

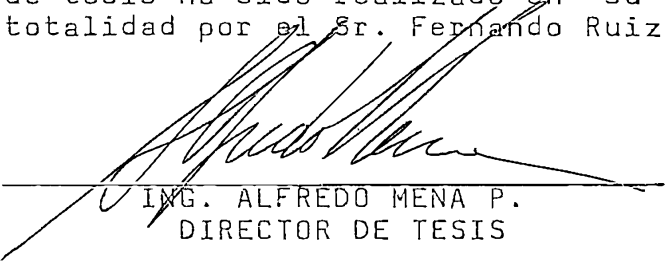
"ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD ESTACIONARIA Y  
CARGABILIDAD EN LINEAS DE TRANSMISION"

Tesis previa a la obtención del  
Título de Ingeniero en la espe-  
cialización de Potencia, en la  
Facultad de Ingeniería Eléctrica  
de la Escuela Politécnica Nacio-  
nal.

FERNANDO R. RUIZ S.

Quito, Marzo de 1980

Certifico que el presente trabajo de tesis ha sido realizado en su totalidad por el Sr. Fernando Ruiz.



---

ING. ALFREDO MENA P.  
DIRECTOR DE TESIS

DEDICATORIA

A MIS QUERIDOS PADRES.

## A G R A D E C I M I E N T O

Para todas las Autoridades de la Escuela, y los profesores del Departamento de Potencia, especialmente de los laboratorios; conjuntamente con el personal del DOSNI y para un magnífico profesor como el Ing. Alfredo Mena por sus valiosas sugerencias y su ayuda personal, y para todos los que en una u otra forma han contribuido al mejor desarrollo del presente trabajo.

## INDICE GENERAL

Página

### CAPITULO I.

#### ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSMISION Y LA ESTABILIDAD ESTACIONARIA

1.1	Potencia límite de un sistema de transmisión .....	1
1.2	Efecto de la caída de voltaje y del criterio de estabilidad en la cargabilidad de la línea .....	15
1.3	La estabilidad estacionaria .....	18
1.4	Métodos para elevar la potencia de transmisión .....	27

### CAPITULO II

#### OBTENCION DE LAS CURVAS POTENCIA-ANGULO

2.1	Análisis teórico de la carga estática ...	34
2.2	Uso del laboratorio para obtener las curvas Potencia-Angulo de varios casos de carga estática .....	39
2.3	Curva Potencia-Angulo del caso Generador-Barra Infinita .....	47

2.4	Estudio de la carga estática en el Analizador de Redes .....	52
-----	--	----

CAPITULO III

LIMITACIONES DE LAS LINEAS DE TRANSMISION

3.1	Generalidades .....	53
3.2	Tensión .....	59
3.3	Corriente .....	62
3.4	Distancia límite del suelo .....	64
3.5	Límite térmico en conductores .....	65
3.6	Cálculo de la temperatura final de equilibrio térmico .....	73

CAPITULO IV

PROGRAMA DIGITAL PARA CALCULAR LA CARGABILIDAD DE UNA LINEA DE TRANSMISION MEDIANTE UN MODELO MATEMATICO

4.1	Modelo, diagrama de flujo y objetivos ...	83
4.2	Presentación del programa y resultados ..	90
4.3	Análisis de resultados y limitaciones del programa .....	93

CAPITULO V

APLICACIONES DEL PROGRAMA DIGITAL PARA CALCULAR  
LA CARGABILIDAD EN LINEAS DE TRANSMISION

5.1	Generalidades .....	99
5.2	Resultados de las diversas alternativas para las líneas que forman el Sistema Nacional Interconectado Actual .....	100-A
5.3	Interpretación de los Resultados y Al- cances del programa .....	101

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	103
APENDICE .....	106
BIBLIOGRAFIA .....	110

## S U M A R I O

La inestabilidad en estado estacionario es un evento posible pero improbable en grandes Sistemas Eléctricos de Potencia. Consideraciones de Estabilidad han sido reconocidas como una parte esencial del planeamiento del SEP durante mucho tiempo. Documentos fundamentales sobre la materia fueron publicados en las TRANSACTIONS de la IEEE hace cerca de 50 años (en pocos años, los estudios de estabilidad se han hecho rutina). Como el comportamiento estable de un gran SEP lo difícil de predecir, este trabajo de tesis enfoca el estudio de la estabilidad estacionaria dirigido a una parte esencial del SEP como es la línea de transmisión. Se presentan análisis teóricos, así como el estudio de los fenómenos en el laboratorio, acompañados de un programa digital que predice el comportamiento de una línea en lo referente a su "Cargabilidad", para terminar haciendo un análisis completo del límite térmico de un conductor. Se pretende, pues encontrar qué parámetros influyen en la cargabilidad de una línea de transmisión y cuáles son sus limitaciones a medida que varían ciertos factores tanto del diseño mismo como eventuales.



## CAPITULO I

### ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN Y LA ESTABILIDAD ESTACIONARIA

#### 1.1 POTENCIA LIMITE DE UN SISTEMA DE TRANSMISION

La búsqueda de la potencia límite para el caso de voltajes en los bornes constantes se puede hacer mediante el siguiente ejemplo: una máquina sincrónica alimenta a través de un transformador y de una línea de transmisión de reactancias dadas,  $X_S$ ,  $X_T$  y  $X_L$  respectivamente, a un circuito metropolitano. Se exige que el voltaje  $\underline{V}_S$  en el lado secundario del transformador, sea igual al voltaje del circuito de carga  $\underline{V}_R$ . Primeramente se hará el cálculo para líneas cortas, es decir despreciando las capacitancias en paralelo de la línea de transmisión. También supondremos que las pérdidas de la línea son despreciables; es decir, que la potencia  $P$  en el borne 2 del circuito de la Figura 2.1, es igual que la potencia  $P_e$  en el borne 1 de la máquina sincrónica. La condición:

$$\left| \underline{V}_S \right| = \left| \underline{V}_R \right| \quad (1.1)$$

implica que la potencia reactiva  $Q$  en el borne 2 no sea de carácter aleatorio, sino que dependa más bien de la potencia de transmisión  $P$ :

$$Q = Q(P) \quad (1.2)$$

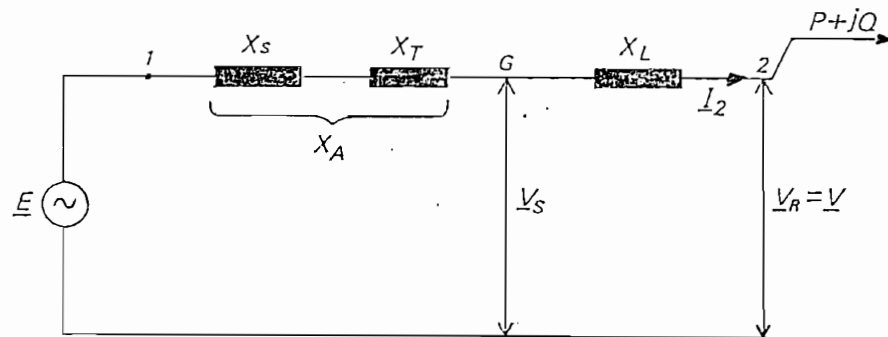


Figura 1.1. Ejemplo para determinar la Potencia Límite bajo la condición  $\left| \underline{V}_S \right| = \left| \underline{V}_R \right|$

$$\text{Sea } \Delta u' = u'_1 + ju'_q = (j \cdot X_L \cdot \underline{I}_2) / \underline{V}_R \quad (1.3)$$

la caída de tensión relativa a lo largo de la línea; entonces para que se cumpla la condición (1) y haciendo

$$\underline{V}_R \angle 0 = \underline{V} \angle 0$$

$$|\underline{V}_S| = \sqrt{(V_R + u_1)^2 + u_q^2} = V_R \sqrt{(1 + u_1')^2 + u_q'^2},$$

por lo que se deberá cumplir que:

$$1 = (1 + u_1')^2 + u_q'^2 \quad (1.4)$$

Sea  $\Delta \underline{u} = u_m + ju_n$  la caída de tensión total relativa entre  $\underline{E}$  y  $\underline{V}_R$ . Hagamos:

$$\frac{X_L}{X_A + X_L} = \frac{X_L}{X} = B \quad (1.5)$$

$$\text{Como } \underline{S}_2 = 3 \underline{V} \underline{I}_2^*, \text{ entonces } \underline{I}_2 = \frac{\underline{S}_2^*}{3V} = \frac{P - jQ}{3V} \quad (1.6)$$

$$\text{Ahora, } u_1' = \text{Re} \left\{ \Delta \underline{u}' \right\} = \text{Re} \left\{ \frac{j X_L \underline{I}_2}{\underline{V}} \right\} = \text{Re} \left\{ \frac{j X_L (P - jQ)}{3V^2} \right\}, \text{ de donde}$$

$$u_1' = \frac{Q X_L}{3V^2}, \text{ además } u_q' = \text{Im} \left\{ \Delta \underline{u}' \right\} = \frac{P X_L}{3V^2}, \text{ entonces}$$

$$u_1' = \frac{Q X_L}{3V^2} = \frac{Q X}{3V^2} B = B u_m \quad (1.7)$$

$$u_q' = \frac{P X_L}{3V^2} = \frac{P X}{3V^2} B = B u_n$$

Ahora, a partir de la ecuación (4) se obtiene:

$$u_m = \frac{1}{B} \left( -1 \pm \sqrt{1 - (B u_n)^2} \right) \quad (1.8)$$

A partir de las ecuaciones (7) y (8) se puede encontrar la relación buscada  $Q = Q(P)$ .

Si asumimos que existe un defasamiento  $\delta$  entre  $\underline{E}$  y  $\underline{V}$ , entonces se cumplirá que:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{u_n}{1 + u_m} = \frac{u_n}{1 + \frac{1}{B} \left( -1 \pm \sqrt{1 - (B u_n)^2} \right)} \quad (1.9)$$

Como  $u_n$  es una medida de la potencia activa, la ecuación (1.9) establece la dependencia entre la potencia activa de transmisión y el ángulo  $\delta$  bajo la condición de que

$$\left| \underline{V}_S \right| = \left| \underline{V}_R \right|.$$

En la Figura 2.2 se establece el curso de  $u_m$  y de  $u_n$  así como de la correspondiente tensión interna  $e = E/V$  en dependencia de  $\delta$ , para un valor de  $B = 0.35$ . El valor máximo de  $u_n$  y por consiguiente el de la potencia activa de transmisión se localiza para  $\delta = 123^\circ$ .

Si llamamos  $\alpha$  al ángulo entre  $\underline{V}_S$  y  $\underline{V}$ , tendremos

$$\text{sen } \alpha = \frac{u'_q}{1} \quad \text{de donde } u'_q(\text{máx.}) = 1$$

y por lo tanto, de acuerdo a la ecuación (1.7) se tiene:

$$u_n(\text{máx}) = 1/B, \quad P(\text{máx}) = \left( \frac{3V^2}{X} \right) \left( \frac{1}{B} \right) = \frac{3V^2}{X_L} \quad (1.10)$$

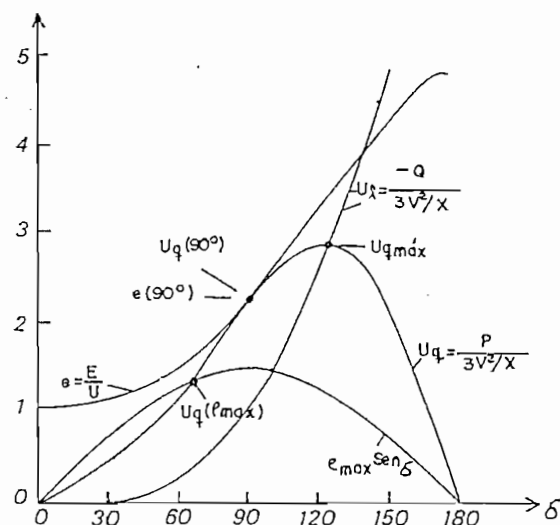


Figura 1.2. Caídas de tensión activa y reactiva como medida para las potencias reactivas y activas en dependencia de  $\delta$  para un sistema de transmisión según la Figura 1.1 y bajo la condición:

$$|\underline{V}_R| = |\underline{V}_S| \quad \text{y } B = 0.35$$

Como el ángulo entre  $\underline{V}_S$  y  $\underline{V}_R$  en este caso asciende a  $90^\circ$ , entonces  $\delta$  será mayor que  $90^\circ$  encontrándose más allá del límite de la estabilidad estacionaria. El punto más alto de la potencia de transmisión de estabilidad estacionaria ocurre cuando  $\delta = 90^\circ$ . Como  $\text{tg } 90 = \infty$ , el denominador del lado derecho de la ecuación (1.9) debe ser cero. Esto ocurre cuando:

$$u_n = u_n(90) = \sqrt{\frac{2}{B} - 1} = \sqrt{1 + \frac{2X_A}{X_L}} \quad (1.11)$$

de donde 
$$P = P(90) = \frac{3V^2}{X} \sqrt{1 + 2 \frac{X_A}{X_L}} \quad (1.12)$$

La correspondiente tensión interna es, para  $\delta = 90$ , igual a la caída de tensión reactiva

$$\frac{E(90)}{V} = e(90) = u_n(90) \quad (1.13)$$

En la Figura 1.3 están representadas  $P_{(\text{máx})}$  y  $P(90)$  de acuerdo a un diagrama vectorial.

Cuando la máquina puede ser excitada sobre el valor  $E(90)$  o sea cuando  $E_{(\text{máx})} > E(90)$  entonces la potencia  $P(90)$  representa la potencial límite de transmisión. Para este caso entonces:

$$P_{(\text{límite})} = P(90) \quad (1.14)$$

Si por el contrario, la máquina no puede ser excitada hasta el valor  $E(90)$  o sea cuando  $E_{(\text{máx})} < E(90)$ , entonces la máxima potencia de transmisión está limitada por la mayor excitación y la potencia límite es en este caso:

$$P_{(\text{límite})} = P(E_{\text{máx}}) \quad (1.15)$$

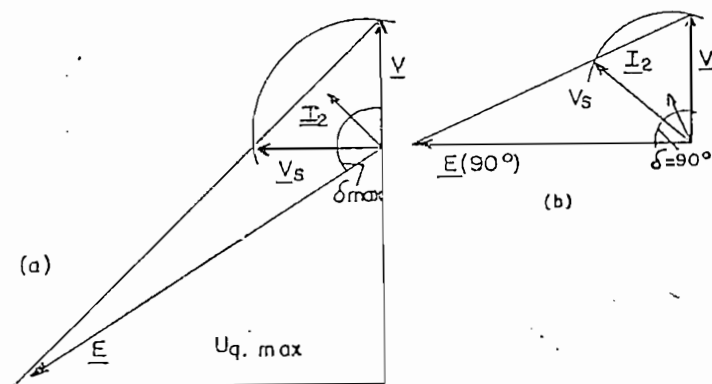


Figura 1.3. Diagrama vectorial de la transmisión según el circuito de la Figura 2.1 para (a)  $P = P_{(\text{máx})}$  y (b)  $P = P(90)$ .

La caída de tensión reactiva perteneciente a  $P(E_{\text{máx}})$  se obtiene de la expresión

$$e^2 = (1 + u_m)^2 + u_n^2 \quad (1.16)$$

para  $e = e_{(\text{máx})} = E_{(\text{máx})}/V$  y según la ecuación (1.8)

$$u_n(e_{\text{máx}}) = \sqrt{\frac{e_{\text{máx}}^2 - 1}{2 \left( \frac{1}{B} - 1 \right)} \left( \frac{2}{B} - \frac{e_{\text{máx}}^2 - 1}{2 \left( \frac{1}{B} - 1 \right)} \right)} \quad (1.17)$$

En la Figura 1.2 está registrado este valor para una tensión  $E_{(\text{máx})} < E(90)$  o, de otra manera, para  $e_{(\text{máx})} < e(90)$ .

El valor de  $P(e_{\text{máx}})$  se obtiene de la ecuación (1.7)

$$P(e_{\text{máx}}) = u_q(e_{\text{máx}}) \frac{3V^2}{X} \quad (1.18)$$

El cálculo de  $P(90)$  tomando en consideración los elementos conectados en shunt es esencialmente complicado, si bien el método de cálculo es el mismo. El circuito equivalente de una red de transmisión sin pérdidas puede siempre



ser representado como un modelo en PI compuesto de inductancias y capacitancias. En general los elementos en serie son inductivos mientras que los elementos en paralelo son capacitivos. En la Figura 1.4 se encuentra representado este circuito.

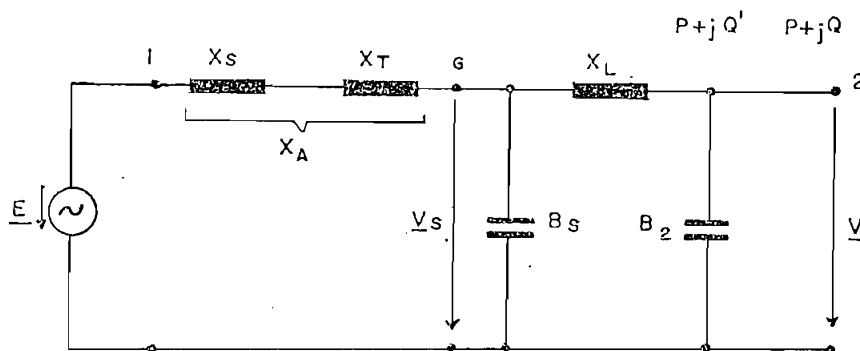


Fig. 1.4 Circuito Equivalente de Transmisión con elementos capacitivos conectados en shunt.

Los dos elementos en paralelo del circuito en PI son iguales cuando la red de transmisión entre los bornes G y 2 es simétrica. Para la misma condición anterior  $\left| \frac{V_s}{-S} \right| = \left| \frac{V}{-R} \right|$  la potencia máxima de transmisión estable será:

$$P(90) = \frac{3V^2}{X_A + X_L - X_A X_L B_S} \sqrt{(1 - X_A B_S)^2 + 2 \frac{X_A}{X_L} (1 - X_A B_S)} \quad (1.19)$$

El término óhmico  $B_2$  en el borne 2 no tiene ninguna influencia siendo ésta más bien determinada por  $\underline{V}$ .

Sin la condición (1) la máxima potencia transmisible sería

$$P_{(\text{máx})} = \frac{3 E V}{X_A + X_L - X_A X_L B_S} \quad (1.20)$$

La tensión interna correspondiente a  $P(90)$  es

$$E(90) = V \sqrt{(1 - X_A B_S)^2 + 2 \left( \frac{X_A}{X_L} \right) (1 - X_A B_S)} \quad (1.21)$$

Es fácil demostrar que las ecuaciones (1.19) y (1.21) para  $B_S = 0$  se convierten en las correspondientes ecuaciones (1.12) y (1.13). El desarrollo del presente subcapítulo se encuentra ampliamente detallado en la referencia 1/.

En la siguiente sección se hará un breve estudio de la cargabilidad de la línea y de sus factores limitantes 2/.

Como la expresión "capacidad de una línea" tradicionalmente usada es fácilmente confundida con las propiedades físicas de la línea (como capacidad térmica) se usa una expresión modificada, a saber, "cargabilidad de la línea", que describe la habilidad en el transporte de carga de una línea de transmisión operando bajo un conjunto especificado de criterios de operación.

A continuación, en la Figura 1.5 se muestran las curvas de la capacidad de transferencia de potencia de la línea de transmisión, también conocidas como curvas "St. Clair" y publicadas por primera vez en el año 1953.

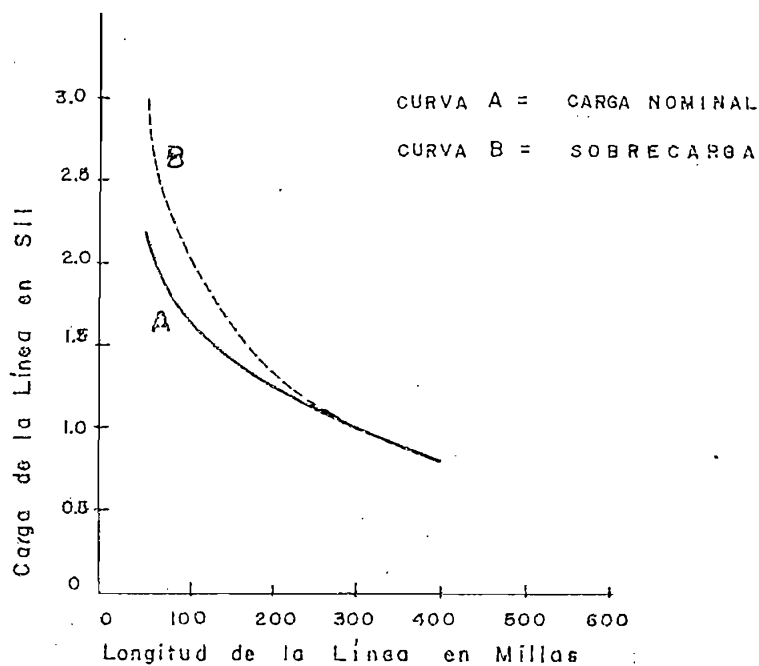


Fig. 1.5 Curvas St. Clair

De todos los factores limitantes que normalmente determinan cuánta potencia puede ser llevada por una línea de transmisión particular se consideran aquí los siguientes:

- a) limitación térmica
- b) limitación de caída de voltaje de la línea
- c) limitación de estabilidad de estado estacionario

La limitación térmica puede ser considerada como un problema en el diseño de la línea antes que como un problema de operación. Es básicamente el problema de la correcta elección del conductor una vez que son conocidos los requerimientos de transporte de corriente y sus condiciones ambientales de operación. La limitación térmica es crítica especialmente en casos de líneas de bajo voltaje (138 Kv) y de una longitud de 50 millas o menos.

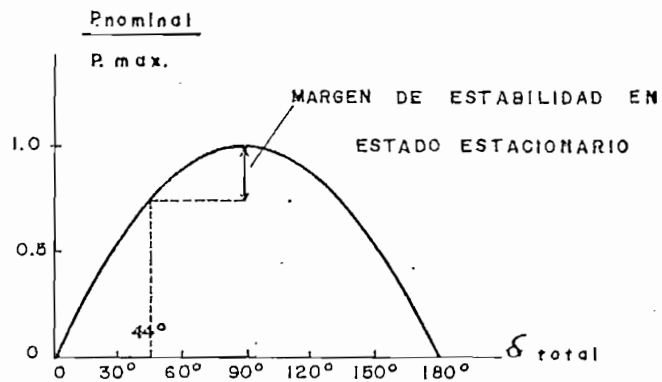
En cuanto a la segunda limitación, según estudios previamente realizados en los Estados Unidos se ha determinado que es razonable un límite del 5% en la caída de voltaje.

Por otro lado, la limitación de estabilidad en estado estacionario se define en términos del margen deseado entre la habilidad de transferir máxima potencia ( $P_{\text{máx}}$ ) y el nivel de operación ( $P_{\text{nominal}}$ ).

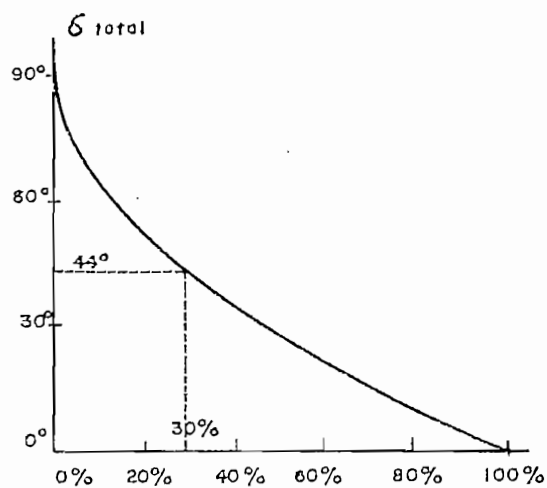
$$\% \text{ Margen de Estabilidad} = \frac{P_{\text{máx}} - P_{\text{nominal}}}{P_{\text{máx}}} 100 \quad (1.22)$$

Se considera según estudios ya realizados que un margen del 30 - 35% es razonable para situaciones en las que la línea está bastante cargada.

