$$

donde:

- I = La corriente efectiva (Amperes)
- $R_{dc}$  = La resistencia a corriente directa por unidad de longitud a 0°C
- $\alpha_o$  = El coeficiente de resistencia entre 0°C y TC
- TC = La temperatura media del conductor
- $K_J$  = El factor que toma en cuenta el incremento de la resistencia con la corriente alterna debido a los efectos de proximidad y piel
- $K_J$  = 1 para corriente directa

Dwight (5) ha dado fórmulas para el factor del efecto piel - KSK y se puede observar que el efecto piel causa un incremento en la resistencia menor del 1% cuando:

$$\sqrt{(f/Rdc)} < 700 \text{ ----- (3)}$$

donde:

- f = Frecuencia
- Rdc = Resistencia a temperatura TC
- KSK = Factor del efecto piel

Y el efecto del trenzado en los cables tiene una influencia despreciable cuando:

$$\sqrt{(f/R_{dc})} < 1500 \text{ ----- (4)}$$

El valor de  $\sqrt{f/R_{dc}}$  para conductores prácticos cae dentro del rango de 200 a 1500.

Dwight también ha dado fórmulas para la determinación del factor por efecto de proximidad  $K_{pr}$ , para la relación espacio-diámetro  $S/D > 3$ , este efecto causa menos del 1% de cambio en la resistencia cuando:

$$\sqrt{(f/R_{dc})} < 1000 \text{ ----- (5)}$$

$$\text{El factor } K_j = (K_{SK} + K_{pr} - 1) \text{ ----- (6)}$$

El coeficiente de resistencia  $\alpha_o$  para conductores con núcleo de acero determinada por Morgan (4) varía con la relación del área total de los hilos no ferrosos a la de los hilos de acero  $A_a/A_b$  :

$$\alpha_o = \frac{\alpha_b \rho_a (1 + \alpha_a T_a) + \alpha_a \rho_b (1 + \alpha_b T_b) A_a/A_b}{\rho_a (1 + \alpha_a T_a) + \rho_b (1 + \alpha_b T_b) A_a/A_b} \text{ ----- (7)}$$

donde:

Los subíndices "a" se refieren a las secciones no ferrosas y los "b" a las ferrosas.

$\alpha$  = Coeficiente de resistencia por temperatura

$\rho$  = Resistividad del material

T = Temperatura media

Existen tablas para la resistencia de los conductores ACSR a 60 Hz, donde muestran el incremento de la resistencia con la temperatura, pero el uso de una ecuación es más apropiado para aplicación por computadora. Partiendo de un valor de resistencia a 60 Hz, la siguiente ecuación puede usarse para ajustes de resistencia por cambios en la temperatura:

$$RA = R_0 [1 + K (T_A - T_0)] \text{ ----- (8)}$$

donde:

RA = Resistencia del conductor a 60Hz a una temperatura conocida  $T_A$

$R_0$  = Resistencia del conductor a 60Hz a una temperatura conocida  $T_0$

$T_A$  = Temperatura a la cual se va a calcular RA

$T_0$  = Temperatura a la cual esta dada  $R_0$

K = Coeficiente de resistencia por temperatura=(0.00401 a -25°C)

El coeficiente K es una función de la temperatura, pero esta dependencia es bastante ligera y por lo tanto K se considera constante.

Lewis y Tuttle (6) concluyen que una alta precisión en la determinación de la resistencia no se justifica porque la resistencia de un conductor en servicio varia por otras razones -- distintas de las de temperatura. Entre estas pueden incluirse el enroscamiento (tornarse en espiral), tolerancias en la conductividad del aluminio y las normas ASTM (16) que especifican una conductividad mínima para materiales conductores.

### 5. Ganancia por calentamiento magnético.

Con corriente directa no se presenta calentamiento magnético, pero con corriente alterna el flujo magnético cíclico ocasiona un aumento de temperatura por corrientes de eddy, histéresis y viscosidad magnética.

El calentamiento debido a corrientes de eddy es usualmente despreciable en conductores no ferrosos a frecuencias fundamentales, pero en conductores trenzados con núcleo de acero, la circulación de la corriente en espiral alrededor del núcleo produce un flujo magnético longitudinal en los hilos de acero. El pico total de la fuerza magnetizante  $H_m$ , para un total de  $nt$  capas de hilos no ferrosos, trenzados con direcciones opuestas por capa es dado por Morgan (4):

$$H_m = \sum_{n=1}^{nt} \sqrt{2} (-1)^{n+1} I_n \sin(X_n/l_n) \text{ ----- (9)}$$

donde:

$I_n$  = La corriente r.m.s.

$X_n$  = El ángulo de las pérdidas magnéticas (0.75 Radianes aprox.)

$l_n$  = La longitud de la capa "n" de hilos no ferrosos

El pico de la inducción magnética  $B$ , en los hilos de acero varía con el diámetro, tratamiento previo, fuerza de tensión y temperatura. La ganancia de calor  $P_e$  por corrientes de eddy aumenta con el cuadrado de la inducción magnética.

$$P_e = A (K_f \pi f B_m)^2 / 16 \rho \text{ ----- (10)}$$

donde:

A = La sección del acero

Kf = El factor de forma de la onda de voltaje

$\rho$  = La resistividad de los hilos de acero

f = Frecuencia

El campo magnético alterno también causa calentamiento en los hilos de acero por histeresis PH. Este está dado por:

$$PH = C_1(T) f A \gamma B_m^{n_1} \text{-----} (11)$$

donde:

$C_1(T)$  = Una función de la temperatura TC del acero

$\gamma$  = Densidad del acero

$n_1$  = Constante (1.68)

La ganancia de calor debido a la viscosidad magnética es despreciable a frecuencias de potencia. Por lo tanto, la ganancia de calor debido a la magnetización de los hilos de aceros:

$$Q_M = P_e + PH \text{-----} (12)$$

Para acero a 50 Hz  $Q_M$  puede ser determinada por la siguiente relación:

$$Q_M = 625 d A \gamma b_m^{1.82} e^{(-2.5 * 10^{-3} TC)} \text{-----} (13)$$

donde:

d = Diámetro de hilos de acero

Para valores de  $f$  distintos de 50 Hz se puede multiplicar el lado derecho de la ecuación por  $f/50$ .

Se considera por la mayoría de los autores que  $R_0$  de la ecuación (8) incluye este efecto de calentamiento magnético a 60Hz.

#### 6. Ganancia de calor solar.

El sol es otra fuente de energía térmica que incrementa la temperatura del conductor. Su influencia depende del estado de la superficie receptora; los cuerpos negros tienen aproximadamente 100% de absorción, no así los cuerpos brillantes que pueden absorber de 4 a 5%. El factor que toma en cuenta este hecho es el coeficiente de absorción solar  $A$ .

Los conductores en líneas aéreas desarrollan diversas condiciones en la superficie que afectan la cantidad de calor solar que pueden absorber en un tiempo dado. Un conductor nuevo tiene un coeficiente de absorción solar de 0.23 de acuerdo a House y Tuttle (15). Un conductor oscurecido por el tiempo podrá tener un coeficiente de 0.97 y por lo tanto ganará una gran cantidad de energía solar.

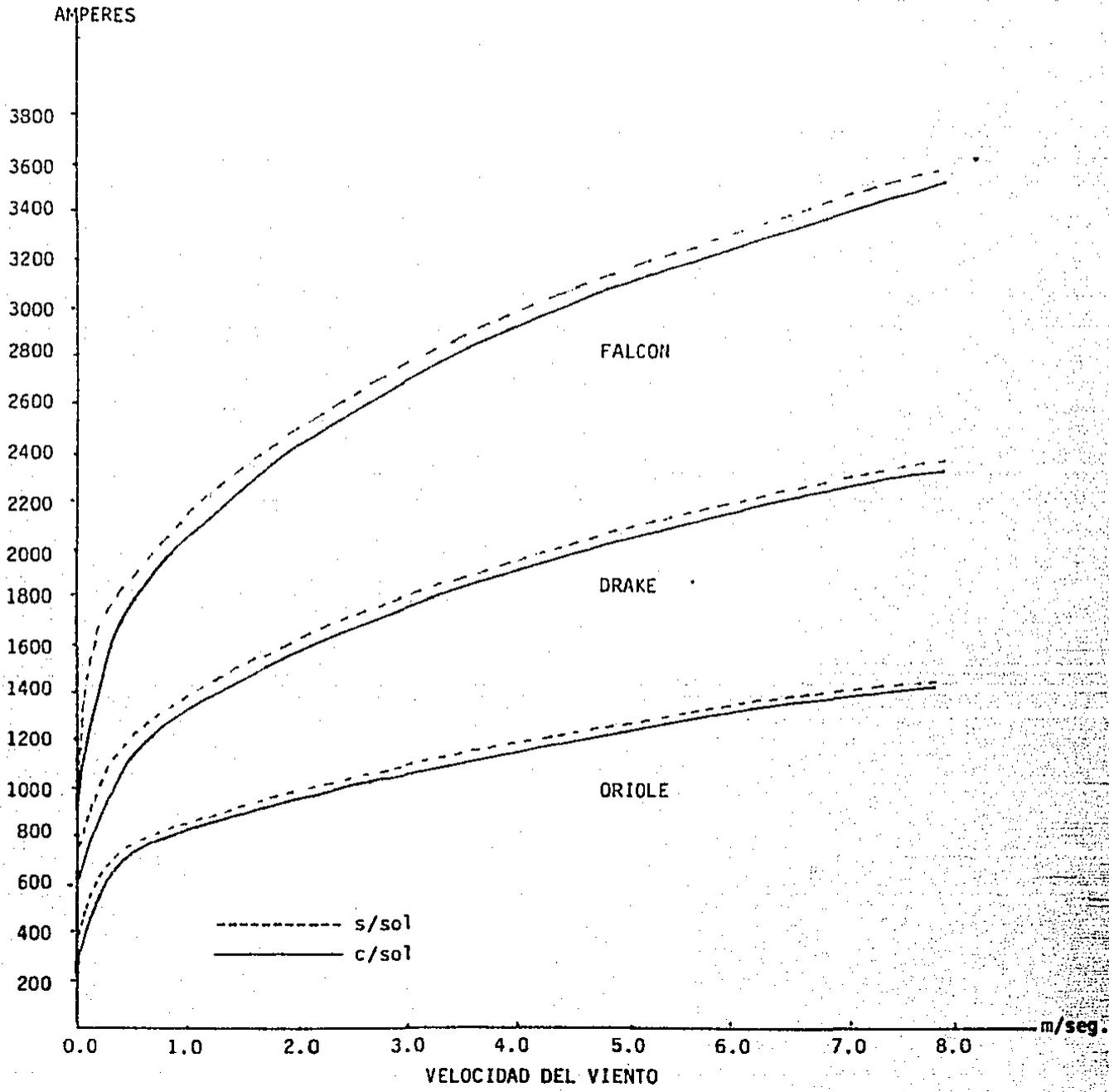
Davis (7) reporta que un conductor cerca de la superficie de la tierra podrá no recibir todos los rayos solares debido al efecto de espaciamiento presente en la atmósfera. El efecto de la ganancia de calor solar se puede observar en las figs. 7 y 8, las cuales se realizaron con el programa de computador descrito en los apéndices. Esta en un conductor es parcialmente determinada por la orientación de la línea, la distancia de la línea del ecuador, la hora del día, el mes del año y las condiciones atmosféricas prevalecientes.

Una línea que tenga una orientación este-oeste, tiene un Azi-



Fig. 8

Efecto de la velocidad del viento en la ampacidad.



muth de 270°, mientras que una línea norte-sur tiene un Azimuth de 180°. En la preparación de las figuras mostradas, se han supuesto las peores condiciones de calor solar encontradas en Tucson, Arizona. Estas son una línea con orientación este-oeste, latitud 32°N y una altitud del sol a las 2 p.m.

La ecuación matemática para calcular la influencia solar sobre una línea de energía es:

$$QS = A \times QSI \times (\text{Sen } \theta) \times \text{APRI} \text{ ----- (12)}$$

donde:

- A = Coeficiente de absorción solar  
 A= 0.23 en conductores nuevos  
 A= 0.95 en conductores viejos
- APRI= Superficie proyectada del conductor en pies = D/12
- QSI = Radiación solar específica (W/PIE<sup>2</sup>)
- $\theta$  = Angulo de incidencia efectiva de los rayos solares
- D = Diámetro del conductor (pulgadas)

El ángulo  $\theta$  de incidencia efectiva de los rayos solares se calcula mediante el álgebra vectorial, para ello se define una terna de ejes coordenados ortogonales. A saber (fig.9):

- a) La dirección norte-sur, positivo al sur
- b) La dirección este-oeste, positivo al este
- c) La vertical del lugar

Para determinar la posición del sol y de la línea de transmisión se definen tres vectores  $\hat{S}$ ,  $\hat{E}$  y  $\hat{V}$  ubicados en los ejes ortogonales que se han definido.

Si bien la fig. 9 indica las posiciones correctas del sol en su trayectoria aparente, para objetivizar con mayor claridad las ecuaciones siguientes serán definidos los vectores posición del sol (I) y posición de la línea (L), recurriendo a la fig.10. A iguales conclusiones se llegaría utilizando la fig. 9.

$$\hat{I} = \hat{S}\text{Cos}H_c\text{Cos}Z_c = \hat{E}\text{Cos}H_c\text{Sen}Z_c + \hat{V}\text{Sen}H_c$$

$$\hat{I} = \hat{S}\text{Cos}Z_1 + \hat{E}\text{Sen}Z_1$$

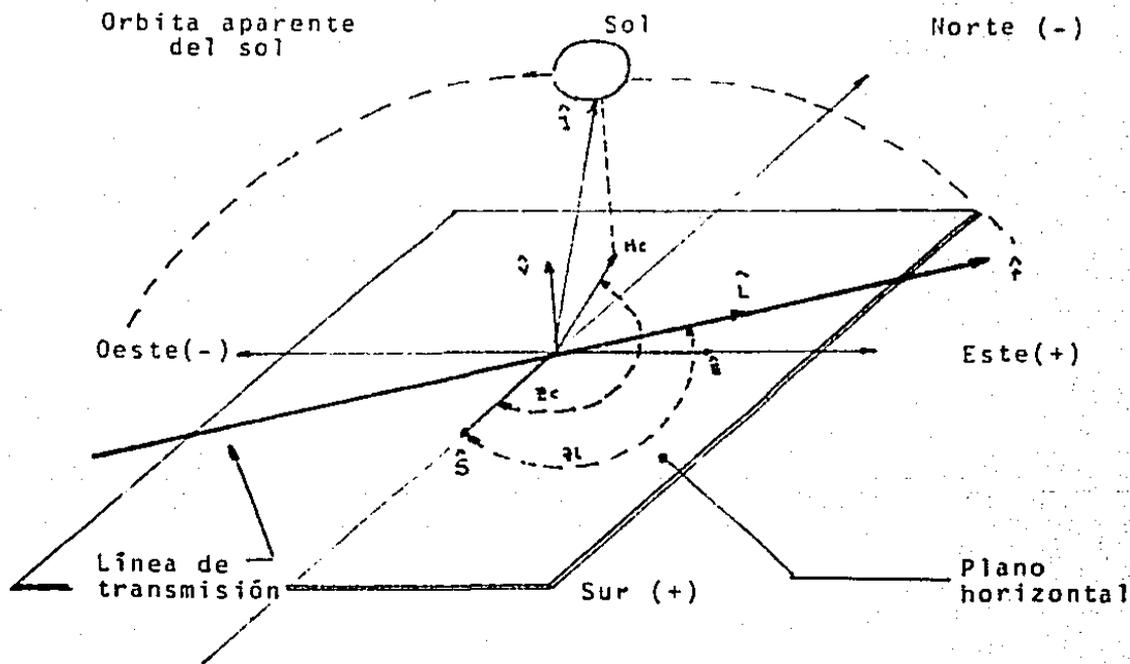


Fig. 9



donde:

Hc = Angulo "Altura del sol" (Grados sexagésimales)

Zc = Azimuth del sol (Grados sexagésimales)

Z<sub>i</sub> = Azimuth de la línea (Grados sexagésimales)

Los valores de Hc y Zc pueden obtenerse de la tabla No. 1 para el Hemisferio Sur y de la No. 2 para el Hemisferio Norte.

TABLA NO. 1

Hora solar local						
Latitud Sur	10 horas		12 horas		14 horas	
	Hc	Zc	Hc	Zc	Hc	Zc
20	62	78	87	0	62	282
25	62	88	88	180	62	272
30	62	98	83	180	62	262
35	61	107	78	180	61	253
40	60	115	73	180	50	245
45	57	122	68	180	57	235
50	54	128	63	180	54	232
60	47	137	53	180	47	223

TABLA NO. 2

Hora solar local						
Latitud Norte	10 horas		12 horas		14 horas	
	Hc	Zc	Hc	Zc	Hc	Zc
20	62	78	87	0	62	282
25	62	88	88	180	62	272
30	62	98	83	180	62	262
35	61	107	78	180	61	252
40	60	115	73	180	60	245
45	57	122	68	180	58	238
50	54	128	63	180	54	232
60	47	137	53	180	47	223
70	40	143	43	180	40	217

QCR la radiación solar específica puede determinarse a partir de la tabla No. 3, QCR cambia con la altura sobre el nivel del mar y puede ser ajustado para este cambio por la relación:

$$QSI = QCR \left\{ 1 + \text{Elev} (3.5 \cdot 10^{-5} - \text{Elev}(10 \cdot 10^{-9})) \right\} \text{-----(16)}$$

donde:

QCR = La radiación solar específica al nivel del mar (Tabla No. 3)

Elev = La altura media del conductor sobre el nivel del mar (pies)

TABLA NO. 3

Calor total recibido por una superficie el nivel del mar normal a los rayos solares.

Altitud solar Hc	Radiación solar específica QCR			
	Atmósfera clara		Atmósfera industrial	
	W/m <sup>2</sup>	W/PIE <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/PIE <sup>2</sup>
5	233.5	21.7	135.6	12.6
10	432.7	40.2	240.0	22.3
15	583.4	54.2	328.3	30.5
20	693.2	64.4	421.9	39.2
25	769.6	71.5	501.6	46.6
30	828.8	77.0	570.5	53.0
35	877.2	81.5	618.9	57.6
40	912.8	84.8	662.0	61.5
45	940.7	87.4	694.2	64.5
50	968.7	90.0	726.5	67.5
60	1000.0	92.9	770.7	71.6
70	1022.6	95.0	809.4	75.2
80	1031.2	95.8	833.1	77.4
90	1037.6	96.4	849.3	78.9

### 7. Ganancia de calor por efecto corona.

Quando el gradiente de voltaje  $E_s$ , en la superficie del conductor excede el gradiente crítico  $E_{cr}$ , el aire en la superficie del conductor es ionizada originando una pulsación de iones por la corriente alterna; la cual ocasiona un aumento de temperatura por fricción o impacto de las moléculas de ai re, que producen una difusión de calor en o cerca de la su-  
perficie.

Este calentamiento por efecto corona depende de la naturaleza de la fuente de voltaje, la densidad relativa del aire  $\delta$ , y la presencia de cualquier forma de precipitación o materia extraña en la superficie del conductor. Solo una pequeña par te del calor generado por efecto corona se difunde en el con ductor aumentando su temperatura.

Para corriente alterna la ganancia de calor por fase encontrada por Clode y Gary (8) para buen tiempo:

$$QI = 8f (C_1 - C_g) V_{cr} (V - V_{cr}) \text{-----} (17)$$

donde:

$C_g$  = Capacitancia a tierra del conductor (o conductores de una fase)

$C_1$  = Capacitancia a tierra de la carga espacial

$V$  = Voltaje del conductor a tierra

$V_{cr}$  = Voltaje crítico corona (inicio)

$$C_1 = 2\pi\epsilon_0 / \ln(2H/r_1) \text{-----} (18)$$

donde:

$H$  = Altura sobre tierra del conductor

$r_1$  = Radio medio de la carga espacial

La ganancia de calor por efecto corona para clima húmedo encontrada por Clode y Gary (9-10), está dada por:

$$Q_1 = K_1 P_N \text{ ----- (19)}$$

donde:

$P_N$  = La ganancia de calor normalizada dada en la fig.11

$K_1$  = Un factor que tiene en cuenta el arreglo de conductores por fase. El valor del factor de superficie  $m$  necesario para determinar el voltaje de inicio del efecto corona, depende del trenzado del conductor, lo mismo que de la presencia en su superficie de raspaduras o incisiones - de materias extrañas como insectos, mugre, polución, -- precipitación y materia vegetal.

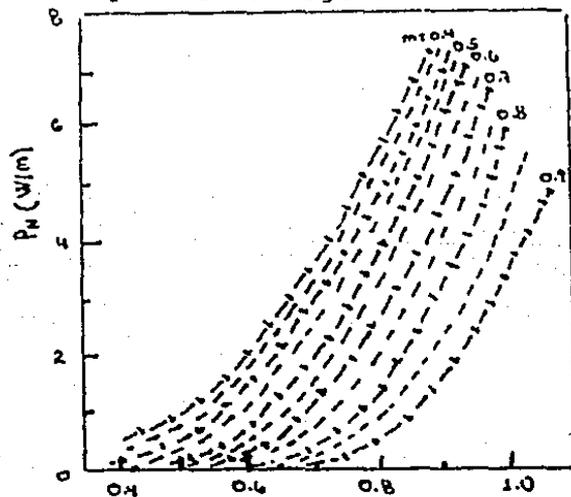


fig.11 Es/Ecr ( $m=1$ )

Pérdidas normalizadas corona AC.

Morgan (4) concluye que el calentamiento por efecto corona es solo significativo con gradientes de voltaje superficial altos, semejantes a los que ocurren durante la lluvia cuando también sucede el enfriamiento por evaporación. El efecto de la difusión térmica en el calentamiento del conductor no está todavía determinado adecuadamente; lo cierto es que el calentamiento por efecto corona solo puede tomarse en cuenta dentro de un marco probabilístico.

### B. Pérdidas de calor por convección.

La cantidad difícil de predecir es la pérdida de calor por convección. Incluso en una calma total hay disipación de calor por un efecto natural conocido por "efecto chimenea", el cual consiste en que bajo condiciones de calma total ocurren velocidades del viento verticales. Por lo tanto muchos investigadores piensan que valores de velocidad cero del viento no son realistas. La convección se complica también por el hecho de que la velocidad del viento puede variar ampliamente a lo largo de la línea.

Las ecuaciones que presentamos adelante para pérdidas de calor por convección se aplican a casos generales, como también a los casos en que la velocidad del viento sea igual a cero.

I. Cuando  $V \neq 0$ , evaluar:

$$QC1 = \left[ 1.01 + 0.371 \left( \frac{DPfV}{U_f} \right)^{0.52} \right] K_f (t_c - t_a) \text{ ----- (20)}$$

(w por pie de conductor)

$$QC2 = 0.1695 \left( \frac{DPfV}{12U_f} \right)^{0.6} K_f (t_c - t_a) \text{ (w por pie de conductor) -- (21)}$$

Tomar el valor mayor entre QC1 y QC2.

II. Cuando  $V = 0$

a) Para el nivel del mar:

$$QC = 0.0072 D^{0.75} (TC - TA)^{0.25} (w \text{ por pie de conductor}) \text{-----} (22)$$

b) Cuando está a una altura mayor del nivel del mar:

$$QC = 0.283 Pf^{1/2} D^{0.75} (TC - TA)^{1.25} (w \text{ por pie de conductor}) \text{--} (23)$$

donde:

D = Diámetro exterior del conductor (pulgadas)

Pf = Densidad del aire (Lbs/Pie<sup>3</sup>)

V = Velocidad del viento normal al conductor (Pies/Hora)

Uf = Viscosidad absoluta del aire (Lbs/h pie)

Kf = Conductividad térmica del aire (W/Pie<sup>2</sup> °C)

TC = Temperatura promedio del conductor (°C)

TA = Temperatura ambiente (°C)

Los valores para Pf, Uf y Kf son aproximados a los de la tabla No. 4, sin embargo las siguientes ecuaciones obtenidas por --- Lutwen (11) se utilizan para aplicaciones por computador.

$$Pf = 21.6578 \text{ Elev}(-3.90696 \cdot 10^{-5})_{tf} \text{ Elev}(1.51218 \cdot 10^{-7}) - 0.996289 \text{ (Lbs/Pie}^3) \text{-----} (24)$$

$$Uf = \frac{tf}{5165.9 + 5.16708 tf} \text{ (Lbs/h Pie)-----} (25)$$

$$Kf = 1.20498 \cdot 10^{-3} + t_f (2.26545 \cdot 10^{-5})(W/Pie^3) \text{-----} (26)$$

donde:

Elev = Altura media del conductor sobre el nivel del mar (pies)  
 $t_f$  = Temperatura de la película de aire ( $^{\circ}K$ )

$$t_f = (Kc + Ka)/2 \text{-----} (^{\circ}K) \text{-----} (27)$$

donde:

$Kc$  = temperatura del conductor ( $^{\circ}K$ )

$Ka$  = Temperatura ambiente ( $^{\circ}K$ )

En los siguientes apartados discutiremos algunos de los parámetros que determinan el cálculo de las pérdidas de calor por convección.

### 8.1 Velocidad del viento (V) y temperatura ambiente ( $t_a$ ).

Las tablas de ampacidades de los conductores ACSR estan basadas generalmente en una temperatura ambiente de  $25^{\circ}C$  ( $77^{\circ}F$ ) y una velocidad del viento de 0.626 m/seg. (1.4 millas/hora); - como se puede observar de las figs. 7 y 8, realizadas con el programa descrito en el apéndice B, la temperatura ambiente y la velocidad del viento tienen un notable efecto en la ampacidad de los conductores.

La tabla No. 5 permite cuantificar varias velocidades del viento. Como se ha dicho, una condición de cero velocidad del viento no es realista, porque bajo condiciones de calma total ocurren velocidades del viento verticales con valores entre 0.122 a 0.183 m/seg. (0.2723-0.409 millas/hora), como resultado del efecto chimenea en un conductor caliente.

Viscosidad , densidad y conductividad térmica del aire

Temperatura				Viscosidad Abs. (Lbf/h pie)		Densidad del aire Pf(Lbf/pie <sup>3</sup> )			Conductividad térmica del aire Kf (W/pie <sup>2</sup> °C)
(°F)	(°C)	(°K)	(°K/100) <sup>4</sup>	Uf	Nivel del mar	5000 pies	10000 pies	15000 pies	
32	0	273	55.55	0.0415	0.0807	0.0671	0.0554	0.0455	0.00739
41	5	273	59.73	0.0421	0.0793	0.0660	0.545	0.0447	0.00750
50	10	283	64.14	0.0427	0.0779	0.0648	0.0535	0.0439	0.00762
59	15	288	68.80	0.0433	0.0765	0.0636	0.0526	0.0431	0.00773
68	20	293	73.70	0.0439	0.0752	0.0626	0.0517	0.0424	0.00784
77	25	298	78.86	0.0444	0.0740	0.0616	0.0508	0.0417	0.00795
86	30	303	84.29	0.0450	0.0728	0.0606	0.0500	0.0411	0.00807
95	35	308	89.99	0.0456	0.0716	0.0596	0.0492	0.0404	0.00818
104	40	313	95.98	0.0461	0.0704	0.0586	0.0484	0.0397	0.00830
113	45	318	102.26	0.0467	0.0693	0.0577	0.0476	0.0391	0.00841
122	50	323	108.85	0.0473	0.0683	0.0568	0.0469	0.0385	0.00852
131	55	328	115.74	0.0478	0.0672	0.0559	0.0462	0.0379	0.00864
140	60	333	122.96	0.0484	0.0661	0.0550	0.0454	0.0373	0.00875
149	65	338	130.52	0.0489	0.0652	0.0542	0.0448	0.0367	0.00886
158	70	343	138.41	0.0494	0.0643	0.0535	0.0442	0.0363	0.00898
167	75	348	146.66	0.0500	0.0634	0.0527	0.0436	0.0358	0.00909
176	80	353	155.27	0.0505	0.0627	0.0522	0.0431	0.0354	0.00921
185	85	358	164.26	0.0510	0.0616	0.0518	0.0423	0.0347	0.00932
194	90	363	173.63	0.0515	0.0608	0.0506	0.0418	0.0343	0.00943
203	95	368	183.40	0.0521	0.0599	0.0498	0.0412	0.0338	0.00952
212	100	373	193.57	0.0526	0.0591	0.0492	0.0406	0.0333	0.00966

\*\*\* Tomado de "Guidelines for the selection and operation of bare ACSR conductors with regard to current-carrying capacity".

