

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

" USO DEL SIMULADOR DE REDES DEL LABORATORIO DE SISTEMAS DE
POTENCIA, VENTAJAS Y LIMITACIONES EN COMPARACION CON UN -
PROGRAMA DIGITAL".

TESTS DE GRADO
PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD
ESPECIALIZACION: POTENCIA

PRESENTADA POR:

EDUARDO SPANDRE VELASQUEZ

GUAYAQUIL - ECUADOR

1982

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

AL ING. HERNAN GUTIERREZ V.
Director de Tesis, por su
ayuda y colaboración para -
la realización de este traba
bajo.

AL ING. JORGE CHIRIBOGA
Por la colaboración presta-
da en el Laboratorio de Siste
mas de Potencia.

D E D I C A T O R I A

A MI MADRE, quien me educó
y supo guiar por los buenos
senderos de la vida.

D E D I C A T O R I A

A MI ABUELITA

A MIS HERMANOS

A MI ESPOSA

Hernan Gutierrez

ING. HERNAN GUTIERREZ VERA
DIRECTOR DE TESIS

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).



EDUARDO RENE SPANDRE VELASQUEZ

RESUMEN

El tema en cuestión trata sobre todo de dar al estudiante del Laboratorio de Sistemas de Potencia la información necesaria acerca del simulador de redes montado en la ESPOL, a fin de que sea una guía para su operación, simulando sistemas de potencia reales.

El desarrollo de esta información se ha efectuado paso a paso, desde la preparación del sistema a tratarse hasta la realización física del mismo en el simulador; se dan reglas a seguir para obtener buenos resultados en la operación del sistema. He concentrado la atención especialmente al problema de flujo de carga; motivo principal para el uso del simulador; partiendo en principio de sistemas de potencia sencillos, hasta llegar a un sistema más complejo, donde se utilice la máxima capacidad del simulador. Además de éste análisis, se efectuará un estudio de transientes en una línea de transmisión por la conexión y desconexión de fuentes de energía, justificando los resultados obtenidos del simulador, mediante un análisis teórico.

Las respuestas del simulador en el análisis de flujo de carga serán comparadas con un programa digital, a fin de establecer el grado de exactitud del simulador.

INDICE GENERAL

	<u>PAGS.</u>
RESUMEN-----	VII
INDICE GENERAL-----	IX
INDICE DE FIGURAS -----	XI
INDICE DE TABLAS -----	XIV
INDICE DE ABREVIATURAS -----	XV
INTRODUCCION -----	16
CAPITULO I	
1.1. GENERALIDADES -----	18
CAPITULO II: DESCRIPCION DEL SIMULADOR	
2.1. OBJETIVO -----	21
2.2. ESTRUCTURACION DEL SIMULADOR-----	21
2.3. OPERACION-----	32
2.4. ANALISIS DE ERRORES -----	35
CAPITULO III:ANALISIS DE FLUJO DE CARGA EN SISTEMAS DE POTENCIA	
3.1. OBJETIVO-----	38
3.2. EJEMPLOS CON SISTEMAS SENCILLOS -----	38
3.2.1. Preparación de los Sistemas escogidos	42

3.2.2. Obtención de resultados -----	45
3.2.3. Comentarios -----	53
3.3. EJEMPLO CON UN SISTEMA MAS COMPLEJO -----	53
3.3.1. Sistema escogido -----	53
3.3.2. Reducción del Sistema -----	54
3.3.3. Sistema reducido -----	57
3.3.4. Preparación del sistema para flujo de carga -----	65
3.3.5. Energización del simulador y obtención de resultados -----	67
3.4. ANALISIS DEL SISTEMA ESCOGIDO USANDO UN PROGRA MA DIGITAL -----	67
3.5. COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SIMULADOR CON LOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA DI GITAL -----	93
 CAPITULO IV: ANALISIS DE TRANSIENTES QUE SE PRESEN TAN EN UNA LINEA DE TRANSMISION POR LA CONEXION Y DESCONEXION DE LAS FUENTES DE ENERGIA	
4.1. GENERALIDADES -----	104
4.2. ANALISIS TEORICO DEL PROBLEMA POR CONMUTACION	105
4.3. ANALISIS PRACTICO EN EL SIMULADOR -----	133
4.3.1. Ejemplo escogido-----	133

4.3.2. Preparación para su estudio en el simulador -----	134
4.3.3. Energización del simulador y obtención de resultados -----	134
4.4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SIMULADOR CON LOS DEL ANALISIS TEORICO-----	140
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	145
APENDICE: Listado del programa utilizado -----	148
BIBLIOGRAFIA -----	158

INTRODUCCION

A través de los años, los sistemas de potencia se han ido desarrollando de tal manera, que en la actualidad es prácticamente imposible analizar un sistema relativamente complejo con una calculadora de bolsillo; así como también la dificultad que implica la utilización de un analizador de redes a.c., debido al espacio físico - que se ocupa; se ha llegado a obtener un modelo compacto que es el simulador de redes - montado en el Laboratorio de Sistemas de Potencia de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, que permite una rápida maniobra de todos los componentes del sistema y a su vez, proporciona una herramienta de trabajo muy importante, que es la visualización del sistema en sí y ayudará al operador a comprender cómo se

afectan las variaciones de voltaje y de potencia a un sistema.

CAPITULO I

1.1. GENERALIDADES

Como los sistemas eléctricos de potencia han desarrollado un amplio campo, los problemas asociados con su construcción y operación han sido clasificados como:

- a. Diseño inicial para obtener el aumento de carga esperando y la distribución patrón.
- b. Operación económica, digamos con pérdidas mínimas, haciendo el mejor uso del equipo utilizable en cualquier momento.
- c. Seguridad y protección contra disturbios, ya sean naturales o inducidos.
- d. Coordinación con otra clase de producción de energía y absorción de las industrias a fin de realizar una política coherente de energía.

El factor principal en los dos primeros problemas, es el análisis de flujo de carga, es decir, la manera en la cual las potencias activa y reactiva son distribuídas dentro de un sistema. Este trabajo es atribuído a un simulador de redes, que es capaz de un análisis de flujo de carga simple y directo. Además proporciona al ingeniero un mejor entendimiento del comportamiento del sistema y podría ser una ayuda para mejorar el diseño y la operación de sistemas de potencia.

Un sistema de potencia proyectado requiere un cuidadoso análisis antes de ser construído o antes de ser extendido. Las ecuaciones del sistema son esencialmente no lineales, ya que las variables de interés son los voltajes y las potencias. La mayoría de los métodos de análisis de flujo de carga involucran un proceso iterativo.

Otro método consiste en establecer un modelo del sistema, una fuente sinusoidal representa el generador; elementos resistivos, inductivos y capacitivos representan la línea y la carga, y se hacen medidas directas de voltaje y de potencia. Por supuesto, el sis

tema en cuestión debe ser re-escalado, es decir, que las magnitudes del sistema real deben ser transferidas al sistema analógico empleando bases adecuadas.

Mientras que el método analógico no es capaz del mismo grado de precisión como el método del computador digital, ya que se basa en los instrumentos de medición y en la exactitud de la representación física de los componentes, proporciona a cambio, resultados más que adecuados en la mayoría de los casos, ya que los parámetros del sistema generalmente no son conocidos con tanta precisión.

CAPITULO II

DESCRIPCION DEL SIMULADOR

2.1. OBJETIVO

La meta a conseguir en este capítulo es conocer las partes constitutivas del simulador montado en el Laboratorio de Sistemas de Potencia de la ESPOL, por medio de un breve detalle acerca de cada una de ellas, e instruirse en la operación del instrumento, de tal forma que lo explicado en esta sección constituya un patrón a seguir en los capítulos siguientes.

2.2. ESTRUCTURACION DEL SIMULADOR

En el desarrollo del prototipo, la idea principal fue reunir las especificaciones requeridas para producir soluciones de flujo de carga en estado estable, con una exactitud de aproximadamente 2 %. Una idea secundaria pero importante fue la de mantener la simplicidad de la construcción para tener posibilidades de

mantenimiento sencillo y desarrollo dentro de las limitaciones de la ESPOL.

Una red modelo, podría operar en un amplio campo de niveles de voltaje y potencia comparados con el sistema de potencia real, y el mecanismo que permite cambiar estos niveles es el sistema por unidad.