Según se muestra en la Figura 1.6, esto corresponde a un desplazamiento angular de alrededor de  $44 - 40^{\circ}$  a través del sistema, esto es, desde la fuente hasta la carga, incluida la línea bajo estudio junto con la reactancia equivalente de los sistemas en los bornes del transmisor y del receptor.



(a) CURVA POTENCIA-ANGULO



(b) MARGEN DE ESTABILIDAD EN ESTADO ESTACIONARIO.

Figura 1.6. Margen de estabilidad en estado estacionario.

Conviene, antes de pasar a la siguiente sección, indicar el significado del SIL 3/.

SIL (Surge Impedance Loading) se define como la carga de factor de potencia unitario que puede ser entregada por una línea sin resistencia tal que el valor de  $I^2 X$  sea igual a los Kva de carga de la línea. Bajo esta condición los dos voltajes terminal y las corrientes serán iguales en magnitud pero diferentes en fase. El valor numérico del SIL se define como:

$$\text{SIL (Mw)} = \frac{(Kv_{L-L})^2}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (1.23)$$

## 1.2 EFECTO DE LA CAIDA DE VOLTAJE Y DEL CRITERIO DE ESTABILIDAD EN LA CARGABILIDAD DE LA LINEA

### 1.2.1 CRITERIO DE LA CAIDA DE VOLTAJE DE LA LINEA

La Figura 1.7 muestra el efecto del criterio de la caída de voltaje de la línea en la cargabilidad de la línea para un nivel de 1100 Kv. Este criterio para líneas de longitud corta o moderada sigue la ley de los retornos de disminución. Se puede observar que a medida que la caída de voltaje permisible aumenta, la cargabilidad de la línea

mejora rápidamente hasta un punto - en este caso 6% o mayor - donde la cargabilidad máxima esté determinada por el criterio de estabilidad. En ese punto, sin importar cuan grande sea la caída de voltaje, la cargabilidad podrá ser mejorada si se permite un margen menor de estabilidad. Para líneas largas, la cargabilidad está generalmente restringida por el margen de estabilidad antes que por la caída de voltaje.

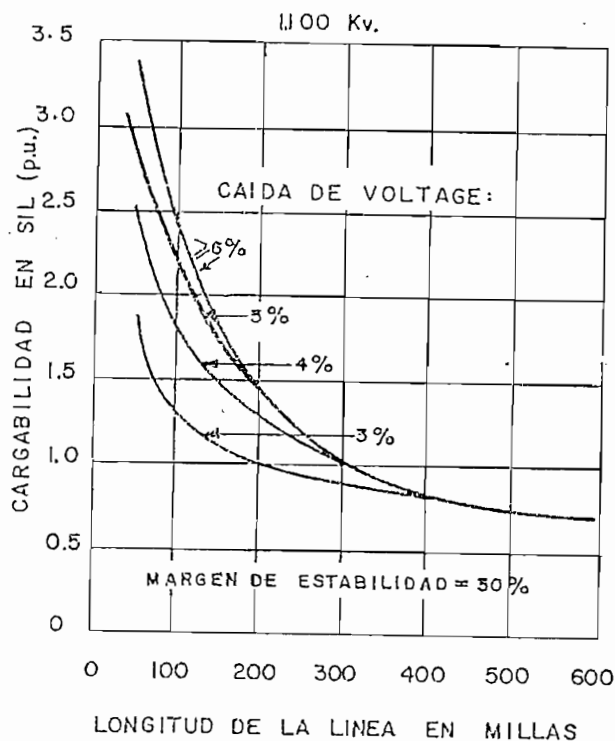


Figura 1.7. Efecto de la caída de voltaje en la cargabilidad de la línea.



### 1.2.2 CRITERIO DE LA ESTABILIDAD EN ESTADO ESTACIONARIO

La Figura 1.8 muestra el efecto de la variación del margen de estabilidad en la cargabilidad de la línea. La variación de la cargabilidad de la línea parece estar relacionada de una manera lineal con el cambio en el margen de la estabilidad; esto es, iguales decrementos en el margen de la estabilidad traen consigo iguales incrementos en la cargabilidad de la línea. Esto sin embargo, solamente es verdad para líneas largas, donde la estabilidad es un factor de control, mientras que para líneas cortas, la reducción en el margen de la estabilidad trae menos mejoras a no ser que se permitan altas caídas de voltaje lo cual es poco razonable. Consecuentemente, para líneas cortas, una manera de mejorar la cargabilidad de la línea consiste en escoger una aceptable combinación entre la caída de voltaje y la estabilidad en estado estacionario.

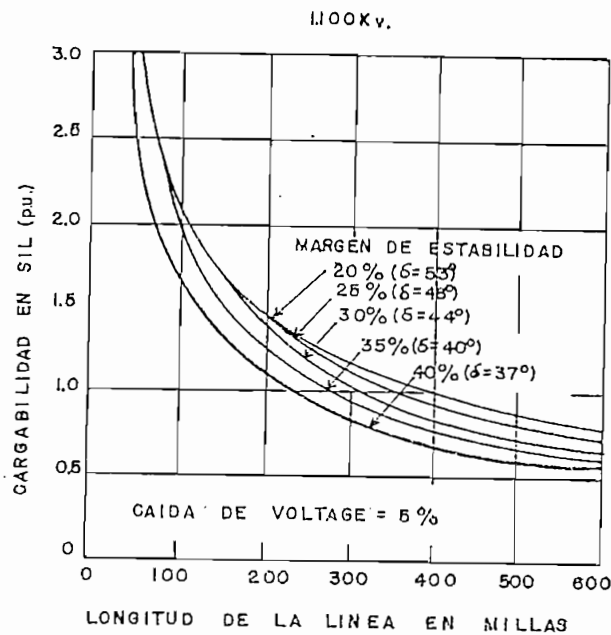


Figura 2.8. Efecto del criterio de estabilidad en estado estacionario sobre la cargabilidad de la línea.

### 1.3 LA ESTABILIDAD ESTACIONARIA

#### 1.3.1 INTRODUCCION

El "American Institute of Electrical Engineers" define la estabilidad y el límite de estabilidad en la for-

ma siguiente <sup>4/</sup>. La estabilidad usada con referencia a un sistema de energía, es el atributo del sistema, o parte de él, que le permite desarrollar en sus elementos fuerzas restauradoras, iguales o mayores que las fuerzas perturbadoras, que permitan establecer un estado de equilibrio entre los elementos.

El límite de estabilidad es el máximo flujo posible de energía que puede pasar por un punto particular determinado del sistema, cuando todo el sistema o la parte de él a la que se refiere el límite de estabilidad, está en régimen de estabilidad.

Los términos estabilidad y límite de estabilidad se aplican tanto al régimen permanente como al transitorio. El límite de estabilidad en régimen permanente se refiere al máximo flujo posible de energía que puede pasar por un punto determinado sin que haya pérdida de estabilidad cuando se aumenta la energía muy gradualmente <sup>5/</sup>.

### 1.3.2 MODOS DE INESTABILIDAD

Se conoce que ocurren cambios discretos en las condiciones de operación de un sistema, en operación normal o "planeada", cuando tienen lugar cambios en la gene-

ración y en la carga o cuando los circuitos son modificados para establecer configuraciones especificadas de grupos de circuitos. Cuando los cambios ocurren, independientemente o en combinación no-correlacionada, a través de la operación normal del sistema, ellos sugieren una interpretación del estado estable como un proceso dinámico continuo. Este es un proceso que, mientras el nivel de operación del sistema está en un estado de fluctuación continua, permite que se formen fuerzas de contrabalanceo que, en operación estable, retornan al sistema hacia su equilibrio estable cuando ocurre una desviación a partir del balance. Normalmente no aparecen efectos adversos a partir de estos cambios continuos pero pequeños en el nivel de operación o a partir de los períodos de oscilación amortiguada que los siguen, cuando un sistema está operando bien dentro de estos límites, pero adquieren significancia cuando el nivel de carga se incrementa gradualmente. En realidad, en condiciones de progresivo incremento de carga, se alcanza un punto en el cual las fuerzas restauradoras generadas por el pequeño impacto de un cambio operacional son insuficientes para asegurar un retorno a la operación normal de estado estable y entonces se inicia la inestabilidad. Esta es una primera forma de inestabilidad, provocada en el nivel más alto de la transmisión de potencia activa por los pequeños momentos transi-

torios de operación a los cuales está sujeto el sistema a través de toda su operación normal.

Cortocircuitos súbitos en líneas de transmisión y otros aspectos dentro del funcionamiento del sistema, dan lugar a que aparezcan disturbios de impacto más severos e inestabilidad a niveles más bajos de carga que cuando las condiciones transitorias de operación son de pequeña magnitud. Consecuentemente la inestabilidad subsiguiente a grandes desviaciones de las condiciones normales de operación es una segunda forma de inestabilidad, que aparece de condiciones de operación no-planeadas o no-esperadas. En comparación con los cambios continuamente cercanos en el estado estacionario planeado, los disturbios grandes tienen una incidencia mucho menor y su extensión y forma son desconocidos e impredecibles antes de su presencia. Estas son las diferencias esenciales en las causas y condiciones en las cuales puede aparecer la inestabilidad que sugieren una división preliminar de interés que se origina de las condiciones de carga gradualmente incrementales en pasos discretos en el estado estacionario, por una parte, y del impacto severo de un disturbio mayor, por otra.

Aplicada a generadores sincrónicos, ya sea de una

simple unidad o en combinación arbitraria, la inestabilidad subsiguiente a un pequeño incremento en el nivel de operación de la carga, es conocida como INESTABILIDAD SINCRONICA EN ESTADO ESTABLE, cuyo estudio no corresponde a la presente Tesis de Grado, y el nivel de operación en el cual ésta ocurre, es el LIMITE DE ESTABILIDAD ESTACIONARIA SINCRONICA que tampoco nos ocupa. El término INESTABILIDAD SINCRONICA TRANSITORIA es reservado para el caso de la inestabilidad que sigue a un gran disturbio, y la potencia de la carga de un pre-disturbio, sobre la cual un gran disturbio de severidad dada, no puede ser resistido sin inestabilidad, es el LIMITE DE ESTABILIDAD SINCRONICA TRANSITORIA.

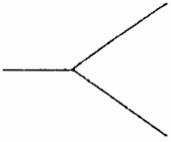
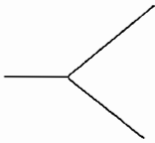
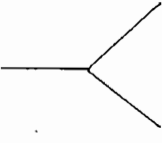
Si bien pueden ser distinguidas por la forma del disturbio que las origina, ambas formas de inestabilidad conducen a una PERDIDA DE SINCRONISMO dentro del sistema y ello se deriva de desbalances en la potencia activa.

Igualmente, la inestabilidad puede aparecer de desbalances de potencia reactiva, y, como en el caso de desbalances de potencia activa, éstos pueden ser separados en las pequeñas desviaciones operacionales y los grandes disturbios transitorios. El primer caso, en el que la inestabilidad aparece de pequeños disturbios de potencia reactiva, y de las fluctuaciones asociadas de voltaje, es conoci-

da como INESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTACIONARIO y el límite en el cual ésta ocurre es el LIMITE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTACIONARIO. La inestabilidad siguiente a grandes disturbios de potencia reactiva es llamada INESTABILIDAD DE VOLTAJE TRANSITORIA y las condiciones límites de operación del pre-disturbio en las cuales se localiza es el LIMITE DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE TRANSITORIA.

A estas formas básicas de inestabilidad, la inestabilidad sincrónica y la de voltaje, cada una con divisiones correspondientes a pequeños disturbios operacionales y a grandes impactos transitorios, puede ser añadida una tercera forma separada: la de la INESTABILIDAD TERMICA. Los límites térmicos de operación siempre dan lugar a que aparezcan los bien definidos límites superiores de la carga en las partes individuales de la planta, en circuitos de transmisión y distribución, y en sistemas interconectados. La operación más allá del límite térmico puede iniciar una secuencia de operación, en las partes individuales de la planta y en sistemas integrados, teniendo las propiedades y características esenciales de un proceso inestable. En este caso, la inestabilidad lleva a un desbalance térmico divergente, el cual puede aparecer durante las condiciones de cambio gradual de carga o cuando la operación normal es repentinamente perturbada por un gran disturbio. Existirán

TABLA 1-1  
 PRINCIPALES MODOS DE INESTABILIDAD

MODOS DE INESTABILIDAD	INESTABILIDAD SINCRONICA  ESTACIONARIA TRANSITORIA	INESTABILIDAD DE VOLTAJE  ESTACIONARIA TRANSITORIA	INESTABILIDAD TERMICA  ESTACIONARIA TRANSITORIA
PARAMETRO ASOCIADO	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA	CORRIENTE
PARTE DISPUESTA A LA INESTABILIDAD	GENERADORES Y MOTORES SINCRONICOS	GENERADORES SINCRONICOS MOTORES ASINCRONICOS	CIRCUITOS INTERCONECTADOS



pues, según lo visto anteriormente, INESTABILIDAD TERMICA ESTACIONARIA e INESTABILIDAD TERMICA TRANSITORIA, y los límites superiores de carga de la operación estable serán los LIMITES TERMICOS ESTACIONARIO Y TRANSITORIO respectivamente. En la Tabla 1.1 se establecen estos distintos modos de inestabilidad, junto con los parámetros del sistema a los que se encuentran asociados, y las partes afectados por ellos.

### 1.3.3 ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTACIONARIO

En la Figura 1.9 se muestra una curva típica de terminales para un circuito de transmisión en la cual la potencia activa transmitida hacia el receptor es expresada como función de dicho voltaje terminal. La figura ha sido determinada para carga estática y ésta indica que, dependiendo del valor del factor de potencia de la carga, hay un límite superior en la potencia activa que puede ser transmitida. Cuando la carga transmitida se incrementa en pasos discretos, es alcanzado un punto de máxima potencia transferible, cuando el incremento de la carga hace que baje el voltaje en el receptor en una cantidad igual al aumento en la componente de fase de la corriente en dicho terminal. Cualquier intento posterior de cargar el circuito reduce la potencia transferida y la parte más baja de la curva potencia activa vs. voltaje tiene la característica de un pro-

001838

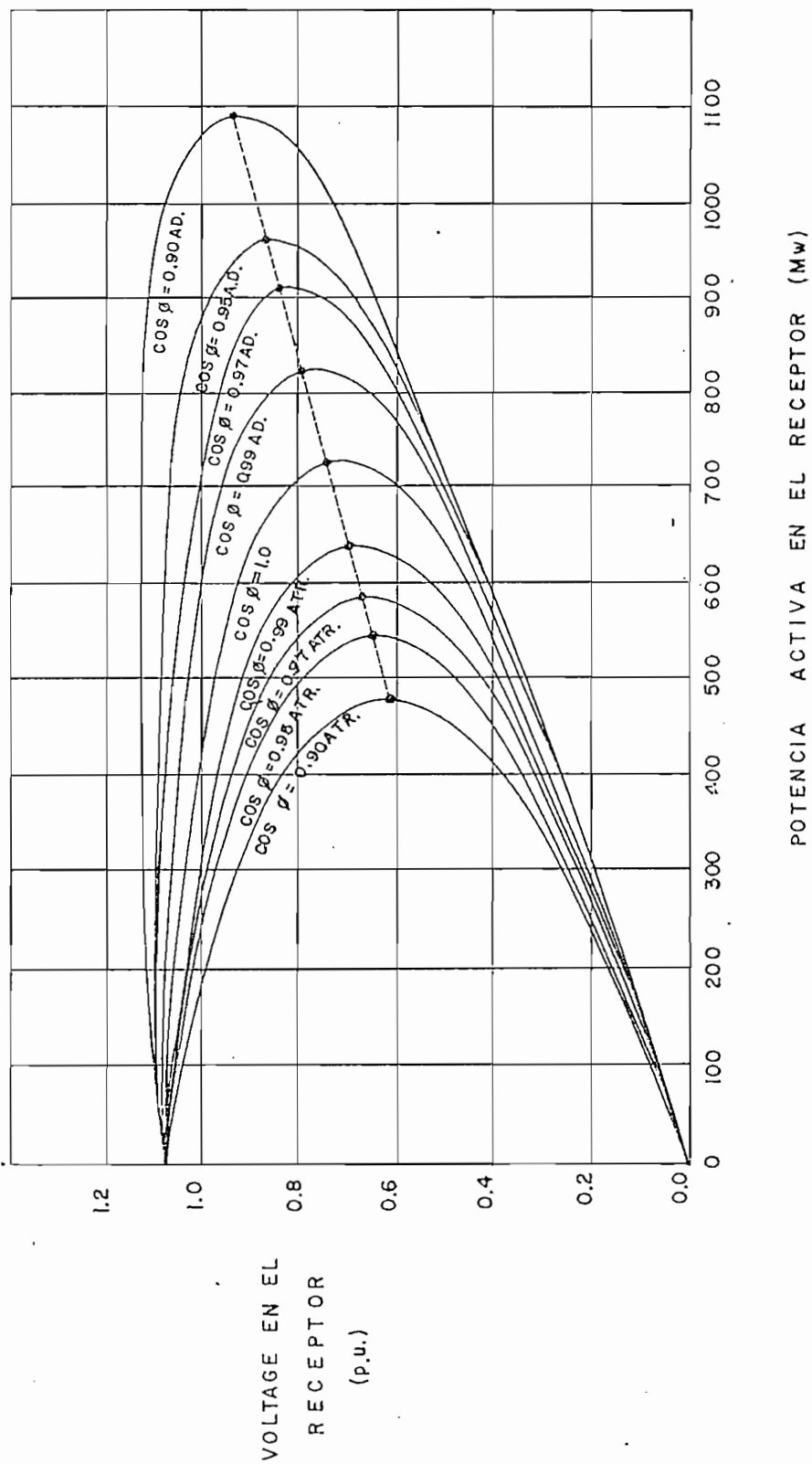


Fig. 1.9 Potencia Activa vs. Voltage Para 275 Kv.

ceso inestable. Las dos formas de compensación, en serie y en shunt, que reducen los cambios del voltaje en el lado de la fuente cuando varía la carga, mejoran la estabilidad de la carga; sin embargo este aspecto será estudiado en otra sección.

#### 1.4 METODOS PARA ELEVAR LA POTENCIA DE TRANSMISION

De las diversas posibilidades para elevar la potencia de transmisión o para mejorar la estabilidad, serán estudiados en la presente sección, el uso de condensadores en serie y en paralelo así como la toma de potencia reactiva. Para elevar la potencia de transmisión, existen dos posibilidades: elevar la tensión interna  $E$  o bien disminuir la reactancia de acople. Para conseguir el primer objetivo se tomará potencia reactiva de la máquina, mientras que para conseguir el segundo, se utilizarán condensadores dispuestos en la red de transmisión.

##### 1.4.1 OPTIMIZACION DE LA ESTABILIDAD MEDIANTE EL USO DE CONDENSADORES EN LA RED DE TRANSMISION

Es fácil observar que la reactancia del circuito de transmisión se reducirá mediante el uso de condensadores en serie debido al carácter negativo de su reactancia. En

la Figura 1.10 se encuentra representada una línea de transmisión, que consta de un generador, un transformador, y la línea misma interrumpida por condensadores en serie.

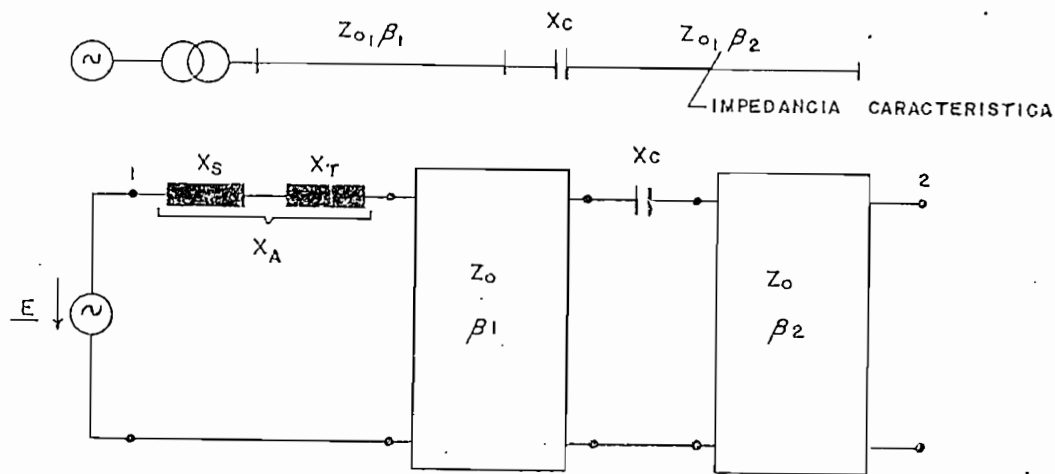


Figura 1.10. Ejemplo para estudiar el comportamiento de un condensador en serie en la reactancia de acoplamiento de una línea de transmisión sin pérdidas.

Para el cálculo de la reactancia de acoplamiento entre los terminales 1 y 2 ha sido cortocircuitado el terminal 2 y encontrado el cociente  $\underline{E}/\underline{I}_2$  para  $\underline{V} = 0$ . Se encuentra luego de un estudio nada complicado, que haciendo las constantes de fase  $\beta = \beta_1 + \beta_2$

$$X_{12} = Z_0 \operatorname{sen}(\beta) + X_A \cos(\beta) - X_C \cos(\beta_2) \left( \cos(\beta_1) - \frac{X_A}{Z_0} \operatorname{sen}(\beta_1) \right) \quad (1.24)$$

De acuerdo con la ecuación (1.24) una reducción de la reactancia de acoplamiento solamente tendría lugar cuando la expresión que se encuentra encerrada entre paréntesis sea mayor que cero. Para conseguir una mayor reducción en la reactancia de acoplamiento, cuando se use un condensador de determinada capacidad, se deberá escoger convenientemente el sitio en donde se colocará al condensador.

Una similar reducción de la reactancia de acoplamiento puede hacerse por medio de la conexión de un condensador en paralelo según indica la Figura 1.11. Para este caso la reactancia resultante será:

$$X_{12} = Z_0 \operatorname{sen}(\beta) + X_A \cos(\beta) - \frac{Z_0^2}{X_C} \operatorname{sen}(\beta_2) \left( \operatorname{sen}(\beta_1) + \frac{X_A}{Z_0} \cos(\beta_1) \right)$$

(1.25)

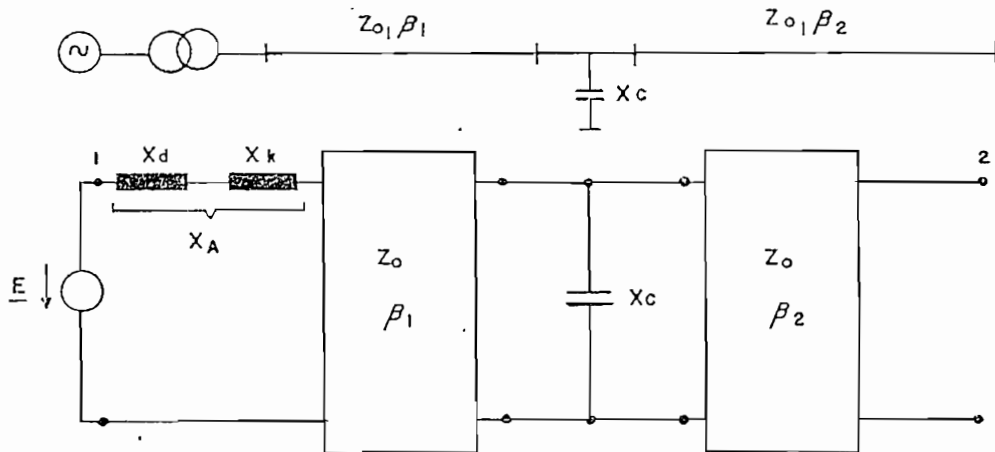


Figura 1.11. Ejemplo para estudiar el comportamiento de un condensador en paralelo en la reactancia de acoplamiento de una línea de transmisión sin pérdidas.