H. A. Smolleck & J. P. Sims

Electric Power Systems Research, 5 (1982) 179-190

TABLA NO. 5  
Rango de la velocidad del viento

m/s	milla/hora	
0.45	1	Calma, el humo sube verticalmente.
0.45 - 1.3	1 - 3	La dirección del viento es mostrada por el humo, pero no por las veletas de viento.
1.8 - 3.1	4 - 7	El viento se siente en la cara, susurran las hojas, usualmente las veletas de viento son movidas por él.
3.6 - 5.4	8 - 12	Las hojas y pequeñas ramas están en constante movimiento, el viento extiende banderas ligeras.
5.8 - 8.0	13-18	Se levantan el polvo y el papel, son movidas pequeñas ramas.

La fig. 6 muestra el efecto de la velocidad del viento sobre la temperatura de los conductores.

### 8.2 Efecto de la dirección del viento.

Morgan (17) encontró que cuando un conductor esta detrás de otro, con respecto a la dirección del viento, como en el caso de conductores agrupados por fase, éste experimenta un incremento en la transferencia de calor como resultado de la estela turbulenta generada por el viento del primer conductor. Este incremento es de cerca del 10% en conductores normalmente espaciados y a bajas velocidades del viento. En altas velocidades se incrementa a 30%.

El calor total transferido por convección de un conductor es muy sensible a  $\psi$ , el ángulo de incidencia del viento con res

pecto al eje del conductor. La máxima transferencia de calor ocurre cuando  $\psi = 90^\circ$ , esto es perpendicular al conductor. A medida que  $\psi$  disminuye, la transferencia de calor disminuye, -- hasta cuando fluye paralelo ( $\psi = 0$ ) que es solo el 42% de su valor máximo. Fig. 12

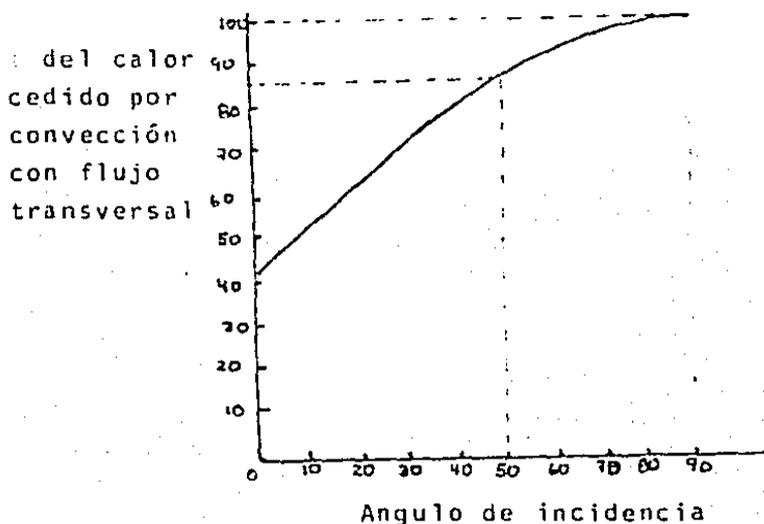


Fig. 12

De la fig. 12 podemos determinar un modelo para el efecto de la dirección del viento linealizado.

Cuando:  $0 \leq \psi \leq 50$

$$\% \text{ QC} = (0.86) \psi + 42 \text{ ----- (28)}$$

Cuando:  $50 < \psi \leq 90$

$$\% \text{ QC} = (0.375) \psi + 68.125 \text{ ----- (29)}$$

Fig. 13

Efecto de la altura en la ampacidad del conductor

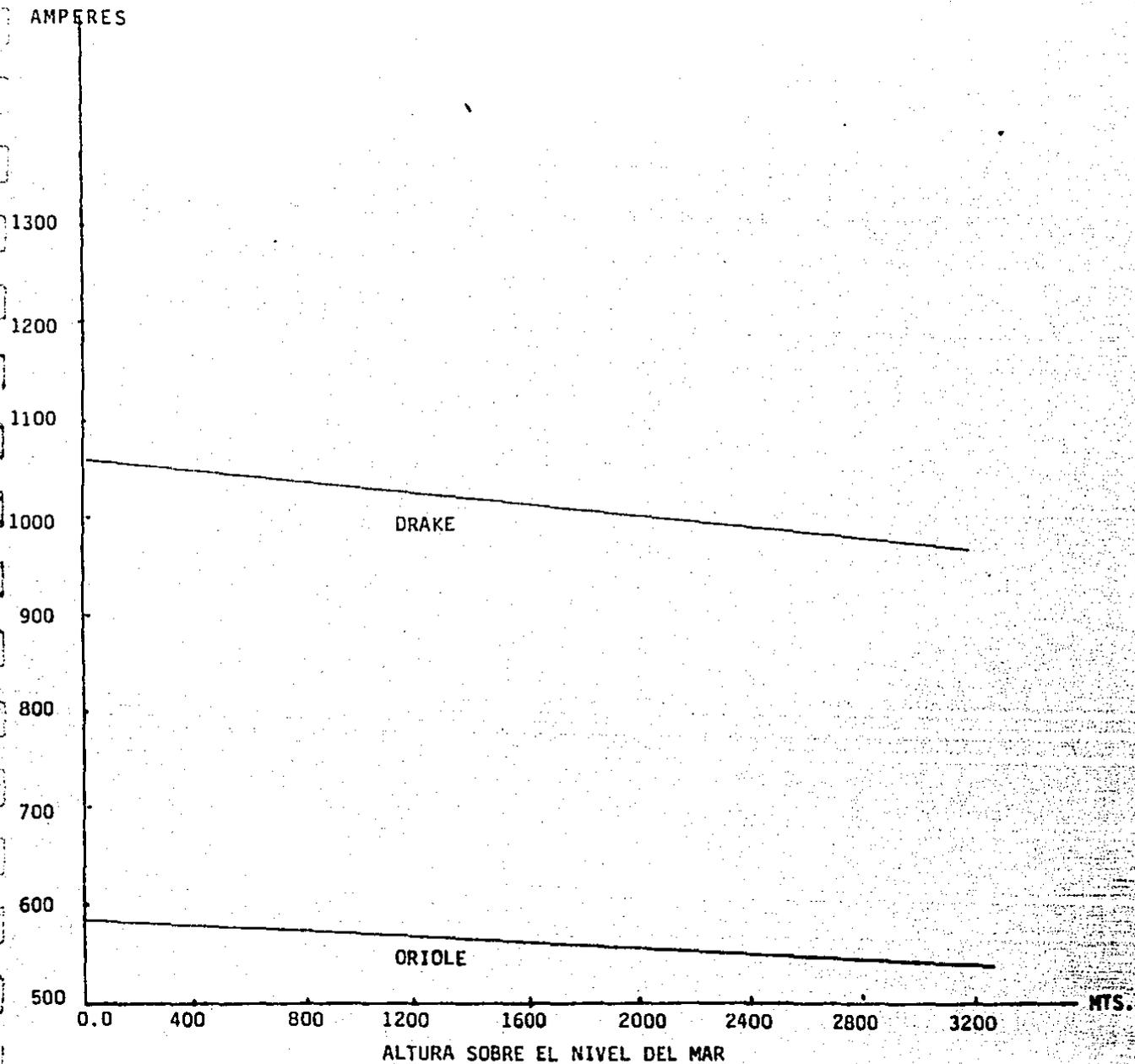


Fig. 14

Efecto de la altura en la ampacidad del conductor

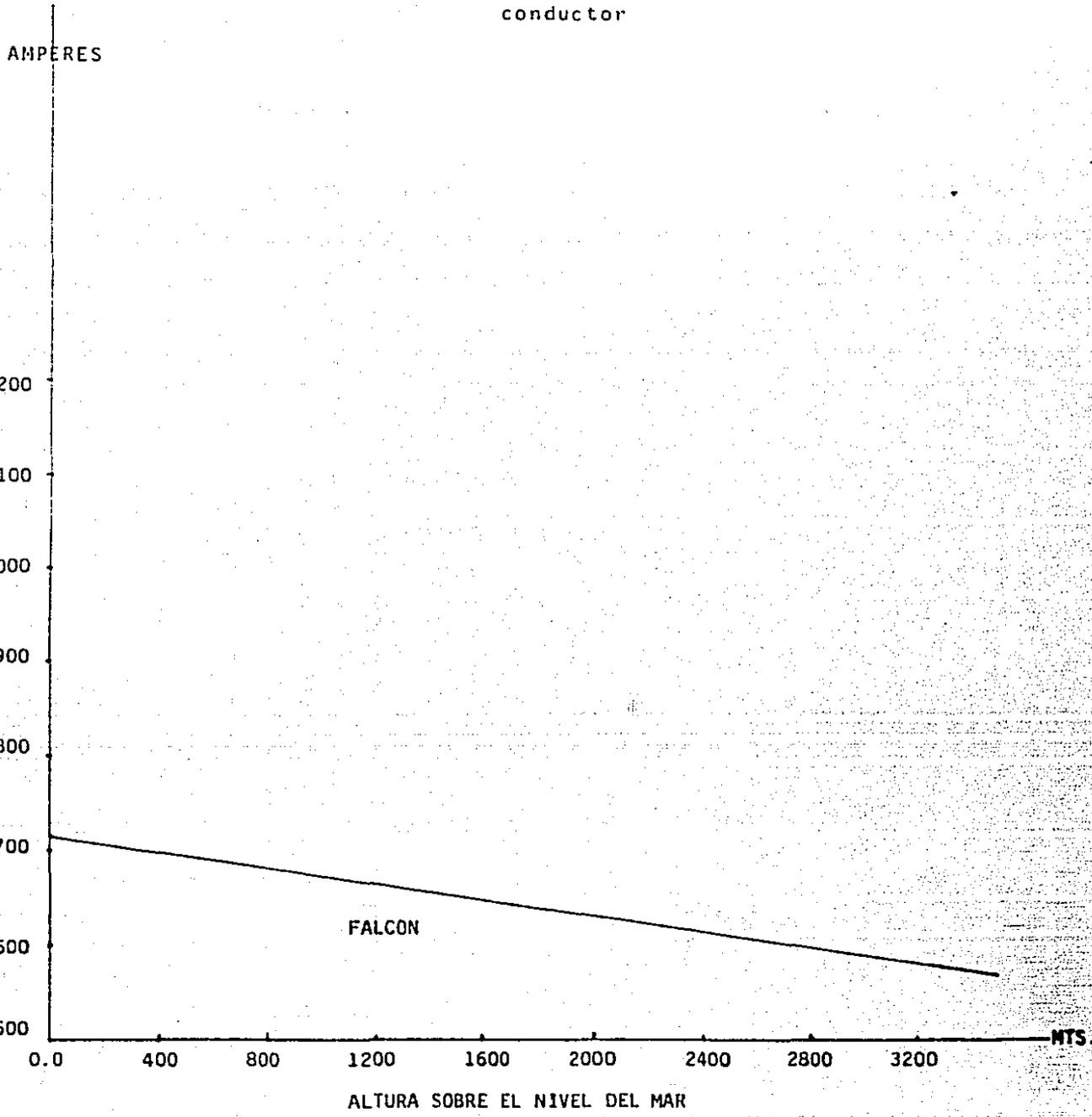
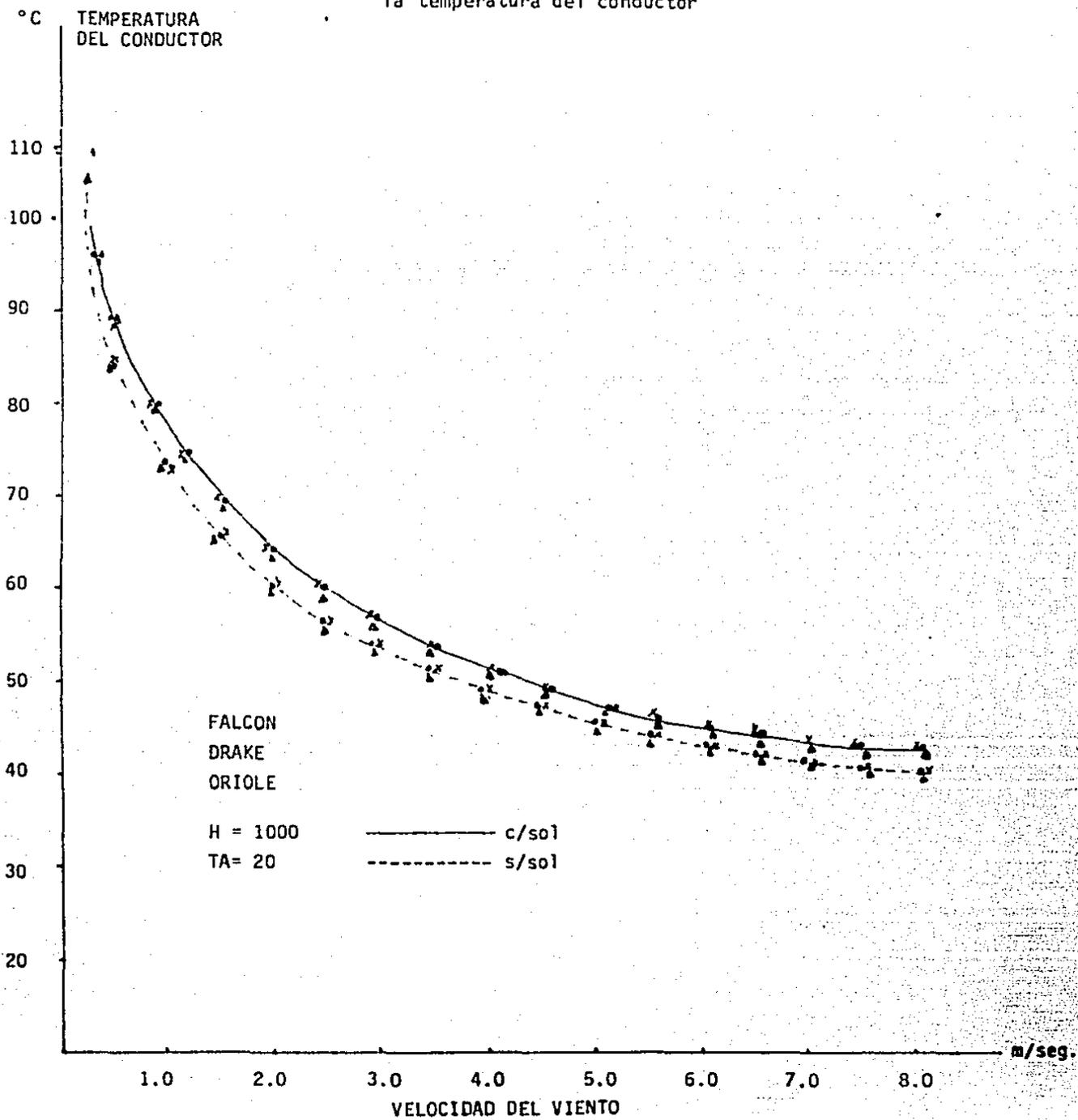


Fig. 14  
 Efecto de la velocidad del viento sobre  
 la temperatura del conductor



Otro factor que afecta la pérdida de calor por convección es el tipo de superficie. En conductores lisos hay una pérdida de calor menor que en los trenzados para un mismo diámetro.

Cuando el número de Reynolds es menor de 3,000 la pérdida de calor por convección forzada, esto es con velocidades del viento mayores a cero, en conductores trenzados es hasta un 10% mayor que en conductores lisos. Para valores de Reynolds mayores de 3,000 ésta diferencia se hace todavía mayor.

Las relaciones presentadas anteriormente son para conductores trenzados tipo ACSR.

A causa de la incertidumbre sobre la velocidad del viento a lo largo de la línea de transmisión, es práctica de los diseñadores considerar la velocidad del viento de 0.608 m/seg. (1.36 millas/hora), con un ángulo de 90°.

### 8.3 Elevación (Elev).

Los efectos de la altura sobre la ampacidad del conductor pueden ser bastante notables debido a los cambios en la densidad del aire  $P_f$ . Por ejemplo  $P_f = 0.074$  al nivel del mar y 25°C (77°F), mientras a 3050 m (10000 pies) y a la misma temperatura  $P_f = 0.0508$ . Si la baja temperatura asociada con la altura se considera, las diferencias de  $P_f$  son todavía mayores. La fig. 13, realizada con el programa descrito en el apéndice B, muestra el efecto de altura en la ampacidad.

### 9. Pérdidas de calor por radiación.

Las pérdidas por radiación pueden obtenerse a partir de la siguiente expresión:

$$QR = 0.138DE \left\{ 0.75 \left[ \left( \frac{k_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{k_a}{100} \right)^4 \right] + 0.25 \left[ \left( \frac{k_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{k_s}{100} \right)^4 \right] \right\} \text{----- (30)}$$

( W por pie de conductor )

donde:

Kc = Temperatura del conductor ( °K )

Ka = Temperatura ambiente ( °K )

Ks = Temperatura de la atmósfera exterior ( °K )

D = Diámetro del conductor a temperatura ambiente (pulgadas)

E = Coeficiente de emisividad de la superficie del conductor

Una característica de ésta fórmula, y la adoptada por la mayoría de los autores, es la inclusión de calor radiado por la atmósfera exterior.

Morgan considera otros factores, tales como la temperatura de la superficie de la tierra y su emisividad (4).

A causa de que las pérdidas por radiación son solo una pequeña parte del total de las pérdidas de calor, se obtiene suficiente exactitud con la siguiente relación:

$$QR = 0.138 \cdot DE \left[ \left( \frac{k_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{k_a}{100} \right)^4 \right] \text{----- (Watts/Pie)----- (31)}$$

### 9.1 Coeficiente de emisividad (E).

Las pérdidas de calor por radiación de un conductor a la atmósfera circundante son función del estado de la superficie del mismo. Dicho estado está descrito por el coeficiente de emisividad E.

Un conductor con una superficie brillante después de ser energizado empieza a oscurecerse y a aumentar la emisividad lle--

gando a alcanzar valores tan altos como 0.98. Un conductor nuevo tiene una emisividad de 0.23. El tiempo necesario para desarrollar una alta emisividad fue estudiado por House et al (12) antes de 1963. Ellos encontraron que los conductores energizados sobre 15 Kv en una atmósfera industrial alcanzaban una emisividad de 0.9 en 8 años. En una zona rural los conductores energizados sobre los 15 Kv alcanzaban una emisividad de 0.9 en cerca de 30 años. Estos resultados pueden ser expresados por la relación empírica:

$$E = 0.23 + \frac{0.7 r}{1.22+r} \text{ ----- (32)}$$

E = 0.23 para conductores nuevos

E = 0.90-0.95 para conductores viejos

donde:

r = número de años

Esta ecuación presenta resultados conservadores para la mayoría de los sitios industriales y no es razonable para conductores en atmósferas rurales. Por lo que para áreas rurales se propone:

$$E = 0.23 + \frac{1.052 r}{1.279+r} \text{ ----- (33)}$$

La ecuación anterior da un valor cercano a 0.7 para 9 a 10 años; que es el valor usado en las figs. 7,8,13 y 14.

A grandes alturas sobre el nivel del mar (3050 mts. o más) se presentan muy pequeñas variaciones sobre el estado de la superficie del conductor o emisividad según lo reportado por House.

Davis (7) reporta que los coeficientes de absorción solar y -- emisividad son iguales, de modo que el valor de 0.7 fue el -- usado como coeficiente de absorción solar en las gráficas ya mencionadas.

#### 10. Enfriamiento por evaporación.

Cuando el aire presenta vapor de agua, éste fluye sobre el -- conductor teniendo un efecto despreciable sobre su temperatura, lo mismo ocurre cuando una parte de la línea está mojada y el resto permanece seca.

Si la superficie del conductor está mojada ocurre un intercambio de calor entre la superficie y el medio a causa de la evaporación. Las relaciones para su cálculo son presentadas por Morgan (4), y aunque el enfriamiento por evaporación es importante, solo debe tomarse en cuenta dentro de una base probabilística.

#### 11. Distribución radial de temperatura.

La importancia de la distribución de temperatura dentro del -- conductor es a menudo pasada por alto y se debe tener en cuenta lo siguiente:

- a) La transferencia de calor al medio está determinada por la temperatura de la superficie del conductor  $T_s$ .
- b) La resistencia depende de la temperatura media del conductor  $T_c$ .
- c) La flecha del conductor está influenciada por la temperatu

ra del núcleo de acero cuando éste esta presente.

La diferencia de temperatura radial es usualmente despreciable en conductores sólidos. En los conductores trenzados, la conducción radial de calor debe tomar lugar a través de los contactos entre los hilos trenzados.

La consecuente restricción en las trayectorias de flujo de calor radial causa que la conductividad térmica  $\lambda$  se reduzca en una centésima parte de la de los conductores sólidos. Según Morgan (4) esto es entre 1.3 y 4.7 Watts/Metro °C, para conductores trenzados de cobre, aluminio, aleaciones de aluminio y ACSR.

$\lambda$  se incrementa ligeramente con el aumento de la tensión en el conductor ocasionado por un contacto mejor entre los diferentes hilos. La corrosión causa una disminución de  $\lambda$ . Morgan sugiere usar el valor de 4 W/M °K para todos los casos.

La distribución radial de temperatura es también afectada por la distorsión de la distribución de corriente a causa del efecto de proximidad y piel, lo mismo que el flujo magnético longitudinal en el núcleo de acero.

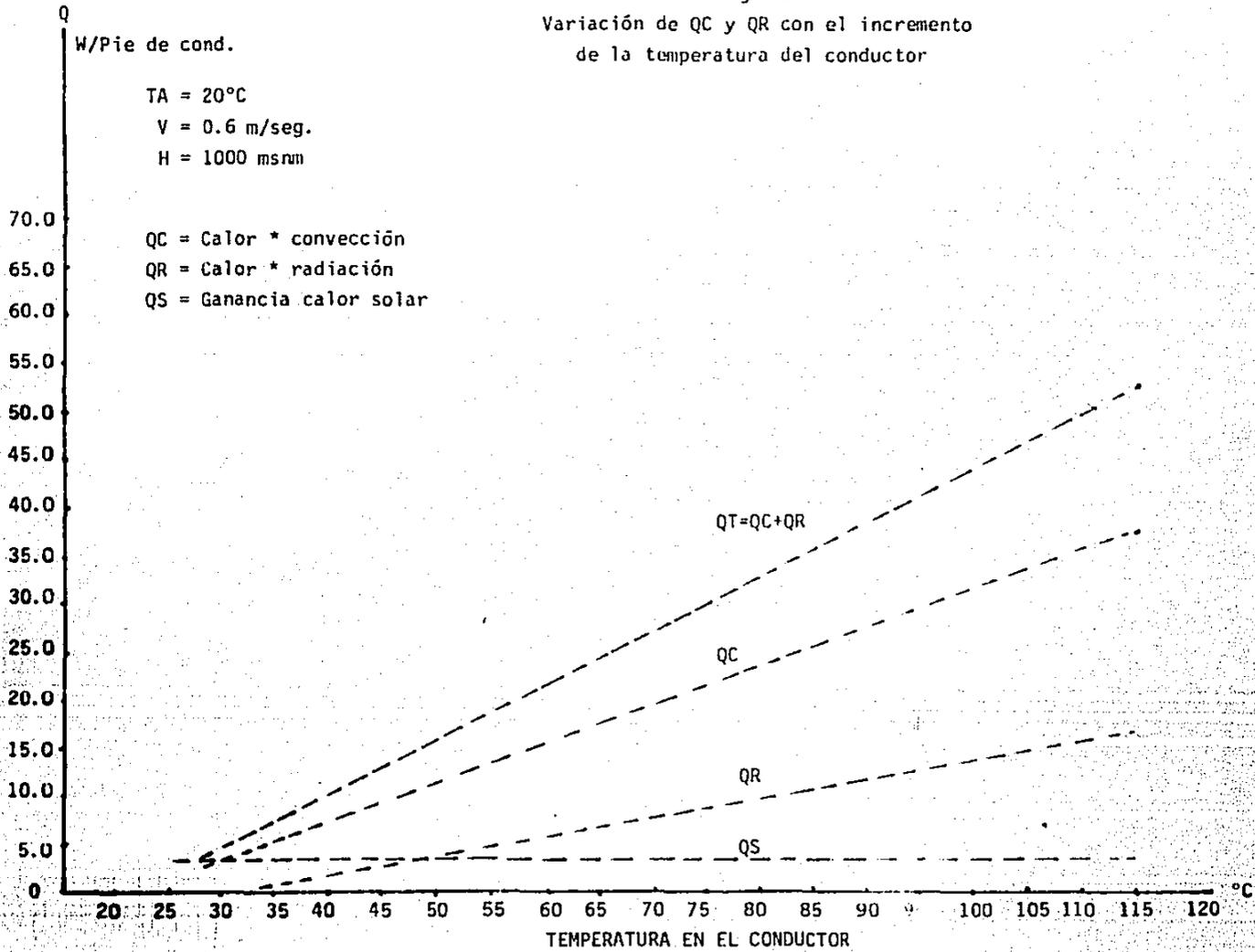
En el cálculo de las ecuaciones de balance térmico se tomó la temperatura media en el conductor TC, esto es, se asume que el conductor es isotérmico, lo cual no intrduce mayores errores en el cálculo de la ampacidad, explican W.Z. Black, S.S. Collins y J.F. Hall (10).

## 12. Efecto de la lluvia en el conductor.

Como se discutió en la sección de enfriamiento por evaporación,

Fig. 15

Variación de QC y QR con el incremento de la temperatura del conductor



la presencia de lluvia a lo largo de la línea incrementa considerablemente la transferencia de calor, debido a la evaporación en la superficie del conductor. Este enfriamiento es ocasionado por la transferencia de masa y es evaluado por Morgan (4) usando la similaridad entre las ecuaciones de transferencia de calor y las de transferencia de masa.

Esta condición favorece el incremento de la ampacidad en la línea durante períodos de sobrecarga. En los modelos dinámicos la presencia de lluvia en los claros críticos favorece un ligero aumento en la capacidad de la línea.

### 13. Efecto de los conductores agrupados en la capacidad de corriente.

La práctica de agrupar conductores de una misma fase se ha ido extendiendo a medida que las Compañías utilizan líneas de alto y extra alto voltaje. Por lo tanto, es importante determinar como éste agrupamiento afecta la temperatura del conductor y su ampacidad.

Hazan (13) realizó pruebas para determinar los cambios en la temperatura y ampacidad en los conductores agrupados.

En la fig. 16 se pueden resumir los resultados, En la fig. 16-A se muestra para 16 pulgadas de separación que:

- a) Cuando el segundo conductor no lleva corriente, pero actúa solo como blindaje, los efectos de convección del viento fueron reducidos en el conductor de prueba, causando que la temperatura se elevara ligeramente.
- b) Cuando el segundo conductor lleva la misma corriente que -

el conductor de prueba, una pequeña cantidad de calor fue transmitida a éste, causándole un incremento adicional de temperatura solo perceptible a altas corrientes.