El sistema por unidad de escalamiento es ampliamente utilizado en el análisis de sistemas de potencia, no sólo por conveniencia, sino además que con un cuidadoso escogitamiento de las cantidades base, el rango de valores a ser representados es mucho menor.

Cualquier cantidad base de MVA puede ser escogida teóricamente para representar un sistema de potencia; en la práctica es recomendable escoger una base tal que permita utilizar el rango completo del simulador. Para el simulador, los valores base están limitados por las características físicas de las unidades de impedancia y dispositivos electrónicos.

El máximo voltaje base se fija debido a la decisión -

de usar dispositivos electrónicos fácilmente aprovechables y normalizados; que tienen definidos los máximos suministros de potencia para los requerimientos de voltaje.

El valor de corriente en la red simulada, debe mantenerse tan bajo como sea posible, a fin de minimizar los efectos de acoplamiento magnético.

Un gran número de factores se ha involucrado en la decisión del valor de la frecuencia de operación del simulador, siendo el predominante el factor Q de los núcleos de ferrita de los inductores y la necesidad de minimizar los acoplamientos indeseables. Para estudios transientes, un rango de frecuencias podría permitir el mejor uso de las características del núcleo de ferrita, pero para problemas de estado estable, sólo se requiere una frecuencia.

Cuando se utiliza el simulador para el análisis de flujo de carga; las unidades pasivas, representando las impedancias de las líneas, transformadores y cables, han sido colocadas en sus valores respectivos,

las variables restantes, dígase: voltaje y ángulo de fase de los generadores, y las impedancias de carga, necesitan ser controladas inmediatamente por medio de los interruptores que manejan la instrumentación en varios puntos de la red.

Generalmente, los cables que interconectan las unidades, deben ser tan cortos como sea posible y distribuidos en tal forma que tengan mínima interferencia uno con otro.

En una primera etapa se decidió adoptar un escalamiento de una sola frecuencia, de tal forma que los circuitos RC de control de fase y frecuencia puedan ser utilizados como dispositivos absolutos de tiempo.

El escalamiento de voltaje y corriente fue designado por compatibilidad con los transistores disponibles normalizados y con los circuitos integrados. Todos los componentes para las unidades electrónicas son artículos disponibles en el stock de Radiospares - Components Limited.

La ESPOL mantiene los siguientes instrumentos para -

uso del simulador de sistemas de potencia:

FASIMETRO REALIMENTADO DPM 380

MULTIMETRO DIGITAL 3 1/2

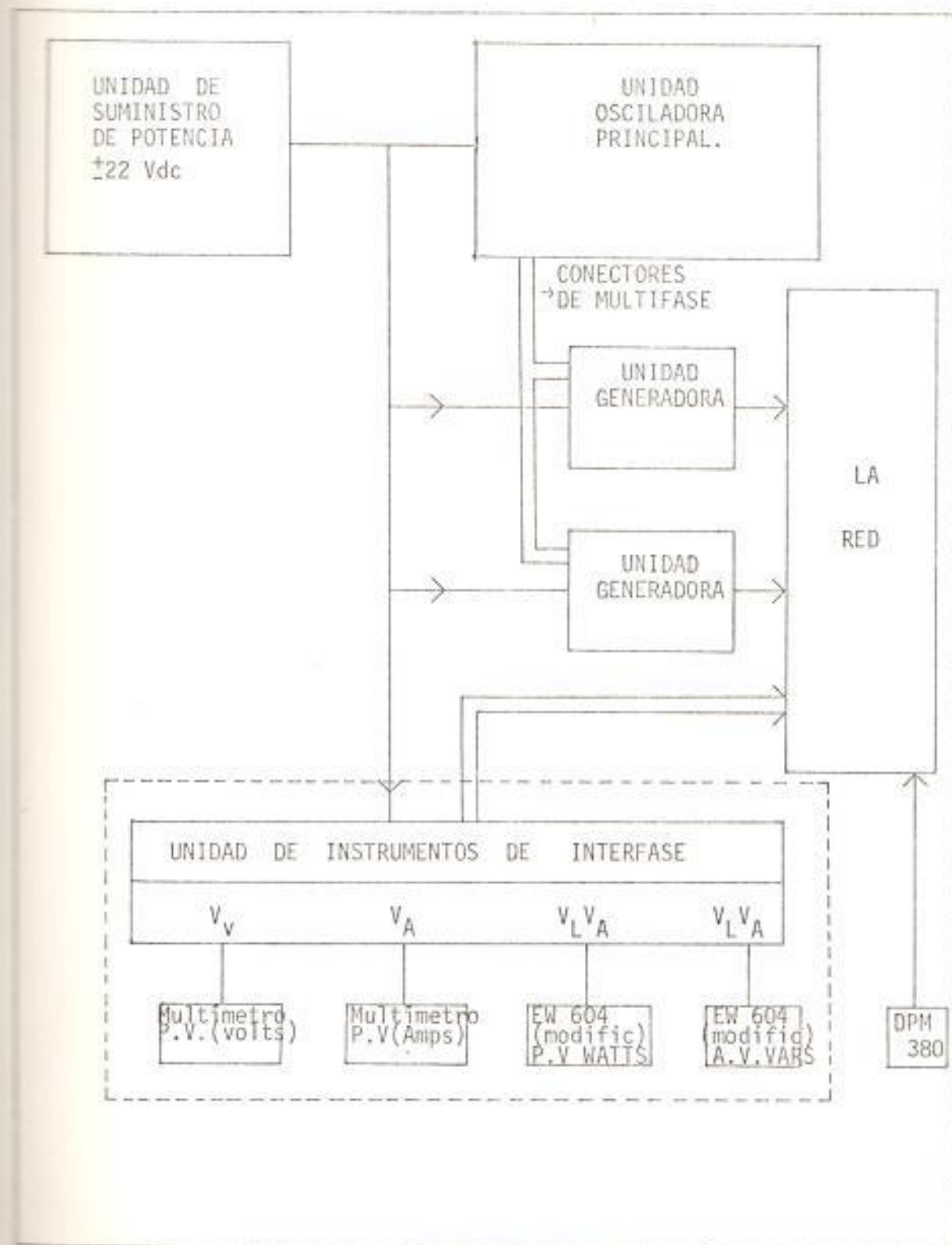
VATIMETRO ELECTRONICO REALIMENTADO EW 604.

Se presentó inicialmente una dificultad con el EW604, debido a que, sólo tenía una precisión de $\pm 5\%$, la cual en principio disminuía aún más, interconectando las dos partes del simulador. Debido a esto, se mo dificó el EW 604 de forma tal que se obtuvo la pre cisión requerida, con la salvedad que sólo se puede utilizar para uso del simulador y no para uso gene ral; sin embargo en asunto costos, ésta fue la solu ción más económica.

La parte electrónica del simulador consiste en seis unidades generadoras manejadas por la unidad osciladora principal, notándose que se puede ampliar esto en un futuro, contando con una unidad amplificadora, como se aprecia en la figura 2.1.

Cada una de las unidades electrónicas incorpora dis-

FIGURA N°2.1.
 DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL SIMULADOR



positivos de estabilización de voltaje que aceptarían una alimentación en el rango de ± 17.5 Vdc hasta ± 30 Vdc., siendo el voltaje nominal de ± 22 Vdc. Esta alimentación puede provenir de un banco de baterías o una unidad de potencia capaces de desarrollar aproximadamente dos amperios.

En la unidad oscilatoria principal de multifase, nos encontramos con que los circuitos RC para generación de frecuencia y control de fase son simples en concepto, pero en la práctica existen tres limitaciones serias:

1. La frecuencia, fase y amplitud, son interdependientes.
2. La relación entre R ó C y la fase no es lineal (función tangente).
3. Cualquier red RC en su forma simple puede funcionar como control de fase sólo sobre un rango considerablemente menor a 90° .

El primero de estos problemas es amortiguado por la de

cisión de usar una sólo frecuencia, pero el problema de la interdependencia de la amplitud y fase permanece.

Se solucionó en parte con el diseño de una red de control de amplitud y compensación de fase de tal forma que se hace un control variable en pequeños pasos y no existirán problemas de interrelación.

La segunda limitación se torna aceptable con un medidor ó un control de calibración que es usado sobre un rango lo suficientemente pequeño, de manera que la función tangente sea aproximadamente lineal.