#### 1.4.2 OPTIMIZACION DE LA ESTABILIDAD MEDIANTE TOMA DE POTENCIA REACTIVA

Por principio puede ser mejorada la estabilidad de la transmisión mediante la elevación del voltaje interno  $E$  del generador de alimentación. En la Figura 1.12 está representado un circuito de transmisión, a través de una línea de reactancia  $X_L$ , con el correspondiente diagrama vectorial

de tensiones. En este diagrama se han considerado los valores de  $\underline{E}$  y de  $\underline{V}_S$  para potencia de transmisión constante. Al elevarse la tensión interna desde  $\underline{E}_a$  hasta  $\underline{E}_b$  y permaneciendo la potencia de transmisión constante ( $P = \text{const}$ ), se presenta una disminución en el ángulo  $\delta$  ( $\delta_b < \delta_a$ ), mientras que la tensión  $\underline{V}_S$  se agranda ( $V_{S_b} > V_{S_a}$ ) y la potencia reactiva de transmisión aumenta en el sector inductivo.

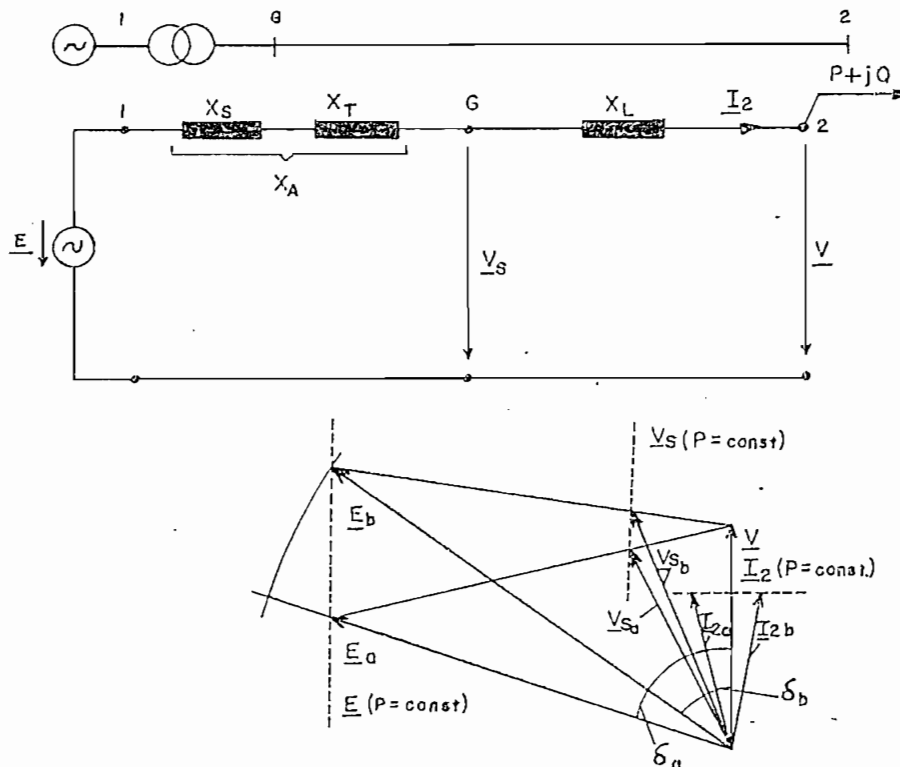


Figura 1.12. Efecto de la elevación de la tensión interna desde  $E_a$  hasta  $E_b$ . Se harán  $V_{S_a} < V_{S_b}$  y  $\delta_b < \delta_a$ .

Una elevación de la tensión interna sin que aumente la tensión  $\underline{V}_S$ , es posible, cuando simultáneamente es tomada en el borne G una apropiada cantidad de potencia reactiva a través de una bobina. El análisis de esta condición se encuentra indicado en la Figura 1.13.

El aumento de  $E_a$  hasta  $E_c = E_b$ , permaneciendo invariable  $\underline{V}_S$  e  $\underline{I}_2$ , hace que el ángulo  $\delta$  disminuya ( $\delta_c < \delta_a$ ), el cual es sin embargo mayor que  $\delta_b$  de la Figura 1.12. Este tipo de mejora en la estabilidad es mayor, cuando la máquina en la condición (a) está entregando potencia con un  $\cos \phi$  cercano a la unidad como es el caso de las Figuras 1.12 y 1.13.



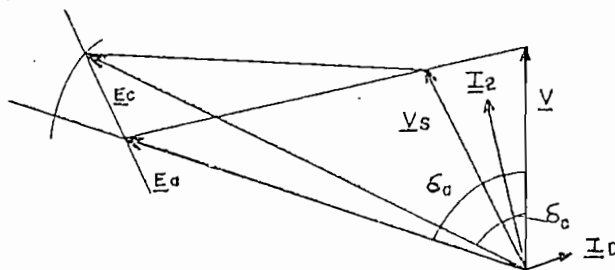
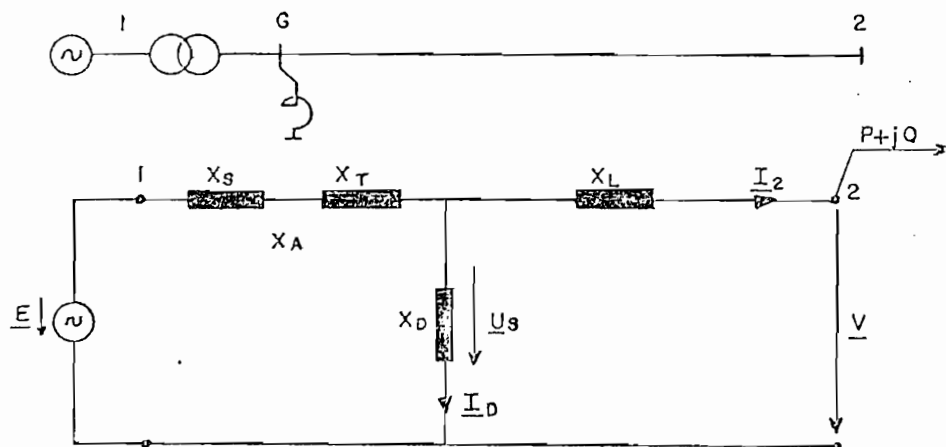


Figura 1.13. Análisis de la elevación de la tensión interna desde  $E_a$  hasta  $E_c = E_b$  (ver figura anterior), mediante toma simultánea de potencia reactiva, de tal forma que  $V_s$  no varíe. Se hace  $\delta_c < \delta_a$ .

## CAPITULO II

### OBTENCION DE LAS CURVAS POTENCIA ANGULO

#### 2.1 ANALISIS TEORICO DE LA CARGA ESTATICA

Es común observar en la casi totalidad de libros que tratan de la estabilidad estacionaria en Sistemas Eléctricos de Potencia información suficiente sobre todos aquellos casos que consideran carga rotativa, más éstos no traen ninguna información sobre la obtención de las curvas Potencia-Angulo para los casos de carga estática; es por esta razón que indicaremos la casi totalidad del presente capítulo a tal estudio. El estudio se considera sólidamente realizado si se considera que ante la obtención de una curva en el laboratorio, se acompaña la curva proveniente del estudio teórico correspondiente.

Empezaremos por realizar el estudio de la máxima transferencia de potencia en un sistema que advierte la presencia de carga resistiva (estática) en su extremo receptor. El circuito base que servirá para nuestro análisis es el siguiente:

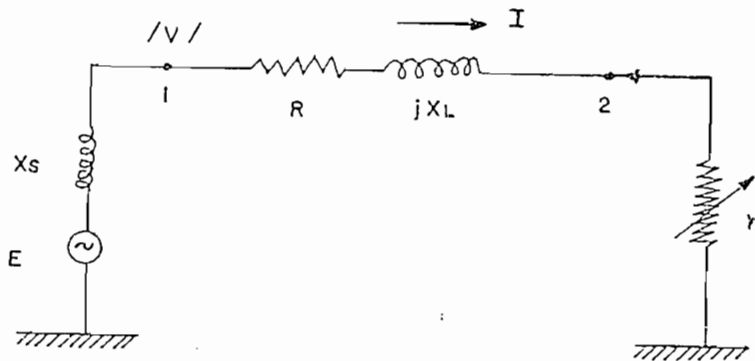


Fig. 2.1

Como podrá observarse en el circuito, el voltaje en el borne 2 no permanecerá constante a medida que aumente la potencia transmitida debido al aumento de corriente que provoca una mayor caída de tensión a lo largo de la línea simulada de la manera más sencilla por el conjunto  $R + jX_L$ . Sin embargo el voltaje en el borne 1 trataremos que permanezca constante variando la excitación de la máquina sincrónica para obtener así mayor claridad en los resultados.

La expresión que nos permita obtener la potencia de transmisión viene deducida a continuación:

$$I = \frac{V}{(R + r) + jX_L} \quad (2.1)$$

$$S = V \cdot I^* \quad (2.2)$$

$$S = V \cdot \frac{V^*}{(R + r) - jX_L} = |V|^2 \frac{R+r + jX_L}{(R+r)^2 + X_L^2} \quad (2.3)$$

De donde obtenemos:

$$P = \frac{|V|^2 (R + r)}{(R + r)^2 + X_L^2} \quad (2.4)$$

Como no nos interesa estudiar un caso aislado, sino obtener la forma general de la curva, asignaremos valores en cierta manera aleatorios a los parámetros del circuito. Sean, entonces:

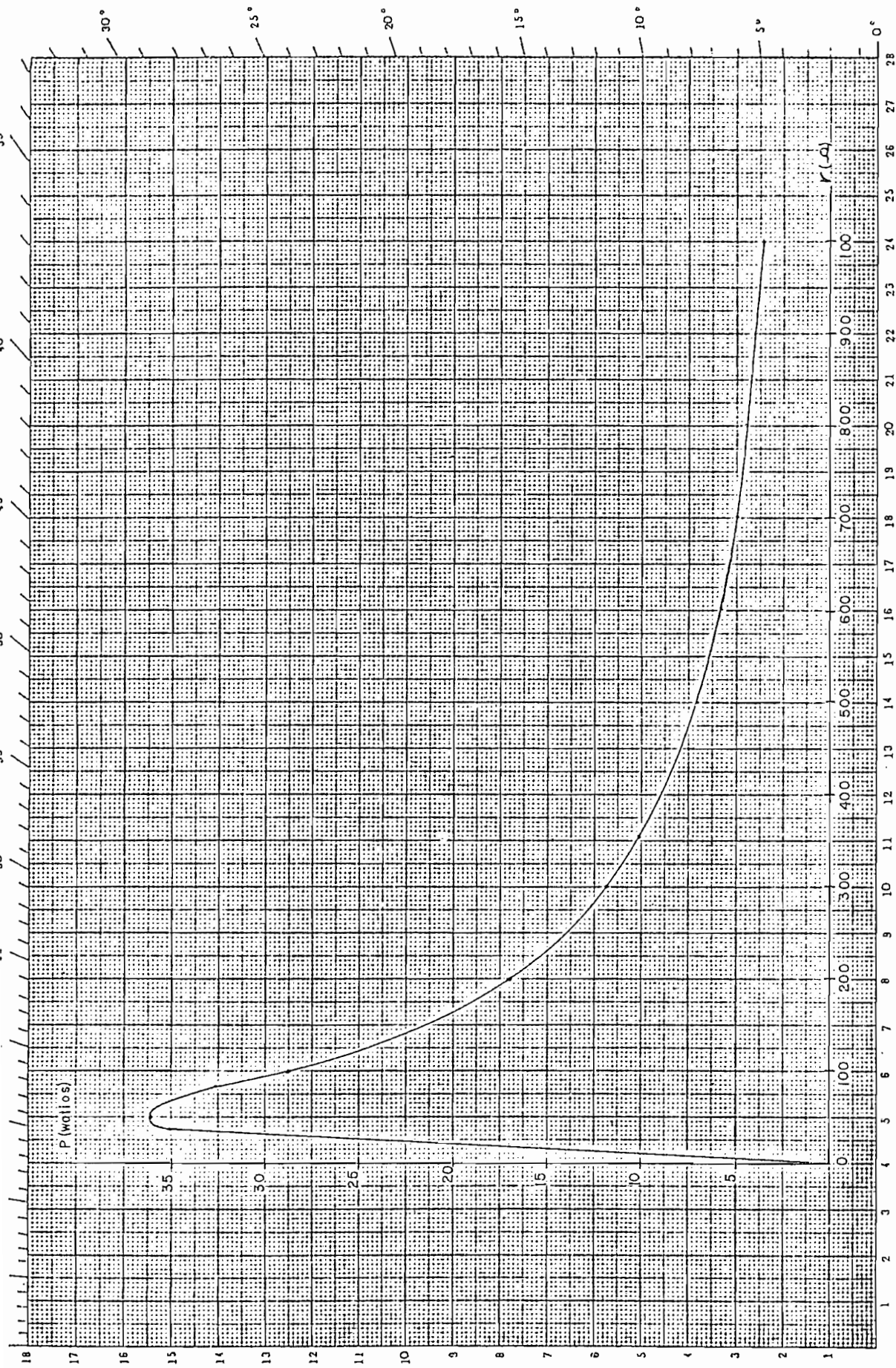
$$\begin{aligned} V &= 60 \text{ V} \\ R &= 0.004 \ \Omega \\ X_L &= 50 \ \Omega \end{aligned}$$

Así pues, la expresión (2.4) se convertirá en la siguiente:

$$P = \frac{3600 (0.004 + r)}{(0.004 + r)^2 + 2500} \quad (2.5)$$

El gráfico de la ecuación anterior puede verse en la siguiente página. Podrá verse en el que hemos cumplido con el teorema de máxima transferencia de potencia; es decir que obtenemos potencia máxima transmitida para el valor:

$$r = \sqrt{X_L^2 + R^2} = 50\Omega$$



OFFSET AMAZONAS - QUITO

Fig. 2.2 POTENCIA TRANSMITIDA A UNA CARGA ESTÁTICA

## 2.2 USO DEL LABORATORIO PARA OBTENER LAS CURVAS POTENCIA-ANGULO DE VARIOS CASOS DE CARGA ESTÁTICA

A continuación mostraremos el estudio realizado en el laboratorio de Máquinas Eléctricas para los distintos casos de carga estática considerados.

Hemos hecho uso esencialmente de una bobina existente en el laboratorio con núcleo de hierro desmontable, y además, se construyó especialmente para el efecto una bobina en el taller con dos taps, a saber: de 45 vueltas y de 90 vueltas.

Se deberá de indicar sin embargo que el método para medir la desangulación a lo largo de la línea no ha sido ni mediante el uso del osciloscopio ni mediante el uso de los medidores del factor de potencia (cosfímetros) pues ambas maneras daban lugar a mucha inexactitud en las mediciones. Se procedió sin embargo de la manera siguiente: medimos los módulos de los voltajes tanto al comienzo como al final de la bobina así como la caída de voltaje en la misma. Habíamos obtenido así un triángulo de vectores que por la conocida ley de los cosenos nos permite encontrar el ángulo de defasaje entre los voltajes terminales de la línea

de transmisión.

Presentamos, pues, en las páginas siguientes, la tabulación de las mediciones, así como las correspondientes curvas.

Para la obtención de la curva teórica haremos uso de la conocida expresión para la estabilidad estacionaria:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \operatorname{sen} \delta \quad (2.6)$$

pues de acuerdo a las mediciones tanto de la resistencia como de la reactancia en la bobina observamos que la primera es despreciable comparada con la segunda. Se anotará que estas mediciones fueron realizadas en el Laboratorio de Circuitos de la EPN.

Sin embargo, para obtener mayor exactitud debe considerarse la expresión completa que será deducida en el Capítulo IV de la presente tesis:

$$P_{ij} = \frac{V_i}{R^2 + X^2} \left[ R (V_i - V_j \cos \delta) + X V_j \operatorname{sen} \delta \right] \quad (2.7)$$



TABLA 2.1. MEDICIONES EN LA BOBINA DEL LABORATORIO (SIN NUCLEO)

V1	V3	V2	W1	W2	$\delta 12$
60	1.77	58.25	15.0	15.0	0.26
60	2.32	57.80	20.0	20.0	0.73
60	2.85	57.80	25.0	24.5	1.47
60	3.40	57.33	29.0	28.0	2.06
60	3.93	57.00	33.5	32.0	2.48
60	5.00	56.22	41.3	40.0	3.23
60	5.75	55.45	50.0	47.5	3.49
60	8.58	53.70	74.1	67.3	5.88
60	10.95	52.00	92.5	82.3	7.67
60	13.00	50.75	110.0	95.7	9.50
60	15.90	48.48	132.0	110.5	11.66
60	19.20	45.22	153.7	122.5	13.51
60	19.86	45.00	157.5	124.4	14.40
60	20.30	44.50	160.0	124.8	14.57
60	21.45	43.15	165.0	125.0	14.99
60	22.33	42.50	170.0	126.5	15.79
60	23.00	41.82	172.5	127.0	16.17
60	23.95	40.80	177.5	129.0	16.64
60	26.00	38.50	189.0	130.3	17.50

Fig. 2.3 BOBINA del LABORATORIO (sin núcleo)

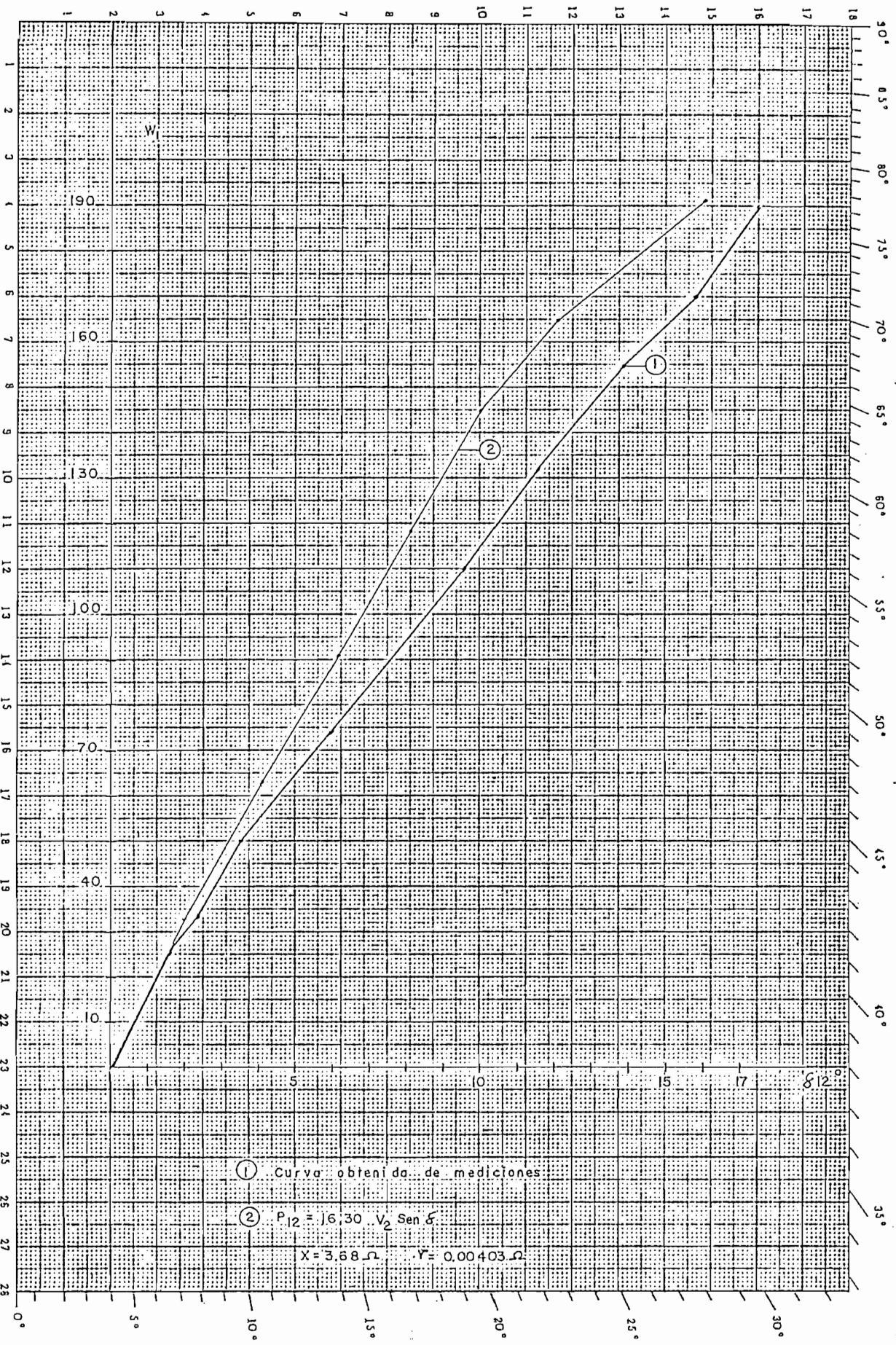


TABLA 2.2. MEDICIONES EN LA BOBINA DEL LABORATORIO (CON NUCLEO)

V1	V3	V2	W1	W2	$\delta 12$
60	8.25	57.5	7.75	7.75	7.72
60	15	55.3	14.50	14.0	14.21
60	23	51.7	20	19.5	22.21
60	30	47.7	24.25	22.5	29.63
60	38.4	40.5	27.50	25.0	39.21
60	46	31.7	26.60	23.25	49.13
60	51.8	22.26	23.50	18.30	58.08
60	54.7	15.25	19.10	13.25	62.66
60	55.52	13.30	17	11.50	64.21
60	56	12.25	16.25	11	65.31
60	57.0	8	13.5	7.5	64.39