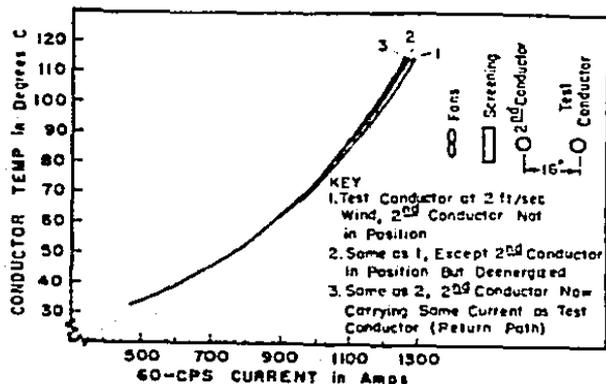


Fig. 16-A

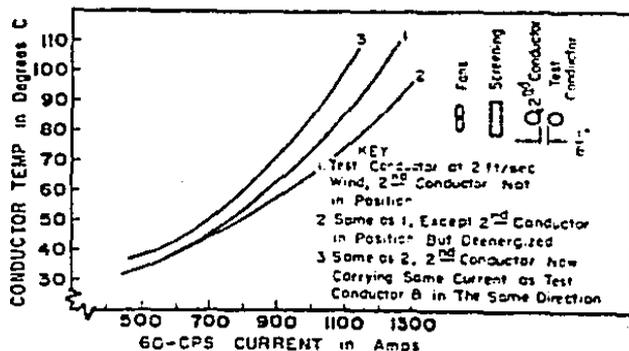


Fig. 16-B

Fig. 16.- Características de la temperatura en conductores agrupados.

La fig. 16B muestra el efecto del segundo conductor para una separación de 1/8 de pulgada, observándose que:

- Cuando el segundo conductor no lleva corriente, éste absorbe calor del conductor de prueba, resultando en una temperatura más baja del conductor de prueba.
- Cuando el segundo conductor está energizado, el calor disipado causa que el conductor de prueba alcance una temperatura mucho mayor que la usual.

En conclusión, se puede observar que para conductores agrupados la disminución de su ampacidad por efecto del agrupamiento es de menos del 1% de la capacidad nominal y puede despreciarse para fines prácticos.

#### 14. Máxima temperatura en el conductor. (tc)

La máxima temperatura permisible en el conductor es el límite térmico del conductor, y debe determinarse después de revisar las temperaturas de diseño para flechas, pérdida de fuerza mecánica y capacidades térmicas o limitaciones de los herrajes de la línea. Como se ha discutido, las variaciones en la temperatura del conductor afectan la ampacidad considerablemente.

La especificación de la máxima temperatura permisible en el conductor debe ser el primer paso para determinar la máxima corriente en el conductor. Si no hay limitaciones debido a flechas, herrajes, etc., una temperatura de 93°C (200°F) se considera como un límite térmico seguro para operaciones normales en conductores de aluminio trenzado y ACSR.

#### 15. Determinación de la ampacidad.

Una vez que la temperatura máxima en el conductor ha sido establecida, las ecuaciones de balance térmico presentadas anteriormente se aplican para determinar la capacidad de transporte de corriente en forma continua para un conjunto de condiciones climáticas.

Estas ecuaciones también se utilizan para determinar la capacidad de transporte con condiciones locales del clima, ganancia de calor solar, elevación y emisividad para una sección particular de la línea o para adoptar diversas ampacidades por épocas del año o estaciones en líneas existentes. Los resultados de estos estudios podrán aplazar en muchos casos el cambio de calibres o reconstrucción de una línea.

"The Aluminum Association" afirma correctamente que no hay nada mágico en las tablas de ampacidad publicadas por Alcoa, -- Alcan, Kaise, Noranda, Anaconda o Reynolds. Estas tablas tienen que ser vistas bajo la luz de los parámetros que gobiernan éstos cálculos.

Esto coincide con que la ampacidad de una línea de transmisión depende de factores ambientales y demandas operacionales asociadas con una línea en particular.

16. Experiencia en operación, temperatura del conductor: medidas VS. calculadas.

A través de los años algunos investigadores han medido la temperatura de los conductores en laboratorios y en el campo con el objeto de verificar las ecuaciones de pérdida de calor.

Baltimore Gas & Electric Company (14) ha hecho mediciones en campo que confirmaron las temperaturas predichas en casi todos los casos. Además encontraron que la temperatura del conductor varía en un rango muy amplio debido a los cambios en las condiciones atmosféricas. Por ejemplo, en los tres meses del período de verano, la temperatura varió de 18 a 101°C, -- con una carga constante. La rapidez de los cambios de temperatura están ligados a la velocidad de las variaciones del clima. Un resultado importante de B.G. & E. es que la temperatura máxima calculada por el método presentado, raramente son excedidas por el conductor durante su vida útil.

## BIBLIOGRAFIA

- ( 1 ) J.R. Harvey  
"Effect of elevated temperature operation on the strength of aluminum conductors".  
IEEE Trans. pas 91 (1972) pp 1769-1772
- ( 2 ) W.B. Howitt and T.E. Simpkins  
"Effect of elevated temperature on the performance of conductor accessories".  
IEEE Paper C-72 pp 188-186 (1971)
- ( 3 ) D.G. Parvin et al  
"Investigation of transmission and distribution system load capabilities at Dallas power & light Company".  
IEEE Trans. pas 99 pp 512-521 (1980)
- ( 4 ) Vicent T. Morgan  
"The current carrying capacities of overhead-line conductor".  
IEEE (1978) Power Engineering Society  
Summer meeting, Los Angeles, Ca. U.S.A. July 1978
- ( 5 ) H.B. Dwight  
"Skin effect and proximity effect in tubular conductors".  
AIEE Trans. vol 41 pp 203-209 (1922)
- ( 6 ) W. A. Lewis & P.D. Tuttle  
"The resistance and reactance of aluminum conductors, steel reinforced".  
AIEE paper 58-1029 (1958)

- ( 7 ) M.W. Davis  
"Nomographic computation of the ampacity rating of aerial-conductors".  
IEEE Trans. pas 89 pp 387-399 (1970)
- ( 8 ) J.J. Clade, C.H. Gary and C.A. Lefaure  
"Calculation of corona losses beyond the critical gradient in alternating voltage".  
IEEE Trans. power apparatus and systems  
Vol. pas 88 pp 695-703 (1969)
- ( 9 ) J.J. Clade & C.H. Gary  
"Predetermination of corona losses under rain: experimental interpreting & checking of a method to calibrate corona losses".  
IEEE Trans. Power apparatus and systems  
Vol. pas 89 pp 853-860 May/June 1970
- (10) J.J. Clade & C.H. Gary  
"Predetermination of corona losses under rain: influence of rain intensity and utilization of a universal chart".  
IEEE Trans. Power apparatus and systems  
Vol. pas 89 pp 1179-1185 July/August 1970
- (11) T.E. Lutwen  
"Economize by customizing conductor thermal ratings".  
Paper presented at the Pacific Coast Electrical Association's annual conference of the engineering and operational section.  
San Francisco, Ca. March, 1976

- (12) H.E. House et al  
"Emissivity of weathered conductor after service in rural and industrial environments".  
IEEE paper 62-1026 (1963)
- (13) E. Hazan  
"Extra-high-voltage single and twin bundle conductors: Electrical character".  
IEEE Trans. pas 78 pp 1425-1432 (1959)
- (14) D.G. Pavin et al  
"Investigation of transmission and distribution system -- load capabilities at Dallas Power & Light Company".  
IEEE Trans. pas 99 pp 512-521 (1980)
- (15) H.E. House and P.D. Tuttle  
"Current carrying capacity of ACSR".  
AIEE Trans. pp 1169-1177 febrero, 1959
- (16) American Society for Testing & Materials (ASTM)  
Normas: ASTM: B-230, B-232, B-341, B-354, B-498, B-606
- (17) Vicent T. Morgan  
"The current-carrying capacity of bare overhead conductors".  
Electrical Eng. Trans. pp 63-72 March, 1968
- (18) W.Z. Black, Stuart S. Collins, J.F. Hall  
"Theoretical model for temperature gradients within bare overhead conductors".  
IEEE Trans. on power delivery  
Vol. 3 N°2 April 1988 pp 703-713

## CAPITULO III

CAPACIDAD DE CONDUCCION BAJO CONDICIONES DE SOBRECARGA1. Introducción.

Las ecuaciones de balance térmico presentadas en el capítulo anterior se usan para determinar la capacidad en estado estable, es decir, durante períodos largos de tiempo. Pero con el incremento de la complejidad de los sistemas interconectados, se presentan corrientes de sobrecarga durante y después de disturbios del sistema que pueden alcanzar valores que exceden la capacidad de carga continua de la línea. Esta condición, sin embargo, podrá existir tal vez por solo media hora o por el tiempo necesario para que la generación se incremente o se realicen las operaciones de maniobra necesarias.

Cuando un incremento de corriente se presenta bruscamente, la temperatura del conductor no aumenta inmediatamente, pero si se incrementa gradualmente a lo largo de una curva que depende de la magnitud de la corriente, las propiedades del conductor y las condiciones ambientales. Las limitaciones de flechas y pérdida de fuerza mecánica se deben mantener, aún en condiciones de emergencia; la temperatura al final del período de sobrecarga se debe restringir a su valor máximo de diseño o límite térmico.

2. Cálculo de temperatura en condiciones de sobrecarga.

En el cálculo de las capacidades de corto circuito se asume que no hay transferencia de calor al medio ambiente durante el corto período en cuestión (1). A su vez, en la determinación de la capacidad continua de corriente se asume que el -

calor ganado por el conductor es igual al transferido al medio por éste. Sin embargo, ninguna de las suposiciones anteriores es válida para condiciones térmicas transitorias durante períodos de sobrecarga cortos; cuando parte del calor generado es disipado, y el resto es almacenado en el conductor, por lo tanto éste aumenta su temperatura.

Varias aproximaciones a este problema fueron investigadas -- por Davison et al (2). Ellos concluyeron que durante sobrecargas cortas se aplica la siguiente ecuación de balance térmico:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Calor almacenado} \\ \text{en el conductor} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Calor ganado por} \\ I^2R \text{ y radiación} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{Pérdidas de calor por} \\ \text{radiación y convección} \\ \text{solar} \end{array} \right]$$

$$Pdt_c = \left[ (I^2RA + QS) - (QR + QC) \right] \text{-----} (34)$$

donde:

P = Capacidad térmica del conductor (J/PIE °C)

tc = Temperatura instantánea en el conductor (°C)

I = Corriente en el conductor (Amperes)

QS = Ganancia de calor solar (W/PIE)

QR = Pérdidas de calor por radiación (W/PIE)

QC = Pérdidas de calor por convección (W/PIE)

RA = Resistencia del conductor a 60Hz a temperatura conocida-TA.

Donde la capacidad térmica de los conductores ACSR se expresa por:

$$P = 4.186 (453.6)(C_1W_1 + C_2W_2) \text{ (J/PIE } ^\circ\text{C)} \text{-----} (35)$$

donde:

$C_1$  = Capacidad térmica específica del aluminio (Cal/g °C)

$W_1$  = Peso del aluminio (Lbs/Pie)

$C_2$  = Capacidad térmica específica del acero (Cal/g °C)

$W_2$  = Peso del acero (Lbs/Pie)

Debe hacerse notar que las temperaturas obtenidas por éste método son ligeramente mayores que las obtenidas por pruebas de laboratorio (3).

Los valores de R, QS, QR y QC se calculan de acuerdo a las expresiones del capítulo anterior.

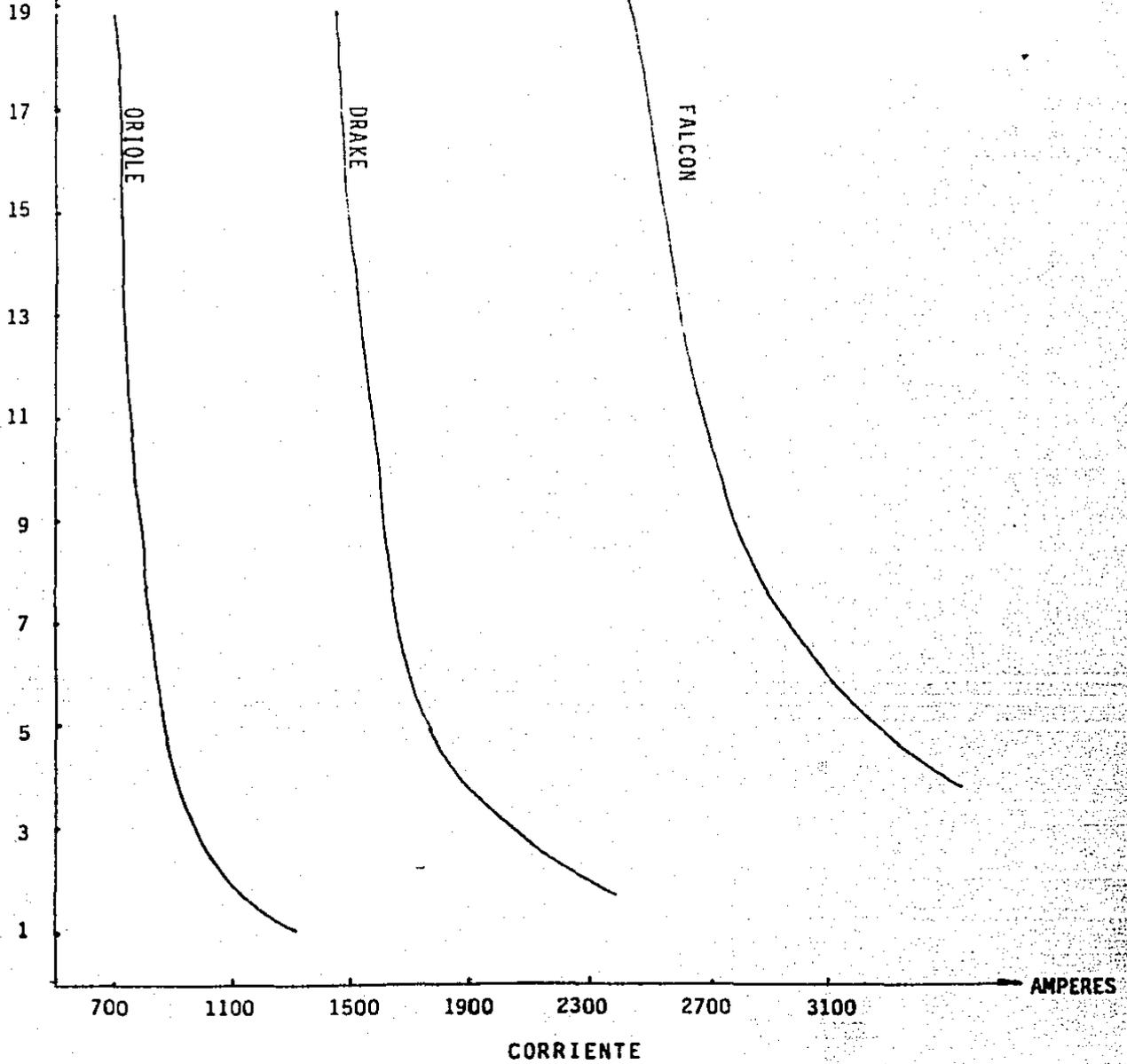
El método anterior se utilizó para realizar diversos análisis de sensibilidad en periodos cortos de los conductores Oriole -- (336.4 MCM), Drake (795 MCM) y Falcon (1890 MCM), los resultados obtenidos son mostrados en las figuras 17, 18 y 19.

La fig.(17) muestra el tiempo para alcanzar una temperatura de 120°C de sobrecarga por estos conductores, observándose que los conductores estabilizan su temperatura bajo condiciones de sobrecarga en periodos que varían desde varios minutos a una hora, dependiendo de las características del conductor.

La fig.(18) muestra el efecto de la velocidad del viento en la capacidad de corriente de sobrecarga, ya que esta velocidad permite aumentar o disminuir significativamente la capacidad de corriente que el conductor puede soportar bajo condiciones de sobrecarga. Sin embargo, este parámetro debe manejarse con cuidado, ya que la velocidad del viento durante una emergencia es muy difícil de predecir.

La fig.(19) muestra el efecto de la temperatura inicial en el conductor, observándose que entre menor sea ésta mayor será -

Fig. 17

TIEMPO  
(MINUTOS)Tiempo en alcanzar una temperatura  
de 120°C para diversas corrientes $t_0 = 93^\circ\text{C}$   
 $t_f = 120^\circ\text{C}$ 

Efecto de la velocidad del viento  
en la corriente de sobrecarga

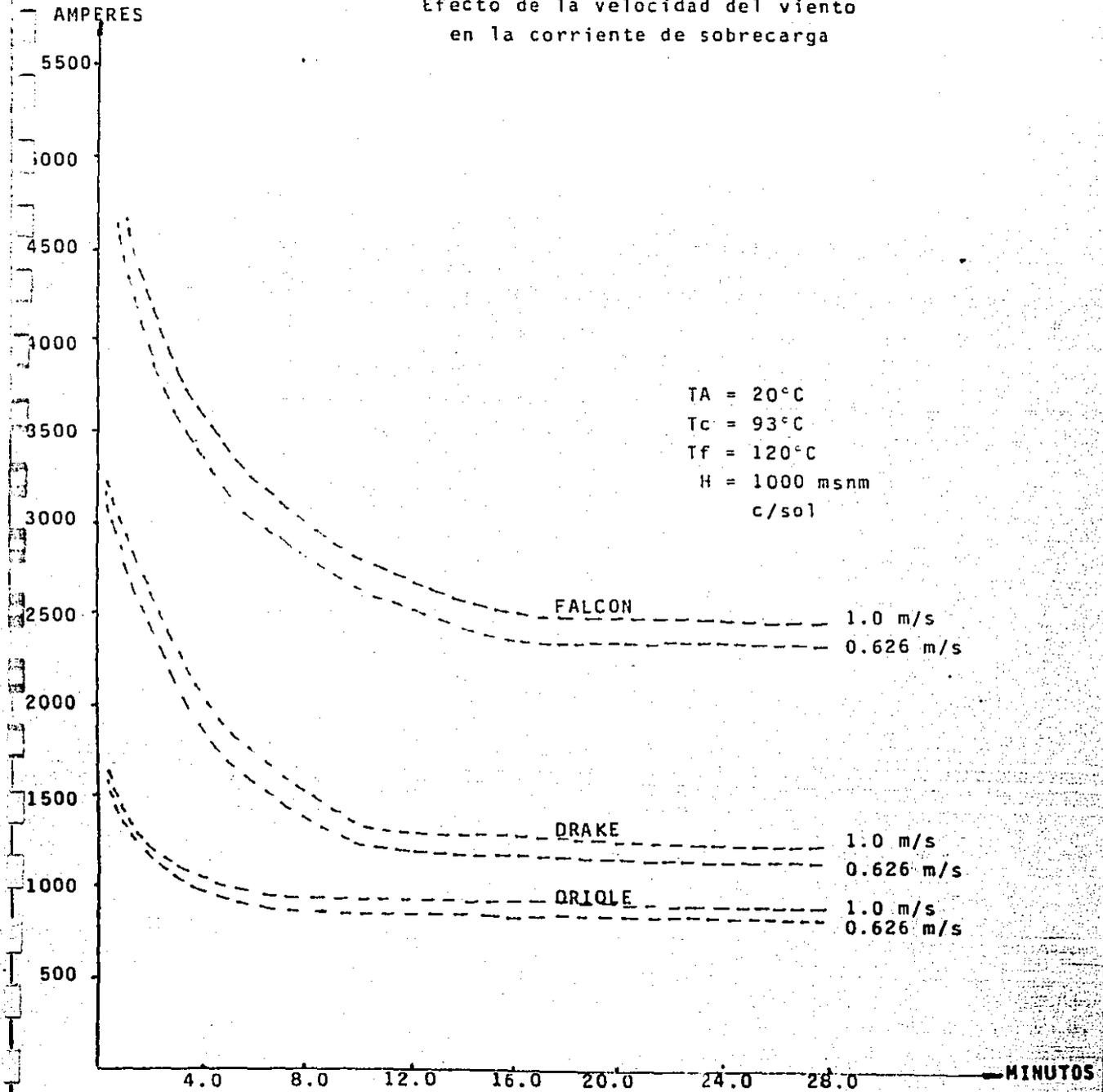
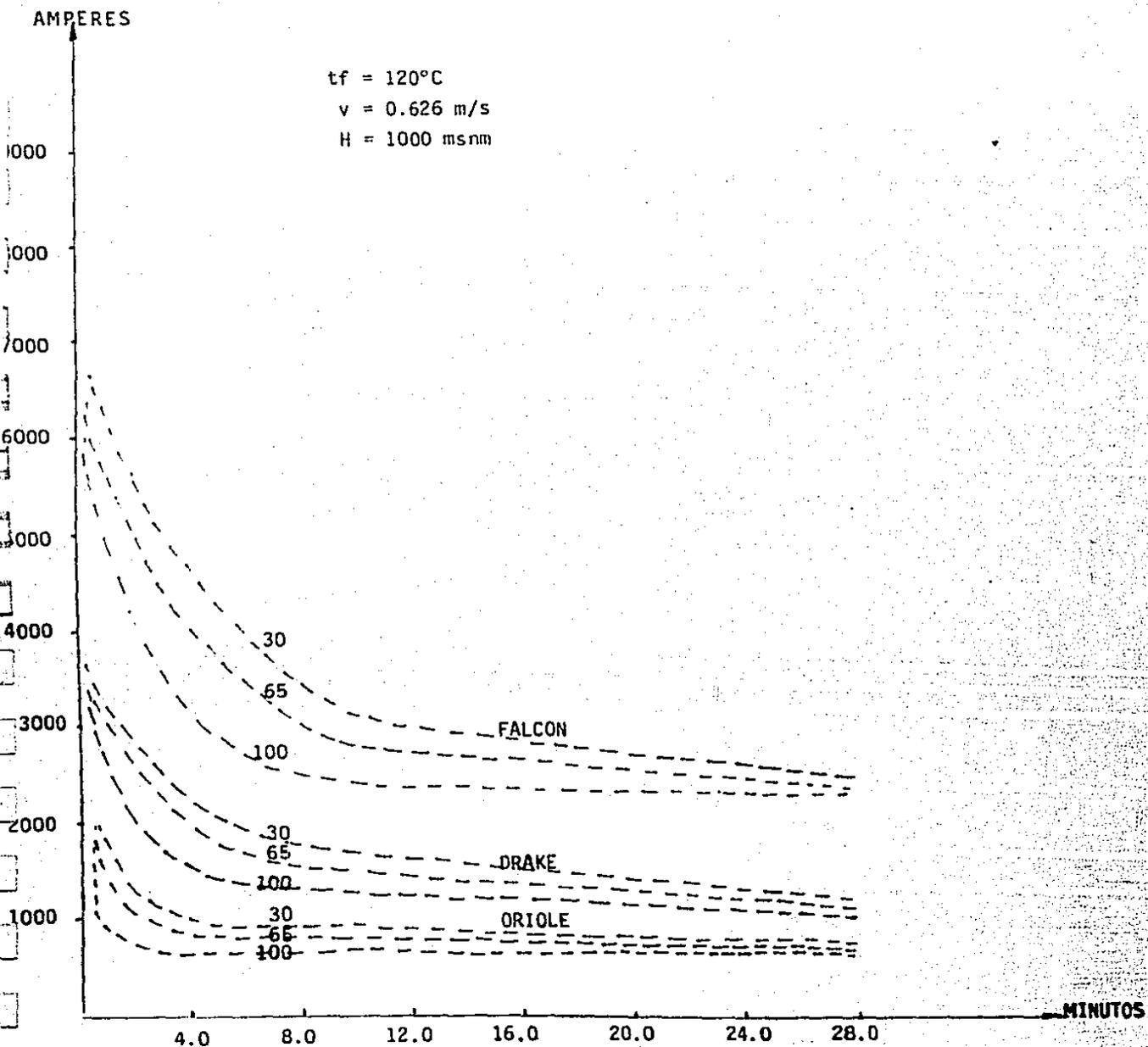


Fig. 19

Efecto de la temperatura inicial en el conductor



El tiempo del conductor por alcanzar la temperatura final de sobrecarga. Nos muestra además el incremento de temperatura durante los periodos de sobrecarga. Se debe notar que los valores de 100°C como temperatura inicial no son valores prácticos, porque en ese caso el conductor ya estaría operando sobrecargado.

La fig.(20) muestra el efecto del porcentaje de sobrecarga sobre la temperatura del conductor, reafirmando lo observado anteriormente sobre la estabilización de los conductores bajo condiciones de sobrecarga.

a) Los tiempos de estabilización son mayores para conductores de mayor sección.

b) A menores sobrecargas menor tiempo de estabilización.

### 3. Cálculo de pérdida de fuerza mecánica.

La pérdida de fuerza mecánica es causada por la operación a altas temperaturas. Es uno de los tres factores primarios que deben considerarse cuando se especifique la capacidad térmica de una línea de transmisión.

Harvey (4) presenta los resultados de un programa de pruebas de Alcoa que resultó en un modelo matemático que puede usarse directamente para calcular la pérdida de fuerza mecánica de un conductor sobre el rango de interés para la mayoría de empresas electrificadoras. Este puede representarse por una simple función parabólica. Los problemas que involucra la pérdida de fuerza mecánica debido a la operación a elevadas temperaturas no están sujetos a una solución exacta. Los modelos matemáticos tienen como objetivo usarse como una guía-

en la determinación aproximada del deterioro causado por las altas temperaturas sobre la fuerza del conductor. Sin embargo, la precisión de los métodos esta hecha pensando en exceder la que la temperatura existente pudiera lograr en la línea.

El aluminio no pierde fuerza mecánica o se recoce muy rápidamente hasta los 90°C (200°F); cualquier pérdida de fuerza mecánica depende de: la temperatura y el tiempo que el conductor este bajo la misma.