La tercera limitación es aceptable, pero inconveniente; y de acuerdo a las limitaciones establecidas se ha llegado a los valores óptimos mostrados en la tabla 1.

Se observa de la misma que se ha tomado una previsión de 100 % de corriente de sobrecarga, debido a las condiciones de desbalance que ocurren durante la solución del proceso iterativo.

TABLA N° 1

IMPEDANCIA BASE 100
 VOLTAJE BASE 5 V
 CORRIENTE BASE 50 m
 POTENCIA BASE 250 m
 FRECUENCIA 159.2Hz

UNIDAD TIPO	VALORES	P O R U N I D A D	
		R A N G O	P A S O S
IMPEDANCIA DE LINEA	L 0 - 10 mH	0 - 0.1	0.01
	0 - 100 mH	0 - 1.0	0.1
	R 0 - 10	0 - 0.1	0.01
	0 - 100	0 - 1.0	0.1
CAPACITANCIA DE CARGA	L 0.1-1H	0 - 1.0	0.1
	1 - 10H	0 - 0.1	0.01
INDUCTANCIA DE CARGA	R 0.1 - 1K	0 - 1.0	0.1
	1 - 10 K	0 - 0.1	0.01
CAPACITANCIA PARASITIVA	C 0.01-0.1HF	0 - 0.01	0.001
	0.1 - 1HF	0 - 0.1	0.01
V	0.5-7.5 V	0.1 - 1.5	CONTINUOS
I	0 - 200 mA	0 - 4.0	-
Ø	0 - 360°	-	CONTINUOS

RANGO DE PARAMETROS DEL SIMULADOR

En cuanto a la frecuencia, se decidió utilizar el valor de 159.2 Hz ya que justamente con este valor se obtiene que $\omega = 2\pi f = 1000$; lo cual proporciona una simple relación numérica entre la impedancia óhmica la inductancia y la capacitancia; digamos que 1.0 pu de impedancia puede ser obtenido con 100 ohmios, ó 100 mh, ó 10 uf.

Si los MVA base son correctamente escogidos, la corriente nunca debería exceder de 2.0 pu.

Se ha incluido además un rango de variación de ángulo de fase de 0 a 360°, para extender el uso del simulador a estudios de estabilidad transiente.

El simulador consta de seis unidades generadoras, dispuestas tres a cada lado del mismo, contando cada una de ellas con un ajuste de voltaje grueso y uno fino, y además con tres posiciones de variación de su ángulo de fase.

Consta además de doce líneas de transmisión, separadas seis a cada lado del simulador, cada una de las cuales

tiene un juego de susceptancias capacitivas en el caso de líneas largas.

Cada línea tiene un juego de décadas de resistencias y de inductancia con los rangos y su variación especificados en la Tabla 1.

Se han ubicado catorce barras, dispuestas siete a cada lado del simulador y tres barras adicionales, comunes a ambos lados del mismo, para facilitar la interconexión cuando se utiliza el instrumento como una sola entidad.

El simulador consta de un interruptor de interconexión que permite que este sea utilizado como uno sólo, disponiendo de la totalidad de los elementos descritos. Se lo utiliza cuando se va a simular un sistema que tenga más de tres generadores o más de seis líneas de transmisión; en caso de no hacer uso de éste interruptor, el simulador consta de dos partes idénticas completamente independientes pudiendo en esta forma, ser usado por dos grupos de estudiantes, simulando sistemas diferentes.

A cada lado del simulador le corresponden doce puntos de medición diferentes, los cuales deben ser interconectados con los elementos del sistema siguiendo un patrón definido, los que están en la parte A del simulador deben ser intercalados de derecha a izquierda; y los de la parte B, de izquierda a derecha, obteniéndose en cada punto, lecturas de potencia activa, reactiva, voltaje y corriente.

El panel de medición está previsto para dos vatímetros (instrumentos comerciales modificados apropiadamente), uno de los cuales se utiliza para medir la potencia activa, y el restante la reactiva, cuando el simulador se utiliza como una sola entidad; dos multímetros digitales (uno para medición de corriente); y dos medidores analógicos para hacer una observación rápida de que la corriente no es excesiva.

2.3. OPERACION DEL SIMULADOR

Para una correcta operación del instrumento se ha creado un formato, el cual deberá ser seguido en lo posible para evitar algún contratiempo posterior.

Como primer paso para tratar un problema en el simulador, se reúne toda la información necesaria acerca de los parámetros y requerimientos del sistema.

De los generadores, debemos conocer sus valores nominales, rango del voltaje de operación, límites de operación de MVA y MVAR, reactancia transiente y reguladores de voltaje.

De los transformadores, debemos conocer sus valores nominales (incluyendo su porcentaje de sobrecarga), número de vueltas, configuración de los devanados, rango del tap (en carga o sin carga), reactancia de acoplamiento, capacitancia del devanado (para problemas transientes).

De las líneas de transmisión y cables, debemos conocer la corriente y voltajes nominales, dependiendo de las condiciones ambientales, impedancias serie y paralelo (susceptancia), incluyendo cantidades de secuencia cero para cálculo de fallas desbalanceadas.

El segundo paso es dibujar un diagrama completo del sistema, donde el problema involucra el desarrollo de

un sistema, digamos en tres etapas, luego éstas podrían ser indicadas por tres diagramas separados, ó indicados claramente en un diagrama de mayor tamaño.

Se debe trabajar con suma precisión al re-escalar el sistema utilizando los valores base más adecuados, para que se utilice completamente el rango de medición del simulador.

Ahora se procede a conectar las unidades, verificando que coincidan las conexiones indicadas en el diagrama con los puntos de medición del simulador.

Como tercer paso, la colocación inicial de la carga debe ser realizada, separando cada carga de la red y conectándola a un generador (a 1.0 pu de voltaje), a través de un medidor de interfase. La unidad de carga es ajustada a su valor nominal y reconectada a la red.

Cuando todas las cargas hayan sido ajustadas a sus valores nominales, cada generador debe a su vez, ser separado de la red, y colocado a 1.0 pu de voltaje y

a un ángulo de fase de unos 15°, esto es por el motivo de tener una rápida variación sea en atraso o en adelante; cuando esto haya sido realizado y los generadores han sido reconectados a la red, el sistema está listo para ser energizado.

Como cuarto paso, el sistema se energiza conmutando a la posición de encendido todos los generadores. El resultado inicial está muy lejos de la distribución y balance de carga deseado.

Una buena experiencia consiste en tomar nota en particular de los generadores y cargas grandes; ya que cambiando una carga, se afecta a las otras y cambiando el ángulo de un generador cambian las potencias de otro, de tal manera que el balance del sistema debe ser llevado a cabo haciendo variaciones pequeñas. Cuando se ha llegado a un equilibrio del sistema, éste debe ser archivado; para partir de éste punto, trabajando con el mismo sistema en estudios posteriores.

2.4. ANALISIS DE ERRORES

A fin de obtener soluciones con una exactitud del or

den del 2 % las unidades electrónicas deben tener las siguientes características:

UNIDAD OSCILADORA PRINCIPAL

La frecuencia $\omega = 1.000 \pm 0.1 \%$

La distorsión debe ser menor al 1 %.

La impedancia de salida debe ser lo suficientemente baja para manejar las seis unidades generadoras, cada una teniendo una impedancia de salida de 1 Megahmio, con una caída de voltaje inferior al 0.1 % lo cual implica 166 ohmios como máximo.

El generador debe tener las siguientes características:

Rango de voltaje - 0.5 Vrms á 7.5 Vrms.

Rango de corriente - 0 á 200 ma.

Potencia de salida -1.5 W máx.

Impedancia de entrada - >1 Megaohmio.

Impedancia de salida- suficientemente baja para desarrollar 200 ma. con una caída de voltaje inferior al 1%.Lo cual implica:

con 0.5 V -----0.025 ohmios como máximo.

con 7.5 V -----0.375 ohmios como máximo.