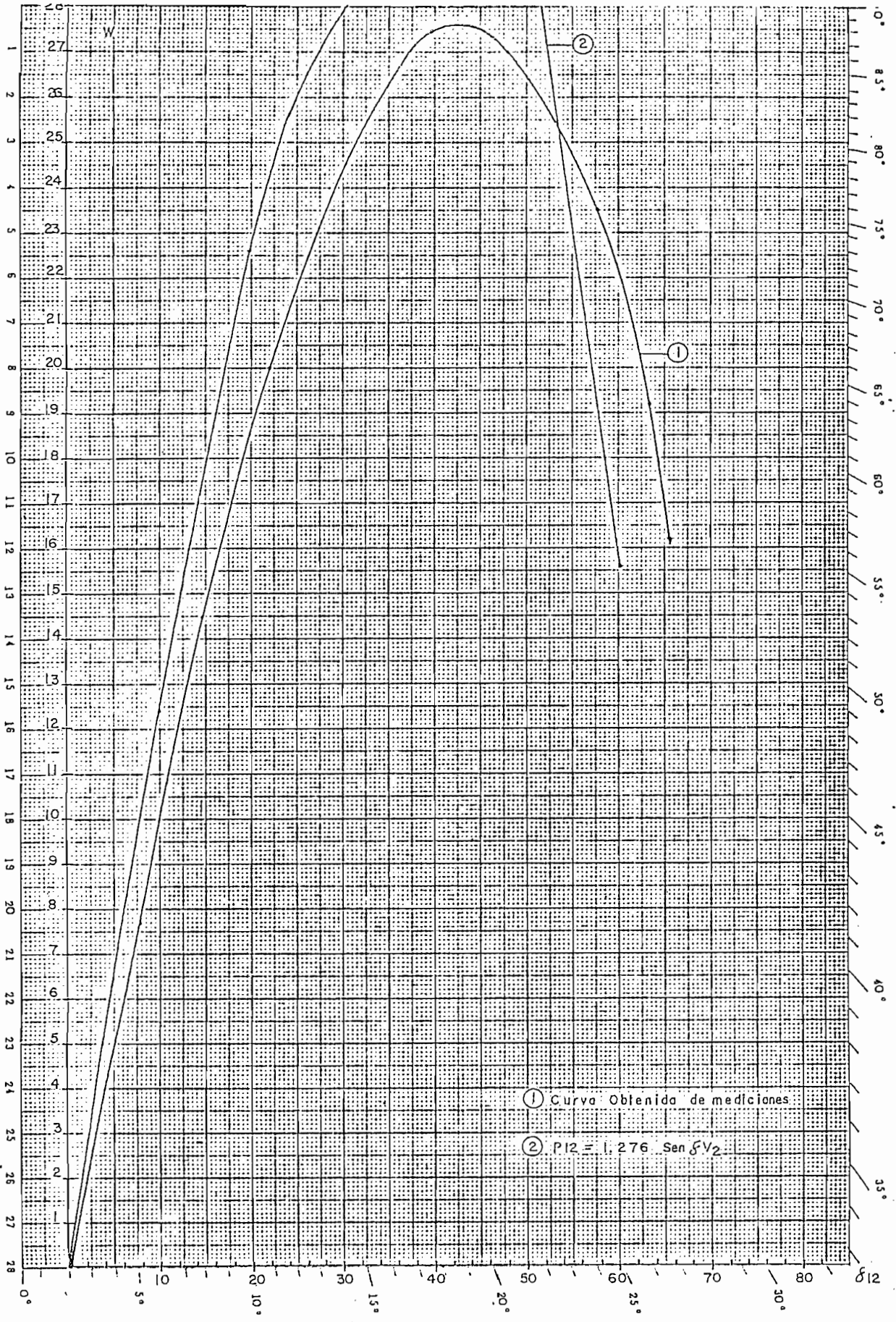
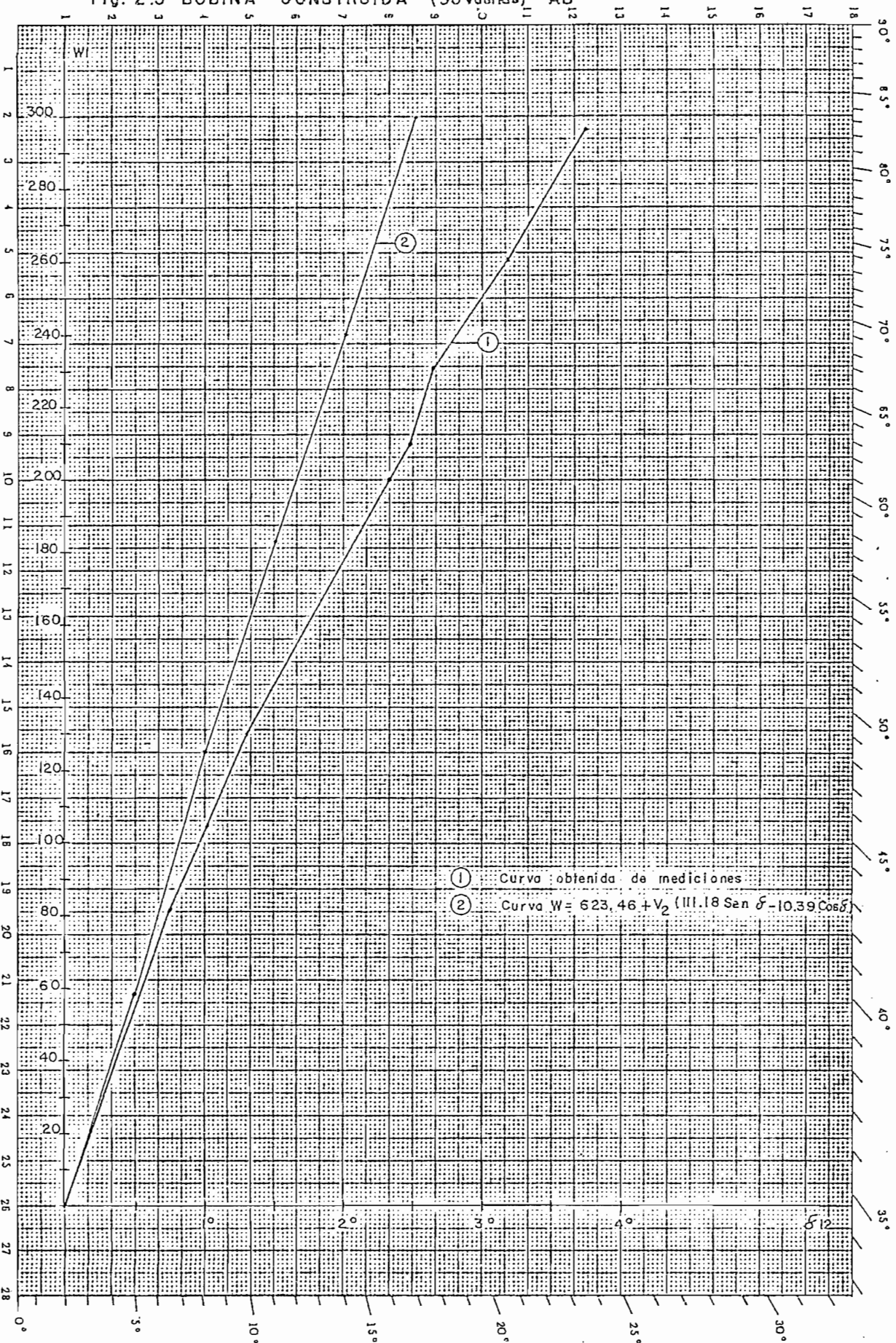


TABLA 2.3. MEDICIONES EN LA BOBINA CONSTRUIDA (90 VUELTAS)

V1	V3	V2	W1	W2	$\delta$ 12
60	0.00	59.00	7	7	-
60	0.55	59.30	42.5	42.5	-
60	1.10	59.20	80.5	80.5	0.73
60	1.45	59.00	105	105	1.01
60	1.80	58.80	128	128	1.29
60	2.36	58.70	139.5	137.5	1.90
60	2.88	58.50	197.5	197.5	2.38
60	2.90	58.35	200	200	2.31
60	2.98	58.25	204.25	202.25	2.33
60	3.00	58.13	205	205	4.32
60	3.088	58.25	210	210	2.47
60	3.15	58.30	215	213.6	2.57
60	3.20	58.15	220	218.25	2.53
60	3.29	58.13	225.0	224.0	2.63
60	3.35	58.00	230.0	227.5	2.61
60	3.50	58.00	238	236	2.79
60	3.67	58.00	252.5	250	2.99
60	3.85	58.00	261.25	258.50	3.20
60	4.08	58.00	276.50	273.85	3.45
60	4.40	57.80	297.50	295.0	3.71

Fig. 2.5 BOBINA CONSTRUIDA (90 vueltas) - AB -



### 2.3 CURVA POTENCIA-ANGULO DEL CASO GENERADOR- BARRA INFINITA

Para este caso indicaremos que se hizo uso de la línea existente en el laboratorio, para una longitud de 100 Km. (ver referencia 6/) cuyos parámetros reales se muestran en la siguiente figura:

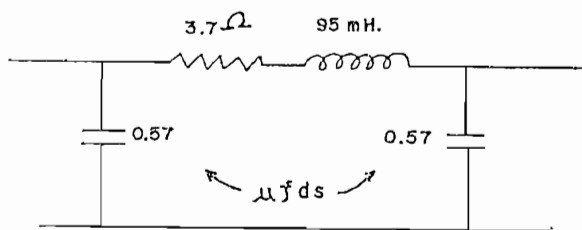


Fig. 2.6

La fórmula para potencia transmitida será la misma que (2.7) como se comprueba a continuación. Sea el circuito de la figura siguiente:

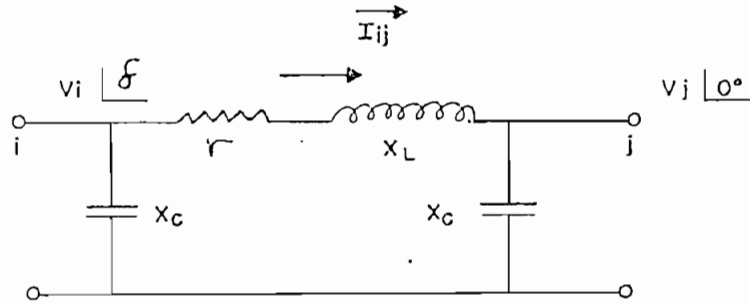


Fig. 2.8

$$I_{ij} = \frac{V_i}{-jX_C} + \frac{V_i - V_j}{r + jX_L} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} (I_{ij})^* &= \frac{V_i^*}{+jX_C} + \frac{V_i - V_j}{r - jX_L} \\ &= \frac{V_i \angle -\delta}{X_C \angle 90} + \frac{V_i \angle -\delta - V_j}{r - jX_L} \\ &= \frac{V_i}{X_C} \angle -\delta - 90 + \frac{r + jX_L}{r^2 + X_L^2} (V_i \angle -\delta - V_j) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{ij} &= (V_i \angle \delta) \cdot (I_{ij})^* \\ &= \frac{V_i^2}{X_C} \angle -90 + \frac{r + jX_L}{r^2 + X_L^2} (V_i^2 - V_i V_j \angle \delta) \end{aligned}$$



$$S_{ij} = -j \frac{V_i^2}{X_C} + \frac{r + jX_L}{r^2 + X_L^2} (V_i^2 - V_i V_j \cos \delta - j V_i V_j \sin \delta)$$

De donde

$$P_{ij} = \frac{V_i}{r^2 + X_L^2} \left( r (V_i - V_j \cos \delta) + X_L V_j \sin \delta \right) \quad (2.9)$$

Esto se debe a que no existe dispersión de potencia activa en las ramas en paralelo debido a que la conductancia es cero ( $C = 0$ ). Las curvas así detenidas se muestran a continuación. Se debe notar además que la admitancia en paralelo influye directamente en los niveles de voltaje  $V_i$  y  $V_j$ .

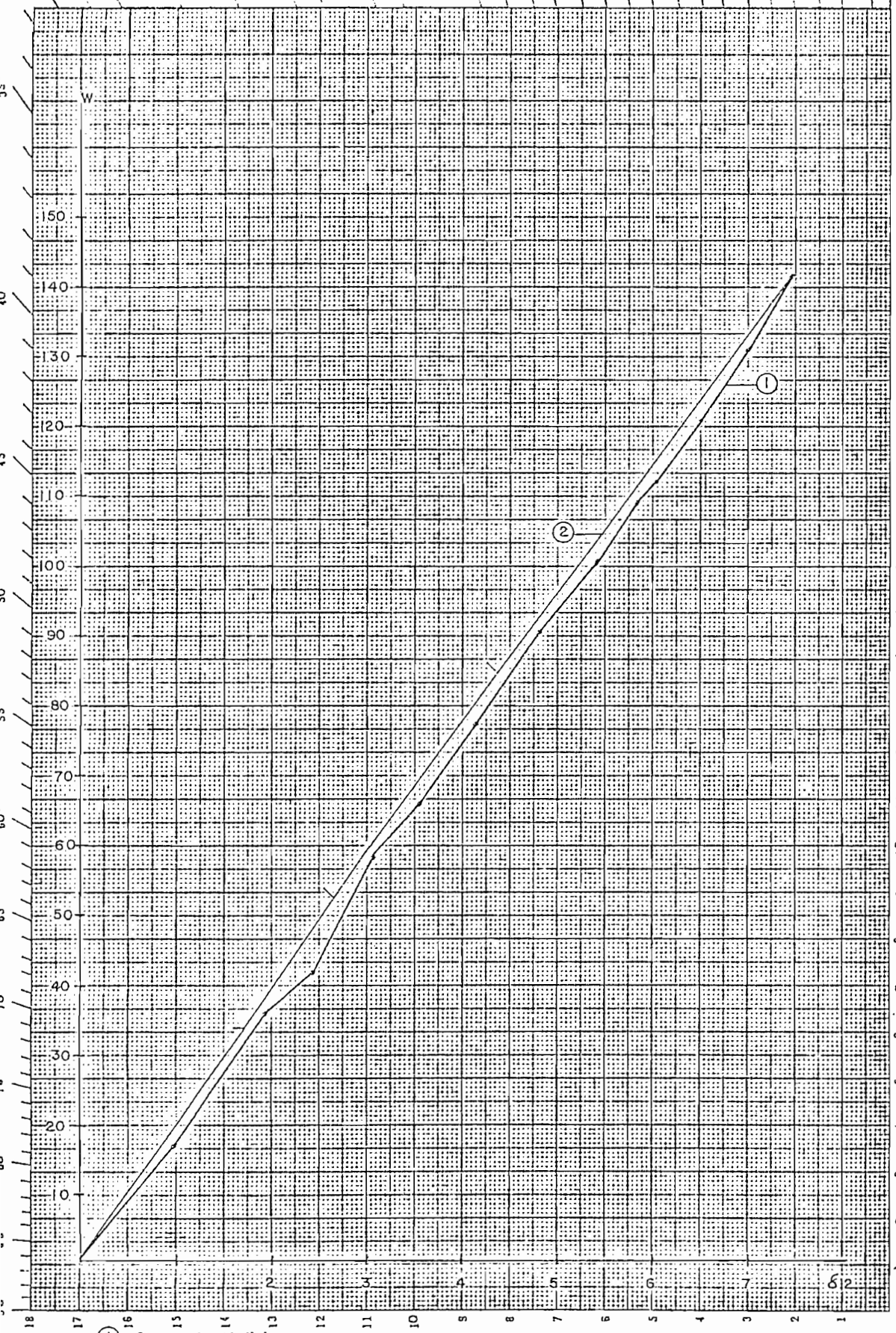
TABLA 2-4

MEDICIONES DEL SISTEMA GENERADOR - BARRA INFINITA LINEA DE 100 KM.

V1	V2	V3	P12 (w) medido	$\delta_{12}$	P12 (w) calculado
195	200	6	17.5	0.96	18.25
195	200	8.25	35.7	1.90	36.11
195	200	8.75	42.1	2.31	43.90
195	200	11	58.2	3.16	60.04
195	200	12.15	66.3	3.57	67.81
195	200	13.8	77.1	4.15	78.81
195	200	15.75	90.2	4.82	91.51
195	200	17.5	100.4	5.41	102.68
195	200	18.75	108.1	5.83	110.63
195	200	19.4	112.6	6.04	114.60
195	200	20.75	121.2	6.49	123.10
195	200	22	130.1	6.91	131.03
195	200	22.25	132.5	6.99	132.54
195	200	22.75	136.3	7.16	135.74
195	200	23.45	142.2	7.39	140.08

10° CURVA POTENCIA - ANGULO  
 GENERADOR Línea 100 Km - Barra Infinita

Fig. 2.6

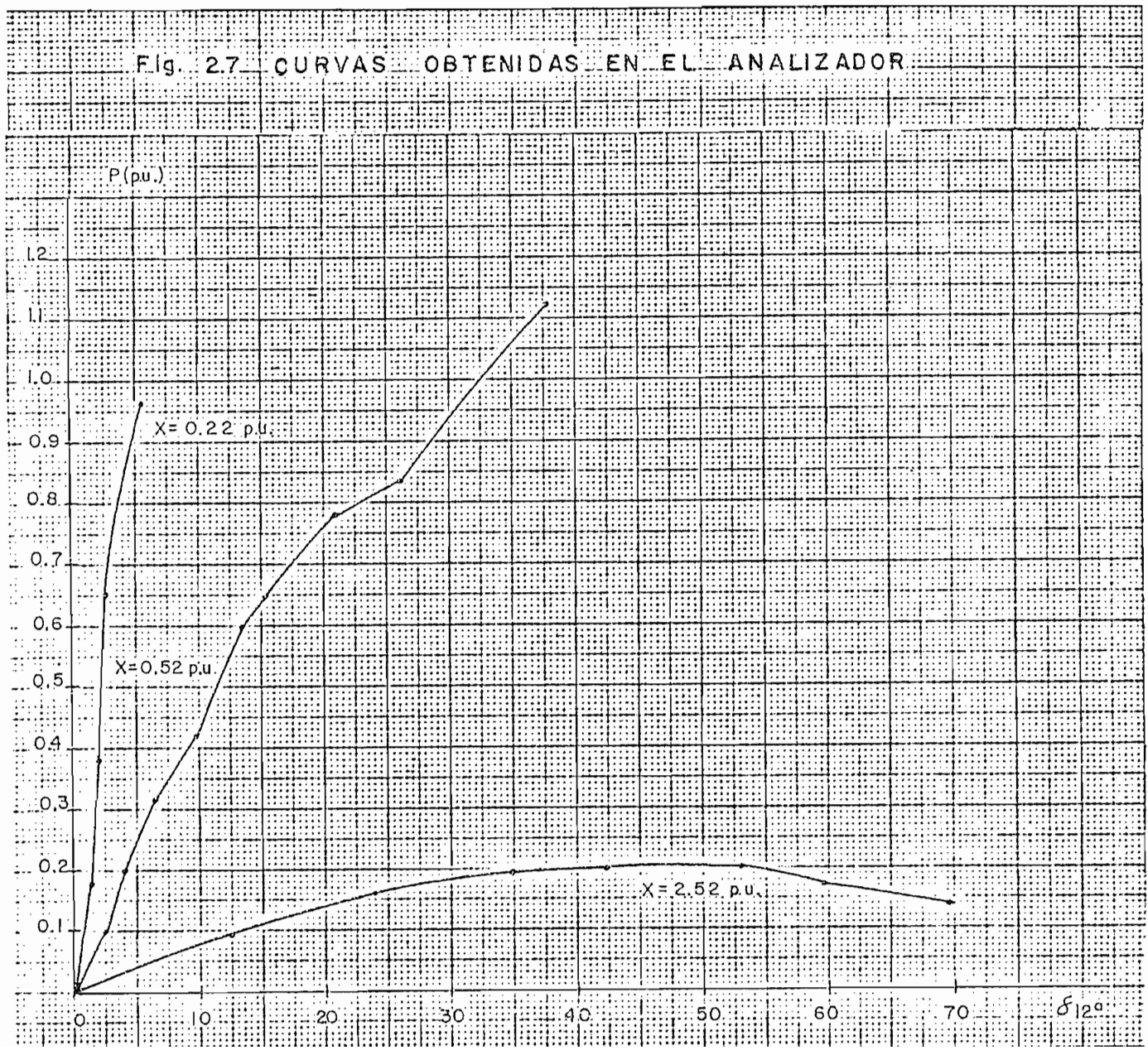


OFFSET AMAZONAS - QUITO

- ① Curva de Mediciones
- ② Curva Calculada

## 2.4 ESTUDIO DE LA CARGA ESTÁTICA EN EL ANALIZADOR DE REDES

Las curvas obtenidas en el analizador pueden apreciarse en la gráfica siguiente.



CAPITULO IIILIMITACIONES DE LAS LINEAS DE TRANSMISION

## 3.1 GENERALIDADES

Las limitaciones que se encuentran en una línea de transmisión obedecen en general a dos causas principales:

- 1) Limitaciones de diseño; y,
- 2) Limitaciones del sistema.

Las primeras se deben a las principales características que el proyectista de líneas ha colocado como hipótesis de funcionamiento de la línea. Será conveniente mencionar, con la debida demostración matemática, casos de limitaciones en que el sistema, del cual forma parte la línea se ve imposibilitado de operar correctamente, a causa de la línea de transmisión.

Entre estas últimas, podemos mencionar la desangulación que se produce entre los puntos extremos de

una línea, al transmitir potencia por ella y que refleja en un cierto grado la capacidad de la totalidad del sistema (fuentes de energía, consumos de ella y configuración del sistema) para permitir esta transmisión. La obtención de la potencia de transmisión se obtiene como sigue:

Sea el siguiente sistema simple de línea de transmisión:

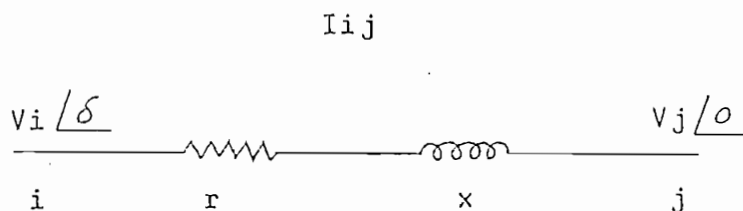


Figura 3.1

$$\begin{aligned}
 \text{entonces } S_{ij} &= V_i (I_{ij})^* \\
 &= V_i \left( \frac{V_i - V_j}{r + jx} \right)^* \\
 &= \frac{V_i / \delta}{r - jx} (V_i / -\delta - V_j) \\
 &= \frac{V_i}{r - jx} (V_i - V_j / \delta)
 \end{aligned}$$

$$= \frac{V_i (r + jx)}{r^2 + x^2} (V_i - V_j \cos \delta - jV_j \sin \delta)$$

$$S_{ij} = \frac{V_i}{r^2 + x^2} (r (V_i - V_j \cos \delta) + x V_j \sin \delta) +$$

$$+ j \frac{V_i}{r^2 + x^2} (x (V_i - V_j \cos \delta) - r V_j \sin \delta)$$

de donde:

$$P_{ij} = \frac{V_i}{r^2 + x^2} \left( r (V_i - V_j \cos \delta) + x V_j \sin \delta \right) \quad (3.1)$$

$$Q_{ij} = \frac{V_i}{r^2 + x^2} \left( x (V_i - V_j \cos \delta) - r V_j \sin \delta \right) \quad (3.2)$$

a partir de lo cual, si se desea obtener la potencia máxima de transmisión se deberá igualar la primera derivada a cero, lo que nos da, para la potencia activa:

$$r V_j \sin \delta = -x V_j \sin \delta$$

$$\text{o } \operatorname{tg} \delta = \frac{-x}{r} \quad (3.3)$$

y para la potencia reactiva:

$$xV_j \sin \delta = rV_j \cos \delta$$

$$\text{o} \quad \text{tg } \delta = \frac{r}{x} \quad (3.4)$$

Se deberán, pues, satisfacer las condiciones (3.3) y (3.4) para obtener máxima potencia activa y reactiva respectivamente.

Si reemplazamos la expresión (3.3) en (3.1) obtendremos:

$$P_{ij}(\text{máx}) = \frac{V_i V_j}{|Z|} \left( \frac{V_i}{V_j} \cos \theta - 1 \right) \quad (3.5)$$

y reemplazando (3.4) en (3.2) se obtiene para la potencia reactiva:

$$Q_{ij}(\text{máx}) = \frac{V_i V_j}{|Z|} \left( \frac{V_i}{V_j} \sin \theta - 1 \right) \quad (3.6)$$

$$\text{en las cuales } |Z| = \sqrt{r^2 + x^2} \quad (3.7)$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{x}{r} \quad (3.8)$$



Estas ecuaciones se transforman en las siguientes ecuaciones, si se desprecia la resistencia de la línea, quedando sólo la reactancia, es decir, para

$$Z \longrightarrow x \angle 90^{\circ}$$

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{X} \sin \delta \quad (3.9)$$

$$Q_{ij} = \frac{V_i}{X} (V_i - V_j \cos \delta) \quad (3.10)$$

Si el sistema no es capaz de trabajar en estas condiciones, la tensión de llegada bajará fuera de los límites permitidos, lo que obligará por una parte a aumentar  $\delta$  para obtener la potencia  $P_R$  requerida por el receptor, y por otra, a aumentar las componentes activa y reactiva de la corriente. Este aumento de  $\delta$  también aumenta  $Q_S$  y  $Q_R$ . Para mejor comprensión, haciendo uso de la misma simplificación de considerar sólo la parte reactiva de la impedancia de la línea, se tendrán las siguientes ecuaciones:

$$P_S = \frac{E_S E_R}{X} \sin \delta \quad (3.11)$$

$$P_R = \frac{E_S E_R}{X} \sin \delta = P_S \quad (3.12)$$

$$Q_S = \frac{E_S E_R}{X} \left( \cos \delta - \frac{E_S}{E_R} \right) \quad (3.13)$$

$$Q_R = \frac{E_S E_R}{X} \left( -\cos \delta + \frac{E_S}{E_R} \right) \quad (3.14)$$

Esta sucesión de aumentos de los valores de  $\delta$  y de la corriente, traen consigo nueva variación de  $E_R$ , es decir se llega a una situación inestable al pasar este límite. En algunos casos el límite de regulación puede llegar antes del límite de estabilidad, y aún provocar un problema de operación por sobrepasar antes el límite de corriente permisible por diseño de la línea.

En resumen, para dejar nombrados los límites de operación de sistemas en algún orden, podemos decir que existe una potencia de transmisión en las líneas, que está limitada por uno o varios de los factores siguientes:

- a) Estabilidad Permanente:  $P_R = \frac{E_S E_R}{X}$
- b) Estabilidad transitoria: valor de  $\delta$  de recuperación estable.
- c) Regulación de la Tensión: reglamentos y suministro de KVAR.

Entremos ahora en la exposición de las limita-

ciones de diseño de una línea. Una línea está sometida a dos tipos de influencias físicas: aquellas controlables a voluntad, y las eventuales. Las primeras pueden considerarse relativamente constantes en toda la línea; las restantes son de carácter aleatorio, es decir, dependen del lugar y del tiempo considerado, y para las cuales pueden utilizarse criterios probabilísticos.