Harvey presenta las siguientes ecuaciones para conductores - ACSR:

$$RS = RSEC \frac{STREC}{STRT} + 109 \frac{STR ST}{STRT} \text{ ----- (36)}$$

donde:

RS = Fuerza restante como porcentaje de la inicial.  
 STREC= Fuerza inicial calculada del aluminio EC trenzado(Lbf)  
 STRT = Fuerza inicial calculada del conductor (Lbf)  
 STRST= Fuerza inicial calculada del acero (Lbf)

$$RSEC = (-0.24tc+134) T^{-(0.001tc-0.095)0.1/d} \text{ ----- (37)}$$

donde:

tc = Temperatura del conductor (°C)  
 T = Tiempo transcurrido en horas  
 d = Diámetro del aluminio trenzado tipo EC (pulgadas)

Fig. 20

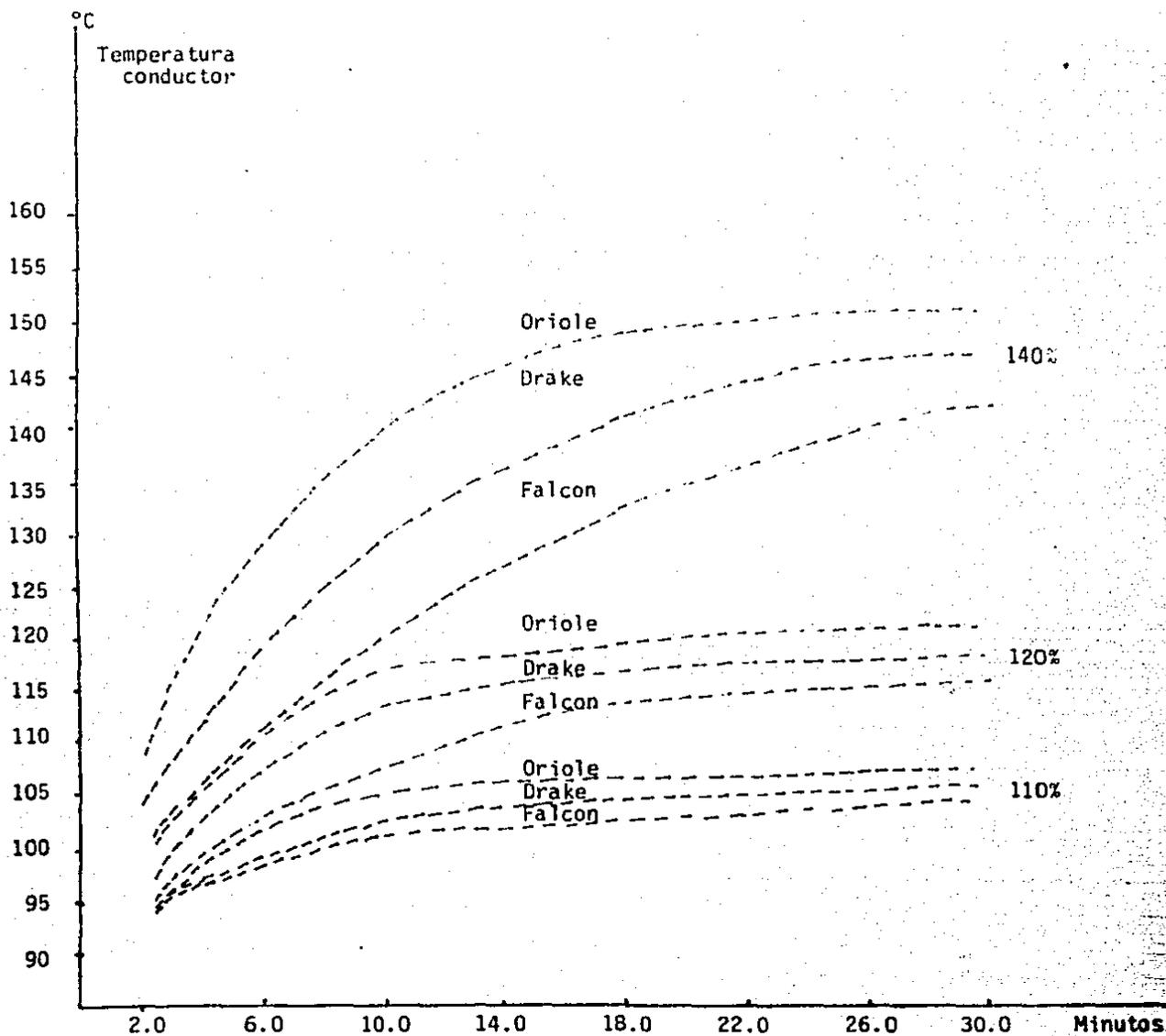
Efecto del porcentaje de sobrecarga en la temperatura final del conductor.

TA = 20°C

H = 1000 msnm

To = 93°C

V = 0.626 m/s



Nota: Si  $(-0.24tc+134)$  es mayor que 100 use 100.

El resto de la fuerza de los conductores ACSR como una función de la temperatura del conductor y el tiempo se ilustra en la fig.(21), para los siguientes conductores ACSR:

Oriole (336.4 MCM)

Drake (795.0 MCM)

Falcon (1590.0 MCM)

De esta se puede observar, que el porcentaje de pérdida mecánica para conductores ACSR está relacionado con los porcentajes de fuerza que suministra el acero y el aluminio al conductor y no con el calibre de éste.

La mayor parte de la pérdida de la fuerza mecánica a temperaturas mayores de  $150^{\circ}\text{C}$  ( $302^{\circ}\text{F}$ ) ocurre en las primeras 400 horas. A temperaturas mayores de  $100^{\circ}\text{C}$  y menores de  $150^{\circ}\text{C}$  ( $302^{\circ}\text{F}$ ) la variación en el porcentaje de pérdida mecánica es menor en las primeras 400 horas; tal y como se puede observar en la fig(21).

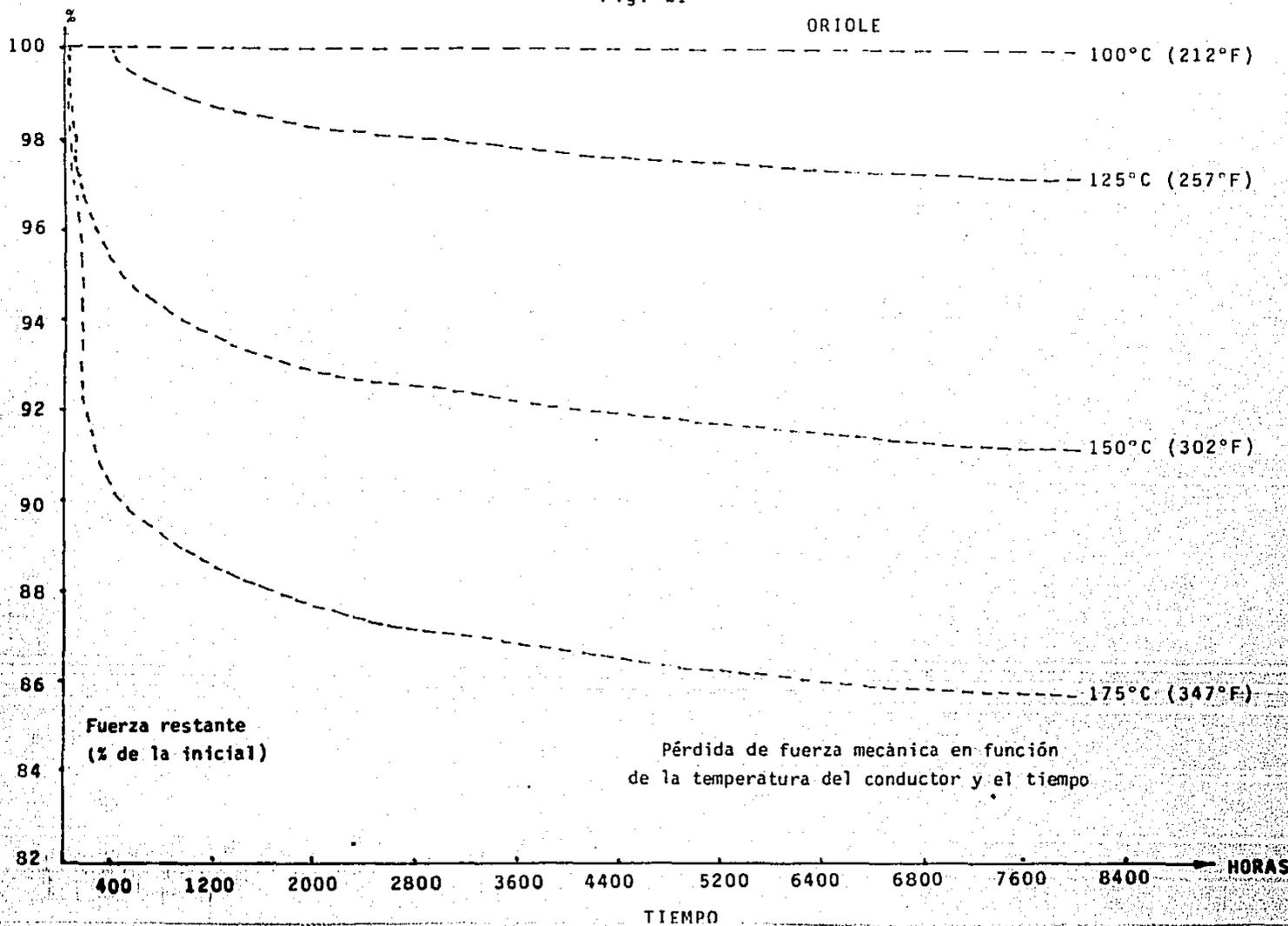
En el apéndice A, se ilustra el método para determinar las diversas variables que intervienen en el cálculo de pérdida de fuerza mecánica, y se muestra la forma de calcular ésta para diversas temperaturas y tiempos durante la vida esperada del conductor.

#### 4. Alargamiento de una línea de transmisión.

Estiramiento, alargamiento, deslizamiento o fluencia de una línea de transmisión puede definirse como la deformación no-

Fig. 21

ORIOLE

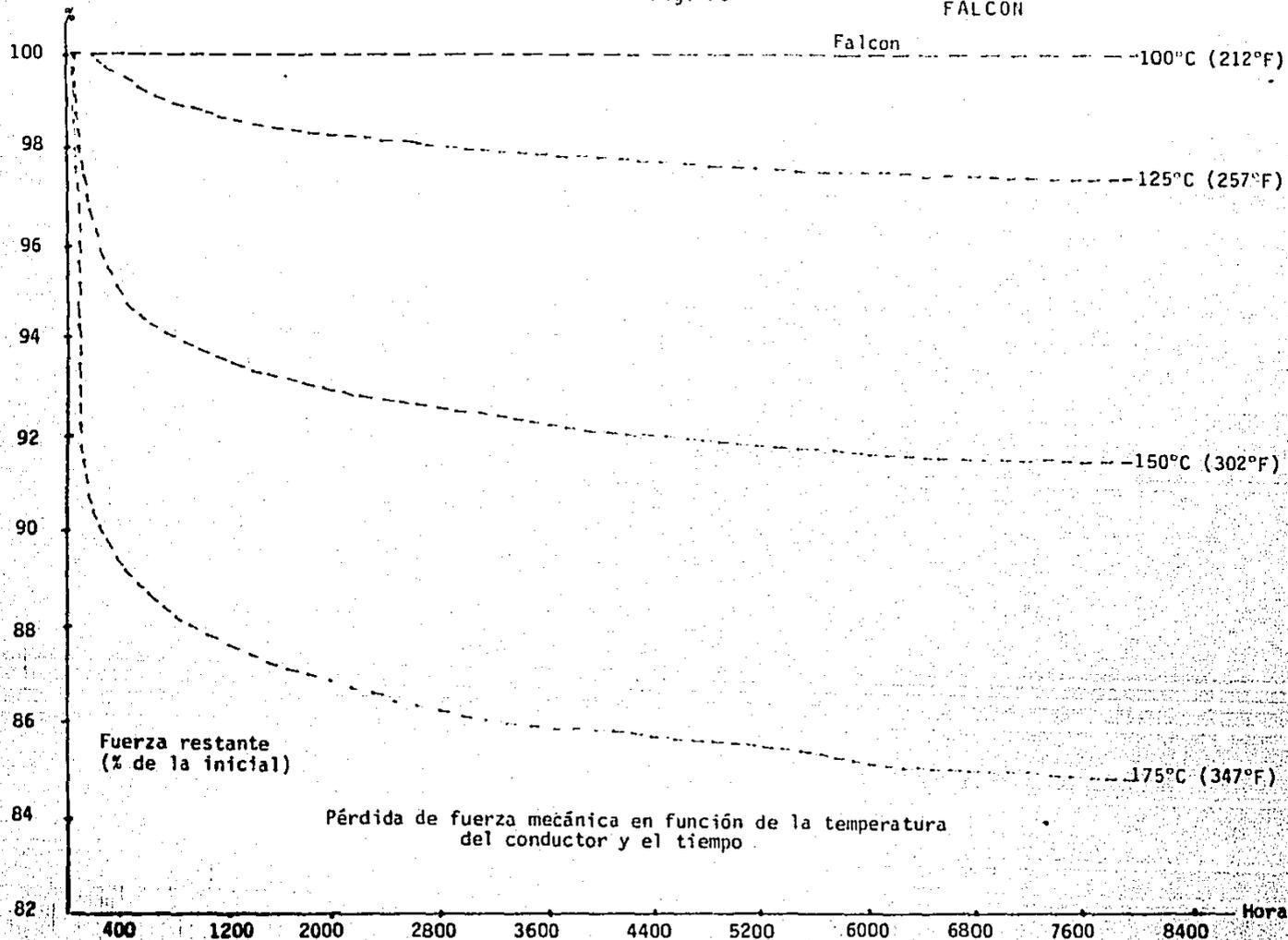


Pérdida de fuerza mecánica en función de la temperatura del conductor y el tiempo



Fig. 21

FALCON



recobrible que ocurre bajo carga. Esta ha sido estudiada por Harvey (5) y es de importancia primaria sobre los claros de los conductores, Harvey concluye que: " la tendencia hacia altas temperaturas de las líneas de transmisión podría no -- afectar significativamente los conductores ACSR por estira-- miento. Esta tendencia, sin embargo, podrá tener un marcado efecto sobre los conductores de aluminio ".

La referencia (6) da explicaciones adicionales sobre porque la diferencia del estiramiento para el ACSR es muy pequeña-- entre temperaturas altas y la temperatura ambiente, esto se debe principalmente al cambio de tensión mecánica del aluminio trenzado al núcleo de acero cuando la temperatura se incrementa. En los conductores de aluminio u otro material sencillo, el estiramiento puede alcanzar valores muy peligrosos a altas temperaturas bajo ciertas condiciones de tensión del claro.

## B I B L I O G R A F I A

- (1) "Aluminum overhead conductor engineering data"  
Aluminum Company of America  
Cec 7 p 6 (1961)
- (2) G.A. Davison et al  
"Thermal ratings for bare overhead conductor"  
IEEE Trans power apparatus and systems  
Vol pas 88 pp 194-199 March 1969
- (3) E. Hazan  
"Extra-high-voltage single and turn bundle conductor"  
AIEE Trans power apparatus and systems  
Vol 78 pp 1425-1434 December 1959
- (4) J.R. Harvey  
"Effect of elevated temperature operation on the strength  
of aluminum conductors"  
IEEE Trans pas 91 pp1769-1772 (1972)
- (5) J.R. Harvey  
"Creep of transmission line conductors"  
IEEE Trans pas 88 pp 281-286 (1969)
- (6) "Aluminum Company of America, overload and fault limitations  
of bare luminum conductors"  
Alcoa Aluminum overhead conductor engineering data  
Sec: 7 (1961)

## CAPITULO IV

Conclusiones.

- 1) El modelo del cálculo de la ampacidad por límites térmicos descrito en el presente trabajo, puede aplicarse en el diseño y operación de líneas aéreas de transmisión. En él se incluyen los criterios más recientes reportados en la literatura. Se presentan diversas gráficas donde se pueden observar la influencia de los diversos parámetros en la temperatura y ampacidad de las líneas de transmisión. De las tablas presentadas a lo largo del trabajo, lo mismo que del apéndice A, se pueden seleccionar valores para algunas variables que de otro modo serían difíciles de calcular. Los resultados obtenidos con la metodología descrita se compararon con los reportados por diversos autores para verificar su validez.
- 2) En el caso de diseño debe tenerse en cuenta que factores tales como la temperatura ambiente y velocidad del viento son difíciles de predecir, por lo tanto se seleccionan en forma conservadora. El ángulo de incidencia del viento no siempre se ha tenido en cuenta, pero para efectos de diseño se puede tomar como 90 grados. La altura media sobre el nivel del mar, orientación de la línea, altitud del sol y radiación solar se pueden determinar con un grado de exactitud bastante alto. Además, estos parámetros no varían durante el servicio de la línea; esto es, a una hora del día siempre se recibirá una cantidad fija de watt  $s/m^2$ .
- 3) En cuanto a la determinación de la ampacidad por límite térmico en tiempo real, muchos parámetros son fijos, como la resistividad del conductor, orientación, altura de la línea sobre el nivel del mar, etc. Otros varían en forma

tal que pueden ser determinados previamente, como el coeficiente de absorción solar y de emisividad.

Otros, como la temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento, varían continuamente y no de forma uniforme a lo largo de la línea; por lo cual existen ciertos claros - con mayor temperatura que los demás.

Es parte del estudio para la determinación de los límites térmicos en tiempo real determinar el claro o los claros críticos.

- 4) La ventaja de incrementar la capacidad de carga con el monitoreo de la temperatura ambiente, velocidad y ángulo del viento, es importante ya que puede evitar la construcción de nuevas líneas, o el cambio de calibre de las ya existentes. Esto último puede obligar a dejar la línea fuera de servicio por largos períodos, mientras que la instalación de equipos para el monitoreo del clima no siempre significa que la línea se saque de servicio.
- 5) También es importante observar de las curvas del capítulo - III que un aumento de carga en el conductor no origina un cambio instantáneo en la temperatura del mismo. En la operación a elevadas temperaturas ya sea por sobrecargas o por la determinación de una alta temperatura de operación en tiempo real, se debe determinar como es afectada la vida útil de la línea. Para este propósito, el programa aquí desarrollado realiza los cálculos de pérdida de fuerza mecánica como resultado de una o varias combinaciones tiempo-temperatura. En la tabla 2 del apéndice A, se encuentran los datos para determinar el cálculo de pérdida de fuerza mecánica de los conductores ACSR más usados.
- 6) En las curvas de pérdida de fuerza mecánica se puede observar la conveniencia de definir diferentes tipos de tempera

tura de operación para sobrecargas y emergencia. Para cargas que originen temperaturas de 100°C, se encontró que no hay pérdida de fuerza mecánica para conductores ACSR en 800 horas. Para temperaturas de 125°C, 150°C y 175°C se encontraron diversos porcentajes de pérdida de fuerza mecánica.

Si las limitaciones en los herrajes y flechas permiten a una línea operar a temperaturas altas, se pueden establecer políticas de operación en las cuales la pérdida de fuerza mecánica acumulada durante la vida útil del conductor sean aceptables. Un criterio de operación podría ser el siguiente:

175°C durante 3 minutos 2 veces al año.

150°C durante 10 minutos 3 veces al año.

125°C durante 30 minutos 6 veces al año.

100°C durante 90 minutos 9 veces al año.

El establecimiento de capacidades como la anterior puede contribuir a mejorar la confiabilidad del sistema en general.

- 7) Es importante señalar que al establecer nuevas capacidades se debe tener en cuenta si los demás equipos, tales como transformadores, interruptores, seccionalizadores, etc., asociados a la línea están en capacidad de manejar las nuevas cargas sin sufrir deterioros.
  
- 8) Ya en algunas empresas se han iniciado estudios para la operación de líneas existentes con la determinación de la temperatura en tiempo real, mediante el monitoreo del clima y programas de computadora como el presentado. Por razones de seguridad algunos autores sugieren tomar de 5 a 10°C extra a la temperatura calculada y con base a ésta determinar la capacidad real de la línea, que en un alto porcentaje del tiempo es mayor a la capacidad de diseño.

9) No siempre el límite térmico de la línea en el diseño es - el que origina el conductor más económico, pues éste debe cumplir con otros requerimientos como calidad del voltaje, estabilidad, interferencias en radio y televisión, ruido - audible, etc., que afectan su costo. El diseño óptimo de - líneas de transmisión de energía eléctrica es aquel que cum ple con todas las restricciones del marco más económico pa ra la vida útil de la línea.

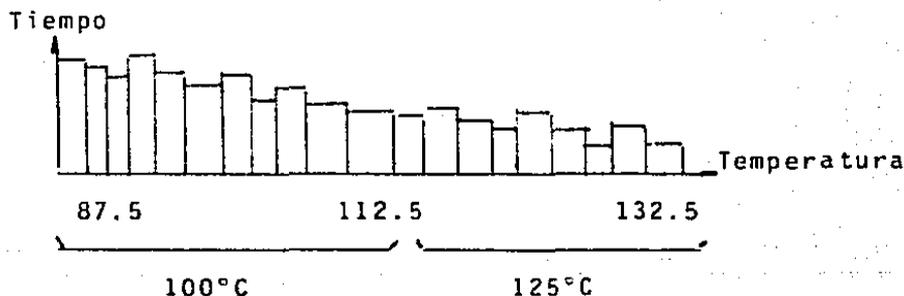
## APENDICE A.

### 1. Uso de modelos para el cálculo de la pérdida de fuerza mecánica.

La operación a elevadas temperaturas de los conductores ACSR se puede representar por una serie de temperaturas y tiempos que permitan determinar cuanta fuerza ha perdido el conductor.

Por conveniencia, estas operaciones a elevadas temperaturas se dividen en intervalos de temperatura. La suma de todos los tiempos dentro del intervalo es el tiempo que el conductor opera a la temperatura media del intervalo.

Para este tipo de cálculos son adecuados incrementos de 25°C.



Ahora, si se predice que una línea va a operar un total de - 1000 horas a 100°C, 200 horas a 125°C y 50 horas a 150°C durante su vida, y esos tiempos y temperaturas ocurren intermitentemente; la pérdida de fuerza mecánica puede aproximarse como si la línea operara continuamente a 100°C durante 1000 horas, luego a 125°C durante 200 horas y finalmente 50 horas a 150°C.

Para determinar la pérdida de fuerza mecánica se utiliza el -- siguiente algoritmo para conductores ACSR:

- 1.- Calcular la fuerza restante a la temperatura inferior ( $t_0$ ).
- 2.- Calcular el tiempo requerido al intervalo de temperatura - próximo superior ( $t_1$ ), para obtener la misma pérdida del - paso 1.
- 3.- Sumar el tiempo del paso 2 al tiempo de la temperatura ( $t_1$ ).
- 4.- Calcular la fuerza restante a la temperatura ( $t_1$ ) y el -- tiempo calculado en el paso 2.
- 5.- Calcular el tiempo requerido a la temperatura próxima supe rior ( $t_2$ ) para obtener la pérdida del paso 4.
- 6.- Sumar el tiempo del paso 5 al tiempo a la temperatura ( $t_2$ ).
- 7.- Calcular la fuerza restante a la temperatura ( $t_2$ ) y el tiem po calculado en el paso anterior.
- 8.- Estos pasos se deben repetir para todas las temperaturas me dias.

Para el caso de conductores ACSR, la pérdida de la fuerza se -- calculará para la parte EC con el método anterior. Para calcu-- lar la fuerza restante se usará el modelo de ACSR presentado en el Cap. III (o el que sea del cálculo de temperatura de sobre-- carga).

Para la determinación de :

d = Diámetro de un hilo EC  
 STREC= Fuerza inicial de los hilos EC  
 STRST= Fuerza inicial del núcleo de acero  
 STRT = Fuerza inicial del conductor

Utilizados en el cálculo de la pérdida de fuerza mecánica se partió de las siguientes normas ASTM:

ASTM B-230  
 ASTM B-232  
 ASTM B-341  
 ASTM B-354  
 ASTM B-498  
 ASTM B-606

La norma B-232 indica el procedimiento a seguir para el cálculo de la fuerza del aluminio y acero que sumadas dan la -- del conductor ACSR, con los datos de las anteriores normas - se elaboró la tabla # 1 y teniendo en cuenta que:

1 cmil =  $5.067 \times 10^{-4}$  mm<sup>2</sup>  
 1 lbf = 4.482216 Newton  
 1 pascal = Newton/mts<sup>2</sup>  
 1 pascal = 6894.7572 lbs/pulg<sup>2</sup>  
 1 psi = 1 lbs/pulg<sup>2</sup>  
 MPa = Megapascal  
 Ksi° = Kilopsi

Se llegó a la tabla # 2 para conductores de tipo ACSR clase-A (capa de zinc, galvanizadas). Para conductores ACSR clases B, C o AZ se procede igual.

T A B L A 1

CODIGO	AWG O MCM	TRENZADO		FUERZA CONDUCTOR Lbf x 10 <sup>3</sup>	PRESION EN HILOS DE ALUMINIO		PRESION EN HILOS DE ACERO	
		ALUMINIO (DIAMETRO EN PGS.)	ACERO (DIAMETRO EN PGS.)		PSI x 10 <sup>3</sup>	%	PSI x 10 <sup>3</sup>	%
Turkey	6	6x0.0661	1x0.0661	1.190	28.5	96	190	96
Swan	4	6x0.0834	1x0.0834	1.86	27.5	96	190	96
Swanate	4	7x0.0772	1x0.1029	2.36	28.0	96	185	96
Sparrow	2	6x0.1052	1x0.1052	2.85	26.0	96	185	96
Sparate	2	7x0.0974	1x0.1299	3.64	27.0	96	180	96
Robin	1	6x0.1182	1x0.1182	3.55	25.5	96	185	96
Raven	1/0	6x0.1327	1x0.1327	4.38	25.0	96	180	96
Quail	2/0	6x0.1490	1x0.1490	5.30	25.0	96	170	96
Pigeon	3/0	6x0.1672	1x0.1672	6.62	24.0	96	170	96
Penguin	4/0	6x0.1878	1x0.1878	8.35	24.0	96	170	96
Waxwing	226.8	18x0.1217	1x0.1217	6.88	25.0	93	180	96
Partridge	266.8	26x0.1013	7x0.0788	11.3	26.0	93	190	96
Ostrich	300	26x0.1074	7x0.0835	12.7	26.0	93	190	96
Merlin	336.4	18x0.1367	1x0.1367	8.68	25.0	93	180	96
Linnet	336.4	26x0.1138	7x0.0885	14.1	25.5	93	190	96
Oriole	336.4	30x0.1059	7x0.1059	17.3	26.0	93	185	96
Chickadee	397.5	18x0.1486	1x0.1486	9.94	24.5	96	170	96
Ibis	397.5	26x0.1236	7x0.0961	16.3	25.0	93	185	96
Lark	397.5	30x0.1159	7x0.1151	20.3	25.5	93	185	96
Pelican	477	18x0.1628	1x0.1628	11.8	24.0	93	170	96
Flicker	477	24x0.1410	7x0.0940	17.2	24.5	93	185	96
Hawk	477	26x0.1355	7x0.1054	19.5	25.0	93	185	96
Hen	477	30x0.1261	7x0.1261	23.8	25.0	93	180	96
Osprey	556.5	18x0.1758	1x0.1758	13.7	24.0	93	170	96
Parakeet	556.5	24x0.1523	7x0.1015	19.8	24.0	93	185	96
Dove	556.5	26x0.1463	7x0.1138	22.6	24.5	93	185	96
Eagle	556.5	30x0.1362	7x0.1362	27.8	25.0	93	180	96
Peacock	605	24x0.1588	7x0.1059	21.6	25.0	93	185	96

T A B L A 1

CODIGO	AWG O MCM	TRENZADO		FUERZA CONDUCTOR Lbf x 10 <sup>3</sup>	PRESION EN HILOS DE ALUMINIO		PRESION EN HILOS DE ACERO	
		ALUMINIO (DIAMETRO EN PGS.)	ACERO (PGS.)		PSI x 10 <sup>3</sup>	%		
Squab	605	26x0.1525	7x0.1136	24.3	24.0	93	185	96
Teal	605	30x0.1420	19x0.8520	30.0	24.5	93	190	93
Kingbird	636	18x0.1830	1x0.1880	15.7	24.0	93	170	96
Rook	636	24x0.1628	7x0.1085	22.0	24.0	93	185	96
Grosbeak	636	26x0.1564	7x0.1216	25.2	24.0	93	180	96
Egret	636	30x0.1456	19x0.0874	31.5	24.5	93	190	93
Flamingo	666	24x0.1667	7x0.1111	23.7	24.0	93	185	96
Starling	715.5	26x0.1659	7x0.1290	28.4	24.0	93	180	96
Redwing	715.5	30x0.1544	19x0.0926	34.6	24.0	93	185	93
Cuckoo	795	24x0.1820	7x0.1213	27.9	24.0	93	180	96
Drake	795	26x0.1749	7x0.1366	31.5	24.0	93	180	96
Mallard	795	30x0.1628	19x0.0977	38.4	24.0	93	185	93
Tern	795	45x0.1329	7x0.0886	22.1	25.0	91	190	96
Condor	795	54x0.1214	7x0.1214	28.2	25.0	91	180	96
Canary	900	54x0.1291	7x0.1291	31.9	25.0	91	180	96
Rail	954	45x0.1456	7x0.9710	25.9	24.5	91	185	96
Cardinal	954	54x0.1329	7x0.1329	33.8	25.0	91	180	96
Ortolon	1033.5	45x0.1516	7x0.1011	27.7	24.0	91	185	96
Curlew	1033.5	54x0.1384	7x0.1384	36.6	25.0	91	180	96
Bluejay	1113	45x0.1573	7x0.1049	29.8	24.0	91	185	96
Finch	1113	54x0.1436	19x0.0862	39.1	24.5	91	190	93
Bunting	1192.5	45x0.1628	7x0.1085	32.0	24.0	91	185	96
Grackle	1192.5	54x0.1486	19x0.0892	41.9	24.5	91	190	93
Bittern	1272	45x0.1680	7x0.1121	34.1	24.0	91	185	96
Pheasant	1272	54x0.1535	19x0.0921	43.6	24.0	91	185	93
Dipper	1351.5	45x0.1733	7x0.1151	36.2	24.0	91	185	96
Martin	1351.5	54x0.1582	19x0.0949	46.3	24.0	91	185	93