Control de fase - 0 a 360°

Variación de fase - pasos de 0.5 °

Exactitud de fase - superior que $\pm 0.1^\circ$

Instrumentos de Interfase:

Rango de medición de voltaje - 0.5 a 7.5 V(0.1 a 1.5 pu)

Exactitud de medición de voltaje - ± 50 mv (1 %)

Rango de medición de corriente - 0.5 ma a 200 ma (0.01 a 4 pu)

Exactitud de medición de corriente - ± 50 uamp.(0.1%)

Rango de medición de volt-amp - 2.5 mva a 1.5 va (0.01 a 6 pu)

Exactitud de medición de volt - amp - ± 0.25 mva (0.1% a 1.0 pu)

CAPITULO III

ANALISIS DE FLUJO DE CARGA EN SISTEMAS DE POTENCIA

3.1. OBJETIVO

Se espera que la principal aplicación del simulador sea dar a los estudiantes una apreciación y una idea más clara acerca del comportamiento de los sistemas de potencia, de tal manera que se observe físicamente al sistema, y se aclare cualquier duda remanente de la teoría recibida.

El simulador no puede reemplazar a un programa digital; sino más bien, ser su complemento, ya que un programa digital es mucho más preciso en cuanto a resultados, pero en cuanto al análisis propiamente dicho, la velocidad para hacer diferentes pruebas en el simulador, es determinante.

3.2. EJEMPLOS CON SISTEMAS DE POTENCIA SENCILLOS

El primer ejemplo objeto de análisis es el mostrado

en la figura 3.2.

Para preparar este sistema en el simulador, recurrimos al Capítulo dos, sección tres, de esta tesis.

Según se observa en el diagrama, tenemos los parámetros necesarios para efectuar el análisis requerido, que en este caso es flujo de carga, y pasamos a escoger una base adecuada, de tal forma que los valores en pu escogidos estén dentro del rango del simulador y hagan uso completo del alcance de los aparatos de medición.

Escogemos como valores base los siguientes:

MVA BASE = 100

KV BASE = 69

Efectuando las reducciones respectivas se llega al sistema en la figura 3.2.1.

FIGURA 3.2.

PRIMER EJEMPLO

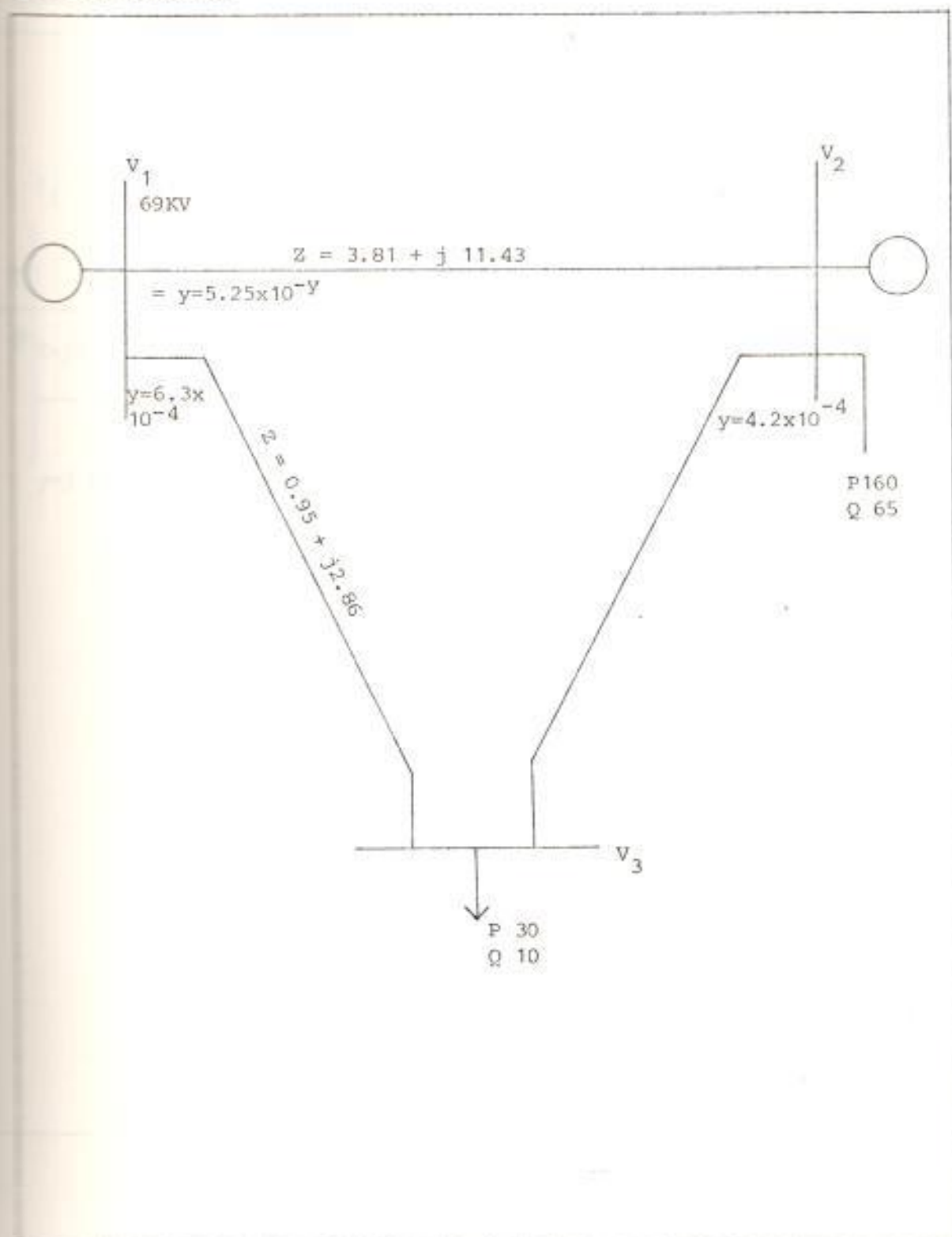
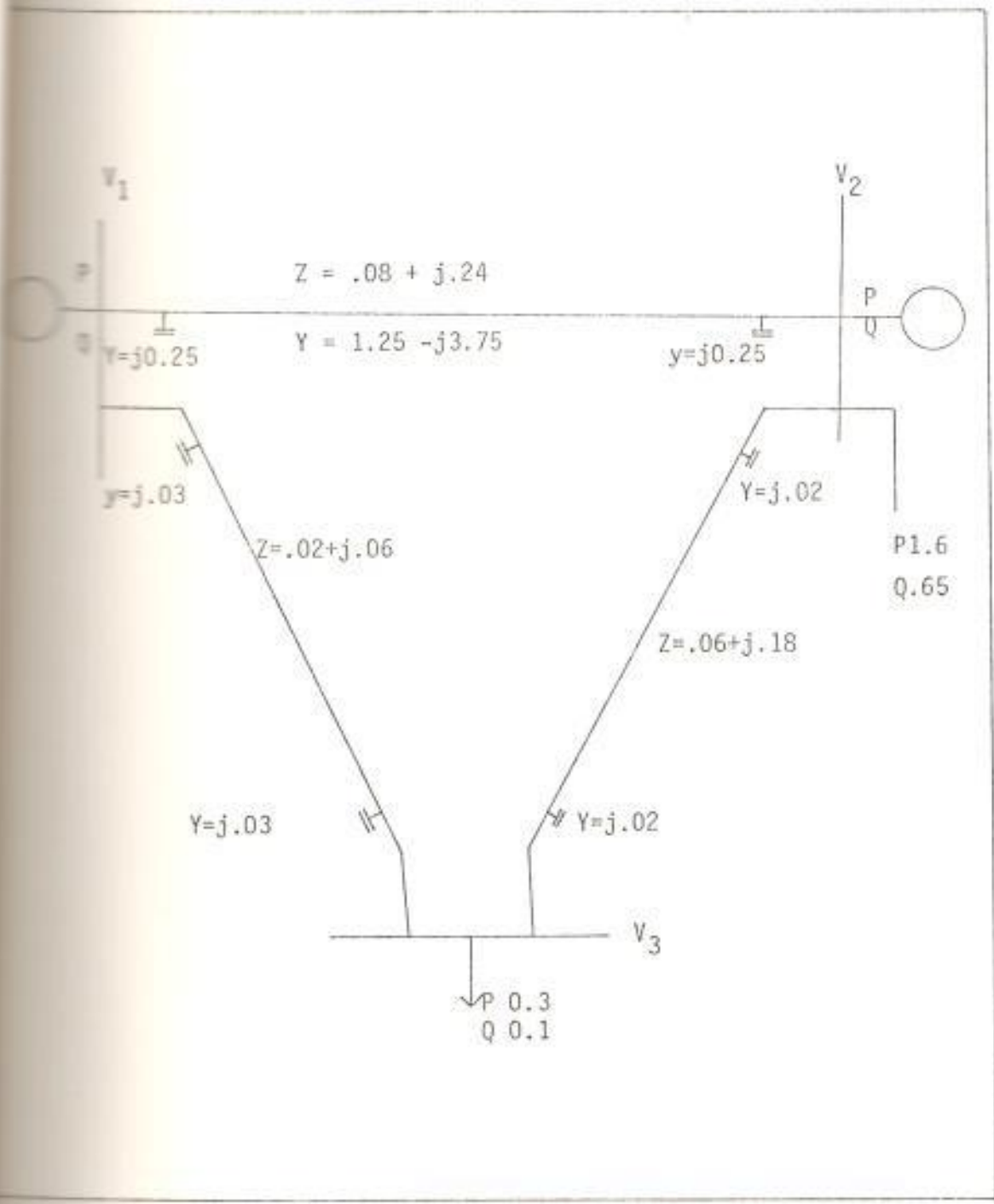