Las características controlables a voluntad en cierto modo son la tensión de servicio y la corriente, ya que en general existen medios de protección contra sobrecorrientes y aún contra sobretensiones. Las eventuales son las condiciones meteorológicas que rodean la línea, los vehículos o personas situadas en su cercanía, etc.

### 3.2 TENSION

El diseño correcto deberá contemplar con diferente probabilidad los siguientes casos:

#### 3.2.1 TENSION DE SERVICIO

Como es lógico el proyecto de aislación constituida tanto por los aisladores soportes como por el aire circundante, debe considerar la máxima tensión de operación

posible en 60 ciclos y asignarle un carácter permanente en el tiempo. A lo largo de la línea, especialmente en el caso de desconexión involuntaria, el valor de la tensión puede ir en aumento por el llamado efecto Ferranti, que en líneas de muy alta tensión es considerable.

La tensión como magnitud variable a voluntad, estará limitada al valor de diseño correspondiente.

### 3.2.2 TENSION DE MANIOBRA

En general se trata de trenes de ondas producidas por el cambio de configuración del sistema, al operar algún elemento de él que provoque conexión o desconexión de algún tramo, con el consiguiente cambio de energía que representa las partes frente al todo. Se caracterizan por tener forma rectangular de unos 400 x 2000 microsegundos de duración, con magnitudes que pueden alcanzar entre 2,5 y 5 veces el valor nominal. Como su ocurrencia en plena magnitud es de baja probabilidad ya que dependen del estado del sistema y del momento en que se produce la conexión o desconexión frente a la sinusoide de voltaje, a este fenómeno se le asigna coincidencia con los estados meteorológicos más permanentes (sin sobrecargas de hielo y vientos moderados) en el caso de su aislación a estructuras.

En lo que respecta a distancia al suelo, puede considerarse también una ocurrencia simultánea con objetos permanentes bajo la línea, reconociendo la bajísima probabilidad combinada que ocurre entre estas sobretensiones en plena magnitud y la presencia de vehículos o personas bajo la línea. Excepción posible de realizar en el proyecto de una línea, es la que constituye caminos principales y autopistas, en que se sabe de un tránsito casi continuo de vehículos, puntos especiales en los que se deberá tener especial cuidado para mantener mayor distancia, mediante el subterfugio de no proyectar estos cruces de manera de dejarlos en el lugar más desfavorable de la catenaria para el conductor.

Estas tensiones no son posible controlar directamente, sino en forma indirecta a través del cumplimiento de las instrucciones para maniobras, que deben ser redactadas de acuerdo a las hipótesis de funcionamiento del sistema. Su valor máximo está relacionado, entre otras cosas, con la tensión de servicio a que se hace operar.

### 3.2.3 TENSIONES DE ORIGEN ATMOSFERICO

Al igual que las anteriores, no es posible con-

trolarlas directamente, sino a través de un correcto mantenimiento de la aislación, puestas a tierra, cable de guardia y en ciertos casos, también del funcionamiento del pararrayos.

Por otra parte, tanto las sobretensiones anteriores como éstas, provocan daños relativamente moderados, que son de carácter transitorio en la mayoría de los casos y que permiten una reconexión exitosa, dada la característica de fugacidad que tienen estos fenómenos.

### 3.3 CORRIENTE

En el análisis de los efectos de la corriente en las líneas, no debemos perder de vista los fenómenos anteriores, ya que sus condiciones se suman. En efecto, con el paso de la corriente por el conductor, su temperatura varía, modificando sus condiciones de templado, de manera de aumentar su flecha. A manera de ilustración puede indicarse que la flecha aumenta aproximadamente 3 a 4 cm. por  $^{\circ}\text{C}$  de temperatura en líneas de cobre, ACSR o aluminio puro, para luces entre 300 y 500 mt.

Este último factor, dada su importancia y amplias posibilidades de variación, lo analizaremos en detalle.

Como se indicó anteriormente, la corriente de una línea de transmisión depende de muchos factores y puede considerarse como la suma de dos componentes: las partes activa y reactiva de ella.

La componente activa de la corriente está gobernada única y exclusivamente por la desangulación entre las tensiones de los extremos terminales, la que obedece a la potencia que está entregando en su extremo receptor.

La componente reactiva de la corriente se debe al factor de potencia del consumo y al paso de la corriente total a través de la inductancia  $x$  de la línea. Su valor es función de las magnitudes de las tensiones de los extremos emisor y receptor.

Desde el punto de vista de calentamiento, la corriente total resultante de estas condiciones, causará, a su vez, pérdidas de potencia activa, llamada efecto Joule, y además pérdidas de potencia reactiva.

Junto a las características del ambiente, (temperaturas del aire, presencia de viento y de sol) la corriente resulta ser el único parámetro que finalmente limi-

tará la potencia transmitida por una línea, si se quiere obtener distancias al suelo superiores a un valor fijado. Antes de proseguir el análisis del proceso de calentamiento de un conductor, deberemos referirnos a este límite de distancia.

#### 3.4 DISTANCIA LIMITE DEL SUELO

Como expresamos anteriormente, la experiencia reflejada en los reglamentos de los diversos países considera como criterio de distancia mínima, un valor tal que se tenga cierta "seguridad" en la distancia escogida, aplicada a una posición o configuración límite.

Existe la posibilidad de mirar este problema desde un punto de vista probabilístico, siempre que se tenga adecuada información sobre:

- a) Probabilidad de tener una forma de carga (corriente en función del tiempo) dada.
- b) Probabilidad de existir temperatura y viento (brisa) de ciertas magnitudes en la línea considerada.



- c) Errores de perfil topográfico y errores de templado posibles.
- d) Dispersión de la tensión de descarga entre electrodos sumergidos en el aire.

Considerar simultáneamente estas probabilidades es un trabajo que se está realizando recién en estos años en todos los países, buscando un método menos laborioso que el simple establecimiento matemático de estos parámetros.

### 3.5 LIMITE TERMICO EN CONDUCTORES

Los materiales de los cuales se fabrican actualmente conductores, han sido objeto de numerosas investigaciones para determinar cuál sería el límite térmico aceptable para conductores. Los resultados de estas investigaciones indican que es posible trabajar permanentemente con cobre, aluminio, o las aleaciones de aluminio hasta  $90^{\circ}\text{C}$  sin hacer peligrar sus características mecánicas. Sin embargo debe considerarse las condiciones más desfavorables que pueden producirse, por ejemplo: bajo las uniones gram-~~pas~~ pas o aún prensas de mal diseño o en mal estado, por lo que se adopta un valor de  $10^{\circ}\text{C}$  inferior a este máximo. Por otra

parte, debe aceptarse que estos  $10^{\circ}\text{C}$  cubrirán también cualquier error de apreciación o variación en la temperatura ambiente, en la carga transmitida por la línea, en la topografía o aún en el templado.

A estas condiciones permanentes podrán superponerse condiciones transitorias como por ejemplo: corrientes de corto - circuito, que por su carácter momentáneo pueden aceptarse siempre que no acerquen la temperatura final de los conductores a los valores de recocido de los metales, lo que sería peligroso. Aún cuando las temperaturas de fusión de los metales son bastante diversas, la temperatura de recocido es relativamente cercana entre ellos. Se recomienda no sobrepasar por cálculo las temperaturas de  $210^{\circ}\text{C}$  en el cobre y  $200^{\circ}\text{C}$  en el aluminio. En todo caso, debe tenerse presente que este tipo de esfuerzos térmicos, si alcanzan a valores mayores de  $90^{\circ}\text{C}$  en los conductores, van debilitando acumulativamente el conductor.

El calentamiento de los conductores es un proceso físico bastante conocido. Las reglas a las que está sometido pueden resumirse diciendo que un conductor elemental, por ejemplo un trozo de longitud unitaria recibe la influencia de fuentes calóricas que aumentan su temperatura respecto del medio ambiente con lo que provoca inmedia-

tamente una transmisión de esa energía calórica, motivada por la diferencia de temperatura entre el conductor y el medio ambiente.

Los fenómenos termodinámicos que esta diferencia provoca son principalmente dos: convección del aire alrededor del conductor, y radiación al ambiente. El tercer fenómeno termodinámico, la conducción del calor, es despreciable en su magnitud frente a los otros dos.

Investigaciones realizadas en los laboratorios de la firma ALCOA permiten establecer las siguientes fórmulas para la convección y radiación, respectivamente:

$$q_c = 0.072 P_f^{1/2} D^{3/4} (t_c - t_a) \quad \text{W/pie} \quad (3.15)$$

$$q_r = 0.138 E D \left[ \left( \frac{K_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{K_a}{100} \right)^4 \right] \quad \text{W/pie} \quad (3.16)$$

Donde:

$q_c$  = potencia calórica disipada por convección, en vatios por pie de conductor.

$q_r$  = potencia calórica disipada por radiación, en vatios por pie de conductor.

- $P_f$  = densidad relativa del aire, a nivel del mar = 1; depende de la temperatura del aire y de la altura sobre el nivel del mar.
- $D$  = diámetro del conductor en pulgadas.
- $t_c$  = temperatura media del conductor en  $^{\circ}\text{C}$ .
- $t_a$  = temperatura ambiente, en grados  $^{\circ}\text{C}$ .
- $E$  = factor de superficie del conductor = 0,23 para conductor nuevo; = 0,91 para conductor ennegrecido; = 0,5 promedio considerado aceptable.
- $K_c$  = temperatura Kelvin del conductor ( $0^{\circ}\text{K} = 273,16^{\circ}\text{C}$ ).
- $K_a$  = temperatura Kelvin del ambiente.

La ecuación (3.15) se refiere a la convección natural del conductor al medio ambiente considerado quieto. Sin embargo, su valor cambia notablemente si se considera que el ambiente que lo rodea está en movimiento, como suele estarlo debido al tiraje por diferencia de temperatura entre el aire inmediatamente en contacto con el conductor y el resto, aún cuando no haya brisa alguna.

Los valores de esta brisa artificial que se han

medido son del orden de 0,1 a 0,2 m/seg.

Por otra parte, sólo en situaciones de orografía muy especiales las máximas temperaturas ambiente, y por ende, las condiciones más desfavorables de temperatura de los conductores, se desarrollan sin presencia de vientos suaves, por lo que en general es costumbre asociar a estas temperaturas, una brisa mínima de 0,6 m/seg. en total (2 Km/h), a no ser que las circunstancias de la orografía que atraviesa la línea indiquen lo contrario. En este caso, la ecuación (3.15) que representa la convección natural se reemplaza por la siguiente que toman en cuenta la convección forzada:

$$q_{cf} = \left[ 1,01 + 0,371 \left( \frac{D \rho_{\delta} V}{\mu_f} \right)^{0,52} \right] K_f (t_c - t_a) \quad \text{W/pie} \quad (3.17)$$

Siempre que:

$$0,1 < \frac{D_0 \rho_{\delta} V}{\mu_f} < 1000$$

$$y \quad q_{cf} = 0,1695 \left( \frac{D \rho_{\delta} V}{\mu_f} \right)^{0,6} K_f (t_c - t_a) \quad \text{W/pie} \quad (3.18)$$

$$\text{para valores} \quad 1000 < \frac{D_0 \rho_{\delta} V}{\mu_f} < 18000$$

donde, además de los parámetros definidos anteriormente,

- $V$  = Velocidad del flujo de aire (pie/Km)  
 $\mu_f$  = Viscosidad absoluta del aite (lb/h.pie)  
 que varía entre 0,0415 y 0,0526 con la temperatura del aire entre 0° y 100°C.  
 $K_f$  = Coeficiente de la conductividad térmica del aire, (W/pie cuadrado . °C) y que varía entre 0,00739 y 0,00966 para una temperatura ( $t_f$ ) promedio del ambiente entre 0° y 100°C, donde  $t_f = \frac{t_c + t_a}{2}$   
 $D_o$  = Diámetro medido en pies =  $\frac{D}{12}$ .

Fórmulas más aproximadas en ambos casos son las siguientes, que pueden utilizarse con menos cálculos:

$$q_{cf} = 0.5388 (1.01 + 43.22 D^{0.52}) \quad \text{W/pie} \quad (3.19)$$

para viento de 0,6 m/seg.

Siempre que  $D \leq 1,6''$

$$q_{cf} = 22,5 D^{0,6} \quad \text{W/pie} \quad (3.20)$$

Si  $D > 1,6''$

la pérdida por radiación tiene también una fórmula aproximada:

$$q_r = 6.73 D \quad \text{W/pie} \quad \text{para} \quad E = 0.5 \quad (3.21)$$

El conductor, atravesado por una corriente  $I$ , constante, irá recibiendo energía calórica debido a las pérdidas Joule a razón de  $P = r I^2$  (W/pie) si  $r$  es la resistencia por unidad de longitud (ohm/pie) a la temperatura considerada.

Este conductor, antes de ser energizado, tenía la temperatura del ambiente. A medida que las pérdidas Joule le van entregando energía calórica, estas calorías hacen que suba la temperatura. Esta alza de temperatura sigue hasta buscar un equilibrio entre la temperatura  $t_c$  (y  $K_c$ ) de las fórmulas para  $q_c$  y  $q_r$ , que produzca una pérdida de energía calórica tal que compense las pérdidas joule. Sin embargo, no debe olvidarse la posibilidad de recibir calor mediante la radiación solar. En el equilibrio, es decir en el estado permanente final, se puede escribir:

$$q_c + q_r = q_s + I^2 r \quad \text{W/pie} \quad (3.22)$$

$$\text{si } q_s = a \cdot A' \cdot Q_s \cdot \text{sen } \theta \quad (3.23)$$

Donde:

$q_s$  = calor recibido del sol (W/pie) .

$a$  = coeficiente de absorción solar = 0,23  
para conductor nuevo; = 0,95 para con-  
ductor ennegrecido; = 0.5 promedio acep-  
tado.

$A'$  = proyección del área del conductor.

$Q_s$  = radiación total del sol y del cielo  
( W/pie cuadrado ) ; en el cenit  $\sim 105$   
 $\text{mW/cm}^2$  .

$\theta$  = arc cos ( (cos Hc) cos (Zc-Ze) ).

Hc = altitud del sol en grados sexagesimales.

Zc = Azimut del sol en grados sexagesimales.

Ze = Azimut de la línea en grados sexagesima-  
les.

Como en los casos anteriores, se puede tener  
una fórmula aproximada más útil considerando:



$a = 0,5$  y una línea de Este a Oeste a los  $30^{\circ}$  de latitud

$$q_s = 3.87 D \text{ (W/pie)} \quad (3.24)$$

Existe también la necesidad de tomar en cuenta la variación de la resistencia del conductor en función de su temperatura  $t_c$  según la conocida fórmula:

$$r_c = r_a \left( 1 + \underset{\alpha}{a}(t_c - t_a) \right) \quad (3.25)$$

en que el coeficiente depende del material en cuestión:

$\alpha = 0.004$  para aluminio a  $25^{\circ}\text{C}$ .

$\alpha = 0.00353$  para aleación de aluminio 5005

$\alpha = 0.00347$  para aleación de aluminio 6201

$\alpha = 0.00374$  para aleación de cobre

### 3.6 CALCULO DE LA TEMPERATURA FINAL DE EQUILIBRIO TERMICO

Cuando se tiene una variación entre una potencia transmitida permanente, y una nueva condición de carga permanente, es indudable que de la temperatura que equilibraba el proceso térmico de calentamiento y el de convección-radiación al ambiente, deberá pasarse a una nueva tem-

peratura final en que se restablezca el equilibrio entre energía calórica entregada al conductor y la energía perdida por éste al ambiente.

Con las ecuaciones indicadas anteriormente, pueden escribirse las ecuaciones de equilibrio térmico en la forma siguiente, tomándolas por unidad de longitud.

1) Temperatura anterior al cambio de potencia:

$$(1 + \alpha t_c) R_o I_1^2 = K(t_c - t_a) + L \left[ \left( \frac{K_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{K_a}{100} \right)^4 \right] - 3.87 D \quad (3.26)$$

2) Temperatura de equilibrio final a que se llega:

$$(1 + \alpha t_f) R_o I_2^2 = K(t_f - t_a) + L \left[ \left( \frac{K_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{K_a}{100} \right)^4 \right] - 3.87 D \quad (3.27)$$

Donde:

$t_c$  = temperatura del conductor ( $^{\circ}\text{C}$ ), antes del cambio.

$t_f$  = temperatura del conductor ( $^{\circ}\text{C}$ ), después del cambio.

$R_0$  = resistencia a  $0^{\circ}\text{C}$  de la unidad de longitud del conductor.

$I_1$  = corriente circulando antes del cambio (ver Figura 3.2).

$I_2$  = corriente circulando después del cambio (ver Figura 3.2).

$K$  = constante de convección del conductor considerado.

$t_a$  = temperatura del ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$L$  = constante de radiación del conductor considerado.

$K_c, K_a, K_f$  = valor en  $^{\circ}\text{Kelvin}$  de las temperaturas  $t_c, t_a,$  y  $t_f$ .

$D$  = diámetro del conductor en pulgadas.

Los valores numéricos de las constantes  $K$  y  $L$  serían, como antes:

$$K = \left[ 1.01 + 0.371 \left( \frac{D \rho_0 V}{H_0} \right)^{0.52} \right] K_f \quad \text{W/pie } ^{\circ}\text{C} \quad (3.28)$$

$$L = 0.138 ED \quad \text{W/pie } ^{\circ}\text{K} \quad (3.29)$$

3) Conocidos los valores  $t_c$  y  $t_f$ , temperaturas del conductor antes y después del cambio puede calcularse

en forma muy aproximada y haciendo algunas hipótesis, el tiempo que se demora en llegar al estado final de equilibrio térmico.

Se supone que el proceso de cambio de una temperatura inicial  $t_c$  hasta llegar a la temperatura final  $t_f$ , podrá dividirse en intervalos iguales y suficientemente pequeños para que pueda considerarse lícitamente que todo otro parámetro permanece invariable en el intervalo.

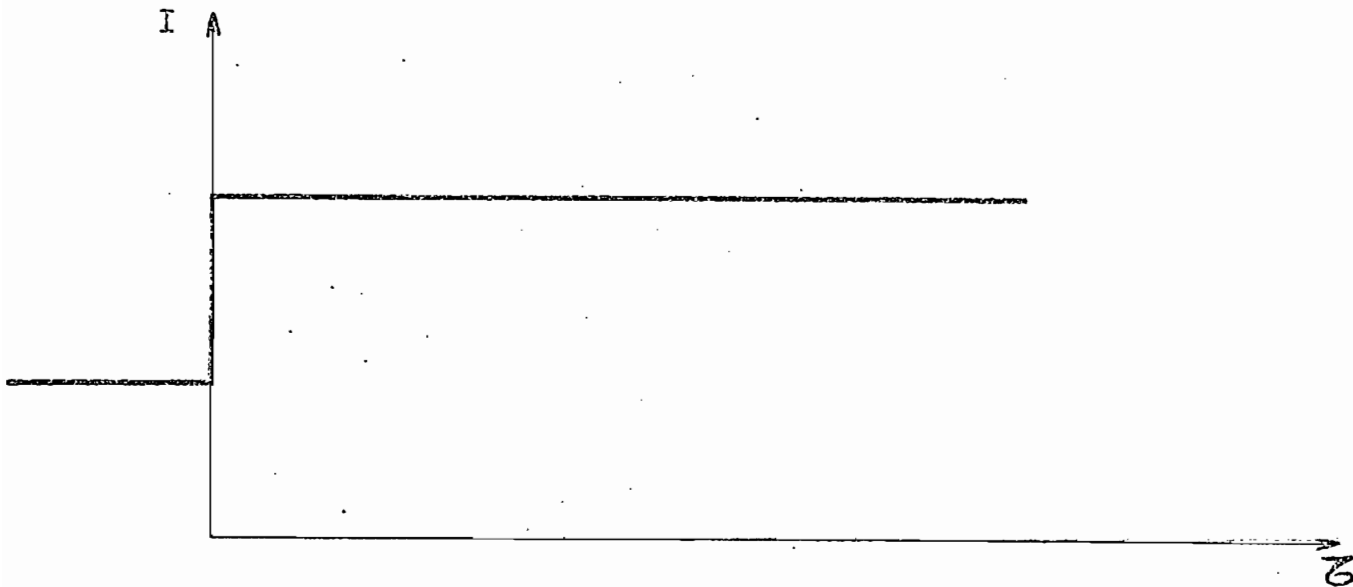


Fig. 3.2 Variación de Régimen de Corriente en Conductores

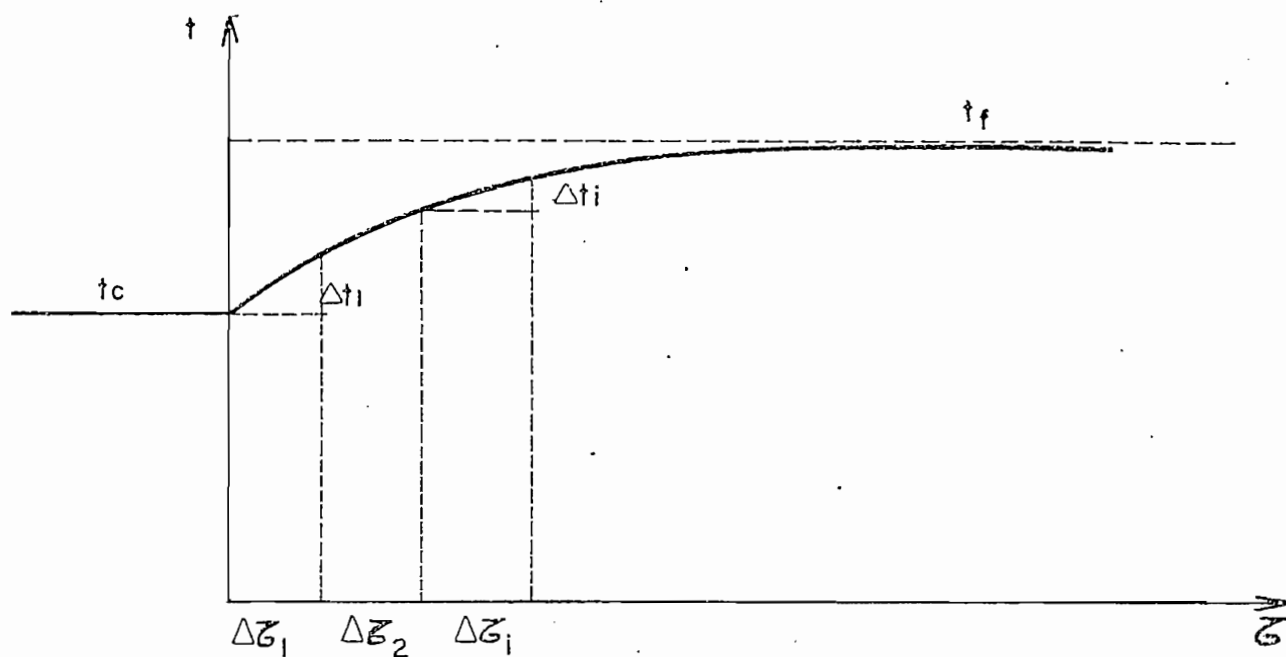


Fig. 3.3 Variación de Régimen de Temperatura en Conductores

La cantidad de energía calórica recibida por cada unidad de longitud del conductor, durante el intervalo considerado  $\Delta E_i$ , será:

$$E_i = \left\{ (1 + \alpha t_i) R_0 I_2^2 - K (t_i - t_a) - \right.$$

$$- L \left[ \left( \frac{K_i}{100} \right)^4 - \left( \frac{K_a}{100} \right)^4 \right] + 3.87 D \} \cdot \Delta T_i \quad (\text{W} \cdot \text{S})$$

(3.30)

donde el subíndice "i" se aplica a la temperatura del conductor en el intervalo  $\Delta T_i$  considerado, y los valores  $\alpha$ ,  $K$ ,  $L$ , se mantendrán constantes durante todo el intervalo  $\Delta T_i$ .

Toda la energía calórica  $\Delta E_i$ , producto de las pérdidas que no es capaz de disipar el conductor, por tener sólo la temperatura  $t_i$ , provocará un alza de su temperatura que supondremos se hará efectiva en el último instante del intervalo. Esta aproximación será más real mientras más pequeña sea la duración de  $\Delta T_i$ . El alza de temperatura al final del intervalo será pues:

$$\Delta t_i = \frac{\Delta E_i}{C_c} \cdot K \quad (^\circ\text{C}) \quad (3.31)$$

en la que  $C_c$  es la capacidad calórica del material en:

$$\text{Kcal / unidad longitud } ^\circ\text{C} \quad \text{y } K \text{ es el factor } K = \frac{0.860}{3600} \quad \left( \frac{\text{Kcal}}{\text{W.S}} \right)$$

para convertir unidades de energía eléctrica en calorías.