T A B L A 1

CODIGO	AWG O MCM	TRENZADO		FUERZA CONDUCTOR Lbf x 10 <sup>3</sup>	PRESION EN HILOS DE ALUMINIO		PRESION EN HILOS DE ACERO	
		ALUMINIO (DIAMETRO EN PGS.)	ACERO (DIAMETRO EN PGS.)		PSI x 10 <sup>3</sup>	PSI x 10 <sup>3</sup>	PSI x 10 <sup>3</sup>	PSI x 10 <sup>3</sup>
Bobolink	1431	45x0.1783	7x0.1189	38.3	24.0	91	185	93
Plover	1431	54x0.1628	19x0.0977	49.1	24.0	91	815	93
Nuthatch	1510.5	45x0.1832	7x0.1221	40.1	24.0	91	180	96
Parrot	1510.5	54x0.1673	19x0.1004	51.7	24.0	91	185	93
Lapwing	1590	45x0.1878	7x0.1252	42.2	24.0	91	180	96
Falcon	1590	54x0.1716	19x0.1030	54.5	24.0	91	185	93
Bluebird	2156	84x0.1602	19x0.0961	60.3	24.0	90	185	93
Chukar	1780	84x0.1456	19x0.0874	51.0	24.5	90	190	93
Kiwi	2167	72x0.1735	7x0.1157	49.8	24.0	90	185	96

**HIGH-STRENGTH**

Crouse	80	8x0.100	1x0.1670	23.1	27.0	96	170	96
Petrel	101.8	12x0.0921	7x0.0921	46.2	27.0	96	185	96
Minorca	110.8	12x0.0961	7x0.0961	50.2	27.0	96	185	96
Leghorn	134.6	12x0.1059	7x0.1059	60.4	26.0	96	185	96
Guinea	159	12x0.1151	7x0.1151	71.1	25.5	96	185	96
Dotterel	176.9	12x0.1214	7x0.1214	76.9	25.0	96	180	96
Dorking	190.8	12x0.1261	7x0.1261	83.1	25.0	96	180	96
Cochin	211.3	12x0.1327	7x0.1327	92.0	25.0	96	180	96
Brahma	203.2	16x0.1127	19x0.9770	126.3	25.5	96	185	93

T A B L A 2

CODIGO	AWG O MCM	DIAMETRO EN HILOS DE ALUMINIO		FUERZA DEL CONDUCTOR		FUERZA DEL ALUMINIO		FUERZA DEL ACERO	
		PGS.	MTS.	Lbf $\times 10^3$	New $\times 10^3$	Lbf $\times 10^3$	New $\times 10^3$	Lbf $\times 10^3$	New $\times 10^3$
Turkey	6	0.0661	$1.68 \times 10^{-3}$	1.19	5.29	0.57	2.53	0.63	2.79
Swan	4	0.0834	$2.12 \times 10^{-3}$	1.86	8.27	0.87	3.88	0.98	4.37
Swanate	4	0.0772	$1.96 \times 10^{-3}$	2.36	10.5	0.88	3.91	1.48	6.58
Sparrow	2	0.1052	$2.67 \times 10^{-3}$	2.85	12.7	1.30	5.78	1.55	6.90
Sparate	2	0.0974	$2.47 \times 10^{-3}$	3.64	16.2	1.35	6.01	2.28	10.14
Robin	1	0.1182	$3.00 \times 10^{-3}$	3.55	15.8	1.60	7.12	1.95	8.67
Raven	1/0	0.1327	$3.37 \times 10^{-3}$	4.38	19.5	1.99	8.85	2.39	10.63
Quail	2/0	0.1490	$3.78 \times 10^{-3}$	5.31	23.6	2.50	11.12	2.80	12.46
Pigeon	3/0	0.1672	$4.25 \times 10^{-3}$	6.62	29.4	3.03	13.48	3.59	15.97
Penguin	4/0	0.1878	$4.77 \times 10^{-3}$	8.35	37.1	3.83	17.4	4.52	20.11
Waxwing	266.8	0.1217	$3.09 \times 10^{-3}$	6.88	30.6	4.87	21.66	2.01	8.94
Partridge	266.8	0.1013	$2.57 \times 10^{-3}$	11.3	50.3	5.07	22.55	6.23	27.71
Ostrich	300	0.1074	$2.72 \times 10^{-3}$	12.7	56.5	5.70	25.36	7.0	31.14
Merlin	336.4	0.1367	$3.47 \times 10^{-3}$	8.68	38.6	6.14	27.31	2.54	11.29
Linnet	336.4	0.1138	$2.89 \times 10^{-3}$	14.1	62.7	6.26	27.85	7.84	34.88
Oriole	336.4	0.1059	$2.70 \times 10^{-3}$	17.3	77.0	6.40	28.47	10.9	48.49
Chickadee	397.5	0.1486	$3.77 \times 10^{-3}$	9.94	44.2	7.23	32.16	2.71	12.06
Ibis	397.5	0.1236	$3.14 \times 10^{-3}$	16.3	72.5	7.26	32.30	9.04	40.21
Lark	397.5	0.1159	$2.94 \times 10^{-3}$	20.3	90.3	7.40	32.92	12.9	57.38
Pelikan	477	0.1628	$4.14 \times 10^{-3}$	11.8	52.5	8.4	37.37	3.4	15.12
Flicker	477	0.1410	$3.58 \times 10^{-3}$	17.2	76.5	8.6	38.26	8.6	38.26
Hawk	477	0.1355	$3.44 \times 10^{-3}$	19.5	86.7	8.7	38.70	10.8	48.04
Hen	477	0.1261	$3.20 \times 10^{-3}$	23.8	106	8.7	38.70	15.1	67.17
Osprey	556.5	0.1758	$4.47 \times 10^{-3}$	13.7	61.0	9.75	43.37	3.95	17.57
Parakeet	556.5	0.1523	$3.87 \times 10^{-3}$	19.8	88.1	9.7	43.15	10.1	44.93
Dove	556.5	0.1463	$3.72 \times 10^{-3}$	22.6	101	9.9	44.05	12.7	56.50
Eagle	556.5	0.1362	$3.46 \times 10^{-3}$	27.8	124	10.1	44.93	17.7	78.74

T A B L A 2

CODIGO	AWG O MCM	DIAMETRO EN HILOS DE ALUMINIO		FUERZA DEL CONDUCTOR		FUERZA DEL ALUMINIO		FUERZA DEL ACERO	
		PGS.	MTS.	Lbf x10 <sup>3</sup>	New x10 <sup>3</sup>	Lbf x10 <sup>3</sup>	New x10 <sup>3</sup>	Lbf x10 <sup>3</sup>	New x10 <sup>3</sup>
Peacock	605	0.1588	4.03x10 <sup>-3</sup>	21.6	96.1	10.6	47.15	11.0	48.93
Squab	605	0.1525	3.87x10 <sup>-3</sup>	24.3	108	10.6	47.15	13.7	60.94
Teal	605	0.1420	3.61x10 <sup>-3</sup>	30.0	133	10.6	47.15	19.4	86.30
Kingbird	636	0.1880	4.78x10 <sup>-3</sup>	15.7	69.8	11.2	49.82	4.5	20.02
Rook	636	0.1628	4.14x10 <sup>-3</sup>	22.0	97.86	11.2	49.82	10.8	48.04
Grosbeak	636	0.1564	3.97x10 <sup>-3</sup>	25.2	112	11.2	49.82	14.0	62.28
Egret	636	0.1456	3.70x10 <sup>-3</sup>	31.5	140.1	11.4	50.71	20.1	89.41
Flamingo	666	0.1667	4.23x10 <sup>-3</sup>	23.7	10.5	11.7	52.05	12.0	53.38
Starling	715.5	0.1659	4.21x10 <sup>-3</sup>	28.4	126	12.6	56.05	15.8	70.28
Redwing	715.5	0.1544	3.92x10 <sup>-3</sup>	34.6	154	12.6	56.05	22.0	97.86
Cickoo	795	0.1820	4.62x10 <sup>-3</sup>	27.9	124	13.9	61.83	14.0	62.28
Drake	795	0.1749	4.44x10 <sup>-3</sup>	31.5	140	13.9	61.83	17.6	78.29
Mallard	795	0.1628	4.14x10 <sup>-3</sup>	38.4	171	13.9	61.83	24.5	108.99
Tern	795	0.1329	3.76x10 <sup>-3</sup>	22.1	98.3	14.2	63.16	7.9	35.14
Condor	795	0.1214	3.08x10 <sup>-3</sup>	28.2	125	14.2	63.17	14.0	62.28
Canary	900	0.1291	3.28x10 <sup>-3</sup>	31.9	142	16.1	71.62	15.8	70.28
Rail	954	0.1456	3.70x10 <sup>-3</sup>	25.9	115	16.7	74.29	9.2	40.92
Cardinal	954	0.1329	3.38x10 <sup>-3</sup>	33.8	150	17.0	75.62	16.8	74.73
Ortolon	1033.5	0.1516	3.85x10 <sup>-3</sup>	27.7	123	17.7	78.74	10.0	44.48
Curlew	1033.5	0.1384	3.52x10 <sup>-3</sup>	36.6	163	18.4	81.85	18.2	80.96
Bluejay	1113	0.1573	4.00x10 <sup>-3</sup>	29.8	133	19.1	84.96	10.7	47.60
Finch	1113	0.1463	3.72x10 <sup>-3</sup>	39.1	174	19.5	86.74	19.6	87.19
Bunting	1192.5	0.1628	4.14x10 <sup>-3</sup>	32.0	142	20.5	91.19	11.5	51.16
Grackle	1192.5	0.1486	3.77x10 <sup>-3</sup>	41.9	186	21.0	93.42	20.9	92.97
Bittern	1272	0.1680	4.27x10 <sup>-3</sup>	34.1	152	21.8	96.98	12.3	54.72
Pheasant	1272	0.1535	3.90x10 <sup>-3</sup>	43.6	194	21.7	96.53	21.9	97.42
Dipper	1351.5	0.1733	4.40x10 <sup>-3</sup>	36.2	161	23.2	103.20	13.0	57.83

T A B L A 2

CODIGO	AWG O MCM	DIAMETRO EN HILOS DE ALUMINIO		FUERZA DEL CONDUCTOR		FUERZA DEL ALUMINIO		FUERZA DEL ACERO	
		PGS.	MTS.	Lbf x10 <sup>3</sup>	New x10 <sup>3</sup>	Lbf x10 <sup>3</sup>	New x10 <sup>3</sup>	Lbf x10 <sup>3</sup>	New x10 <sup>3</sup>
Martom	1351.5	0.1582	4.02x10 <sup>-3</sup>	46.3	206	23.2	103.20	23.1	102.76
Bobolink	1431	0.1783	4.53x10 <sup>-3</sup>	38.3	170	24.5	108.99	13.8	61.39
Plover	1431	0.1628	4.14x10 <sup>-3</sup>	49.1	218	24.6	109.43	24.5	108.98
Nuthatch	1510.5	0.1832	4.65x10 <sup>-3</sup>	40.1	178	25.9	115.21	14.2	63.16
Parrot	1510.5	0.1673	4.25x10 <sup>-3</sup>	51.7	230	25.9	115.21	25.8	114.77
Lapwing	1590	0.1878	4.65x10 <sup>-3</sup>	42.2	187.7	27.3	121.44	14.9	66.28
Falcon	1590	0.1716	4.25x10 <sup>-3</sup>	54.5	242.4	27.3	121.44	27.2	120.99
Bluebird	2156	0.1602	4.77x10 <sup>-3</sup>	60.3	268.2	36.6	162.81	23.7	105.42
Chukar	1780	0.1456	3.70x10 <sup>-3</sup>	51.0	226.8	30.8	137.01	20.2	89.86
Kiwi	2167	0.1735	4.41x10 <sup>-3</sup>	49.8	221.5	36.7	163.26	13.1	58.27

HIGH-STRENGTH

Crouse	80	0.1000	2.54x10 <sup>-3</sup>	5.20	23.1	1.6	7.12	3.6	16.01
Petrel	101.8	0.0921	2.34x10 <sup>-3</sup>	10.4	46.2	2.10	9.34	8.3	36.92
Minorca	110.3	0.0961	2.44x10 <sup>-3</sup>	11.3	50.2	2.3	10.23	9.0	40.03
Leghorn	134.6	0.1059	2.69x10 <sup>-3</sup>	13.6	60.4	2.6	11.57	11.0	48.93
Guinea	159	0.1151	2.92x10 <sup>-3</sup>	16.0	71.1	3.1	13.79	12.9	57.38
Dottorel	176.9	0.1214	3.08x10 <sup>-3</sup>	17.3	76.9	3.3	14.68	14.0	62.28
Dorking	190.8	0.1261	3.20x10 <sup>-3</sup>	18.7	83.1	3.6	16.01	15.1	67.17
Cochin	211.3	0.1327	3.37x10 <sup>-3</sup>	20.7	92.0	4.0	17.79	16.7	74.29
Brahma	203.2	0.1127	2.86x10 <sup>-3</sup>	28.4	126.3	3.9	17.35	24.35	108.99

2. Ejemplos

- 1) Calcular la fuerza restante en un conductor ACSR, 336.4-Kcmil 18/1, para las siguientes relaciones tiempo-temp.:

TIEMPO (HRS.)	TEMPERATURA (°C)
a) 24	125
b) 50	125
c) 120	125
d) 2	150
e) 52	150
f) 120	150
g) 170	150

$$a) RSEC = (-0.24T + 134) t^{-(0.001T - 0.095) + (0.1/d)}$$

Donde:

T = Temperatura (°C)	T = 125°
t = Tiempo (Horas)	t = 24
d = Diámetro hilo EC (Pulg.)	d = 0.1059

$$RSEC = (-0.24 * 125 + 134) * (24)^{-(0.001 * 125 - 0.095) * (0.1 / 0.1367)}$$

-0.24 \* 125 + 134 = 104 como es mayor que 100 se toma 100

$$RSEC = (100)(24)^{-(0.03) * (0.7315)}$$

$$RSEC = (100) * (0.9326) = 93.26$$

$$RS = RSEC \frac{STR_{EC}}{STR_T} + 109 \frac{STR_{ST}}{STR_T}$$

$$RS = 93.26 * \frac{6.14 * 10^3}{8.68 * 10^3} + 109 * \frac{2.54 * 10^3}{8.68 * 10^3} = 97.85$$

$$b) RSEC = (-0.24 \cdot 125 + 134) \cdot (50)^{-(0.001 \cdot 125 - 0.095)} \cdot (0.1 / 0.1367)$$

-0.24 \* 125 + 134 = 104 mayor que 100 entonces tomamos 100

$$RSEC = (100) \cdot (50)^{-(0.03)} \cdot (0.7315) = 91.77$$

$$RS = 91.77 \cdot \frac{6.14 \times 10^3}{8.68 \times 10^3} + 109 \cdot \frac{2.5 \times 10^3}{8.68 \times 10^3} = 96.80$$

$$c) RSEC = (-0.24 \cdot 125 + 134) \cdot (120)^{-(0.001 \cdot 125 - 0.095)} \cdot (0.1 / 0.1367)$$

-0.24 \* 125 + 134 = 104 mayor que 100 entonces tomamos 100

$$RSEC = (100) \cdot (120)^{-(0.03)} \cdot (0.7315) = 90.02$$

$$RS = 90.02 \cdot \frac{6.14 \times 10^3}{8.68 \times 10^3} + 109 \cdot \frac{2.54 \times 10^3}{8.68 \times 10^3} = 95.56$$

d,e,f.)  $T = 150^\circ C$

$$B = -0.24 \cdot 150 + 134 = 98$$

t (tiempo)	RSEC	RS
2	95.30	99.29
52	83.59	91.01
120	80.82	89.05
170	79.70	88.26

2.2) Calcular la fuerza restante en un conductor ACSR 795 Kcmil 26/7, para las siguientes relaciones tiempo-temperatura:

TIEMPO (HRS.)	TEMPERATURA ( $^\circ C$ )
a) 3	150°
b) 10	150°

TIEMPO (HRS.)	TEMPERATURA (°C)
c) 30	150°
d) 50	150°
e) 100	150°
f) 200	150°
g) 500	150°

$$B = (-0.24 \cdot T + 134) = 98$$

$$RSEC = 98 \cdot t^{-(0.001T - 0.095) \cdot (0.1/d)}$$

$$RSEC = 98 \cdot t^{-(0.055) \cdot (0.1/0.1749)}$$

$$RSEC = 98 \cdot t^{-0.0314}$$

$$RS = RSEC \cdot \frac{13.9 \times 10^3}{31.5 \times 10^3} + 109 \cdot \frac{17.6 \times 10^3}{31.5 \times 10^3}$$

t (Hrs.)	RSEC	RS
3	94.67	100
10	91.15	100
30	88.06	99.7
50	86.66	99.1
100	84.79	98.3
200	82.96	97.5
500	80.60	96.4

2.3 En una línea con conductores 954 Kcmil 45/7 ACSR, se espera operarla durante su vida bajo las siguientes condiciones de sobrecarga:

- 10,000 horas a 100°C
- 100 horas a 125°C
- 10 horas a 150°C

¿Cuál es el porcentaje de fuerza del conductor al final de su vida útil?

EC

$$B = (-0.24T + 134) = 110 \quad \text{entonces } B = 100$$

$$RSEC = (100) * t^{-(0.001 * T - 0.095) * (0.1/d)}$$

$$RSEC = (100) * (10000)^{-(0.1 - 0.095) * (0.1/0.1456)}$$

$$RSEC = 96.88 \approx 97\%$$

$$100t^{-(0.02060)} = 97$$

$$-(0.2060) \ln t = \ln 0.97$$

$$t = 4.3824 \text{ horas}$$

$$t = 100 = 4 = 104 \text{ horas}$$

$$RSEC = 100 * (104)^{-(0.2060)} = 90.87\% \approx 91$$

$$B = (0.24 * 150 + 134) = 98$$

$$98 * t^{(-0.037)} = 91$$

$$(-0.037) \ln t = \ln (91/98)$$

$$t = 7.11 = 7$$

$$t = 10 + 7 = 17 \text{ horas}$$

$$RSEC = 98(17)^{(-0.037)} = 88.05$$

$$RS = 88 * \frac{16.7 \times 10^3}{25.9 \times 10^3} + 109 * \frac{9.2 \times 10^3}{25.9 \times 10^3} = 95.45\% \approx 95\%$$

Nota: Se considera que la vida útil de un conductor ACSR, ha finalizado cuando su fuerza mecánica como porcentaje de la inicial es menor del 85%.

Estos resultados concuerdan con los publicados por Harvey (1).

En el programa de cálculo de pérdida de fuerza mecánica estos resultados son ligeramente inferiores debido a -- que el programa trabaja con los valores decimales en cada paso y no con aproximaciones.

Es importante notar además, que las ecuaciones de pérdida de fuerza mecánica incluyen el porcentaje de fuerza que posee el acero y el porcentaje de fuerza del aluminio. Estos pueden variar ligeramente de un fabricante a otro.

La ecuación de pérdida del conductor en conjunto, incluye en la parte del acero el factor 1.09, que es la cantidad de carga que lleva el núcleo de acero como resultado del deslizamiento y tensión cedido por el aluminio trenzado bajo calentamiento y tensión.

#### BIBLIOGRAFIA

(1) J.R. Harvey

Effect of elevated temperature operation on the strength of aluminum conductors.

IEEE Trans. Pas 91 (1972) pp. 1769-1772

MANUAL DEL USUARIO

## APENDICE B.

## 1) Lenguaje utilizado:

El programa para la selección de conductores utiliza el lenguaje Fortran 77, ya que es el más utilizado del grupo de lenguajes de alto nivel denominados científicos o algebraicos. Este lenguaje fue revisado y adoptado por ANSI (American National Standard).

El método de programación empleado fue del tipo estructurado, de tal forma que se puedan manejar los diversos bloques de manera independiente.

Este programa es un módulo de la estación de trabajo, proyecto 2280 del IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas) para el diseño de líneas de transmisión en computadora personales. El programa calcula:

1. La corriente máxima para condiciones climatológicas y temperatura dadas.
2. La temperatura alcanzada por el conductor para ampacidad y condiciones climatológicas dadas.
3. El tiempo necesario para alcanzar una temperatura dada en condiciones de sobrecarga.
4. La temperatura que alcanza el conductor después de operar un tiempo dado en condiciones de sobrecarga.
5. La fuerza mecánica restante en el conductor como porcentaje de la inicial al final de un período de estudio.

6. La fuerza mecánica restante ocasionada por la operación del conductor a dos o tres temperaturas y tiempos de sobrecarga distintos.

## 2. Forma de entrar datos.

Los datos de entrada siempre van separados por coma o espacio en blanco (formato libre).

### 2.1 Primera línea:

En el primer renglón lee tres valores L, N y M que están asignados como instrucciones de control así:

Los valores de control L son para el cálculo de parámetros de diseño y operación en estado estable.

L=1 Para entrar datos completos de la línea para calcular la corriente I.

L=2 Para entrar datos resumidos de la línea para calcular la corriente I.

L=3 Para entrar datos completos de la línea para determinar la temperatura en el conductor TC.

L=4 Para entrar datos resumidos de la línea para determinar la temperatura en el conductor TC.

Los valores de control N se utilizan para cálculos en estado transitorio y pérdida de fuerza mecánica.

N=0 No entra el programa a la parte de cálculos de temperatura de sobrecarga, ni pérdida de fuerza mecánica.

N=1 Entrar datos completos para calcular temperatura después de sobrecarga TC1 y pérdida de fuerza mecánica RS como porcentaje de la inicial.

- N=2 Entrar datos resumidos para calcular temperatura después de sobrecarga TCl y pérdida de fuerza mecánica RS como porcentaje de la inicial.
- N=3 Entrar datos para calcular temperatura TCl después de sobrecarga.
- N=4 Entrar datos para calcular pérdida de fuerza mecánica RS como porcentaje de la inicial.
- N=5 Entrar datos para calcular tiempo IIP en alcanzar una temperatura determinada con una sobrecarga dada.

Los valores de control M se utilizan para realizar cálculos adicionales de pérdida de fuerza mecánica. Para esto se entran datos de temperatura y tiempo que en conjunto con lo calculado en la etapa anterior sirven para encontrar un nuevo valor de pérdida de fuerza mecánica que incluya el efecto de las diversas temperaturas y tiempos.

- M=0 No entra en estudios adicionales de cálculo de pérdida de fuerza mecánica.
- M=1 Entrar datos para calcular pérdida de fuerza mecánica acumulada con dos temperaturas y tiempos de sobrecarga.
- M=2 Entrar datos para calcular pérdida de fuerza mecánica acumulada con tres temperaturas y tiempos de sobrecarga.

## 2.2 Segunda línea.

En el segundo renglón se entran los datos de la línea dependiendo del valor L así:

Si L=1

Entrar:

H1 = Altura media de la línea sobre el nivel del mar (Metros)  
 NA = Número de años del conductor en servicio (Adimensional)  
 V1 = Velocidad del viento (Mts/Seg)  
 ALFA= Dirección del viento (Grados)  
 TC = Temperatura máxima en el conductor (°C)  
 TA = Temperatura ambiente (°C)  
 HC = Altitud del sol (Tabla 1 y 2, Grados)  
 QRC= Radiación solar específica (Tabla 3, Grados)  
 ZC = Azimuth del sol (Tabla 1 y 2, Grados)  
 Z1 = Azimuth de la línea (Grados)  
 D1 = Diámetro del conductor a temperatura ambiente (Metros)  
 RO1= Resistencia del conductor a 60 Hz y temperatura conocida (°C)  
 T0 = Temperatura a la cual se calcula R0 (°C)

Si L=2

Entrar:

H1 = Altura media sobre el nivel del mar (Metros)  
 TA = Temperatura ambiente (°C)  
 Z1 = Azimuth de la línea (Grados)  
 D1 = Diámetro del conductor a temperatura ambiente (Metros)  
 RO1= Resistencia del conductor a 60Hz y temperatura conocida  
 (Ohms/Km)  
 T0 = Temperatura a la cual se calculo R0 (°C)

Cuando le damos esta opción de entrada el programa asume (en el bloque de inicialización):

NA = 10  
 V1 = 0.6095 m/seg.  
 ALFA= 90°  
 TC = 93°C  
 HC = 63°C  
 ZC = 282  
 QCR= 1000

Si L=3

Entrar:

H1 = Altura media sobre el nivel del mar (Metros)  
 NA = Número de años del conductor en servicio  
 V1 = Velocidad del viento (Mts/Seg)  
 ALFA = Dirección del viento (Grados)  
 TA = Temperatura ambiente (°C)  
 HC = Altitud del sol (Tablas 1 y 2, Grados)  
 QRC = Radiación solar específica (Tabla 3, Grados)  
 ZC = Azimuth del sol (Tablas 1 y 2, Grados)  
 Z1 = Azimuth de la línea (Grados)  
 D1 = Diámetro del conductor a temperatura ambiente (Metros)  
 R01 = Resistencia del conductor a 60Hz y temperatura conocida (Ohms/Km)  
 T0 = Temperatura a la cual se calcula R0  
 AMP = Corriente en el conductor (Amperes a 60 Hz)  
 TC = Valor de inicio del proceso iterativo (°C)  
 (Si no se conoce entrar 93.0)

Si L=4

Entrar:

H1 = Altura media sobre nivel del mar (Metros)  
 TA = Temperatura ambiente (°C)  
 Z1 = Azimuth de la línea  
 D1 = Diámetro del conductor a temperatura ambiente (Metros)  
 R01 = Resistencia del conductor a 60Hz y temperatura conocida (Ohms/Km)  
 T0 = Temperatura a la cual está calculada R01(°C)  
 AMP = Corriente en el conductor (Amperios a 60Hz)

Cuando le damos esta opción de entrada el programa asume (en el bloque de inicialización):

NA = 10  
V1 = 0.6095 Mts/Seg.  
ALFA = 90°  
HC = 63  
ZC = 282  
QRC = 1000  
TC = 93

### 2.3 Tercera línea.

En esta línea si la opción de control es N=0, se debe correr la parte anterior del programa para tener como base la temperatura y ampacidad de operación normal.

Si N=0

No entrar más datos.