FIGURA 3.2.1.

SISTEMA REDUCIDO



3.2.1. Preparación de los Sistemas Escogidos

Como se observa de los valores obtenidos, estos se pueden regular fácilmente en el Simulador.

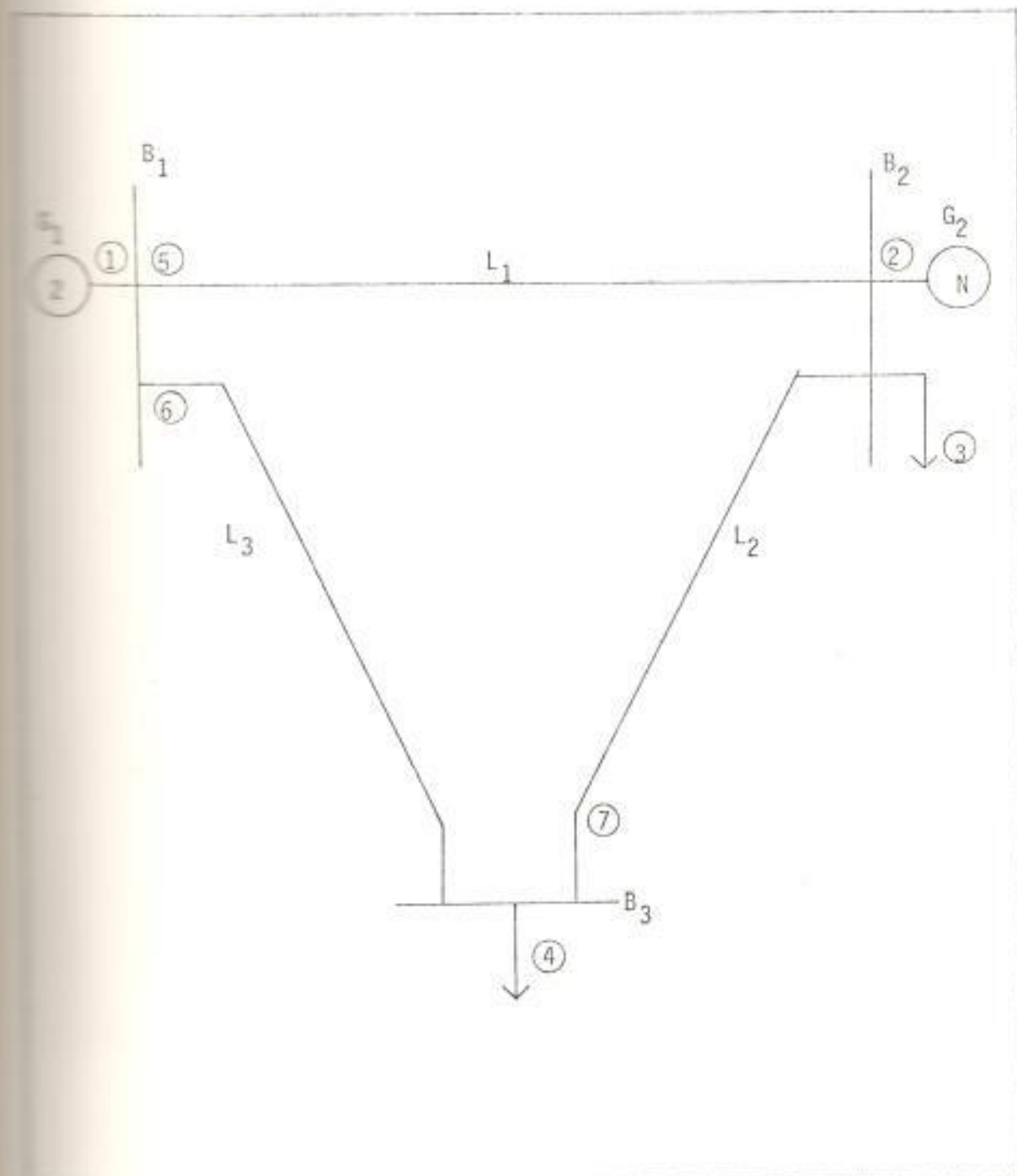
Procedemos ahora a elaborar un diagrama de medición, para en base a este diagrama hacer las diferentes conexiones en el simulador.

Para la confección del diagrama de medición, - existe una regla práctica que facilitará nuestro trabajo de apreciación del simulador.

En primer lugar, se numeran en orden ascendente las barras de generación; luego las barras de carga, y por último las líneas, de esta manera tendremos un patrón definido y cualquier persona podrá interpretar de una manera sencilla cualquier diagrama de medición, por . complicado que este sea.

El diagrama de medición se observa de la figura 3.2.2., y es necesario insistir en que la

FIGURA 3.2.2.

NUMERACION DE MEDIDORES

ubicación de los medidores debe depender del sentido de la corriente; en este caso, se han colocado de la manera señalada, debido a que el generador de la izquierda se ha asumido mayor que el generador de la derecha.

El siguiente paso, luego de la interconexión, es muy importante; todos los generadores del sistema, deben ser aislados y regulados separadamente a 1.0 pu de voltaje y a un ángulo de -fase de 15° .

Cuando se haya efectuado este paso, y los generadores hayan sido reconectados a la red, se puede proceder a energizar el sistema.

La energización se lleva a cabo conmutando a la posición de encendido todos los generadores de la red; el resultado inicial está muy distante de la distribución y balance de carga de seado.

Algo realmente importante es tomar muy en cuen

ta la lectura de los medidores cercanos a los generadores, a fin de controlar el hecho de que la corriente esté por debajo del límite, y no sobrepase el valor de 2.0pu.

Se debe ir efectuando variaciones pequeñas de voltaje y ángulo en los generadores a fin de que las potencias se vayan distribuyendo de manera uniforme, y los voltajes en las cargas permanezcan dentro del límite establecido con anterioridad.

3.2.2. Obtención de Resultados

Luego de efectuar las variaciones respectivas de los parámetros del sistema de potencia, se llegó al resultado de la figura 3.2.3.

Como segundo ejemplo, se ha tomado el sistema de la figura 3.2.4.

Los parámetros del sistema son los siguientes:

FIGURA 3.2.3.