Algunos valores de  $C_c$  son los siguientes:

Cobre	0,0928	Kcal/Kg °C
Aluminio	0,214	Kcal/Kg °C
Acero	0,115	Kcal/Kg °C

Para ACSR deberá formarse la suma ponderada según los pesos de sus componentes.

Obtenido  $\Delta t_i$  de la ecuación (3.31), al fin del intervalo, la temperatura del conductor habrá subido a:

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t_i \quad (3.32)$$

De una nueva aplicación de la fórmula (3.30), hecha para el nuevo valor  $t_{i+1}$  que reemplazará a  $t_i$  en ella, variando el parámetro  $K$  que se ve afectado por la temperatura del conductor a través de  $K_f$ , según las ecuaciones (3.28), (3.17) y (3.16), se podrá obtener el nuevo  $\Delta t_i$  de la ecuación (3.31).

Este proceso deberá extenderse desde el interva-

lo  $i$ , que comprenderá al momento inicial de cambio de  $I_1$  al valor  $I_2$ , con  $t_i = t_c$ , hasta que los intervalos sucesivos, aplicando (3.32), de finalmente  $t_{i+1} = t_f$  de la ecuación (3.27). Sin embargo, debido a que la temperatura del conductor va subiendo,  $\Delta E_i$  disminuye con los pasos sucesivos y, en los últimos intervalos  $\Delta T$  el alza  $\Delta t_i$  es mínima, acercándose  $t_{i+1}$  a  $t_f$  como asíntota, es decir el tiempo que ocupa en llegar (suma de  $\Delta T_i$ ) es infinito.

Se ha desarrollado un programa para la computadora Hewlett Packard modelo 9100 B en la empresa ENDESA de nacionalidad chilena, en que puede calcularse este proceso de integración y dar como resultado la suma de intervalos necesarios, mediante la aproximación de dar por finalizado el proceso cuando la temperatura del conductor es tal que la energía de pérdidas disipada por convección y radiación, restada la energía solar, ha sobrepasado el 95% de la energía de pérdidas (Joule). De este programa (referencia 8/) se han sacado los siguientes resultados, a manera de ilustración:



SE INCLUYE ACCION DEL SOL

Conductor (sección)	1/0 AWG	1/0	2/0	4/0	4/0
Material	cobre	cobre	cobre	ACSR	AASC
Diámetro mm	9.36	9.36	10.5	14.31	14.31
I <sub>1</sub> A	145	145	170	170	170
I <sub>2</sub> A	300	300	340	340	340
Tc (°C)	50	50	50	50	49
ta (°C)	35	40	35	35	35
tf (°C)	80	80	80	74	72
tiempo total (seg.)	580	330	980	1310	1210

TABLA 3.1

## COMENTARIOS

1. Las dos primeras columnas corresponden al mismo conductor a diferente temperatura ambiente (35° y 40°).
2. Las tres últimas columnas corresponden al mismo conductor equivalente sometido a las mismas cargas. La temperatura inicial tc

es muy semejante, difiriendo sólo la aleación en  $1^{\circ}\text{C}$ .

3. En los cinco casos se vió que existe una demora en alcanzar  $80^{\circ}\text{C}$ . En los dos últimos conductores, el proceso se había detenido a los  $74$  y  $72^{\circ}\text{C}$  respectivamente por acción de la aproximación lenta, citada arriba. Para las temperaturas de  $74$  y  $72$  en el conductor, las energías disipada y recibida tenían una relación inferior a  $0.95$ .
4. Este programa integra por intervalos de  $10$  seg. de duración.

CAPITULO IV

PROGRAMA DIGITAL PARA CALCULAR LA CARGABILIDAD  
DE UNA LINEA DE TRANSMISION MEDIANTE UN MODELO MATEMATICO

4.1                    MODELO MATEMATICO Y DIAGRAMAS DE FLUJO

El modelo matemático de una línea de transmisión junto con las impedancias terminal del sistema se muestra a continuación:

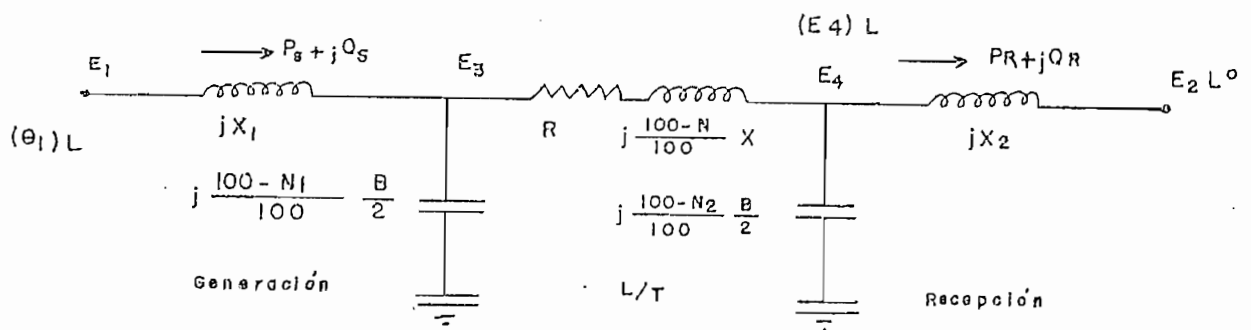


Figura 4.1. Modelo Matemático de una L/T

Donde:

$$\left. \begin{array}{l} P_S + Q_S \\ P_R + Q_R \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Vienen expresados en p.u. del} \\ \text{SIL de la línea estudiada} \end{array}$$

$N =$  % de compensación en serie

$N_1, N_2 =$  % de compensación en shunt.

$(E_4)L =$  Valor límite de voltaje definido por la caída de voltaje.

$(\theta_1) =$  Angulo límite definido por el criterio de estabilidad estacionaria.

Este programa, como se verá a continuación, emplea el llamado equivalente  $\pi$  de una línea en vez del nominal  $\pi$ . Como es conocido, el primero es mucho más apegado a la realidad, sobre todo para líneas de longitud bastante grandes ( 500 Km.). La diferencia que existe entre tales circuitos se muestra a continuación en la siguiente tabla:

Nominal	Equivalente	
Z	$Z_0 \sinh(\gamma l)$	Impedancia Serie
$\frac{Y}{2}$	$\frac{1}{Z_0} \operatorname{tgh} \frac{\gamma l}{2}$	Admitancia Shunt (a cada extremos de la línea)

TABLA 4.1. Diferencias entre los circuitos equivalente y nominal.

En la siguiente página se muestra el diagrama de flujo del programa principal y posteriormente el de la subrutina principal que utiliza el método de Newton - Raphson para resolver el circuito. Existen además subrutinas de grafización de resultados que no han sido expuestas en forma de diagramas de flujo por considerarles demasiado elementales. Ante todo, conviene indicar que todo el programa está codificado en lenguaje BASIC aplicable a la computadora TEXTRONIX 4051 existente en el departamento de electrónica de la Escuela Politécnica Nacional. La operación del programa se la hace por medio de una unidad de disco en la cual se encuentra grabado el presente trabajo y su manipuleo no presenta la menor complicación. Cualquier persona con mínimos conocimientos del manejo del HARDWARE está perfectamente capacitada para poner en funcionamiento el programa que nos ocupa en el presente capítulo de este trabajo de tesis.

Por otro lado, indicaremos los datos con los cuales ha sido corrido el programa para obtener los resultados que luego se expondrán:

Resistencia Serie de la L/T = 0.0003323 p.u./Km.

Reactancia Serie de la L/T = 0.0015907 p.u./Km.

Conductancia = 0

Susceptancia de la L/T = 0.0010224 p.u./Km.

Reactancias Terminal en ambos extremos (transmisor y receptor) = 0.20 p.u.

Voltaje al comienzo de la línea =  $E_3$  = 1.06 p.u.

Voltaje en el extremo receptor =  $E_2$  = 1.0 p.u.

Margen de estabilidad = 35%

Voltaje límite al final de la línea = 1.01 p.u.

o caída de voltaje a lo largo de la línea máxima del 5%.

Angulo incremental para  $E_1$  = 1 grado.

Se trata, pues de obtener las llamadas Curvas de St. Clair publicadas por primera vez en 1953 y que no son otra cosa que el estudio de la cargabilidad de una línea de transmisión como función de su longitud. Las bases de potencia y voltaje escogidas para resolver el presente circuito son de 125 MVA y de 200 KV indicándose que el proceso si se realiza en forma manual resultaría muy tedioso y extrema-

damente largo pues se obtiene un sistema de ecuaciones cuyas variables se encuentran en forma implícita y que recomiendan necesariamente el uso de una computadora. El programa es en extremo versátil y solamente tiene dos limitaciones importantes que se indicarán en otro apartado del presente capítulo.

DIAGRAMA DE FLUJO

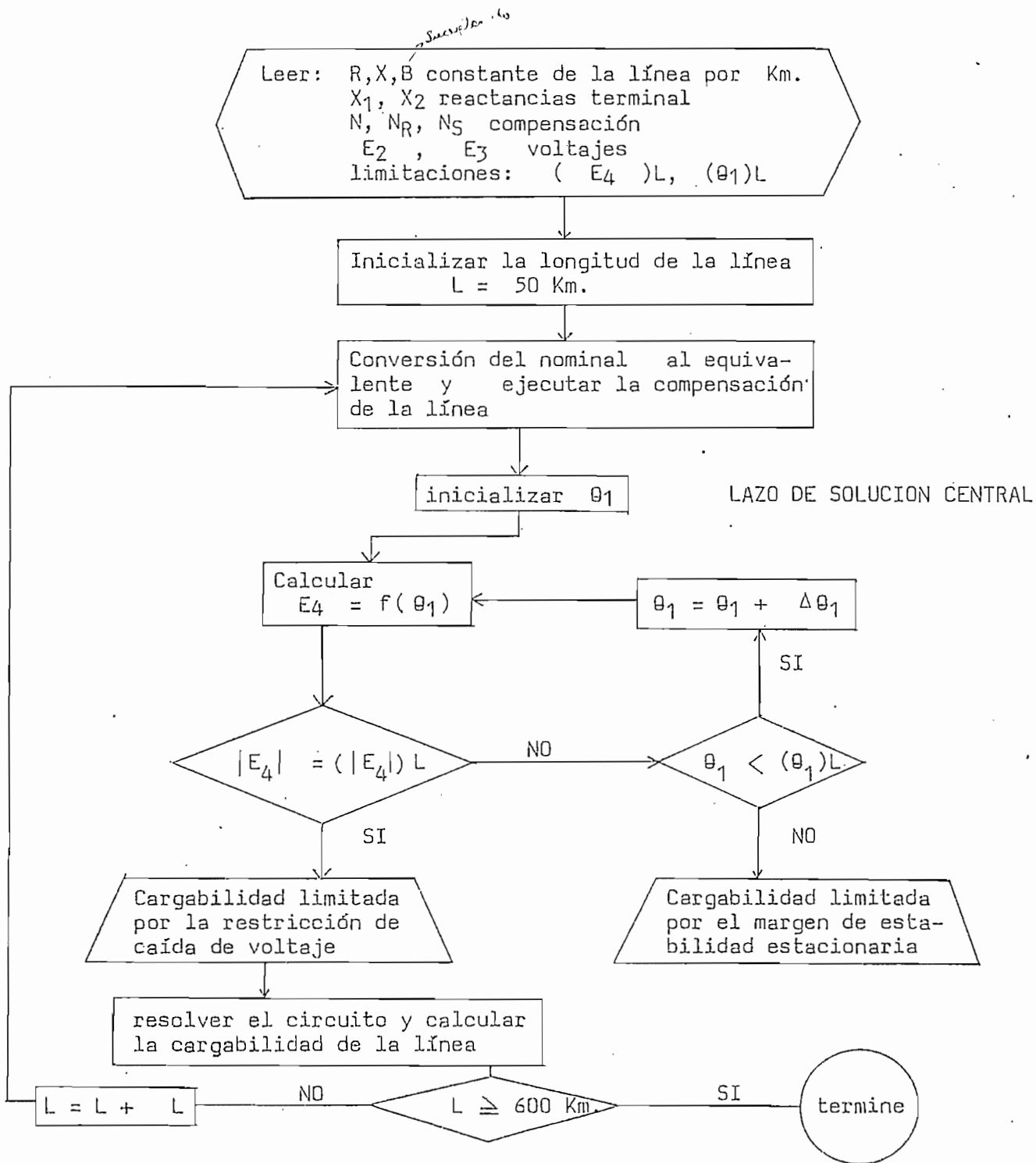


Figura 4.2. Programa Principal



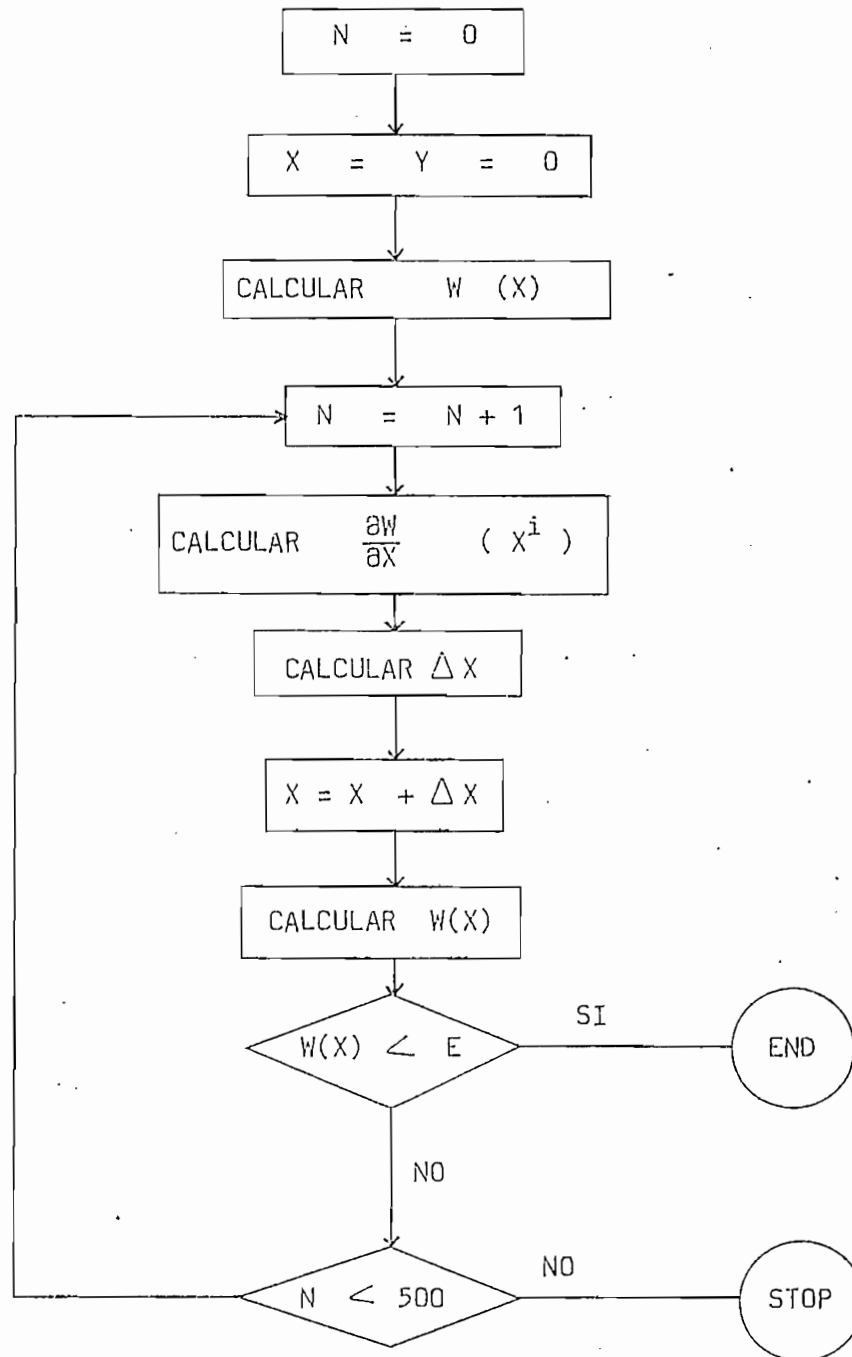


Figura 4.3. Cálculo de  $E_R = F(\theta_1)$  por el Método de Newton - Raphson

El método de Newton - Raphson para resolver un sistema de ecuaciones cuyas variables se encuentran en forma implícita se muestra a continuación:

Sea  $X$  un vector de variables y  $W(X)$  el sistema de ecuaciones; entonces se tendrá:

$$W(X) = 0 \quad (4.1)$$

$$\text{Sea ahora } X^{i+1} = X^i + \Delta X^i \quad (4.2)$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones cuando se encuentre el valor de  $\Delta X^i$  que se obtiene del producto matricial siguiente:

$$\left[ \frac{\partial W}{\partial X} (X^i) \right] \left[ \Delta X^i \right] = - W (X^i) \quad (4.3)$$

Como se verá, esta solución sería demasiado larga hacerla manualmente.

```

3 100 PAGE
4 110 PRINT 'JJJJJJJJPROGRAMA PARA OBTENER LAS CURVAS DE CARGABILIDAD DE'
5 115 PRINT '*****'
6 120 PRINT 'JJJUNA LINEA DE TRANSMISION MEDIANTE UN MODELO MATEMATICO'
7 125 PRINT '*****'
8 126 PRINT 'JJJJJJJJJJJ'
9 127 INPUT A$
10 130 REM ENTRADA DE DATOS DE LOS PARAMETROS DE LA LINEA DE TRANSMISION
11 140 REM PARA UN CIRCUITO 'PI' NOMINAL
12 145 H9=0
13
14 150 DELETE Z1,Y1,X1,X2,E1,E2,E3,E4
15 160 DIM Z(2),Z3(2),Z4(2),Y1(2),X1(2),X2(2),S1(2),F1(2)
16 170 PAGE
17 180 PRINT 'JJJENTRADA DE DATOS DE LA LINEA'
18 181 PRINT '*****'
19 190 PRINT 'S1(1)=Resistencia serie del circuito 'PI' nominal de la L/T'
20 200 PRINT 'S1(2)=Reactancia serie del circuito 'PI' nominal de la L/T'
21 210 PRINT 'F1(2)=Susceptancia en paralelo del circuito 'PI' de la L/T'
22 220 PRINT 'X1(2)=Reactancia terminal del lado de la fuente (P.U.)'
23 230 PRINT 'X2(2)=Reactancia terminal del lado de la carga (P.U.)'
24 232 PRINT 'JJJ'
25 233 PRINT 'LOS DATOS DE LA LINEA SERAN EN (P.U./km)'. PRESIONE [RETURN]
26 234 PRINT 'JJJ'
27 235 INPUT B$
28 240 PAGE
29 245 PRINT 'JJJJSS1(1)= '
30 250 INPUT S1(1)
31 255 PRINT 'S1(2)= '
32 260 INPUT S1(2)
33 265 PRINT 'F1(2)= '
34 270 INPUT F1(2)
35 275 PRINT 'X1(2)= '
36 280 INPUT X1(2)
37 285 PRINT 'X2(2)= '
38 290 INPUT X2(2)
39 300 REM ENTRADA DE DATOS DE VOLTAJES
40 310 PAGE
41 320 PRINT 'JJJJENTRADA DE VOLTAJES'
42 325 PRINT '*****'
43 330 PRINT 'E3=mod'ulo del voltaje al comienzo de la linea'
44 335 PRINT 'E2=mod'ulo del voltaje al lado de la carga'
45 340 PRINT 'SE ASUME EL VOLTAJE E2 COMO REFERENCIA'
46 345 PRINT 'JJJJJJJJJJJ' PRESIONE [RETURN]
47 346 INPUT C$
48 347 PAGE
49 350 PRINT 'JJJJJJJE3= '
50 355 INPUT E3
51 360 PRINT 'E2= '
52 365 INPUT E2
53 370 REM ENTRADA DE LOS VALORES DE COMPENSACION
54 375 PAGE
55 380 PRINT 'JJJENTRADA DE LOS VALORES DE COMPENSACION'
56 385 PRINT '*****'
57 390 PRINT 'N=compensacion en serie (en porcentaje)'
58 395 PRINT 'N1=compensacion en shunt al comienzo de la linea (en %)'
59 398 PRINT 'N2=compensacion en shunt al final de la linea (en %)'
60 400 PRINT 'JJJJJJJJJJJJJ' PRESIONE [RETURN]
61
62
63
64
65

```

```

3
4
5 405 INPUT I$
6 410 PAGE
7 415 PRINT 'JJJJJN=' ;
8 420 INPUT N
9 425 PRINT 'N1=' ;
10 430 INPUT N1
11 435 PRINT 'N2=' ;
12 440 INPUT N2
13 445 REM RESTRICCIONES DE CAIDA DE VOLTAJE Y DEL LIMITE DE ESTABILIDAD
14 EN ESTADO ESTACIONARIO
15 455 PAGE
16 460 PRINT 'JJJENTRADA DE LOS VALORES DE LAS RESTRICCIONES'
17 465 PRINT '*****'
18 470 PRINT 'Z8=valor lih' limite del ab'ngulo en el lado de la fuente (rad)'
19 475 PRINT 'Z9=mod'ulo del voltaje al final de la lih'nea'
20 480 PRINT 'JJJJJJJJJJJJ' PRESIONE [RETURN].
21 485 INPUT E$
22 490 PAGE
23 495 PRINT 'JJJJZ8=' ;
24 500 INPUT Z8
25 505 PRINT 'Z9=' ;
26 510 INPUT Z9
27 515 PAGE
28 520 PRINT 'JJJJINICIALIZAR LA LONGITUD DE LA LINEA (KM) Z7=' ;
29 525 INPUT Z7
30 530 REM CONVERSION DEL NOMINAL 'PI' AL EQUIVALENTE 'PI'
31 535 REM U1=Gamma * longitud(km)=constante de propagacion
32 536 REM U1=(Z*Y)^.5*(longitud)
33 537 REM Z0=impedancia caracteristica
34 538 REM Z0=(Z/Y)^0.5
35 539 REM Z1=nueva impedancia serie del circuito 'PI' equivalente
36 540 REM Z1=Z0*SINH(U1)
37 541 REM Y1=nueva admittancia shunt del circuito 'PI' equivalente
38 542 REM Y1=(1/Z0)*Tsh(U1/2)
39 543 REM CALCULO DE GAMMA (U1)
40 544 DELETE U1
41 545 DIM U1(5)
42 546 U1(1)=-S1(2)*PI(2)
43 548 U1(2)=S1(1)*PI(2)
44 550 U1(3)=(U1(1)^2+U1(2)^2)^0.5
45 552 U1(4)=ATN(U1(2)/U1(1))+PI
46 554 U1(5)=U1(3)^0.5*Z7
47 556 U1(2)=U1(4)/2
48 558 U1(1)=U1(5)*COS(U1(2))
49 560 U1(2)=U1(5)*SIN(U1(2))
50 561 W8=U1(1)
51 562 W9=U1(2)
52 566 REM CALCULO DE LA IMPEDANCIA CARACTERISTICA (Z0)
53 567 DIM Z0(4)
54 568 Z0(1)=S1(2)/PI(2)
55 569 Z0(2)=-S1(1)/PI(2)
56 570 Z0(3)=(Z0(1)^2+Z0(2)^2)^0.5
57 571 Z0(4)=ATN(Z0(2)/Z0(1))
58 572 Z0(1)=Z0(3)^0.5
59 573 Z0(2)=Z0(4)/2
60 574 Z0(3)=Z0(1)*COS(Z0(2))
61 575 Z0(2)=Z0(1)*SIN(Z0(2))
62 577 REM CALCULO DE LA NUEVA IMPEDANCIA SERIE
63 578 REM CALCULO DEL SINH(U1)=W(1)+JW(2)