Si N=1

Entrar:

AOL = Corriente de sobrecarga (% de I)  
TIP = Duración de la sobrecarga en minutos  
NF = Número de sobrecargas al año  
NAE = Número de años de estudio (Calc. pérdida de fuerza mecánica)  
WII = Peso del aluminio (Kg/m)  
W21 = Peso del acero (Kg/m)  
STRECI = Fuerza inicial del aluminio EC trenzado (Newton)  
STRTI = Fuerza inicial calculada del conductor (Newton)  
STRSTI = Fuerza inicial calculada del acero (Newton)  
EDI = Diámetro de un hilo EC (Metros)

Si N=2

Entrar:

W11 = Peso del aluminio (Kgs/m)  
 W21 = Peso del acero (Kgs/m)  
 STRECl = Fuerza inicial del aluminio EC trenzado (Newton)  
 STRT1 = Fuerza inicial calculada del conductor (Newton)  
 STRST1 = Fuerza inicial calculada del acero (Newton)  
 HD1 = Diámetro de un hilo EC (mts)

Cuando le damos esta opción de entrada el programa asume (en el bloque de inicialización):

IOL = 130%  
 TIP = 45 minutos  
 NF = 4 sobrecargas/año  
 NAE = 30 años

Si N=3

Entrar:

AOL = Corriente de sobrecarga (% de I)  
 TIP = Duración de la sobrecarga (minutos)  
 W11 = Peso del aluminio (Kgs/mts)  
 W21 = Peso del acero (Kgs/mts)

Si N=4

Entrar:

TC1 = Temperatura en el conductor después del período de sobrecarga (°C)  
 AOL = Corriente de sobrecarga (% de I)  
 W11 = Peso del aluminio (Kgs/mts)  
 W21 = Peso del acero (Kgs/mts)

## 2.4 Cuarta línea.

Esta se utiliza para entrar datos para calcular la pérdida - de fuerza mecánica con más de una temperatura de sobrecarga.

Las temperaturas de sobrecarga deben tener el siguiente or-- den tc1 tc2 tc3.

Si M=0

No entrar más datos.

Si M=1

Entrar:

TC2 = Temperatura de sobrecarga No. 2 (°C)

T2 = Duración en horas de esta sobrecarga en el período de - estudio.

Si M=2

Entrar:

TC2 = Temperatura de sobrecarga No. 2 (°C)

T2 = Duración en horas de esta sobrecarga en el período de - estudio.

TC3 = Temperatura de sobrecarga No. 3 (°C)

T3 = Duración en horas de la sobrecarga No. 3 en el período de estudio.

## 2.5 Ejemplos.

### Ejemplo 1

Un conductor con una resistencia ac a 60H de 0.1696 Ohms/Km, a 20°, con un diámetro exterior de 0.01883 mts., ubicado en una zona a 1000 mts. sobre el nivel del mar, con vientos de 0.626 mts./seg. perpendiculares al conductor con una radiación solar específica de 1000 watts/m<sup>2</sup> y temperatura media de 20°C y debe operar a una temperatura máxima de 93°C.

a) Forma de entrar datos completos para calcular la corriente I.

1,0,0/

1000,10,0.626,90,93,20,63,1000,282,270,0.01883,0.1696,20

Nota: El signo / indica fin de una línea.

El resultado obtenido será el siguiente:

Coefficiente de emisividad	=	6.9072*10 <sup>-1</sup>
Coefficiente de absorción solar	=	6.9072*10 <sup>-1</sup>
Altitud del sol (Grados)	=	63
Azimuth del sol (Grados)	=	283
Azimuth de la línea (Grados)	=	270

Corriente en el conductor = 750.98 Amp.  
 Temperatura en el conductor = 93°C

B) Forma de entrar datos completos para calcular la corriente  
 1. luego entrar datos completos para calcular la temperatura después de sobrecarga TCCI y la pérdida de fuerza mecánica RS.

1,1,0/  
 1000,10,0.626,90,93,20,63,1000,282,270,0.01883,0.1696,20/  
 105,5.0,4,20,0.4734,0.31104,28.46,77.0,48.48,2.68E-3

El resultado obtenido será el siguiente:

Corriente en el conductor = 750.98 Amp.  
 Temperatura en el conductor = 93°C  
 Temperatura después de sobrecarga = 96.563°C  
 Corriente de sobrecarga (%I) = 105  
 Corriente de sobrecarga (Amp) = 788.537  
 Tiempo en alcanzar la sobrecarga = 5 minutos  
 Pérdida de fuerza mecánica (% de la inicial) = 100.00  
 Para un tiempo dado (Horas) = 6.66

Nota:

El tiempo en horas lo calcula el programa de la siguiente manera:

$$T \text{ (Hrs.)} = \text{TIP} * \text{NF} * \text{NAE} / 60$$

donde:

TIP = Minutos en condiciones de sobrecarga

NF = Número de sobrecargas al año

NAE = Número de años de estudio

- c) Forma de entrar datos completos para calcular la corriente I, luego entrar datos resumidos para calcular la temperatura después de sobrecarga TC1 y la pérdida de fuerza mecánica RS.

1,2,0,/

1000,10,0.626,90,93,20,63,1000,282,270,0.01883,0.1696,20/  
.4324,0.31104,2846,77.0,48.48,2.68E-3

Los resultados obtenidos serán los siguientes:

Corriente en el conductor (Amp)	=	750.98	
Temperatura en el conductor (°C)	=	93°C	
Temperatura después de sobrecarga	=	133°C	
Corriente de sobrecarga (% DE I)	=	130	***
Corriente de sobrecarga (Amp)	=	976.28	
Tiempo en alcanzar la sobrecarga	=	45 mins.	***
Pérdida de fuerza mecánica	=	99.79 (% de la inicial)	
Para un tiempo dado (horas)	=	90	***

\*\*\* Estos datos son asumidos por el programa

d) Forma de entrar los datos completos para calcular la corriente  $I$ , y después calcular la temperatura TCl de sobrecarga.

1,3,0/

1000,10,0.626,90,93,20,63,1000,282,270,0.01883,0.1696,20/  
105,10,0.4734,0.31104

Los resultados obtenidos serán:

La corriente en el conductor es (Amp)	=	750.98
Temperatura en el conductor es (°C)	=	93°
La temperatura después de sobrecarga es	=	98.12°C
La corriente de sobrecarga (% de $I$ )	=	105
La corriente de sobrecarga (Amperes)	=	788.537
El tiempo en alcanzar la sobrecarga	=	10 mins.

e) Forma de entrar datos completos para calcular la corriente  $I$  y después calcular la pérdida de fuerza mecánica RS.

1,4,0/

1000,10,0.626,90,93,20,63,1000,282,270,0.01883,0.1696,20/  
120,4,45,30,29.46,77,0,48.48,2.68E-3

Los resultados obtenidos serán:

La corriente en el conductor es (Amp)	=	750.98
La temperatura en el conductor es(°C)	=	93°
Pérdida de fuerza mecánica	=	100 (% de la inicial)
Para un tiempo dado (Hrs)	=	90

- f) Forma de entrar datos completos para calcular la corriente I y después el tiempo TIP para adquirir cierta temperatura de sobrecarga.

1,5,0/

1000,10,0.626,90,93,20,63,1000,282,270,0.01883,0.1696,20/

120,130,0.4734,0.31104

Los resultados serán los siguientes:

La corriente en el conductor es (Amp) = 750.98

La temperatura en el conductor es (°C) = 93°

El tiempo en minutos en alcanzar la sobrecarga = 6.2198

La temperatura después de sobrecarga = 120°C

La corriente de sobrecarga (% de I) = 130

La corriente de sobrecarga (Amp) = 976.28

- g) Forma de entrar datos completos para calcular la corriente I, luego calcular TC1 y RS, y finalmente la pérdida de --- fuerza mecánica por TC1 y TC2.

1,1,1/

1000,10,0.626,90,93,20,63,1000,282,270,0.01883,0.1696,20/

130,40,4,20,0.4734,0.31104,28.46,77.0,48.48,268E-3/

140,4

Los resultados serán los siguientes:

La corriente en el conductor es (Amp) = 750.98

La temperatura en el conductor es (°C) = 93°

La temperatura después de sobrecarga = 133.78°C  
 La corriente de sobrecarga (% de I) = 130  
 La corriente de sobrecarga (Amp) = 976.28  
 El tiempo en alcanzar la sobrecarga = 40.0 mins.

Pérdida de fuerza mecánica (% de la inicial) es = 100  
 Para un tiempo dado (Hrs.) = 53.3

#### CALCULOS ADICIONALES DE PERDIDA DE FUERZA MECANICA

Pérdida de fuerza mecánica (% de la inicial) es = 100  
 Para temperatura y tiempos de:  
 TC1 (°C) = 133.78                      Tiempo (Hrs.) = 53.33  
 TC2 (°C) = 140.0                        Tiempo (Hrs.) = 4

- h) Forma de entrar datos completos para calcular la corriente I, luego calcular TC1 y RS, finalmente la pérdida de fuerza mecánica por TC1, TC2 y TC3.

1,1,2/

1000,10,0.626,90,93,20,63,1000,282,270,0.01883,0.1696,20/

105,40,4,20,0.4734,0.31104/

140,4,150,3

Los resultados obtenidos serán los siguientes:

La corriente en el conductor es (Amp) = 750.98  
 La temperatura en el conductor es (°C) = 93°

La temperatura después de sobrecarga es = 99.328°C  
 La corriente de sobrecarga es (% de I) = 105  
 La corriente de sobrecarga (Amperes) = 788.53  
 El tiempo en alcanzar la sobrecarga = 40 mins.

Pérdida de fuerza mecánica (% de la inicial) es = 100.00  
 Para un tiempo dado (Hrs.) = 53.33

CALCULOS ADICIONALES DE PERDIDA DE FUERZA MECANICA

Pérdida de fuerza mecánica (% de la inicial) = 100

Para una temperatura y tiempos de:

TC1 (°C) = 133.78	Tiempo (Hrs.) = 53.3
TC2 (°C) = 140.0	Tiempo (Hrs.) = 4
TC3 (°C) = 150.0	Tiempo (Hrs.) = 3

Ejemplo 2

a) Forma de entrar datos resumidos para el cálculo de la corriente I.

2,0,0/  
 1000,20,270,0.01883,0.1696,20/

Los resultados obtenidos serán los siguientes:

La corriente en el conductor es (Amp) = 746.80  
 La temperatura en el conductor es(°C) = 93°

b) Forma de entrar datos resumidos para calcular la corriente I y después calcular la temperatura TC1 después de sobre carga.

2.3.0/  
 1000,20,270,0.1883,0.1696,20/  
 105,10,0.4734,0.31104

Los resultados obtenidos serán los siguientes:

La corriente en el conductor es (Amp) = 746.80  
 La temperatura en el conductor es (°C) = 93°

#### CALCULO DE CORRIENTE DE SOBRECARGA

La temperatura después de sobrecarga es = 98.09°C  
 la corriente de sobrecarga (% de I) = 105  
 La corriente de sobrecarga (Amperes) = 784.14  
 El tiempo en alcanzar la sobrecarga = 10 mins.

c) Forma de entrar los datos resumidos para calcular la corriente I y después calcular el tiempo TIP en alcanzar la sobrecarga.

2,5,0/

1000,20,270,0.01683,0.1696,20/

120,105,0.4734,0.31104

Los resultados obtenidos serán los siguientes:

En este caso no se alcanza la temperatura de sobrecarga fija da por el usuario, cuando esto ocurre los resultados son:

No se alcanza la temperatura de sobrecarga = 120°C  
 Con una sobrecarga (% de I) = 105

#### Ejemplo 3

a) Forma de entrar datos completos para calcular la temperatura en el conductor TC.

3,0,0/

1000,10,0.626,90,20,63,1000,282,270,0.01883,0.1696,20,745.14,93

Los resultados obtenidos serán los siguientes:

La corriente en el conductor es (Amp) = 745.14  
 La temperatura en el conductor es ( $^{\circ}\text{C}$ ) = 92.03  
 El número de iteraciones fue = 4

b) Forma de entrar datos completos para calcular la temperatura en el conductor TC y después calcular la temperatura TC1 después de sobrecarga.

3,3,0/

1000,10,0.626,90,20,63,1000,282,270,0.01883,0.1696,20,745.14,93/  
120,110,0.4734,0.31104

Los resultados obtenidos serán los siguientes:

La corriente en el conductor es (Amp) = 745.14  
 La temperatura en el conductor es ( $^{\circ}\text{C}$ ) = 92.03

El número de iteraciones fue = 4

La temperatura después de sobrecarga es = 118.21 $^{\circ}\text{C}$   
 La corriente de sobrecarga (% de I) = 120  
 La corriente de sobrecarga (Amperes) = 894.168  
 El tiempo en alcanzar la sobrecarga es = 110.0 mins.

#### Ejemplo 4

a) Forma de entrar los datos resumidos para calcular la tempe

ratura en el conductor TC.

4,0,0/

1000,20,270,0.01883,0.1696,20,745.14

Los resultados obtenidos serán los siguientes:

La corriente en el conductor es (Amp) = 745.14

La temperatura en el conductor es (°C) = 92.72

El número de iteraciones fue = 4

Nota: La diferencia entre el Ejemplo 3a y 4a radica en la velocidad del viento, en el 3a es 0.626 m/seg y en el 4a es asumida por el programa 0.6095 m/seg.

b) Forma de entrar datos resumidos para calcular la temperatura en el conductor TC y después calcular la temperatura TC1 después de sobrecarga.

4,3,0/

1000,20,270,0.01883,0.1696,20,745.14/

110,30,0.4734,0.31104

Los resultados obtenidos serán:

La corriente en el conductor es (Amp) = 745.14

La temperatura en el conductor es (°C) = 92.73

El número de iteraciones fue = 4

La temperatura después de sobrecarga es = 105.44°C

La corriente de sobrecarga (% de I) = 110  
 La corriente de sobrecarga (Amperes) = 819.654  
 El tiempo en alcanzar la sobrecarga es = 30 mins.

c) Forma de entrar datos resumidos para calcular la temperatura en el conductor TC y después calcular el tiempo TIP en alcanzar la sobrecarga.

4,5,0/  
 1000,20,270,0.01883,0.1696,20,745.14/  
 120,130,0.4734,0.31104

Los resultados obtenidos serán los siguientes:

La corriente en el conductor es (Amp) = 745.14  
 La temperatura en el conductor es (°C) = 92.73  
 El número de iteraciones fue = 4  
 El tiempo en alcanzar la sobrecarga es = 6.4627 mins.  
 Datos temperatura después sobrecarga = 120°C  
 Y una corriente de sobrecarga (% de I) = 130  
 La corriente de sobrecarga (Amp) = 968.68

### 3. Descripción de bloques y métodos numéricos empleados

#### 3.1 Bloque de identificación

Este bloque contiene:

a) Descripción de los diversos tipos de cálculo que realiza.

- b) Identificación de las variables de entrada y salida del programa.
- c) Identificación de las variables, utilizadas en los cálculos.
- d) Identificación de las constantes.
- e) Identificación de las subrutinas, indica que realiza cada una y en donde es llamada.

### 3.2 Bloque de lectura

Este consta de las instrucciones de lectura de datos que pueden ser de dos a cuatro líneas, según sea las instrucciones de control dadas en la primera línea.

### 3.3 Bloque de inicialización

En éste bloque, dependiendo de las instrucciones de control, se asignan valores a ciertas variables.

### 3.4 Bloque de conversión al sistema inglés

En ésta etapa los valores de entrada en sistema métrico son transformados al sistema inglés (en caso de que en algún punto se deseara trabajar en este sistema, los factores de éste bloque se podrían cambiar).

### 3.5 Bloque de validación de datos de entrada

En éste bloque se verifica que cada dato de entrada esté dentro del rango máximo aceptable para líneas de transmisión aéreas, evitando así manejar - datos que podrían conducir a resultados absurdos. Cuando se detecta algún error en esta etapa se envía al bloque de manejo de errores donde se le informa al usuario que hay un error en la entrada del dato en cuestión y se suspende la ejecución del programa.

### 3.6 Programa Principal

Consta de los siguientes bloques:

- a) Cálculo de la corriente, dada la temperatura en el conductor  $T_C$ .
- b) Cálculo de la temperatura en el conductor por método de Steffensen.
- c) Cálculo de la temperatura en el conductor por método de bisección.

#### 3.6.1 Bloques de cálculo de la corriente dada la temperatura $T_C$

En este bloque el programa calcula la corriente en el conductor mediante la relación algebraica de las ecuaciones de equilibrio térmico.

#### 3.6.2 Bloque de cálculo de $T_C$ por métodos de Steffensen y bisección

En este bloque el usuario suministra una corriente de carga y lo que el programa calcula es la temperatura que alcanza el conductor. Se parte de las ecuaciones del caso anterior y se obtiene una ecuación no lineal de la forma  $f(x)=0$ . Por lo tanto, para resolverlo se debe usar un método aproximado. Estos métodos están basados en aproximaciones sucesivas o en una linealización y son del tipo iterativo, empezándose con una o más aproximaciones de la raíz. Esto produce una secuencia  $X_0, X_1, X_2, \dots$  que supuestamente converge a la raíz deseada.

Con ciertos métodos es suficiente para la convergencia conocer un intervalo  $(a,b)$  que contenga las raíces. Otros, una aproximación que esté cerca de la deseada raíz; como ventaja estos métodos convergen más rápidamente. Por lo tanto a menudo es deseable combinar un método áspero con uno que converja más rápidamente al final.

En nuestro caso el problema está limitado a determinar una raíz simple real ( $\alpha$ ) de la ecuación  $f(x)=0$ , esto es nosotros asumimos que  $f'(\alpha) \neq 0$ .

En general si una función  $f(x)$  es continua y  $f(a) \cdot f(b) < 0$ , entonces la ecuación  $f(x)=0$  tiene al menos un cero en el intervalo  $(a,b)$ .

En la búsqueda de la solución se probaron cuatro métodos:

- a) Bisección
- b) Gaus-Seidel
- c) Newton-Raphson
- d) Steffensen

De estos métodos los dos primeros son linealmente convergentes y los dos últimos cuadráticamente convergentes o de segundo orden (1). En nuestro caso, los que se encontraron de mayor facilidad para su implantación son los de Bisección y Steffensen. Están basados en la siguiente teoría:

### 3.6.2.1 Método de Bisección.

Suponiendo que  $f(x)$  es continua en el intervalo  $(a_0, b_0)$  y -- que  $f(a_0) \cdot f(b_0) < 0$  entonces debemos determinar una secuencia de intervalos  $(a_1, b_1)$   $(a_2, b_2)$   $(a_3, b_3)$  ... que deban contener las raíces de la ecuación  $f(x)=0$

Supóngase que en particular  $f(a_0) < 0$  y  $f(b_0) > 0$  (esto no es una limitación, pues podemos considerar la ecuación  $-f(x)=0$ ), el intervalo  $I_k = (a_k, b_k)$ ,  $k=1, 2, 3, \dots$  se determina entonces recursivamente de la siguiente manera:

El punto medio del intervalo  $I_{k-1}$  es:

$$m_k = \frac{1}{2} (A_{k-1} + B_{k-1})$$

Nosotros podemos asumir que  $f(m_k) \neq 0$ , porque de otra manera

hemos encontrado una raíz de la ecuación.

Calcule  $f(m_k)$  y tome:

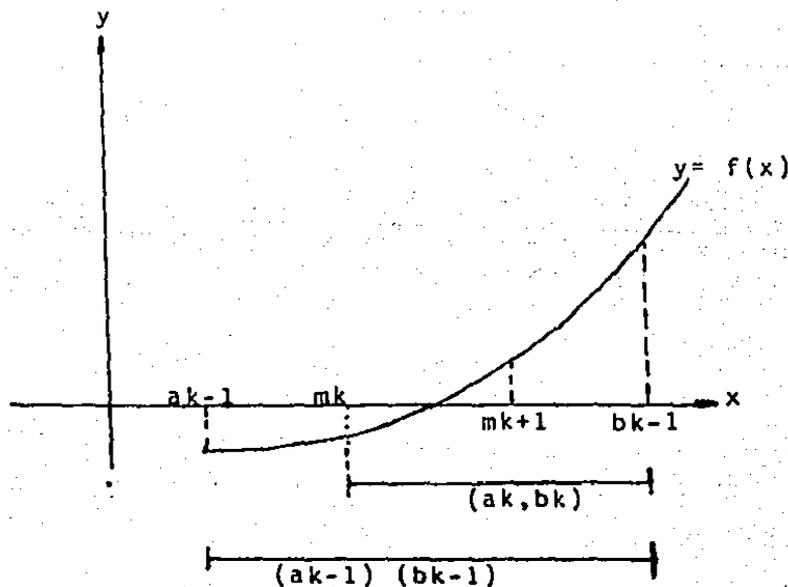
$$(a_k, b_k) = \begin{cases} (m_k, b_{k-1}) & \text{si } f(m_k) < 0 \\ (a_{k-1}, m_k) & \text{si } f(m_k) > 0 \end{cases}$$

De la construcción de  $(a_k, b_k)$  se sigue inmediatamente que --  $f(a_k) < 0$  y  $f(b_k) > 0$  (ver fig. 1) y que cada intervalo  $I_k$  contiene una raíz de  $f(x)=0$  después de  $n$  pasos, hemos contenido la raíz en el intervalo  $(a_n, b_n)$  de longitud.

$$(b_n - a_n) = 2^{-1} (b_{n-1} - a_{n-1}) = \dots = 2^{-n} (b_0 - a_0)$$

Podemos tomar  $m_{k+1}$  como un estimado de la raíz y entonces tenemos:

$$\alpha = m_{n+1} \pm d_n \quad d_n = 2^{-n-1} (b_0 - a_0)$$



### 3.6.2.2 Método de Steffensen.

Este método es similar al Newton-Raphson en cuanto a que en cada paso le restamos un error a la aproximación anterior. Tiene la diferencia de que no requiere la evaluación de derivadas ; pero en vez de eso se deben evaluar cos funciones.

En (1) se prueba que este método es de convergencia de segundo orden:

La solución recursiva es la siguiente:

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{g(X_n)} \quad \text{donde } g(X_n) = \frac{f(X_n + f(X_n)) - f(X_n)}{f(X_n)}$$

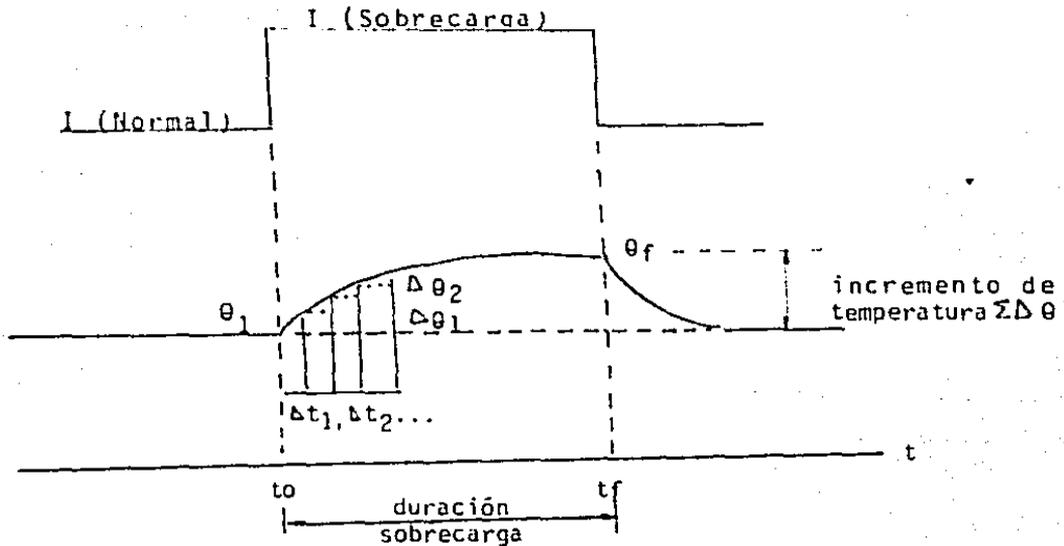
En nuestro caso, después de realizar varias pruebas tomamos como método inicial el de Steffensen y finalizamos con el de Bisección. Cuando el primero se aproxime a la raíz con un error de 0.01 (en caso de que esto no se logre en 100 iteraciones, se sale del ciclo y se suspende la ejecución del programa), se procede con el segundo. La solución se considera válida cuando el error es menor de 0.0001 y no se hayan sobrepasado las doscientas iteraciones en total.

En las diversas corridas realizadas para análisis de sensibilidad se observó que no se pasó de 14 iteraciones en total.

### 3.6.3 Bloque de cálculo de TCI dado TIP.

En este bloque se calcula la temperatura final del conductor después de un tiempo de sobrecarga, la ecuación a resolver es la siguiente:

$$Pd = \left[ (I^2R + QS) - (QR + QC) \right] dt$$



El balance térmico puede calcularse para un tiempo incremental  $\Delta t$ , suficientemente pequeño tal que  $R$ ,  $QC$  y  $QR$  sean prácticamente constantes durante el intervalo, Glenn et al (2) probaron varios diferentes intervalos y encontraron que se lograba incrementar muy poco la exactitud cuando se utilizaban intervalos menores de 10 segundos. El cambio en la temperatura durante el intervalo de tiempo está dado por:

$$\Delta \theta = \left[ \frac{(I^2 R + QS - QC - QR)}{P} \right] \Delta t$$

La nueva temperatura resultante por el calor almacenado es:

$$\theta_1 = \theta t + \Delta t$$

Entonces se pueden calcular valores de  $R$ ,  $QC$  y  $QR$  a la temperatura 1 para usarse en el cálculo de  $\Delta \theta$  para un segundo-incremento de tiempo; este proceso continúa hasta que el --

periodo de sobrecarga  $t_f$  ha sido completamente cubierto.

### 3.6.4 Bloque de cálculo de tiempo TIF dada la temperatura TC1

En este caso el usuario especifica un valor de corriente de sobrecarga y una temperatura límite de emergencia y el programa regresa el tiempo requerido para que el conductor alcance esta temperatura de emergencia.

Si este tiempo es muy corto, digamos entre algunos segundos o algunos minutos, el operador sabe que la línea está muy cargada llegando caso a su límite térmico. Si ocurriera una sobrecarga de emergencia en ese conductor en particular, será necesario transferir la carga a otro circuito, u ocurrirá un rápido sobrecalentamiento. Por otro lado, si el programa produce un tiempo de emergencia cercano a una hora o más la línea está poco cargada y tendrá gran capacidad para responder a una sobrecarga sin llegar a niveles peligrosos de temperatura.

Cuando se está determinando el tiempo para alcanzar una temperatura de sobrecarga, se puede presentar el caso de que ésta no alcance por ser la sobrecarga muy leve para la temperatura dada. Al ocurrir esto el programa presenta los últimos datos obtenidos y suspende la ejecución del programa.

En este caso la ecuación a resolver es la siguiente:

$$\frac{Pd\theta}{(I^2R+QS)-(QR+QC)} = dt$$

Resolviendo en forma análoga al bloque anterior:

$$\frac{PA\theta}{(I^2R+QS)-(QR+QC)} = \Delta t$$

Donde:

P = Capacidad térmica del conductor (J/Pie °C)

QS = Ganancia de calor solar

QR = Pérdida de calor por radiación

QC = Pérdida de calor por convección

d = Diferencial de temperatura

dt = Diferencial de tiempo

Si los términos dentro del paréntesis exterior fueran constantes, el aumento de temperatura se podría calcular para un período de tiempo  $t_f$  de la siguiente manera:

$$\theta_f - \theta_i = \int_0^{t_f} \frac{I^2 R + QS - QC - QR}{P} dt$$

Desafortunadamente R, QS, y QR varían con la temperatura de una manera complicada. Sin embargo, si la corriente se supone constante en el período  $t_f$ , un método incremental puede emplearse para aproximar la integración.

La corriente antes de la sobrecarga se supone igual a la corriente normal de carga del conductor y la corriente de sobrecarga se asume como constante durante la misma e igual magnitud al pico de sobrecarga. Esto simplifica los cálculos y los vuelve conservadores.