RESULTADOS FINALES

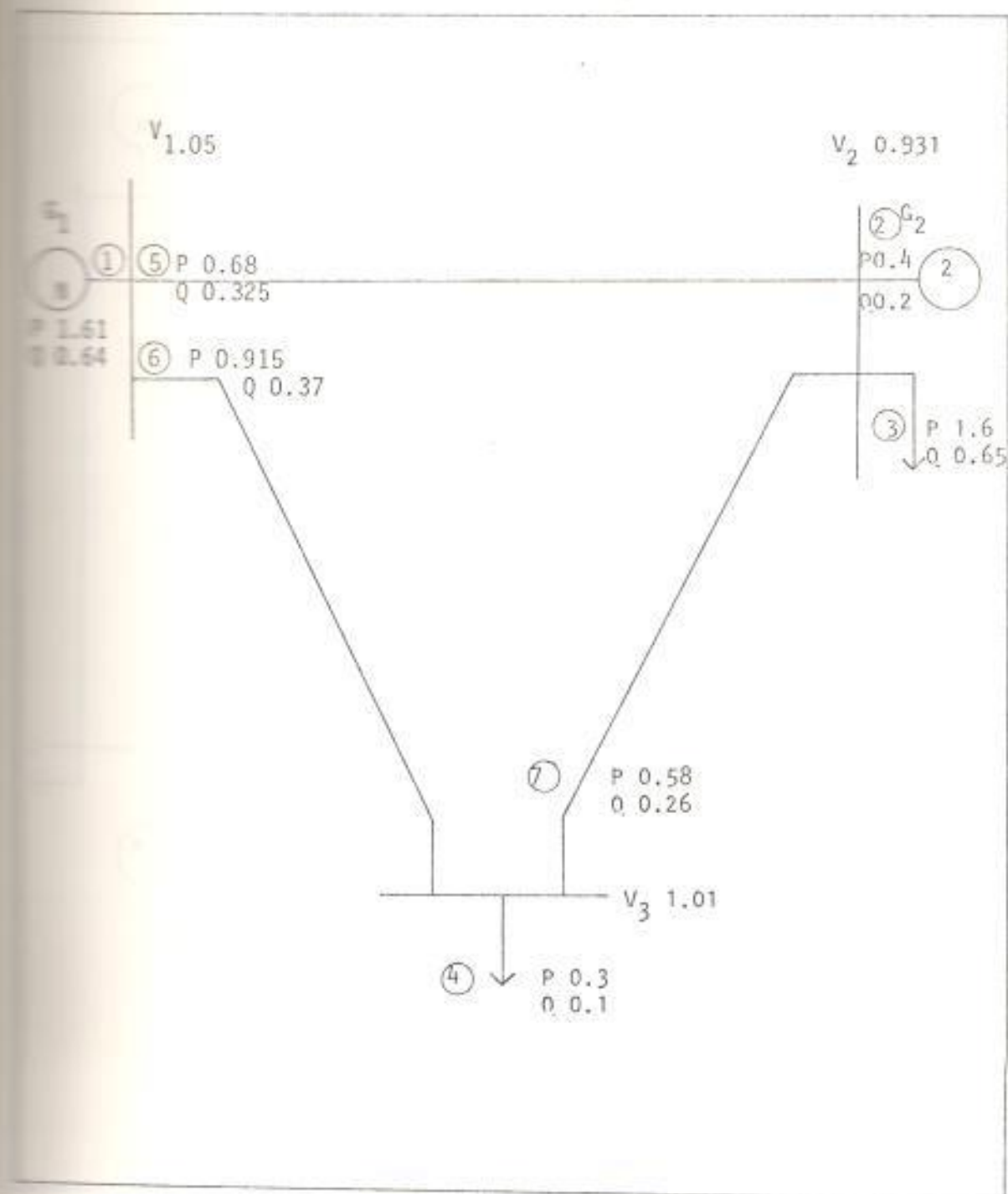


FIGURA 3.2.4.

SEGUNDO EJEMPLO

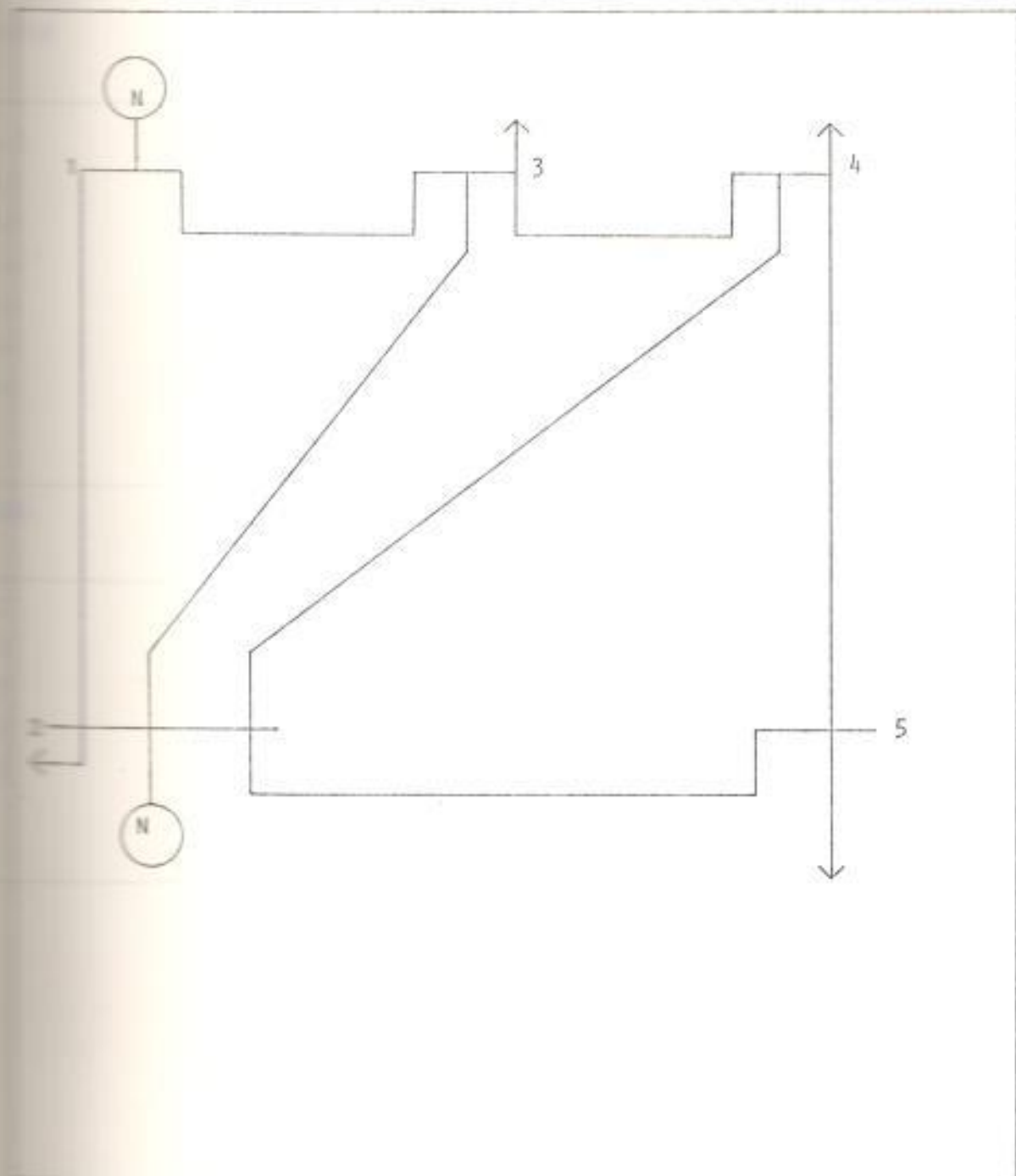


TABLA 2

PARAMETROS DEL SEGUNDO EJEMPLO

LINEA	IMPEDANCIA (Ω)	CARGA DE LA LINEA (v)	
1-2	$3.809 + j11.426$	1.575×10^{-4}	
2-3	$15.23 + j45.706$	1.313×10^{-4}	
3-4	$11.426 + j34.279$	1.05×10^{-4}	
4-5	$11.426 + j34.279$	1.05×10^{-4}	
5-6	$7.618 + j22.850$	7.876×10^{-5}	
6-7	$1.904 + j 5.713$	5.25×10^{-5}	
7-8	$15.235 + j45.706$	1.313×10^{-4}	

LINEA	VOLTAJE ASUMIDO	GENERACION		CARGA	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	$146.28 + j0$	0	0	0	0
2	$138.0 + j0$	40	30	20	10
3	$138.0 + j0$	0	0	45	15
4	$138.0 + j0$	0	0	40	5
5	$138.0 + j0$	0	0	60	10

Con los valores obtenidos en la tabla 2, pasamos a reducir el sistema a valores por unidad, empleando como base los valores de:

MVA BASE: 100 MVA

KV BASE : 138 KV.

Los resultados obtenidos de esta reducción se encuentran detallados en la tabla 3, mostrada a continuación.