```

INDICACION PARA OFSETIC 3 A

L 1

```

580 DIM W(2)
582 W(2)=EXP(-U1(1))
584 W(1)=-0.5*COS(U1(2))*W(2)-1/W(2)
586 W(2)=0.5*SIN(U1(2))*W(2)+1/W(2)
588 Z1(1)=Z0(1)*W(1)-Z0(2)*W(2)
590 Z1(2)=Z0(1)*W(2)+Z0(2)*W(1)
592 REM CALCULO DE LA NUEVA ADMITANCIA EN PARALELO
594 REM Y/2=(1/Z0)*TGH(U1/2)
596 REM CALCULO DE LA TGH(U1/2)=Y1(1)+JY1(2)
598 U1(1)=U1(1)/2
600 U1(2)=U1(2)/2
602 P8=EXP(2*U1(1))
604 P9=1/P8
606 Y2=(P8+P9)*0.5+COS(2*U1(2))
608 Y1(1)=(P8-P9)*0.5/Y2
610 Y1(2)=SIN(2*U1(2))/Y2
614 REM Z0(NUEVA)=1/Z0
616 Y2=Z0(1)^2+Z0(2)^2
618 Z0(1)=Z0(1)/Y2
620 Z0(2)=-Z0(2)/Y2
622 Y1(1)=Z0(1)*Y1(1)-Z0(2)*Y1(2)
624 Y1(2)=Z0(1)*Y1(2)+Z0(2)*Y1(1)
626 REM LOS VALORES ANTERIORES ME DAN LA ADMITANCIA DEL CIRCUITO 'PI'
628 REM EQUIVALENTE
630 REM EJECUCION DE LA COMPENSACION EN SERIE Y EN SHUNT
632 Y2=(100-N)/100
634 Z1(2)=Y2*Z1(2)
636 Y2=(100-N1)/100
637 DIM Y3(2),Y4(2)
638 Y3(2)=Y2*Y1(2)
640 Y2=(100-N2)/100
642 Y4(2)=Y2*Y1(2)
644 Y3(1)=Y1(1)
646 Y4(1)=Y1(1)
648 PAGE
650 PRINT "JJJJJ INICIALIZAR T1(radianes) T1= "
652 INPUT T1
654 PAGE
655 REM SUBROUTINA PARA ENCONTRAR E4=F(T1) POR EL METODO DE NEWTON
656 REM "NAPHSOR"
657 GOSUB 659
658 GO TO 1230
659 Z3(1)=Z3(1)/((Z3(1)^2+Y3(2)^2)
660 Z3(2)=-Y3(2)/((Z3(1)^2+Y3(2)^2)
662 Z4(1)=Y4(1)/((Y4(1)^2+Y4(2)^2)
664 Z4(2)=-Y4(2)/((Y4(1)^2+Y4(2)^2)
666 M6=Z3(2)/X1(2)
668 N6=-Z3(1)/X1(2)
670 H8=(Z3(1)*Z1(1)+Z3(2)*Z1(2))/(Z1(1)^2+Z1(2)^2)
672 N8=(Z3(2)*Z1(1)-Z3(1)*Z1(2))/(Z1(1)^2+Z1(2)^2)
674 C1=1+M6+H8
676 C2=N6+N8
678 C3=(C1^2+C2^2)^0.5
680 C3=C3/E3
682 M7=(M6^2+H8^2)^0.5
684 G4=63/M7
686 M9=(M8^2+N8^2)^0.5
688 G7=M9/M7
690 G9=G4/G7
692 U=69

```

INDICACION POR QUERRECA SA

12  
11  
10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2

```

3
4 694 R=G4
5 696 N7=ATN(N6/M6)
6 698 C4=ATN(C2/C1)
7 700 C5=T1*H7
8 702 G6=C4-C5
9 704 C9=-G6
10 706 N3=Z1(2)+Z3(2)+Z4(2)
11 708 M3=Z1(1)+Z3(1)+Z4(1)
12 710 M4=Z3(1)
13 712 N4=Z3(2)
14 714 M5=Z4(1)
15 716 N5=Z4(2)
16 718 D6=-N4/X1(2)
17 720 D5=N4/X1(2)
18 722 D2=(N3*Z1(1)-M3*Z1(2))/(Z1(1)^2+Z1(2)^2)
19 724 D1=(M3*Z1(1)+N3*Z1(2))/(Z1(1)^2+Z1(2)^2)
20 726 D8=ATN(D6/D5)
21 728 D7=-((D5^2+D6^2)^0.5)
22 730 D4=ATN(D2/D1)
23 732 D3=-((D1^2+D2^2)^0.5)
24 734 F6=ATN((D3*SIN(D4)+D7*STN(D8))/(D3*COS(D4)+D7*COS(D8)))-PI
25 736 D=-F6
26 738 N9=ATN(N8/M8)
27 740 G8=N9-C5
28 742 E=-G8
29 744 F=G7
30 746 G1=T1+D8
31 748 H1=D7*COS(G1)
32 750 F5=((D3*SIN(D4)+D7*SIN(D8))^2+(D3*COS(D4)+D7*COS(D8))^2)^0.5
33 752 F9=E3*F5
34 754 H5=F7/H1
35 756 G=H5
36 758 F2=-M5/X2(2)
37 760 F1=M5/X2(2)
38 762 F4=ATN(F2/F1)
39 764 F3=-((F1^2+F2^2)^0.5)
40 766 G2=E2*F3
41 768 H2=G2*COS(F4)
42 770 H4=H2/H1
43 772 H=-H4
44 774 F7=-(((D3*COS(D4)+F3*COS(F4))^2+(D3*SIN(D4)+F3*SIN(F4))^2)^0.5)
45 776 H3=F7/H1
46 778 J=-H3
47 780 F9=E3*F5
48 782 H6=D7*SIN(G1)
49 784 I1=F7/H6
50 786 K=-I1
51 788 H7=G2*SIN(F4)
52 790 H9=H7/H6
53 792 L1=H9
54 794 H8=F7/H6
55 796 H=H8
56 798 F8=ATN((H3*SIN(D4)+F3*SIN(F4))/(D3*COS(D4)+F3*COS(F4)))-PI
57 799 O=-F8
58 801 RETURN
59 804 IF ABS(E4-Z9)<E-4 THEN 5101
60 805 IF E1<0 THEN 5101
61 806 IF I1=Z8 THEN 5101
62 808 T1=T1+2.9*(PI/180)
63 810 GOSUB 659

```

PROGRAM FOR WFSCTC 5A

```

1 1100 PAGE
2
3 1230 DELETE Z,X,W,A
4
5 1240 DIM A(2,2),Z(2),W(2),X(2)
6
7 1250 X=0
8
9 1260 E9=1.0E-5
10
11 1270 N=0
12
13 1280 GOSUB 2000
14
15 1290 N=N+1
16
17 1300 GOSUB 3000
18
19 1310 GOSUB 4000
20
21 1320 X=X+Z
22
23 1330 GOSUB 2000
24
25 1340 IF W(1)^2+W(2)^2<=E9 THEN 1401
26
27 1350 IF N=500 THEN 1370
28
29 1360 GO TO 1290
30
31 1370 PRINT PSI; "TERMINA POR CUMPLIR 500 ITERACIONES"
32
33 1380 PRINT PSI; "X="; X(1); "Y="; Y(2); "W1="; W(1); "W2="; W(2)
34
35 1390 GO TO 1450
36
37 1401 E4=U*SIN(X(1)-C9)/SIN(X(2)-E)
38
39 1402 E1=-H*BCOS(X(1)-D)-J*E4*XCOS(X(2)-D)
40
41 1407 X(1)=X(1)*180/PI
42
43 1408 X(2)=X(2)*180/PI
44
45 1409 Y=11*180/PI
46
47 1410 GO TO 804
48
49 1411 PRINT PSI; "JX="; X(1); "Y="; Y(2); "E4="; E4; "E1="; E1
50
51 1412 PRINT PSI; "J11="; J11
52
53 1450 GO TO 5101
54
55 2000 A1=SIN(X(1)-C9)
56
57 2010 A2=SIN(X(2)-E)
58
59 2020 A3=R*XCOS(X(1)-C9)
60
61 2030 A4=G*XCOS(X(1)-D)
62
63 2040 A5=F*XCOS(X(2)-E)
64
65 2050 A6=J*XCOS(X(2)-D)
66
67 2060 W(1)=U*A1/A2-(A3-A4+H)/(A5-A6)
68
69 2070 A7=K*SIN(X(1)-D)
70
71 2080 A8=M*SIN(X(2)-D)
72
73 2090 W(2)=U*A1/A2-(A3+A7-L1)/(A5+A8)
74
75 2100 RETURN
76
77 3000 R1=XCOS(X(1)-C9)
78
79 3010 R2=SIN(X(2)-E)
80
81 3020 R3=SIN(X(1)-C9)
82
83 3030 R4=SIN(X(1)-D)
84
85 3040 R5=XCOS(X(2)-E)
86
87 3050 R6=XCOS(X(1)-D)
88
89 3060 R7=SIN(X(2)-D)
90
91 3070 R8=XCOS(X(2)-D)
92
93 3080 L1=R*R1-G*R5+H
94
95 3090 C2=F*R5-J*R8
96
97 3100 C3=R*R1+K*R4-L1
98
99 3110 C4=F*R5+H*R7
100
101 3120 A(1,1)=U*R1/R2-(G*R4-B*R3)/(F*R5-J*R8)
102
103 3130 A(2,1)=U*R1/R2-(K*R6-B*R3)/(F*R5+H*R7)
104
105 3140 A(1,2)=-U*R3*R5/R2^2*PI*(F*R8+J*R5+77*C2^2)
106
107 3150 A(2,2)=-U*R3*R5/R2^2+C3*(H*R8-F*R2)/C4^2
108
109 3160 RETURN
110
111 4000 U9=A(1,1)*A(2,2)-A(2,1)*A(1,2)
112
113 4010 IF U9<>0 THEN 4050
114
115 4020 PRINT "GGGGGGGGGG DET=0"
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200

```

PRODUCCION POR OFFSETEC SA

```

4030 STOP
4050 Z(1) = (-W(1)*A(2,2)+W(2)*A(1,2))/D9
4060 Z(2) = (-W(2)*A(1,1)+W(1)*A(2,1))/D9
4070 RETURN
5080 REM CALCULO DE LA CARGABILIDAD DE LA LINEA
5090 REM CARGABILIDAD=IS2/SIL1
5100 REM SE DESPRECIA LA CONSTANTE DE ATENUACION (N8=0)
5101 W8=0
5102 DIM K3(2),K4(2),E5(2),E6(2)
5103 X(1)=X(1)*PI/180
5104 X(2)=X(2)*PI/180
5110 K3(1)=E3*COB(X(1))
5120 K3(2)=-E3*SIN(X(1))
5130 K4(1)=E4*COB(X(2))
5140 K4(2)=-E4*SIN(X(2))
5150 Y2=K4(1)^2+K4(2)^2
5160 E5(1)=(K3(1)*K4(1)-K3(2)*K4(2))/Y2
5170 E5(2)=(K3(1)*K4(2)+K3(2)*K4(1))/Y2
5180 E5(1)=E5(1)-COS(W9)
5190 E5(1)=E5(1)/SIN(W9)
5200 E5(2)=E5(2)/SIN(W9)
5210 E6(2)=E5(1)
5220 E6(1)=-E5(2)
5230 W7=(E6(1)^2+E6(2)^2)^.5*E4^2
5235 E6(1)=E6(1)*E4^2
>5240 PRINT E51: "CARGABILIDAD DE LA L/T= "E6(1)"; "P.U."; " LONG= "Z7"; "Km"
5250 IF Z7<600 THEN 6000
5260 STOP
6000 Z7=Z7+20
6100 GO TO 530
6150 PAGE
6160 PRINT "JJJUBERTINA PARA GRAFIZAR LA CARGABILIDADJJJJJ"
6170 PRINT "ENTRE LOS VALORES DE LONGITUD Y CARGABILIDADJJJJJGGGGG"
6180 PRINT "
6190 INPUT A$
6195 PAGE
6200 DIM L(120),C(120)
6210 FOR I=1 TO 30
6220 PRINT "L(I);I;"= "I";
6230 INPUT L(I)
6240 PRINT "C(I);I;"= "I";
6250 INPUT C(I)
6260 NEXT I
6270 PRINT "Existen datos de otra curva? (Si o No)"
6280 INPUT A$
6290 IF A$="NO" THEN 7000
6300 FOR I=31 TO 60
6310 PRINT "L(I);I;"= "I";
6320 INPUT L(I)
6330 PRINT "C(I);I;"= "I";
6340 INPUT C(I)
6350 NEXT I
6360 PRINT "Existen datos de otra curva? (Si o No)"
6370 INPUT A$
6380 IF A$="NO" THEN 7500
6390 FOR I=61 TO 90
6400 PRINT "L(I);I;"= "I";

```

MODULO PARA GRAFICAR



```

3
4 6410 INPUT L(I)
5 6420 PRINT 'C(;'I;)'= ' ;
6 6430 INPUT C(I)
7 6440 NEXT I
8 6450 PRINT 'Existen datos de otra curva? (Si o No)'
9 6460 INPUT A$
10 6470 IF A$='NO' THEN 8000
11 6480 FOR I=91 TO 120
12 6490 PRINT 'L(;'I;)'= ' ;
13 6500 INPUT L(I)
14 6510 PRINT 'C(;'I;)'= ' ;
15 6520 INPUT C(I)
16 6530 NEXT I
17 6540 GO TO 8500
18 7000 PAGE
19 7001 VIEWPORT 30,120,20,100
20 7020 WINDOW 0,300,0,25
21 7030 AXIS 20,2
22 7035 MOVE L(1),C(1)
23 7040 FOR I=1 TO 29
24 7050 RDRAW L(I+1)-L(I),C(I+1)-C(I)
25 7060 NEXT I
26 7065 HOME
27 7070 END
28 7500 PAGE
29 7501 VIEWPORT 30,120,20,100
30 7510 WINDOW 0,600,0,50
31 7520 AXIS 20,2
32 7530 MOVE L(1),C(1)
33 7540 FOR I=1 TO 29
34 7550 RDRAW L(I+1)-L(I),C(I+1)-C(I)
35 7560 NEXT I
36 7570 MOVE L(31),C(31)
37 7580 RDRAW L(I+1)-L(I),C(I+1)-C(I)
38 7590 NEXT I
39 7600 END
40 8000 PAGE
41 8001 VIEWPORT 30,120,20,100
42 8010 WINDOW 0,600,0,50
43 8020 AXIS 20,2
44 8030 MOVE L(1),C(1)
45 8040 FOR I=1 TO 29
46 8050 RDRAW L(I+1)-L(I),C(I+1)-C(I)
47 8060 NEXT I
48 8070 MOVE L(31),C(31)
49 8080 FOR I=31 TO 59
50 8090 RDRAW L(I+1)-L(I),C(I+1)-C(I)
51 8100 NEXT I
52 8110 MOVE L(61),C(61)
53 8120 FOR I=61 TO 89
54 8130 RDRAW L(I+1)-L(I),C(I+1)-C(I)
55 8140 NEXT I
56 8150 END
57 8500 PAGE
58 8501 VIEWPORT 30,120,20,100
59 8510 WINDOW 0,600,0,50
60 8520 AXIS 20,2
61
62
63
64

```

```

3
4 8530 MOVE L(1),C(1)
5 8540 FOR I=1 TO 29
6 8550 RDRAM L(I+1)-L(I),C(I+1)-C(I)
7 8560 NEXT I
8
9 8570 MOVE L(31),C(31)
10 8580 FOR I=31 TO 59
11 8590 RDRAM L(I+1)-L(I),C(I+1)-C(I)
12 8600 NEXT I
13 8610 MOVE L(61),C(61)
14
15 8620 FOR I=61 TO 89
16 8630 RDRAM L(I+1)-L(I),C(I+1)-C(I)
17 8640 NEXT I
18 8650 MOVE L(91),C(91)
19 8660 FOR I=91 TO 119
20 8670 RDRAM L(I+1)-L(I),C(I+1)-C(I)
21 8680 NEXT I
22 8690 MOVE L(101),C(101)
23 8700 RDRAM 120,0
24 8710 MOVE L(80),C(80)
25 8720 RDRAM 120,0
26 8730 MOVE L(60),C(60)
27 8740 RDRAM 120,0
28 8750 MOVE L(40),C(40)
29 8760 RDRAM 120,0
30 8770 HOME
31 8780 END
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63

```

INDUCCIOE POU URZETEC SA

Lj  
04704

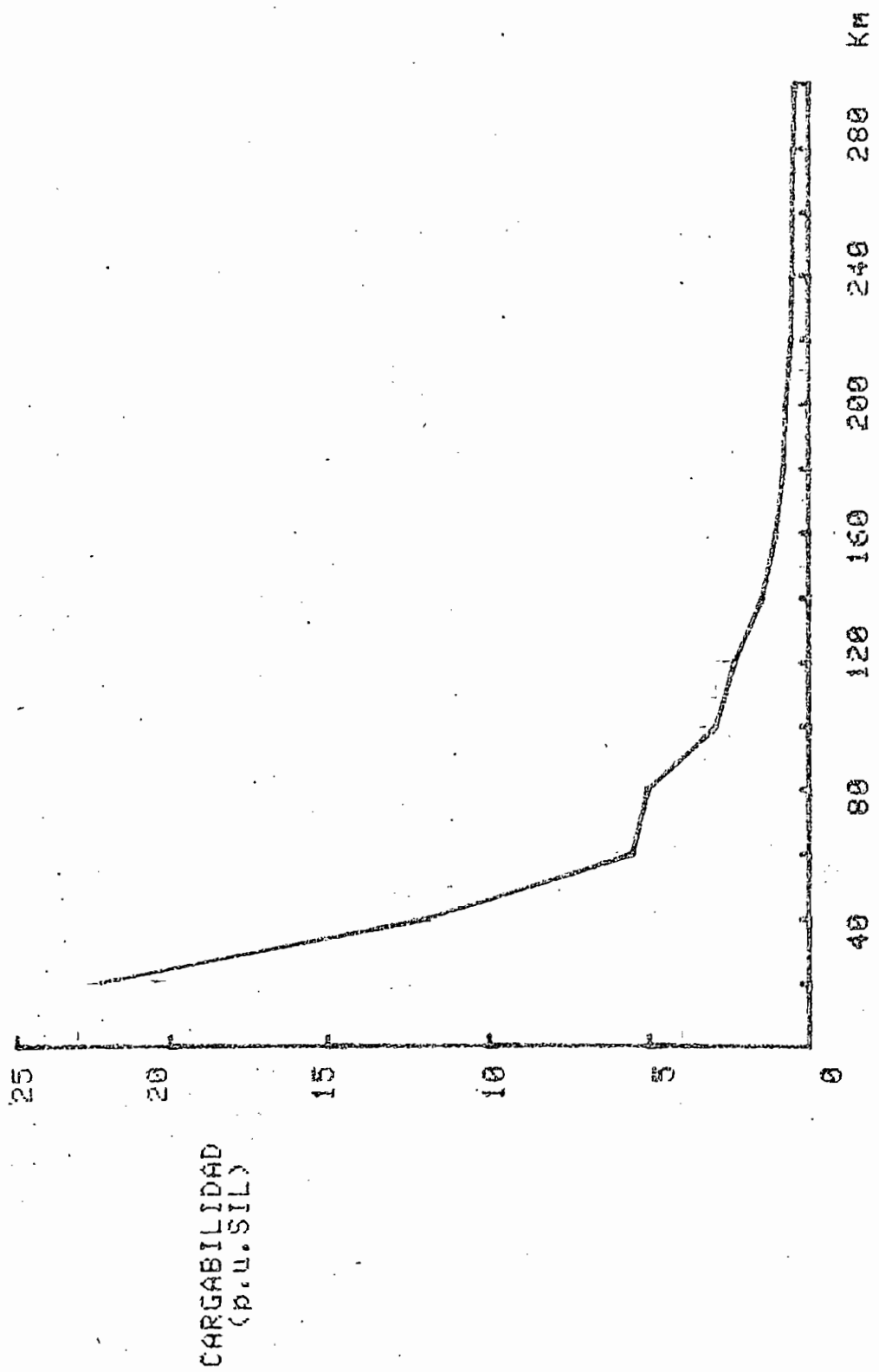


FIG.4.4 CARGABILIDAD DE UNA LINEA MEDIANTE UN MODELO

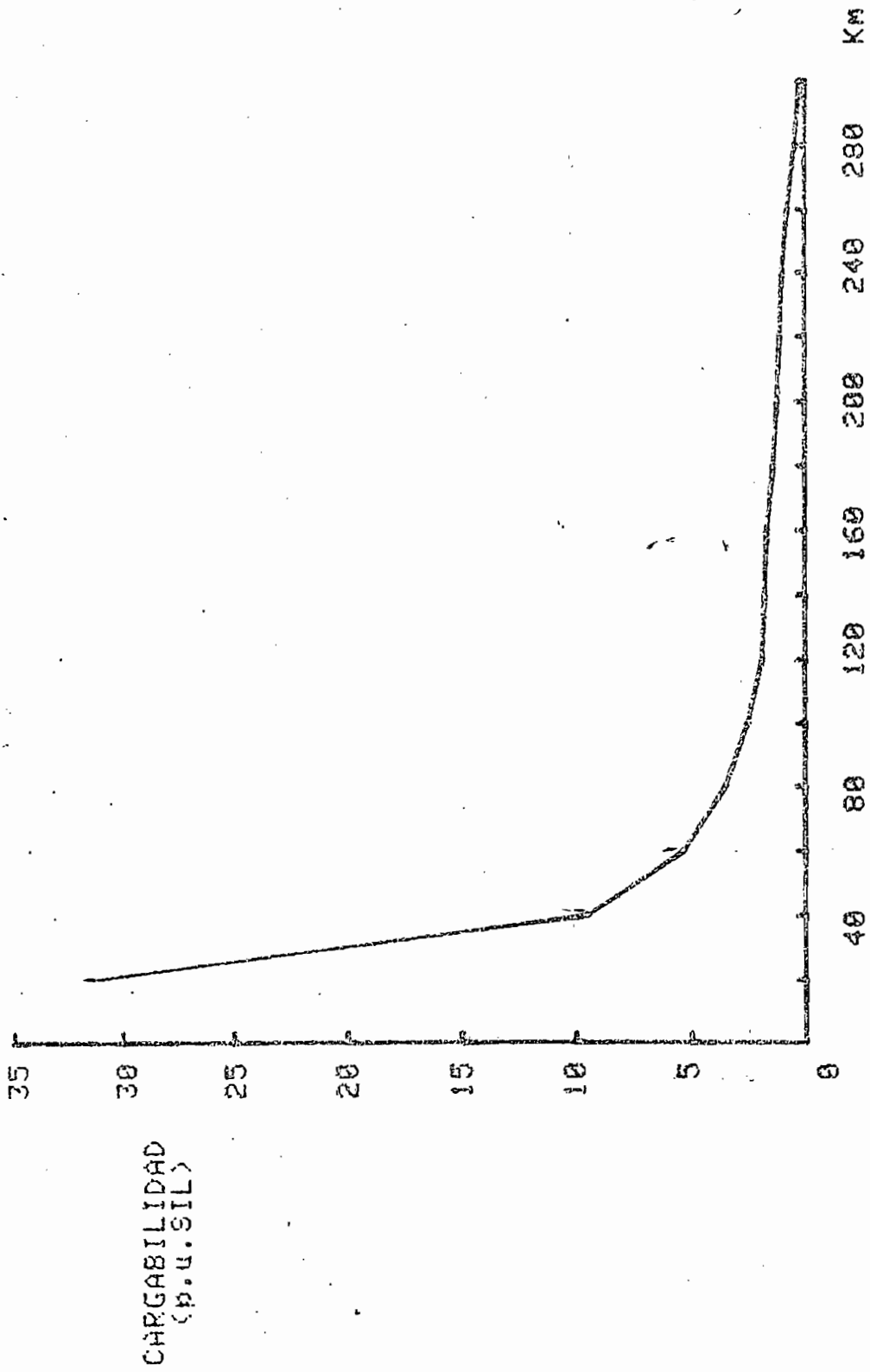


FIG. 4.5 CARGABILIDAD DE UNA LINEA MODELO CON COMPENSACION SERIE (75%)