Gráficamente el método se ilustra en la Figura 2.

De los diversos análisis de sensibilidad se determinó que no se logra incrementar significativamente la exactitud utilizando intervalos para  $\Delta\theta$  menores a 0.2 grados centígrados.

### 3.6.5 Bloque de cálculo de pérdida de fuerza mecánica.

En este bloque se calcula la pérdida de fuerza mecánica para conductores ACSR de acuerdo a las ecuaciones propuestas por Harvey (3). Se tienen tres diferentes opciones para este cálculo:

- a) Calculado de acuerdo a una temperatura y tiempo de sobrecarga determinado, a partir de los datos leídos en la tercer línea.
- b) Calculado con dos temperaturas y tiempos de sobrecarga a partir de los datos de las dos últimas líneas.
- c) Calculado con tres temperaturas y tiempos de sobrecarga a partir de los datos de las dos últimas líneas.

### 3.7 Bloques de impresión de resultados.

Este bloque utiliza el formato libre del lenguaje Fortran 77 imprimiendo tres conjuntos de datos según sea el caso:

- a) Los calculados por las instrucciones de control, N o sea ampacidades y temperatura en el conductor para largos períodos.
- b) Ampacidades, tiempos, temperatura y pérdida de fuerza mecánica para períodos de sobrecarga según sea el caso.
- c) Cálculos adicionales de pérdida de fuerza mecánica, ocasionados por más de una temperatura de sobrecarga.

### 3.8 Bloque de impresión de manejo de errores.

Este bloque consta de la impresión de dos tipos de errores:

- a) Durante la ejecución del programa se verifica la convergencia de los distintos procesos iterativos. En caso de no lograrse se transfiere el control a este bloque donde se le informa al usuario y se suspende la ejecución.
- b) La impresión de los errores encontrados en la verificación de los datos de entrada; se le informa al usuario en que entrada está el error y se suspende la ejecución.

### 3.9 Subrutina Calgen.

Esta subrutina realiza cálculos generales que son utilizados para determinar las pérdidas por radiación y ganancias de calor solar.

### 3.10 Subrutina CalQC.

Esta subrutina realiza el cálculo de las pérdidas de calor por convección.

### 3.11 Subrutina FUEZ.

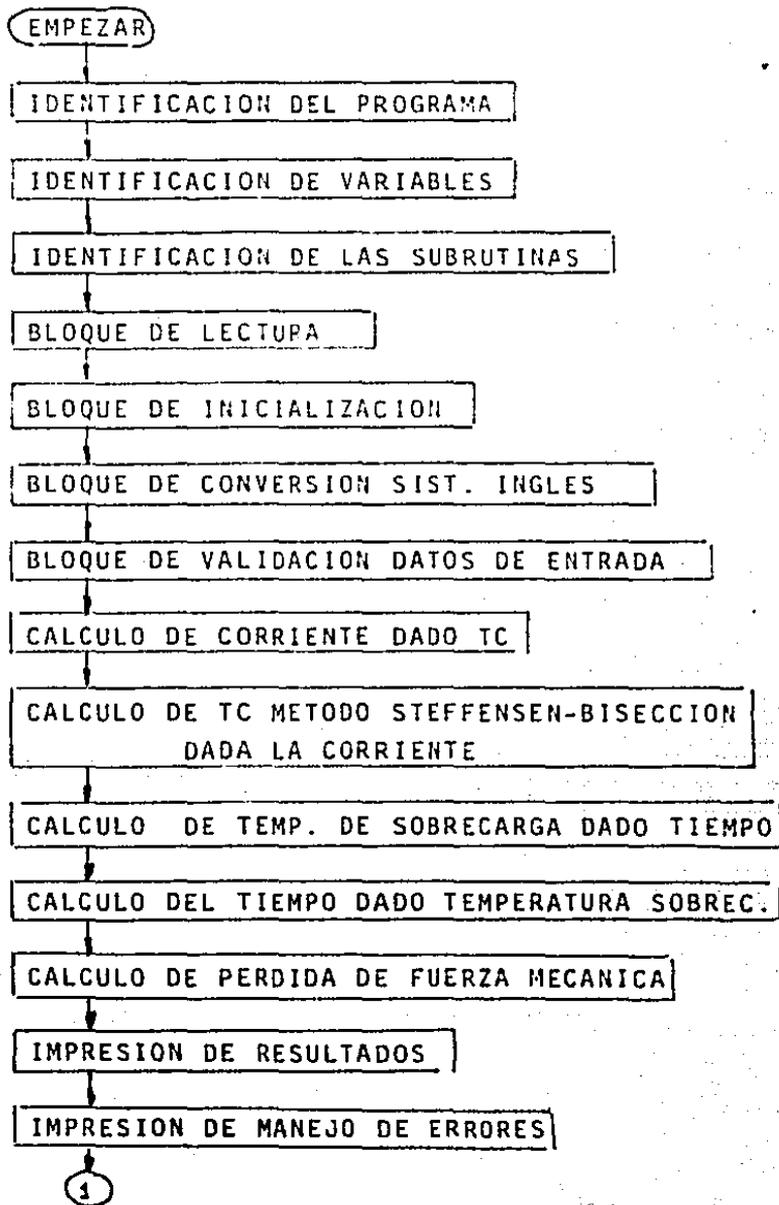
Esta subrutina realiza el cálculo de las pérdidas de fuerza mecánica para dos o tres temperaturas y períodos de sobrecarga.

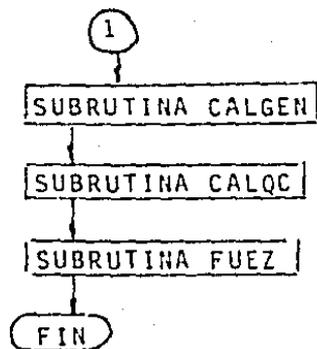
## BIBLIOGRAFIA

- (1) Numerical Methods  
Germund Dahlquist  
Ake Björck  
Prentice Hall
- (2) Short-Time thermal Ratings for Bare Overhead Conductors  
Glenn A. Davison Et Al.  
I.E.E.E. Transaction on Power Apparatus and Systems.  
Vol. PAS 88 No. 3 March, 1969
- (3) Effect of Elevated Temperature Operation on the Strength  
of Aluminium Conductors.  
J.R. Harvey  
I.E.E.E. Transaction, PAS 71, 1972

DIAGRAMA DE FLUJO

BLOQUES





ENCABEZADOS:  
 IDENTIFICACIÓN DEL PROGRAMA  
 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES  
 IDENTIFICACIÓN DE LAS CONSTANTES

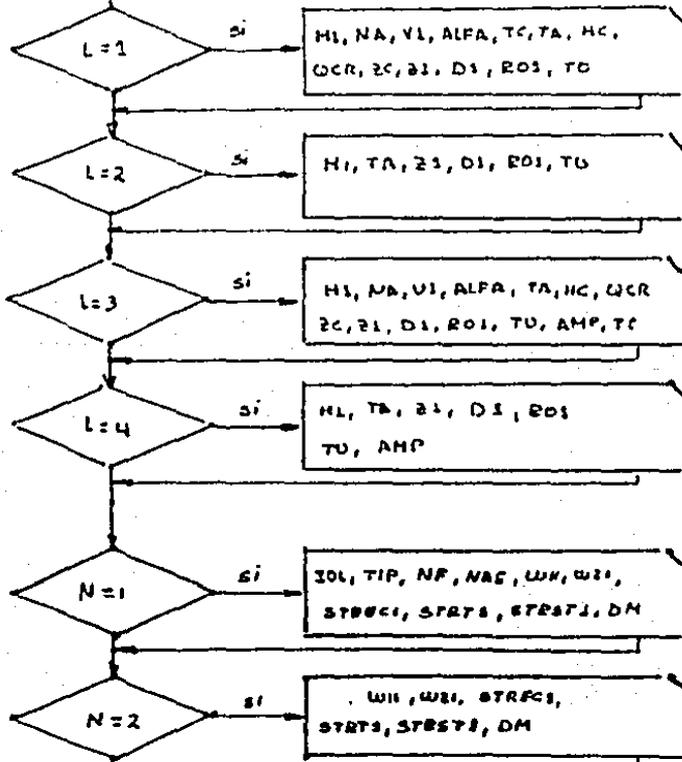
- ENCABEZADOS -

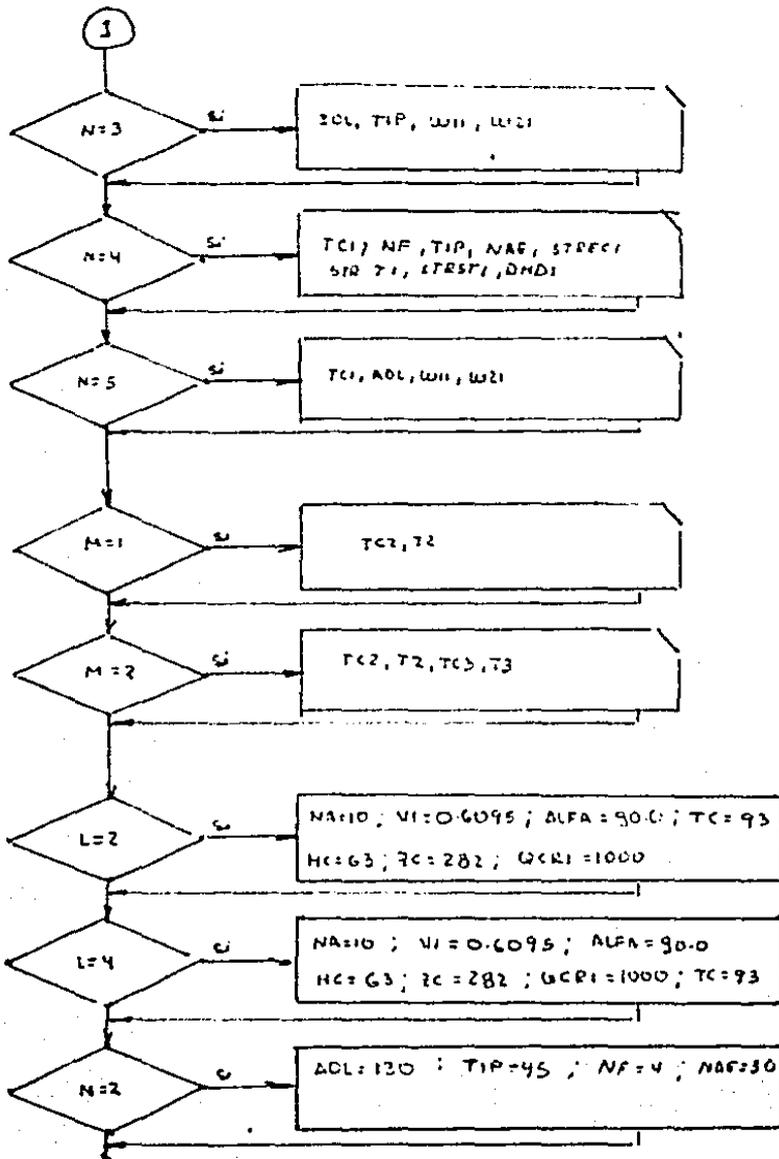
C1 = 0.2158752  
 C2 = 0.109848  
 BLM = 2.718281

- ASIG. DE CONSTANTES -

L, N, M

- LECTURA -



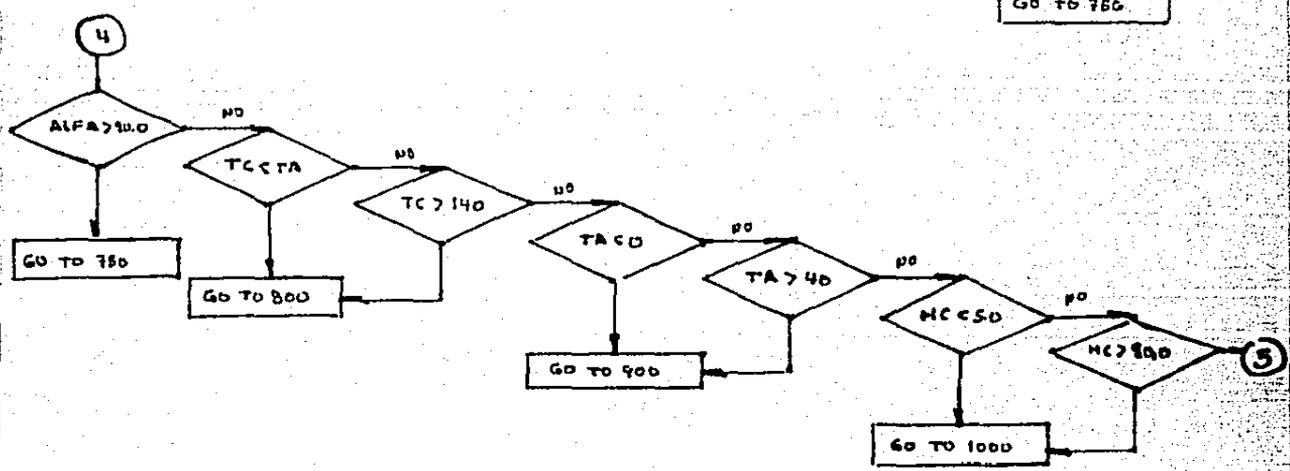
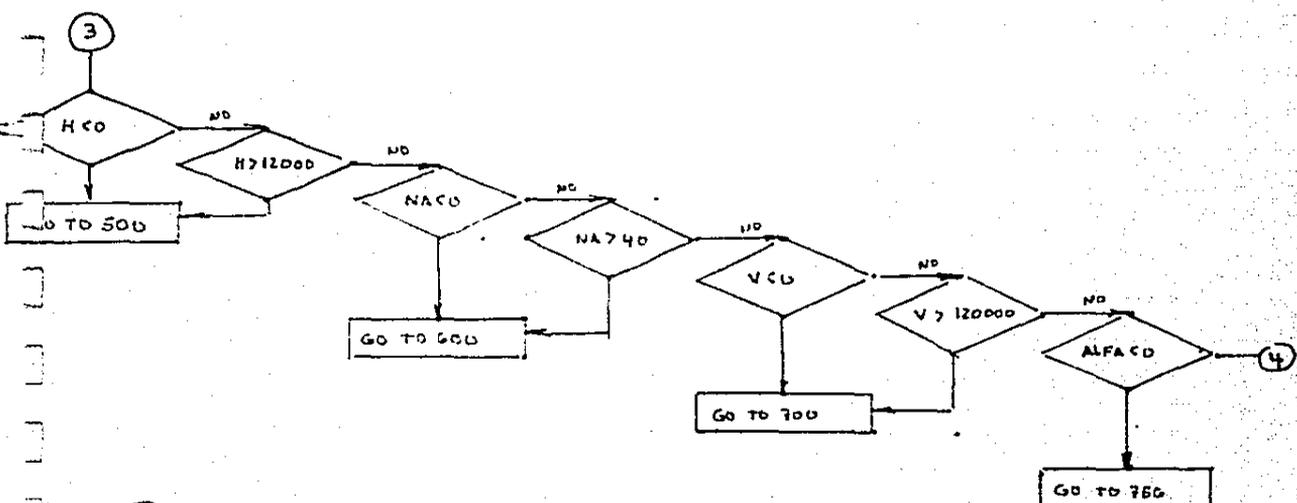
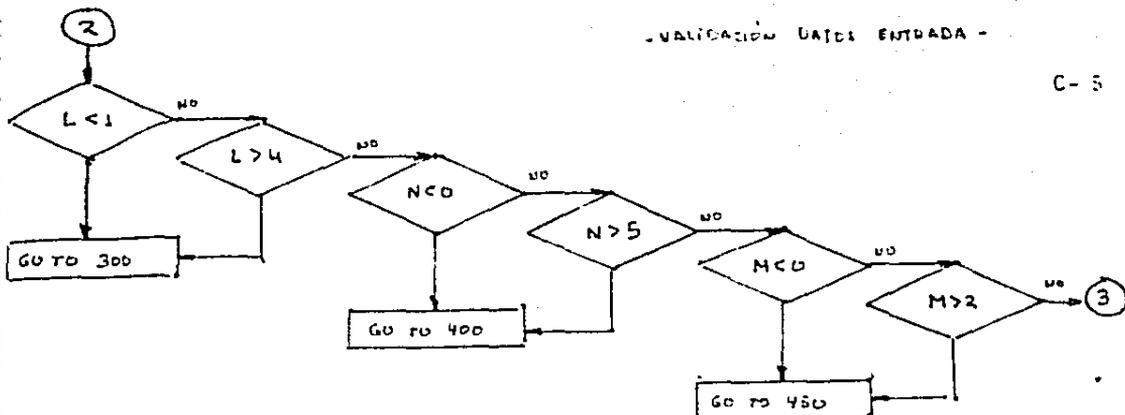


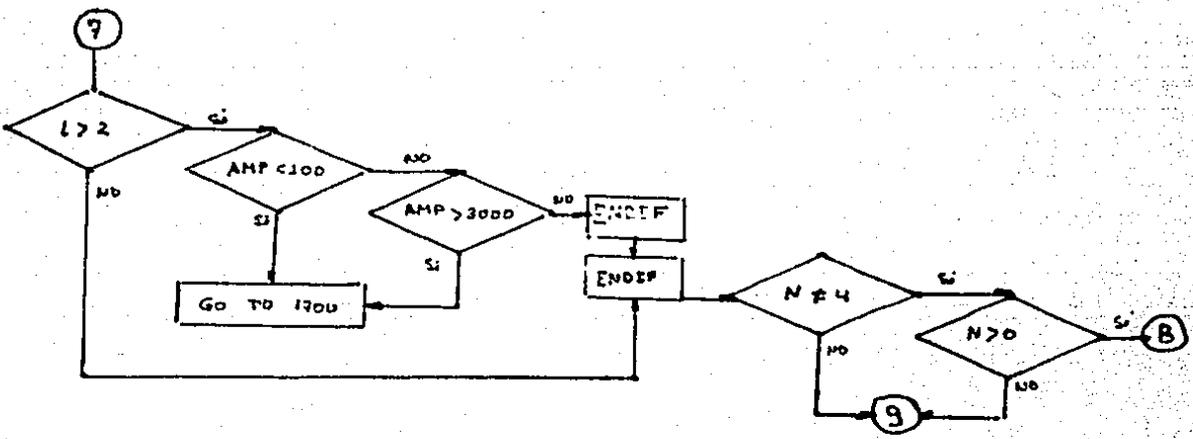
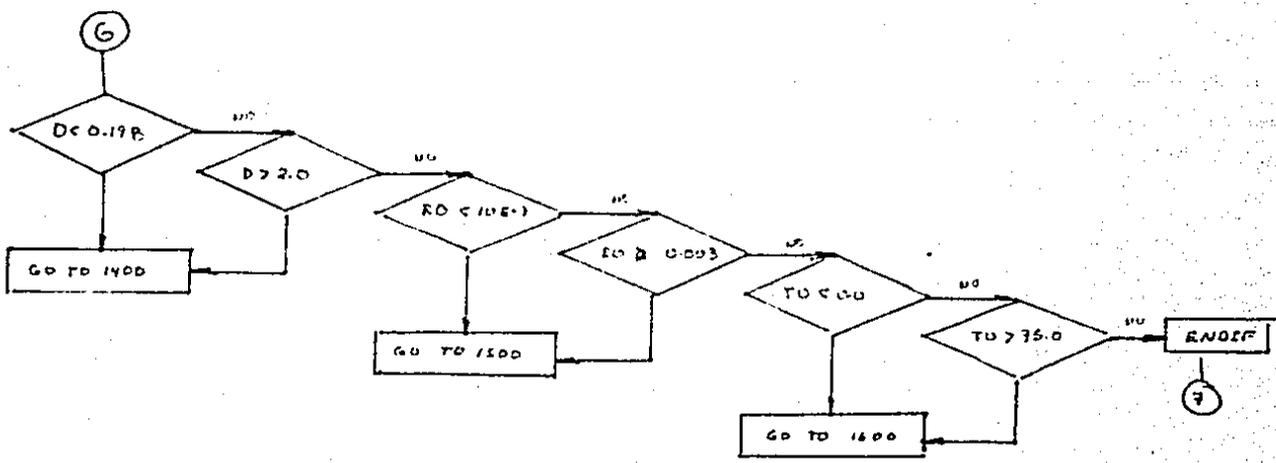
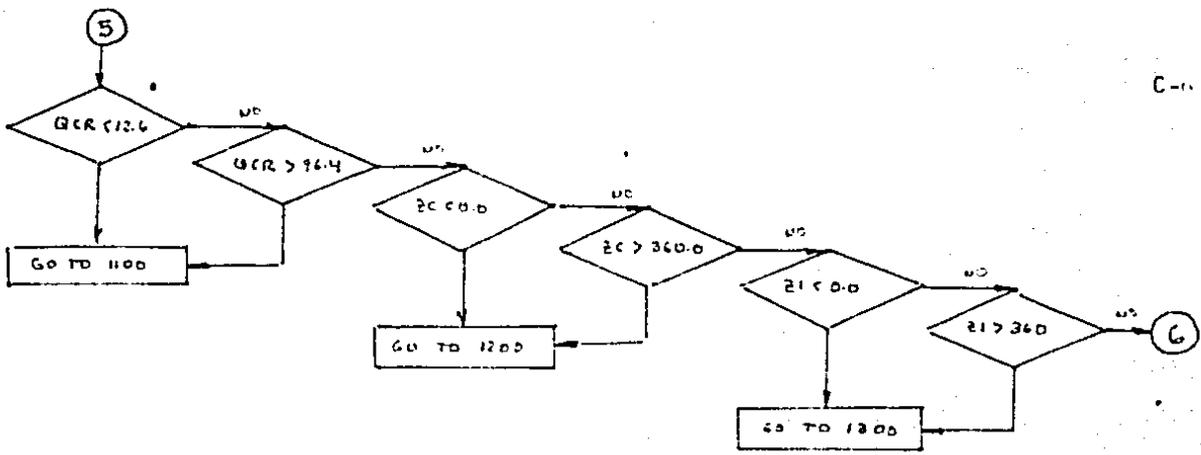
- BLOQUE DE INICIALIZACIÓN -

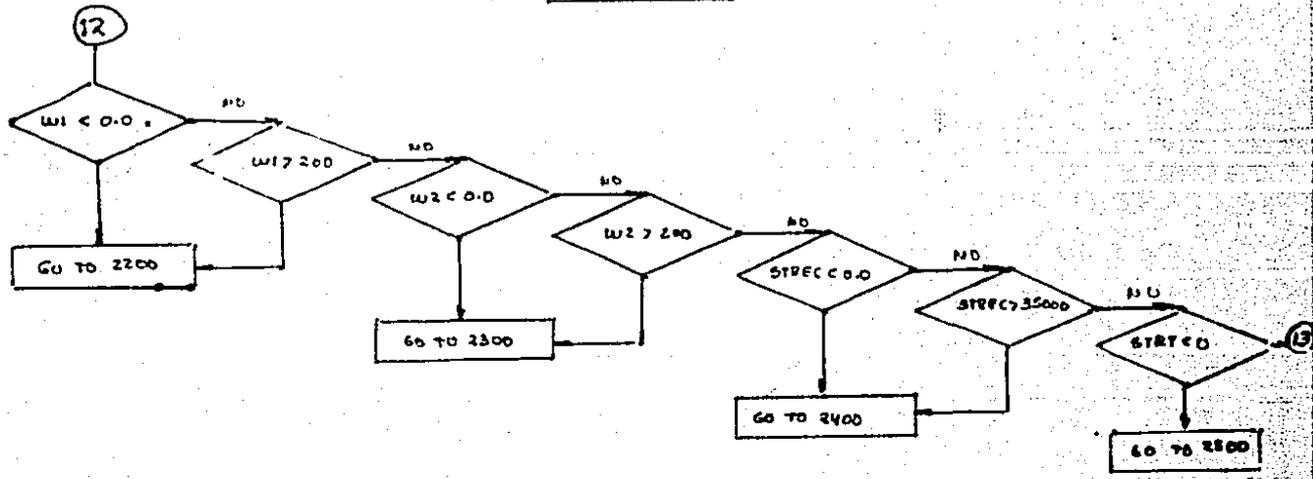
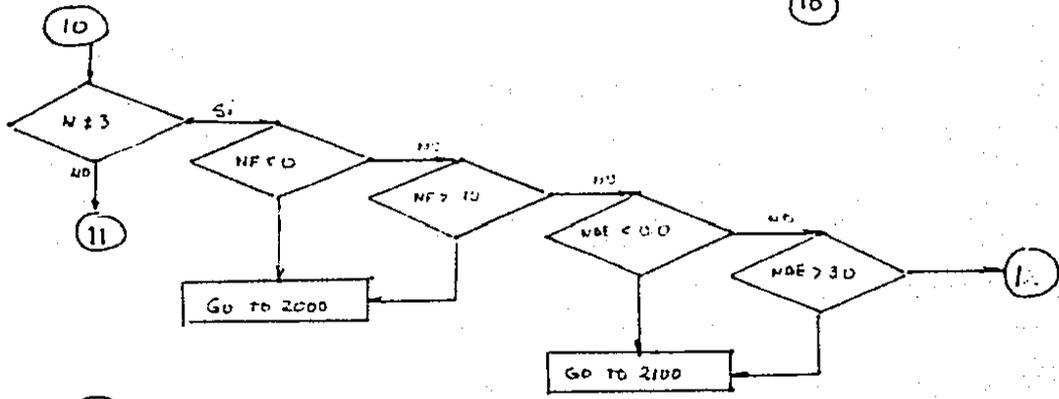
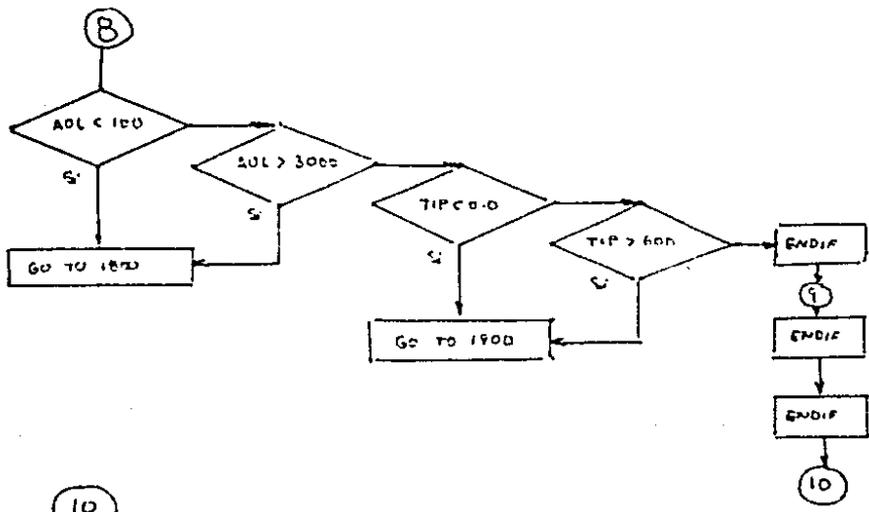
```

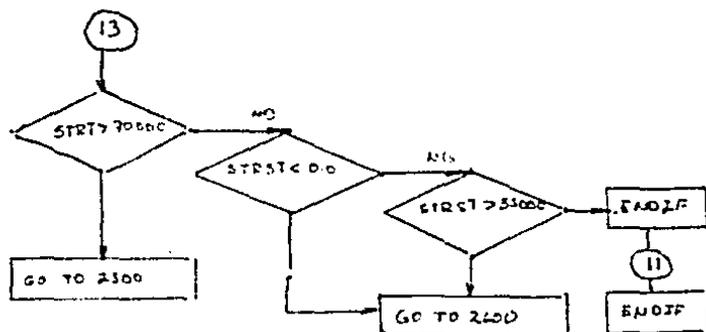
M = M1 * 3.281
V = V1 * 11811.6
D = D1 * 3937
RO = RO1 * 3.048E-4
W1 = W11 * 0.631924
W2 = W21 * 0.631924
STREC = STREC1 * 0.2248
STRT = STRT1 * 0.2248
STRST = STRST1 * 0.2248
HD = HD1 * 39.27
WCR = WCR1 * 0.0929
  