Con estos resultados estamos listos para pasar a interconectar el sistema en el simulador, para lo cual se deberá utilizar el diagrama de medición que aparece en la figura 3.2.5.; diagrama que ha sido realizado siguiendo las consideraciones expuestas en la sección 3.2.1. del presente capítulo.

El resultado del análisis del flujo de carga se observa en la tabla 4.

TABLA 3.

PARAMETROS RE-ESCALADOS DEL SEGUNDO EJEMPLO)

BARRA	IMPEDANCIA(pu)	CARGA DE LA LINEA			
1-2	0.02 + j0.06	j0.030			
1-3	0.08 + j0.24	j0.025			
2-3	0.06 + j0.18	j0.020			
2-4	0.06 + j0.18	j0.020			
2-5	0.04 + j0.12	j0.015			
3-4	0.01 + j0.03	j0.010			
4-5	0.08 + j0.24	j0.025			

BARRA	VOLTAJE ASUMIDO	GENERACION		CARGA	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	1.06 + j0	0	0	0	0
2	1.00 + j0	0.4	0.3	0.2	0.1
3	1.00 + j0	0	0	0.45	0.15
4	1.00 + j0	0	0	0.4	0.5
5	1.00 + j0	0	0	0.6	0.1

FIGURA N° 3.2.5.

DIAGRAMA DE MEDICION DEL SEGUNDO EJEMPLO

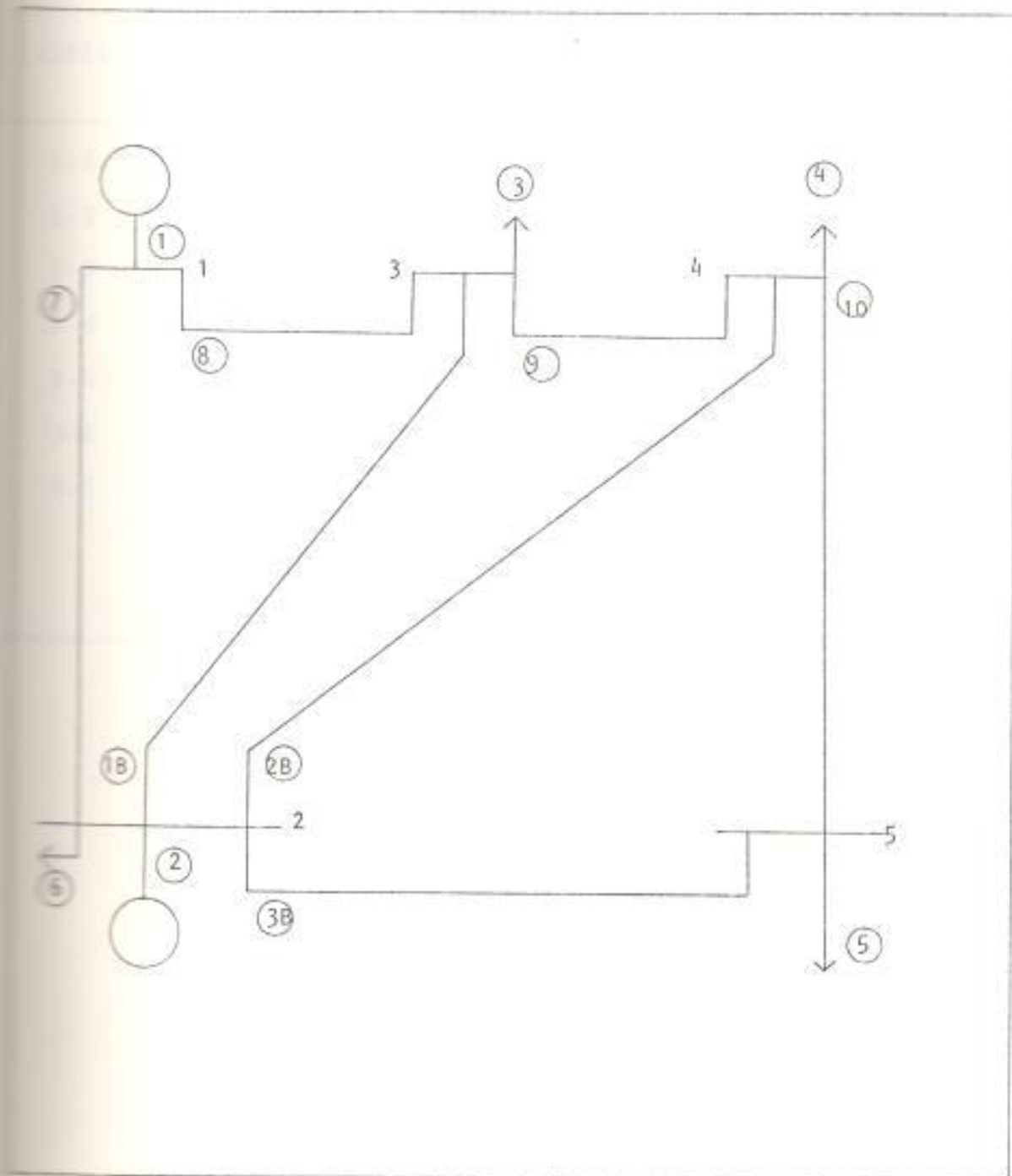


TABLA 4.

RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA DEL SEGUNDO EJEMPLO)

LÍNEA	MW	MVAR
1-2	0.88	-0.08
1-3	0.41	0.01
2-3	0.25	0.04
2-4	0.28	0.03
2-5	0.55	0.07
3-4	0.19	-0.05
4-5	0.06	-0.02

3.2.3. Comentarios

De los ejemplos anteriores, se ha observado la relativa facilidad con la que se ha obtenido - un balance de carga bastante aceptable, y mucho más y mejor percibido que un programa digital, el cual trata al sistema como un ente matemático y no como lo que es, una realidad física sujeta a variaciones diversas, producto de las condiciones ambientales y de la operación de seres humanos.

3.3. EJEMPLO CON UN SISTEMA MAS COMPLEJO

El objeto de estudiar un sistema más complejo en el simulador, reside en la necesidad de observar de que manera responden los instrumentos del mismo, ante un sistema que hace acopio prácticamente de toda la capacidad del simulador.

3.3.1. Sistema Escogido

El sistema a utilizarse en esta sección es el sistema Guayaquil, basándonos en el diagrama -

unifilar del año 1.980.