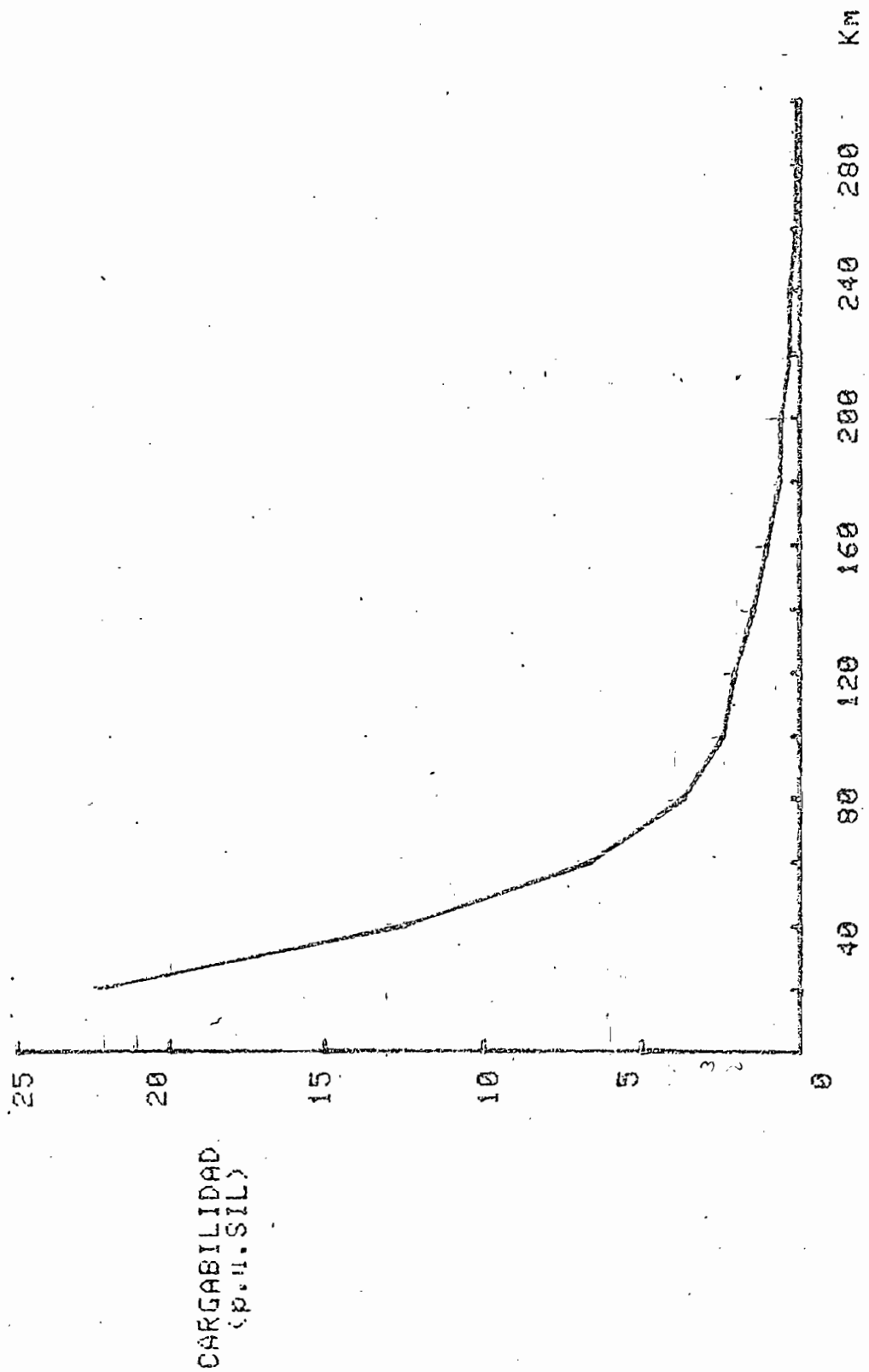


FIG. A.6 CARGABILIDAD DE UNA LINEA MODELO CON COMPENSACION SHUNT (95%)

#### 4.3 ANALISIS DE RESULTADOS Y LIMITACIONES DEL PROGRAMA

Antes de analizar este preciso tema conviene para fines de mejor comprensión del programa, ampliar el concepto del SIL (carga de la impedancia de sobretensión) el cual será usado indistintamente junto con el concepto de Potencia Natural.

Supondremos conocidas las siguientes ecuaciones (referencia 7/):

$$V = V_R \cosh \gamma l + I_R Z_0 \sinh \gamma l \quad (4.4)$$

$$I = I_R \cosh \gamma l + \frac{V_R}{Z_0} \sinh \gamma l \quad (4.5)$$

para la tensión y la corriente en cualquier punto de una línea. Si suponemos una línea sin pérdidas de potencia activa ( $R = C = 0$ ) obtendremos a partir de las anteriores, las siguientes ecuaciones:

$$V = V_R \cos (\beta l) + j I_R Z_0 \text{Sen} (\beta l) \quad (4.6)$$

$$I = I_R \cos (\beta l) + j \frac{V_R}{Z_0} \text{Sen} (\beta l) \quad (4.7)$$

Además indicaremos que la impedancia característica ( $Z_0$ ) y la SI (Seurge Impedance), impedancia de sobretensión serán conceptos usados indistintamente para una línea de transmisión sin pérdidas. Ahora bien, en lo que a los resultados mismos del programa se refiere podemos expresar lo siguiente:

- 1) La curva de cargabilidad de una línea de transmisión muestra dos zonas: la primera debida a la limitación de caída de voltaje que se refiere a líneas de longitud corta y la segunda debida a la restricción del margen de estabilidad que se refiere a una longitud mayor para las mismas líneas.
- 2) Un aumento de la compensación serie se traduce en un aumento de la cargabilidad de la línea.
- 3) Un aumento de la compensación shunt casi no produce variación alguna en la cargabilidad de una línea.
- 4) Asumiendo una línea sin pérdidas de poten-

donde  $Z_0$  es la impedancia característica,  $l$  es la longitud de la línea,  $\gamma$  es la constante de propagación y  $\beta$  es la constante de fase como es comúnmente conocido.

Si colocamos al final de la línea una carga igual a la impedancia característica  $Z_0$  la potencia en el extremo receptor será:

$$P_R = \frac{V_R^2}{Z_0} \quad (4.8)$$

y la ecuación (4.6) se transforma en la siguiente:

$$V = V_R \cos(\beta l) + j \frac{V_R^2}{Z_0 V_R} Z_0 \text{Sen}(\beta l)$$

o lo que es lo mismo:

$$V = V_R (\cos \beta l + j \text{sen} \beta l) = V_R e^{j\beta l} \quad (4.9)$$

esto es, la tensión a lo largo de la línea permanece en valor absoluto invariable, encontrándose únicamente una diferencia de ángulo entre el comienzo y el final de la línea de  $\delta = \beta l$ .

Es por esto que la potencia  $P_N = \frac{V_R^2}{Z_0}$  es llamada Potencia Natural.



cia activa ( $R = C = 0$ ), el cociente entre la cargabilidad de la línea y su SIL es independiente de los parámetros eléctricos de la línea, dependiendo exclusivamente de la línea y de sus voltajes terminales, como puede verse a continuación.

Conociendo que:

$Z_p$  = impedancia serie de la línea por Km.

$Y_p$  = admitancia shunt de la línea por Km.

$$Z_o = \sqrt{Z_p/Y_p} \quad (4.10)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{Z_p Y_p}, \text{ constante de propagación} \quad (4.11)$$

$\alpha$  = constante de atenuación.

$\beta$  = constante de fase.

$$E_s, E_r = \text{voltajes en los extremos emisor y receptor (complejos)} \quad (4.12)$$

$$I_s, I_r = \text{corrientes en los extremos de la línea (complejas)} \quad (4.13)$$

Entonces:

$$S_R = P_R + j Q_R = E_R I_R^* \quad (4.14)$$

Donde:

$$I_R = \frac{E_S - E_R}{Z} - \frac{Y}{2} E_R = \frac{2E_S - 2E_R - ZYE_R}{2Z} \quad (4.15)$$

Siendo:

$$\frac{Y}{2} = \frac{1}{Z_0} \operatorname{thg} \frac{\gamma l}{2} \quad (4.16)$$

como se indicó anteriormente.

Cuando todas las cantidades están expresadas en p.u., se tendrá:

$$\begin{aligned} \frac{S_R}{S_{IL}} &= \frac{E_R I_R^*}{\frac{1}{SI}} = SI \left( \frac{2E_S - 2E_R - ZYE_R}{2Z} \right)^* E_R = \\ &= SI \left[ \frac{2 \frac{E_S}{E_R} - 2 - (Z_0 \sinh \gamma l) \left( \frac{2}{Z_0} \operatorname{thg} \frac{\gamma l}{2} \right)}{2Z_0 \sinh(\gamma l)} \right]^* |E_R|^2 \\ &= \frac{SI}{Z_0^*} \left( \frac{\frac{E_S}{E_R} - \cos(\gamma l)}{\sinh(\beta l)} \right) |E_R|^2 \quad (4.17) \end{aligned}$$

Ahora, como la resistencia R de una línea es mucho menor que su reactancia inductiva X, la constante de

atenuación,  $\alpha$ , es muy pequeña, y la constante de propagación  $\gamma$  se aproxima a la constante de fase,  $j\beta$ , y también  $Z_0^*$  se aproxima a  $S_1$ . Entonces la ecuación (4.17) se reduce a:

$$\frac{S_R}{SIL} = j \frac{\left( \frac{E_S}{E_R} \right)^* - \cos(\beta l)}{\text{Sen}(\beta l)} |E_R|^2 \quad (4.18)$$

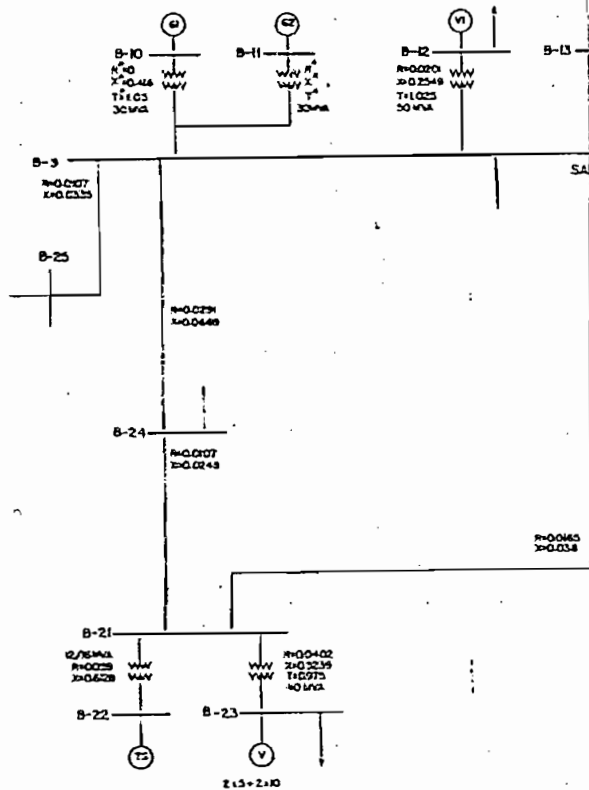
Como limitaciones del programa, podemos indicar que el proceso es relativamente lento, tardándose aproximadamente una hora para la obtención de todos los resultados. Además no funciona cuando se hace la compensación shunt igual al 100% porque en este caso se trabaja con coeficientes muy grandes que salen del marco de capacidad de la máquina. En cualquier otra situación funciona perfectamente bien.

## CAPITULO V

### APLICACIONES DEL PROGRAMA DIGITAL PARA CALCULAR LA CARGABILIDAD EN LINEAS DE TRANSMISION

#### 5.1 GENERALIDADES

Se ha estimado conveniente, y como aplicación del programa que se presenta en el capítulo anterior, realizar un estudio de las líneas que conforman la red actual del Sistema Nacional Interconectado en lo referente a su cargabilidad. En el plano que se presenta a continuación se puede apreciar dicha red que nos facilita su estudio. Conviene indicar, además, que se han contemplado para las diversas líneas cuyo estudio se muestra también a continuación, varias posibilidades en lo que a compensación se refiere. Así, pues, los primeros resultados de Cargabilidad corresponden a la cargabilidad de la línea sin ningún tipo de compensación y luego se consideran tanto ciertos casos tomando al azar de compensación serie porcentual como de compensación shunt, y ésta a su vez dividida a manera de



INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION QUITO-ECUADOR	
DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO PRIMER SEMESTRE, AÑO 1980. SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO.	
DISENADO:	RECOMENDADO:
DISEÑADO:	APROBADO:
REVISADO:	REF:
Fecha: Naturaliza de la revis. Por: Verific: Aprob: FELICIA	

dos alternativas que no significan otra cosa que un estudio más completo de la línea; estas alternativas son, a saber, N1 que es la compensación shunt al comienzo de la línea mirada desde el lado de transmisión y N2 que es la compensación shunt al final de la línea.

Por otro lado, y en lo que a las dos restricciones del programa se refiere, se ha creído necesario presentar los resultados para varios casos de dichas restricciones que son: Margen de Estabilidad y Caída de Voltaje a lo largo de la línea. No debe olvidarse, sin embargo, que los resultados de cargabilidad vienen expresados en por unidad de la potencia natural o SIL que tiene un valor determinado para cada línea y que se ha explicado ampliamente en capítulos anteriores.

5.2 RESULTADOS DE LAS DIVERSAS ALTERNATIVAS PARA LAS LINEAS QUE FORMAN

EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO ACTUAL

LINEA FASCUALES - QUEVEDO  
\*\*\*\*\*

R=0.000295  
X=0.002413  
B=0.000566

LONGITUD= 144 Km  
MARGEN DE ESTABILIDAD= 35%  
CAIDA DE VOLTAJE= 5%

CARGABILIDAD(SIN COMPENSACION)=0.48757 P.U.  
CARGABILIDAD(COMPENSACION SERIE 50%)=1.78101 P.U.

LINEA QUEVEDO - SANTO DOMINGO  
\*\*\*\*\*

R=0.000310  
X=0.002483  
B=0.000611

LONGITUD=104.7 Km  
MARGEN DE ESTABILIDAD=16%  
CAIDA DE VOLTAJE=5%

CARGABILIDAD(SIN COMPENSACION)=0.98753 P.U.  
CARGABILIDAD(COMPENSACION SERIE 50%)=6.45107 P.U.  
CARGABILIDAD(COMPENSACION SERIE 40%)=2.11367 P.U.

LINEA: SANTO DOMINGO - SANTA ROSA  
\*\*\*\*\*

R=0.000311  
X=0.002381  
B=0.000568

LONGITUD=77.7 Km  
MARGEN DE ESTABILIDAD=20%  
CAIDA DE VOLTAJE=4%

CARGABILIDAD(SIN COMPENSACION)=1.63344 P.U.  
CARGABILIDAD(COMPENSACION SERIE 50%)=4.17898 P.U.  
CARGABILIDAD(COMPENSACION SERIE 30%)=3.85099 P.U.  
CARGABILIDAD(COMPENSACION SHUNT 75%)=2.18151 P.U.

PROCESADO POR UNITEC SA

12  
11  
10  
9  
8  
7  
6  
5  
4  
3  
2

LINEA PUCARA - SANTA ROSA  
\*\*\*\*\*

R=0.000701

X=0.002447

B=0.000259

LONGITUD=108 Km

MARGEN DE ESTABILIDAD=52%

CAIDA DE VOLTAJE=5%

CARGABILIDAD(Sin compensacion)=2.51467 P.U.

CARGABILIDAD(Compensacion:serie 50%)=6.16466 P.U.

CARGABILIDAD(Compensacion serie 20%)=3.57728 P.U.

LINEA VICENTINA - IBARRA  
\*\*\*\*\*

R=0.000710

X=0.002608

B=0.000311

LONGITUD=80 Km

MARGEN DE ESTABILIDAD=35%

CAIDA DE VOLTAJE=3%

CARGABILIDAD(Sin compensacion)=3.58776 P.U.

CARGABILIDAD(Compensacion serie 50%)=8.23757 P.U.

CARGABILIDAD(Compensacion serie 20%)=5.91216 P.U.

LINEA PUCARA - ANZATO  
\*\*\*\*\*

R=0.000710

X=0.002477

B=0.000267

LONGITUD=90 Km

MARGEN DE ESTABILIDAD=52%

CAIDA DE VOLTAJE=2%

CARGABILIDAD(Sin compensacion)=22.60243 P.U.

CARGABILIDAD(Compensacion serie 20%)=27.28978 P.U.

CARGABILIDAD(Compensacion shunt N1=50%)=23.77642 P.U.

CARGABILIDAD(Compensacion shunt N2=50%)=22.63754 P.U.

CARGABILIDAD(Compensacion shunt N1=N2=50%)=22.62447 P.U.

NOTA: Los valores de K,X,B, estan en P.U./km

N1=compensacion shunt al comienzo de la linea

N2=compensacion shunt al final de la linea



## 53. ANALISIS DE RESULTADOS Y ALCANCES DEL PROGRAMA

Ante todo, se debe indicar, que en todos los casos se ha introducido como dato del programa un voltaje en el lado de transmisión de 1.06 p.u. el cual se toma como referencia para estudiar las diferentes posibilidades de caída de voltaje a lo largo de la línea. Por otro lado, es de tener en cuenta la utilidad práctica que presenta el programa para poder realizar cualquier tipo de estudio de cargabilidad aplicado a una línea indiferente de nuestro sistema de transmisión poniendo especial cuidado en introducir correctamente los datos que requiere el programa; es decir, las constantes de la línea de transmisión vendrán expresadas en p.u./Km. y la longitud de la línea en Km.

En cuanto al análisis de resultados se refiere, éstos no son otra cosa que una manera de comprobar los estudios teóricos realizados anteriormente y que a simple vista puede decirse son los siguientes:

- a) La compensación serie optimiza la cargabilidad de una línea de transmisión independientemente de su longitud.
- b) La compensación shunt consigue similar efecto.

Sin embargo puede observarse de acuerdo a los resultados presentados que en ciertos casos se consigue diferentes respuestas para los mismos valores de compensación N1 y N2 pero ambos están orientados en el mismo sentido, es decir a aumentar la máxima potencia de transmisión.

- c) En una línea de transmisión, y a medida que aumenta su longitud, es la restricción de caída de voltaje la que actúa primero y luego se hace la restricción del margen de estabilidad indiferentemente de cuáles sean los valores a ellas asignados.

Sin embargo, debe decirse, que la duración de una corrida completa oscila entre 20 y 30 minutos lo cual puede explicarse por el hecho que la computadora se vuelve bastante lenta para programas que tienden a copar su memoria.

neas convencionales aéreas aparece como el más favorable en los tiempos actuales.

- e) La limitación de estabilidad de líneas largas no está presente para transmisión en corriente directa. Las ventajas de transmisión con corriente continua se incrementan con la distancia de transmisión y con el costo de la línea por unidad de longitud.
- f) La compensación shunt, la cual es generalmente requerida para propósitos de control de sobrevoltaje tiene un efecto decreciente en la cargabilidad.
- g) El criterio de la caída de voltaje tiene una influencia primaria en la cargabilidad de líneas cortas, mientras que el criterio de estabilidad tiene una influencia primaria en líneas largas.
- h) Asumiendo una línea sin pérdida, el cociente de la cargabilidad de la línea a su SIL es independiente de los parámetros eléctricos

de la línea. Depende exclusivamente de la longitud de la línea y de los voltajes terminal.

APENDICEFORMA DE UTILIZACION DEL PROGRAMA DIGITAL PARA OBTENER  
LAS CURVAS DE CARGABILIDAD DE UNA LINEA DE TRANSMISION  
MEDIANTE UN MODELO MATEMATICO

El modelo matemático utilizado es el que se muestra en la Figura 4.1 y contempla los siguientes parámetros de entrada que corresponden a un sistema simple con un circuito PI nominal:

- S1(1) = resistencia serie del circuito PI nominal de la L/T en p.u./Km.  
S1(2) = reactancia serie del circuito PI nominal de la L/T en p.u./Km.  
P1(2) = susceptancia en paralelo del circuito PI nominal de la L/T en p.u./Km.  
X1(2) = reactancia terminal del lado de la fuente en p.u.  
X2(2) = reactancia terminal del lado de la carga en p.u.  
E3 = módulo del voltaje al comienzo de la línea en p.u.

- E2 = módulo del voltaje en el lado de la carga (normalmente este valor será de 1 p.u. y se lo tomará como voltaje de referencia).
- N = compensación en serie de la L/T (en %).
- N1 = compensación en shunt al comienzo de la L/T (en %).
- N2 = compensación en shunt al final de la L/T (en %).
- Z8 = valor límite del ángulo en el lado de la fuente (en radianes). Este valor corresponde a la restricción del límite de estabilidad en estado estacionario.
- Z9 = módulo del voltaje al final de la línea en p.u.
- Z7 = longitud inicial de la línea de transmisión (en Km.).
- NOTA: el valor de Z9 corresponde a la segunda restricción del programa que es el de la caída de voltaje a lo largo de la línea.
- T1 = valor inicial (en radianes) del ángulo en el lado de la fuente.

Las variables de salida del programa son las siguientes:

- E4 = valor del voltaje al final de la línea en p.u.

- E1 = voltaje en el lado de la fuente en p.u.
- T1 = valor del ángulo (en radianes) en el lado de la fuente.
- N = número de iteraciones que se han efectuado. Si se hubieren realizado 500 iteraciones el programa se detiene automáticamente pues se considera que es un número suficientemente alto.
- W7 = módulo de la cargabilidad de la línea en p.u. del SIL (o Potencia Natural).
- E6(1) = cargabilidad real de la línea en p.u. del SIL.

Además tenemos las siguientes variables:

- U1 = constante de propagación.
- Zo = impedancia característica.
- Z1 = nueva impedancia serie del circuito PI equivalente.
- Y1 = nueva admitancia shunt del circuito PI equivalente.

Se debe indicar que si se hubieran obtenido en la unidad de salida los valores de cargabilidad conjuntamente con los valores de longitud de la línea, en la pantalla aparecerá lo siguiente:

STOP IN LINE 5260 PRIOR TO LINE 6000

entonces, y únicamente si se desea grafizar estos valores se deberá accionar en el teclado lo siguiente:

RUN 6150

y luego se deberá presionar la tecla RETURN.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. GRUNDLAGEN DER UBERTRAGUNG ELEKTRISCHER ENERGIE, P.. Denzel. Springer - Verlag, pags. 350-355. Berlín 1966.
2. ANALYTICAL DEVELOPMENT OF LOADABILITY CHARACTERISTICS FOR EHV AND UHV TRANSMISSION LINES. R.D. Dunlop, R. Gutman, P. Marchenko. Transactions IEEE, Marzo 1979. pags. 606-617.
3. ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK. Westinghouse Electric Corporation. Pennsylvania, 1964. pag. 479.
4. AMERICAN STANDARD DEFINITIONS OF ELECTRICAL TERMS, American Institute of Electrical Engineers, Nueva York, 1942.
5. ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA, William D. Stevenson, McGraw-Hill, 1978, pag. 342.

6. ESTUDIO DE UNA LINEA DE TRANSMISION MEDIANTE UN MODELO. M. Ramiro Rodas P., 1970.
7. ELEKTRISCHE ENERGIEUBERTRAGUNG UND VERTEILUNG, Walter V. Mangoldt, Siemens, 1960, pags. 64-74.
8. CURSO DE LINEAS DE TRANSMISION PARA PROFESIONALES, Julio Doggenweiler, ENDESA, 1972.
9. BERECHNUNG ELEKTRISCHER VERBUNDNETZE, H. Edelmann, Springer - Verlag, Berlín, 1963, pags. 194-198.
10. DREHSTROM HOCHSTSPANNUNGSUBERTRAGUNG, Siemens, pags. 18-25.
11. STABILITY OF LARGE ELECTRIC POWER SYSTEMS, Richard T. Byerty, Edward W. Kimbark, TRANSACTIONS IEEE, Febrero 1937, pags. 260-280.
12. ELECTRIC POWER TRANSMISSION, M.P. Weinbach, The Macmillan Company, New York, 1948.
13. CURSO DE ENGENHARIA DE OPERACAO DE SISTEMAS ELECTRICOS (DESPACHO E SUBDESPACHO), Electrobras, Noviembre 1979.

14. POWER SYSTEM STABILITY, Vol. 1, Selden B. Crary, New York, 1945, Capítulo 3 y Capítulo 7.