```

- BLOQUE COM. SIST. INIFLS -



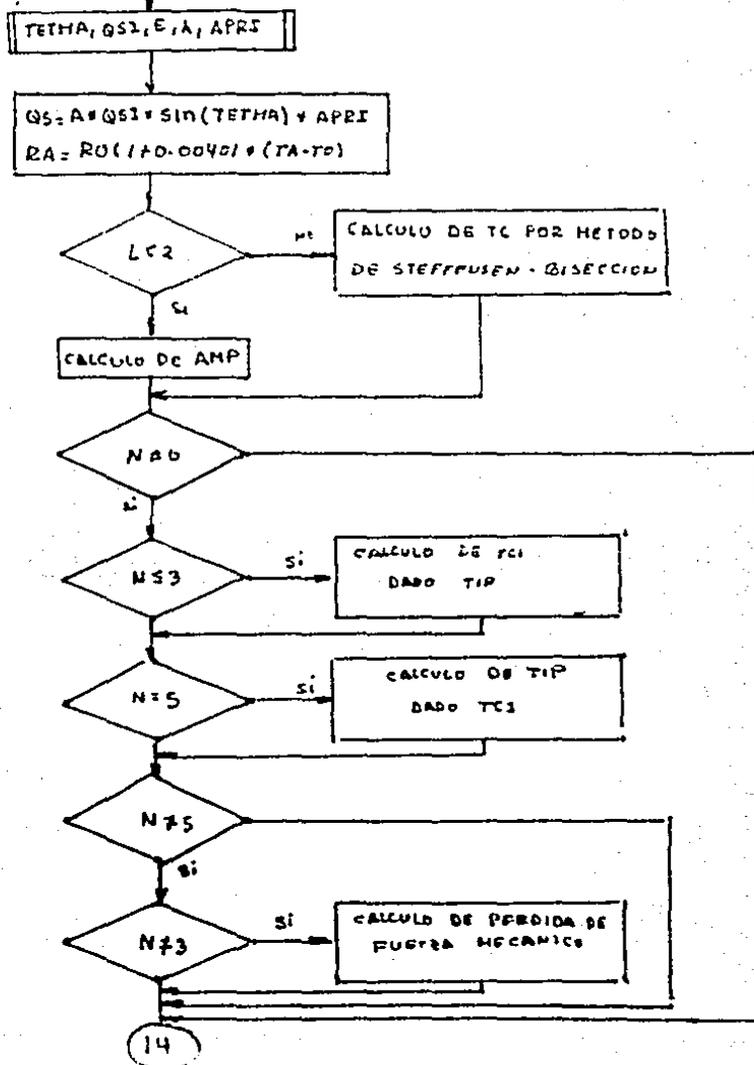


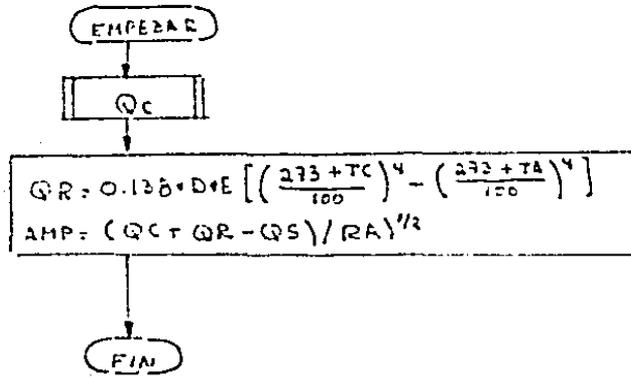




- FIN VALIDACION DATOS DE -  
ENTRADA

- PROGRAMA PRINCIPAL -





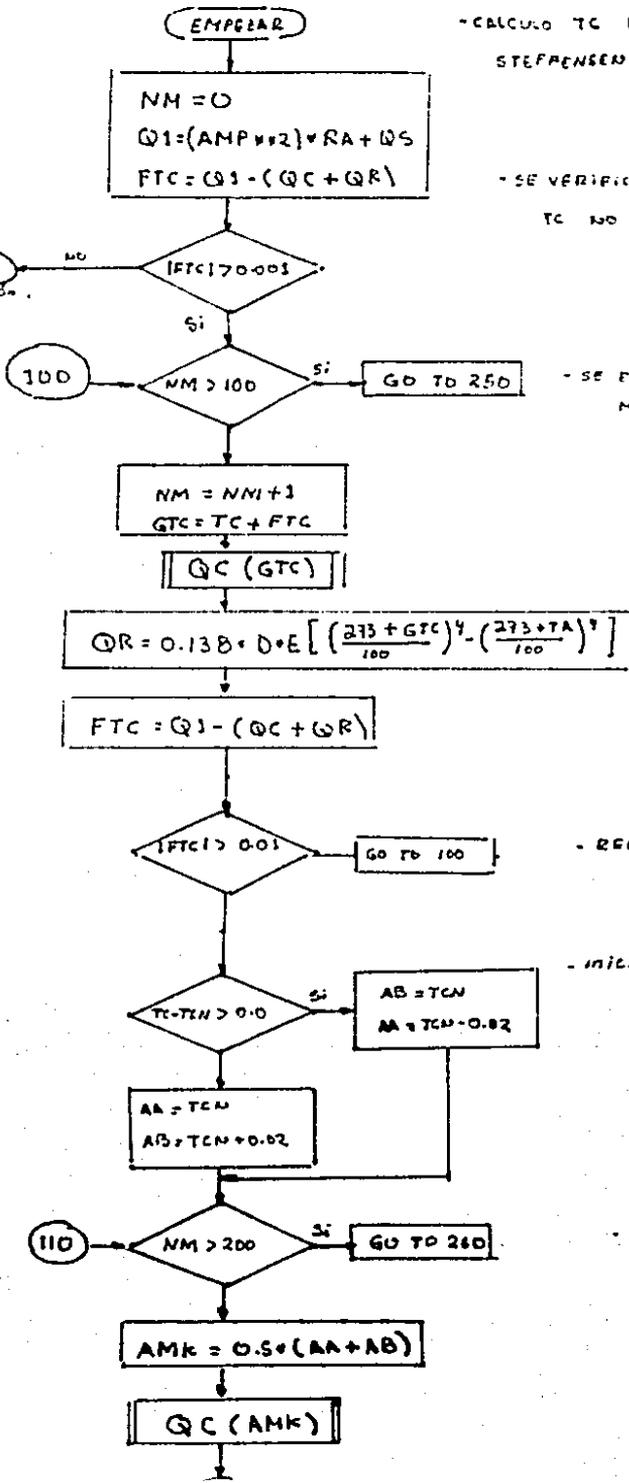
- CALCULO TC POR METODO -  
STEFFENSEN - BISECCION

C-10

UD. AL FINAL

YA QUE EL VALOR  
ASUMIDO ES LA SOLUCION.

- SE VERIFICA QUE EL VALOR ASUMIDO DE  
TC NO SEA LA SOLUCION -

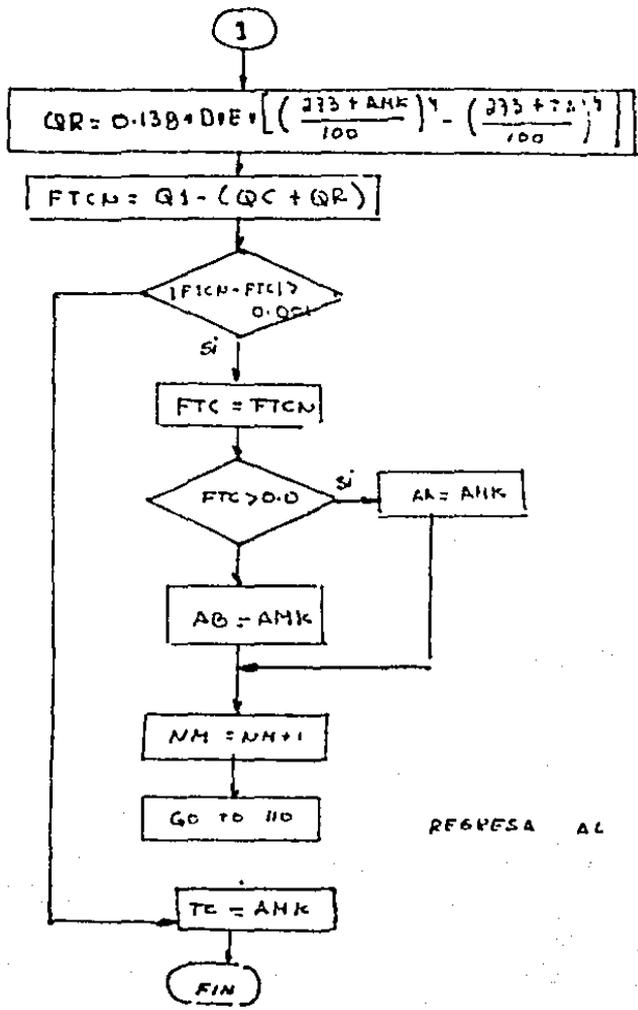


- SE ENVIA A LA IMPRESION DE  
MANEJO DE DATOS PORQUE NO  
CONVERGE EN 100 ITERACIONES  
METODO STEFFENSEN

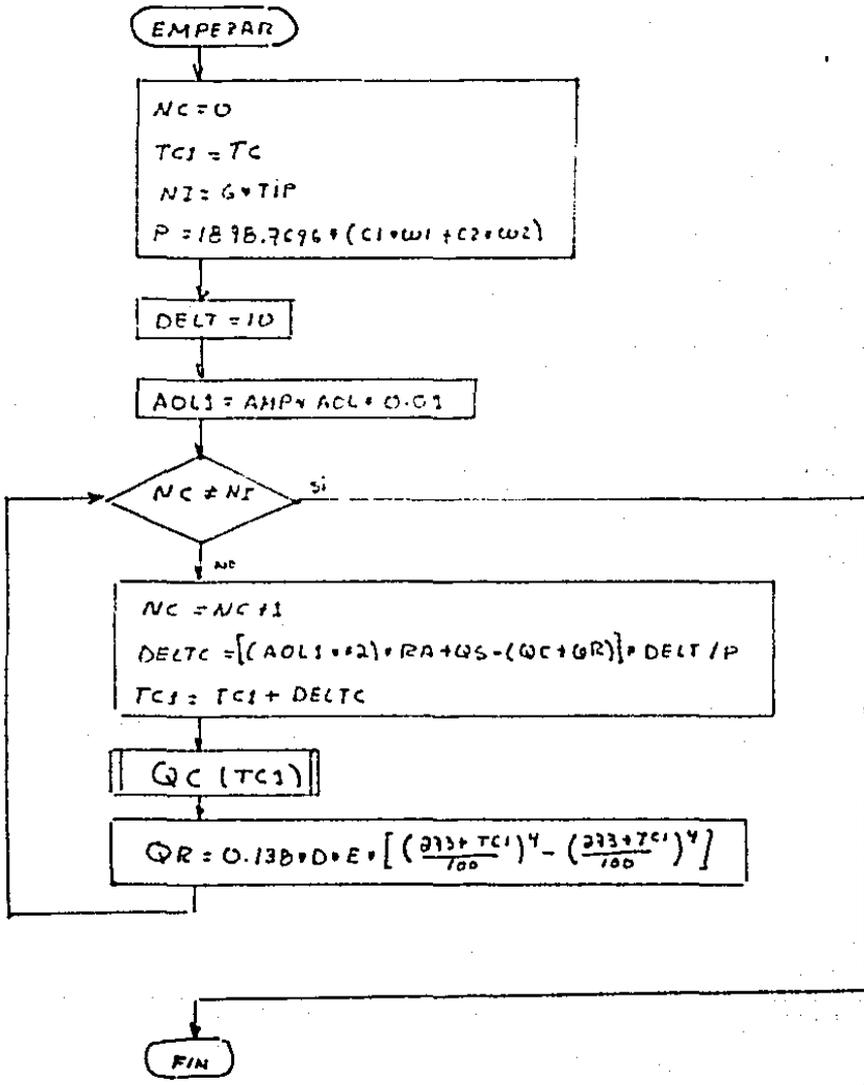
- REGRESA AL PRINCIPIO DEL  
CICLO

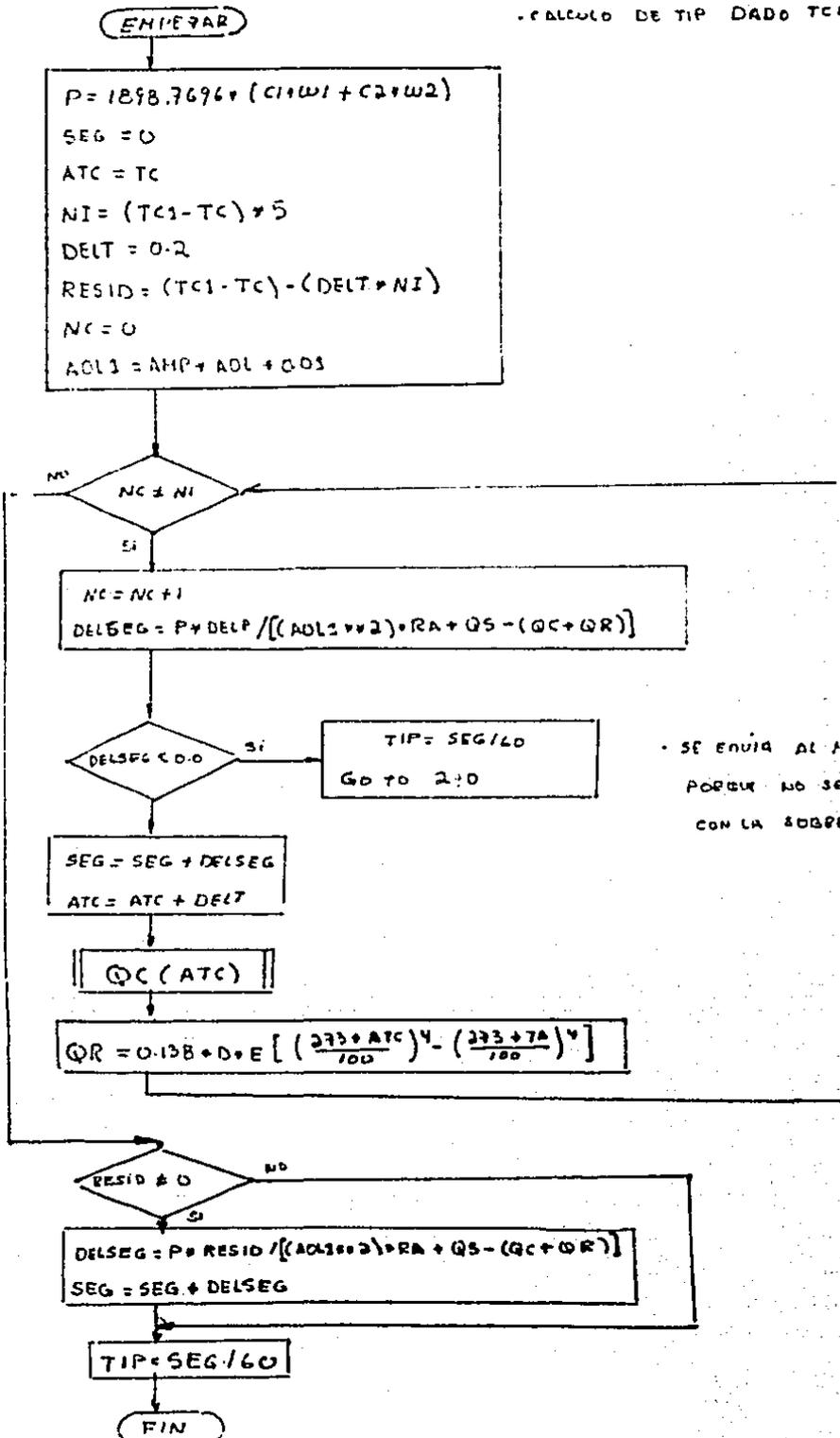
- INICIA METODO BISECCION -

- SE ENVIA A LA IMPRESION DE  
MANEJO DE DATOS PORQUE  
NO CONVERGE EN 200 ITERACIONES  
METODO STEFFENSEN - BISECCION

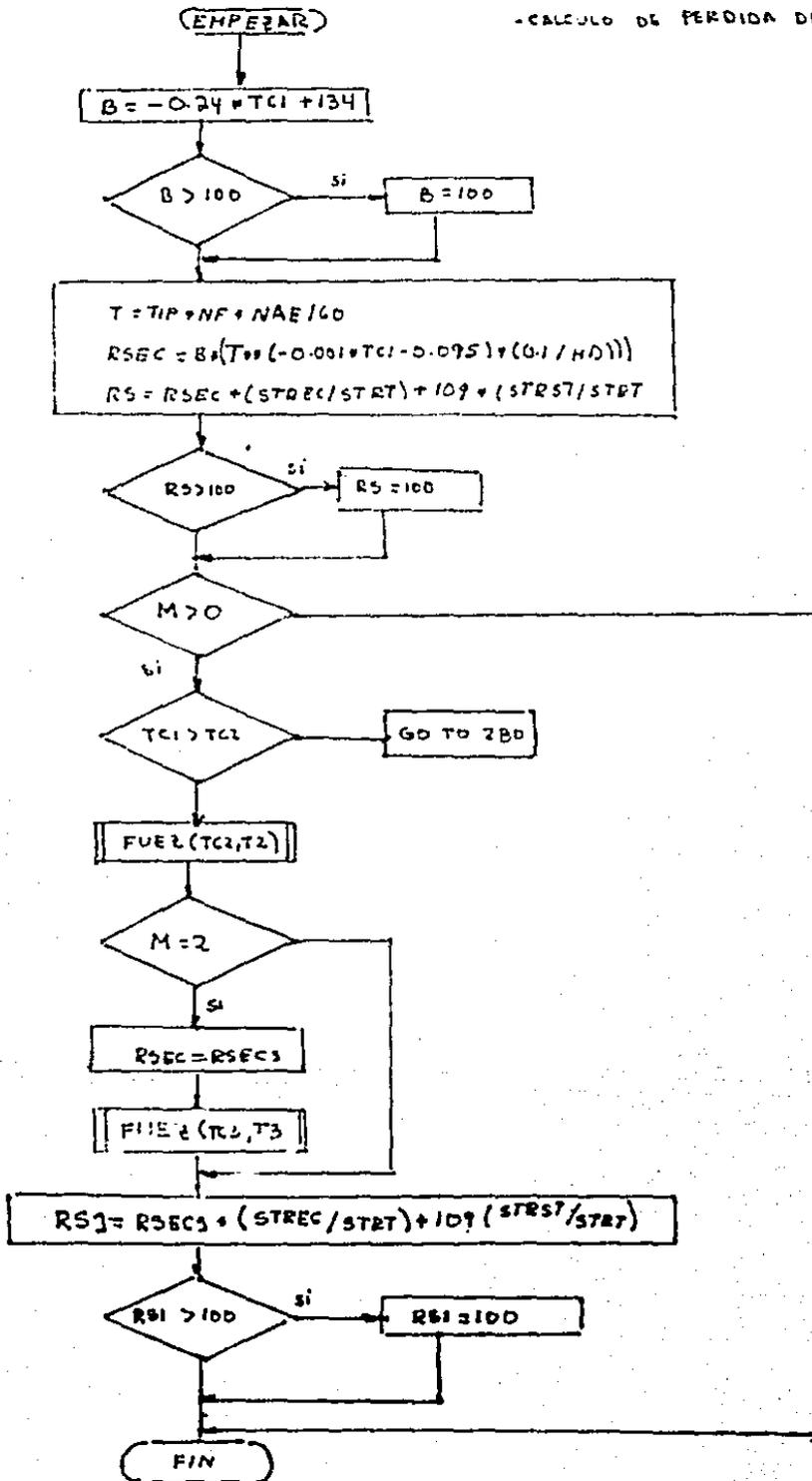


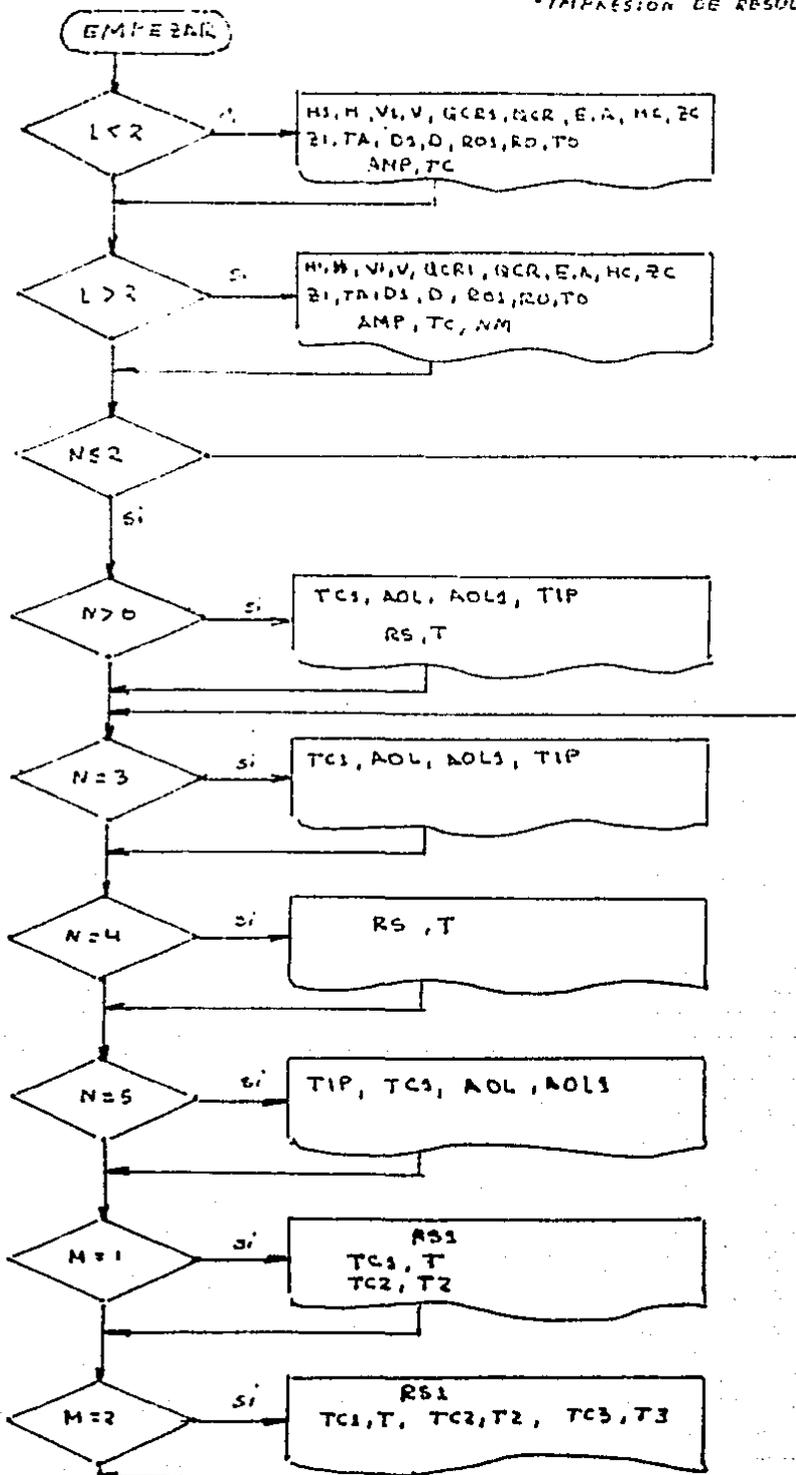
REGRESA AL PRINCIPIO DEL CICLO





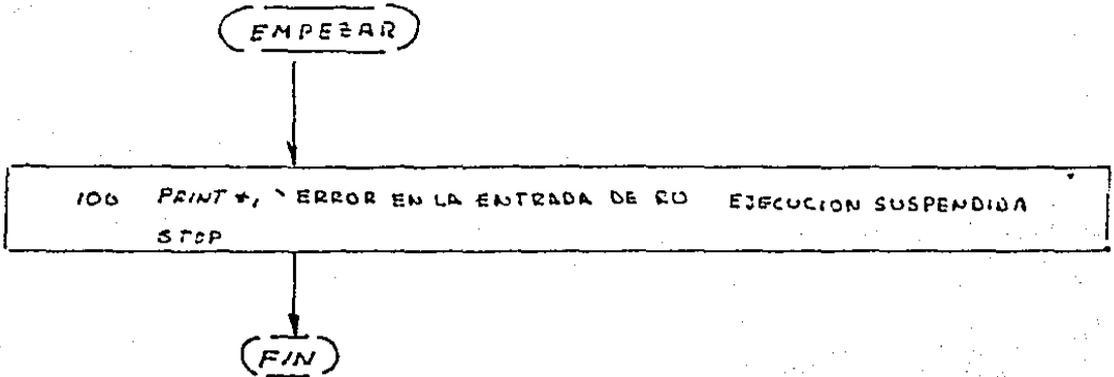
- SE ENVIA AL MANEJO DE STROPS -  
PORQUE NO SE ALCANZA LA TEMP.  
CON LA SOBRECARGA DADA

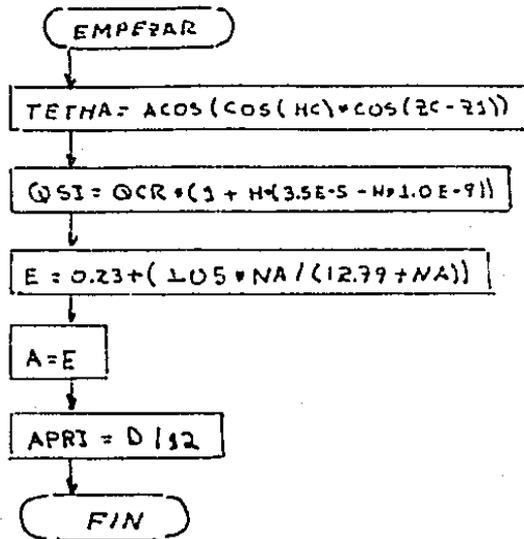




- IMPRESION DE ERRORES -  
(FORMA GENERAL)

C-16





EMPEZAR

$$TF = [(TC + 275) + (TA + 275)] / 2$$

$$FF = 21.657 * (BIN * (HY * (-3.90694E-5)))$$

$$PF = PF * (TF * (HY * 1.51218E-7 - 0.796289))$$

$$UF = TF / (51.65.9 + 5.16708 * TF)$$

$$AKF = 1.20492E-3 + TF * 2.26345E-5$$

V = 0.0

Si

H = 0.0

Si

$$QC = 0.072 * (D * 0.75) * (TC - TA) * 1.25$$

$$QC = 0.283 * (PF * 0.5) * (D * 0.75) * (TC - TA) * 1.25$$

ALFA < 60.0

$$ANUIE = 0.86 * ALFA + 42.0$$

$$ANUIE = 0.375 * ALFA + 48.125$$

$$QC1 = 0.1695 * (D * PF * V / UF)^{0.6} * AKF * (TC - TA)$$

$$QC2 = (3.01 + 0.371 * ((D * PF * V / UF)^{0.52} * AKF * (TC - TA)))$$

QC1 > QC2

Si

$$QC = QC1 + 0.03 * ANUIE$$

$$QC = QC2 + 0.01 * ANUIE$$

FIN