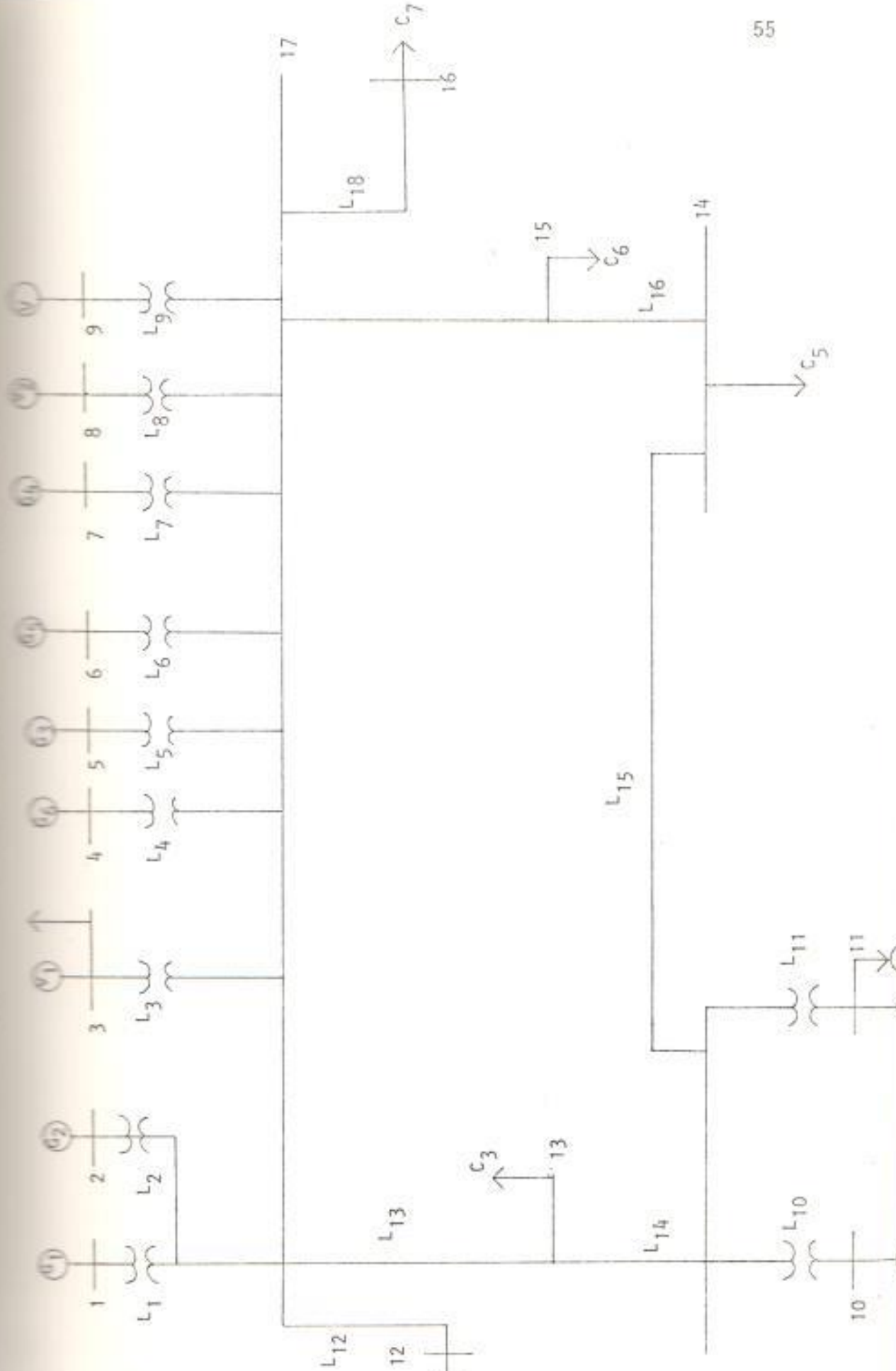
El Sistema Guayaquil presenta dos puntos de generación; la Planta a Vapor Guayaquil y la Planta Térmica Estero Salado, estando ambas enlazadas a través de un sistema de líneas de transmisión a 69000 voltios con subestaciones de bajadas intermedias de 13.800 y de 4.160 voltios.

El diagrama del sistema se presenta en la figura 3.3.1, diagrama que fue facilitado por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación.

3.3.2. Reducción del Sistema

Para reducir el sistema se ha tomado en cuenta los generadores de gas similares en reactancia, y se ha tomado el mismo procedimiento con las unidades de vapor; para la obtención de un equivalente del sistema interconectado que llega a la barra del Salitral, se efectuó un equivalente de Thévenin, para obtener la reactancia

FIGURA Nº 3.1.3
 DIAGRAMA UNIFILAR SISTEMA BUAYABUILL 1.000



equivalente del sistema, y en base a datos de INECEL, obtener la generación de MVA que recibe el Sistema Guayaquil del resto del Sistema Nacional Interconectado.

Una vez realizado lo anterior, procedemos a redistribuir las barras de carga, con el fin de eliminar algunas líneas del sistema, tomando el criterio de importancia de las líneas y contribución de corriente, de forma tal que - nos aproximemos a la realidad, se debe efectuar estas reducciones un tanto forzadas, debido a que la capacidad del simulador nos limita a sólo seis generadores, doce líneas y doce barras, por lo cual se efectúan las aproximaciones antes mencionadas; pero que servirán para nuestros propósitos en el simulador, que consisten en efectuar una distribución de potencia en el sistema, de manera que se observen físicamente las variaciones introducidas, y llegar a una condición tal, que la distribución de potencia, y los niveles de voltaje sean los adecuados.

El diagrama reducido se muestra en la figura -
3.3.2.

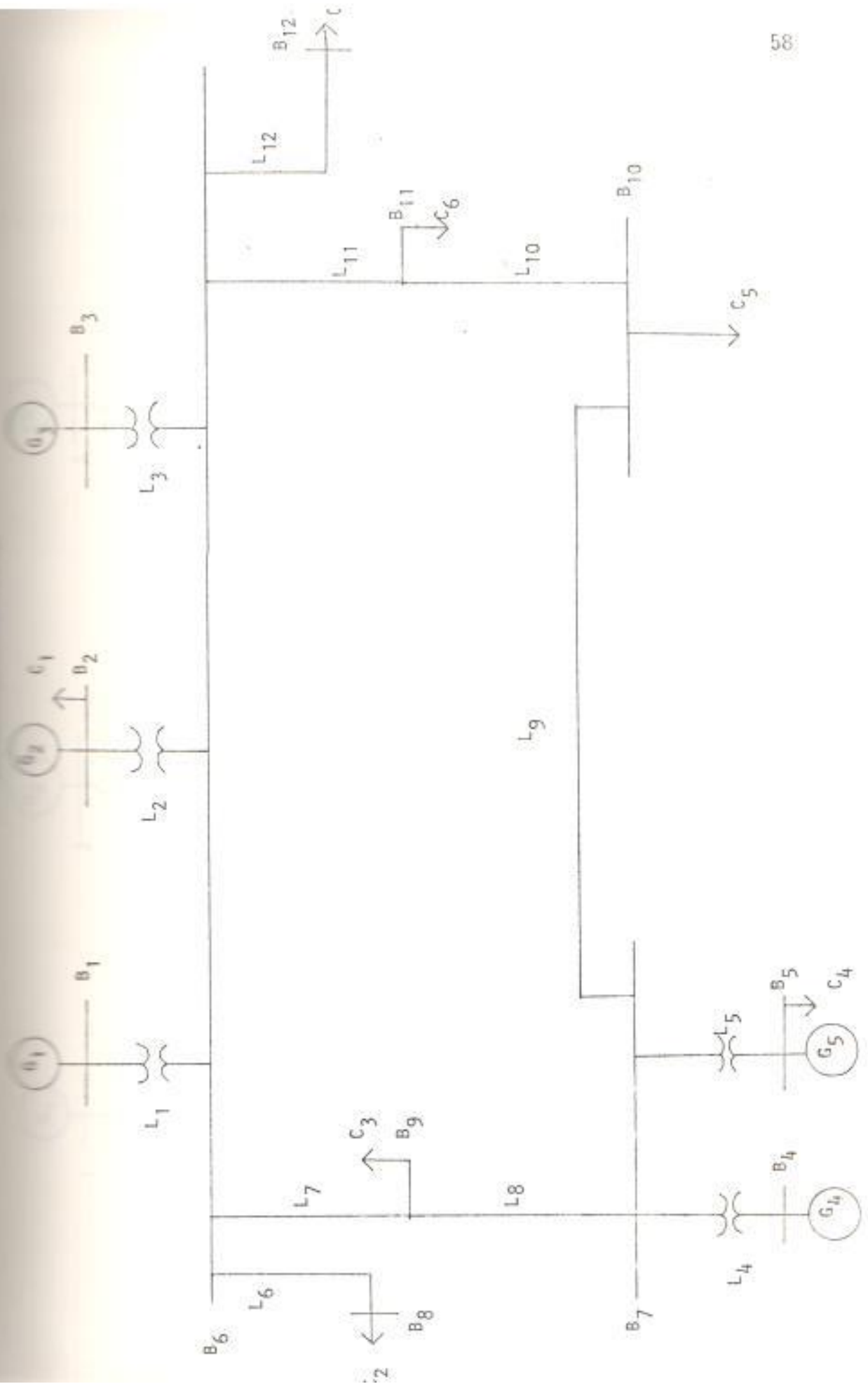
3.3.3. Sistema Reducido

El sistema reducido se lo prepara ahora en pa-
ra su entrada al simulador, de tal forma que -
los valores obtenidos se ajusten a las especi-
ficaciones del mismo, para que de esta manera
se utilicen a discreción los rangos dados por
el simulador en líneas y generadores. Se uti-
lizó una base de 100 MVA y un voltaje base de
69 KV.

Obteniéndose el siguiente diagrama de la figu-
ra 3.3.3.

Los valores de los parámetros del sistema esco-
gido se muestran en la tabla 5, los valores re-
sultantes de la reducción del sistema se mues-
tran en la tabla 6, y los valores en por uni-
dad se muestran en la tabla 7.

FIGURE 10-3-2
 图 10-3-2 电力系统网络图



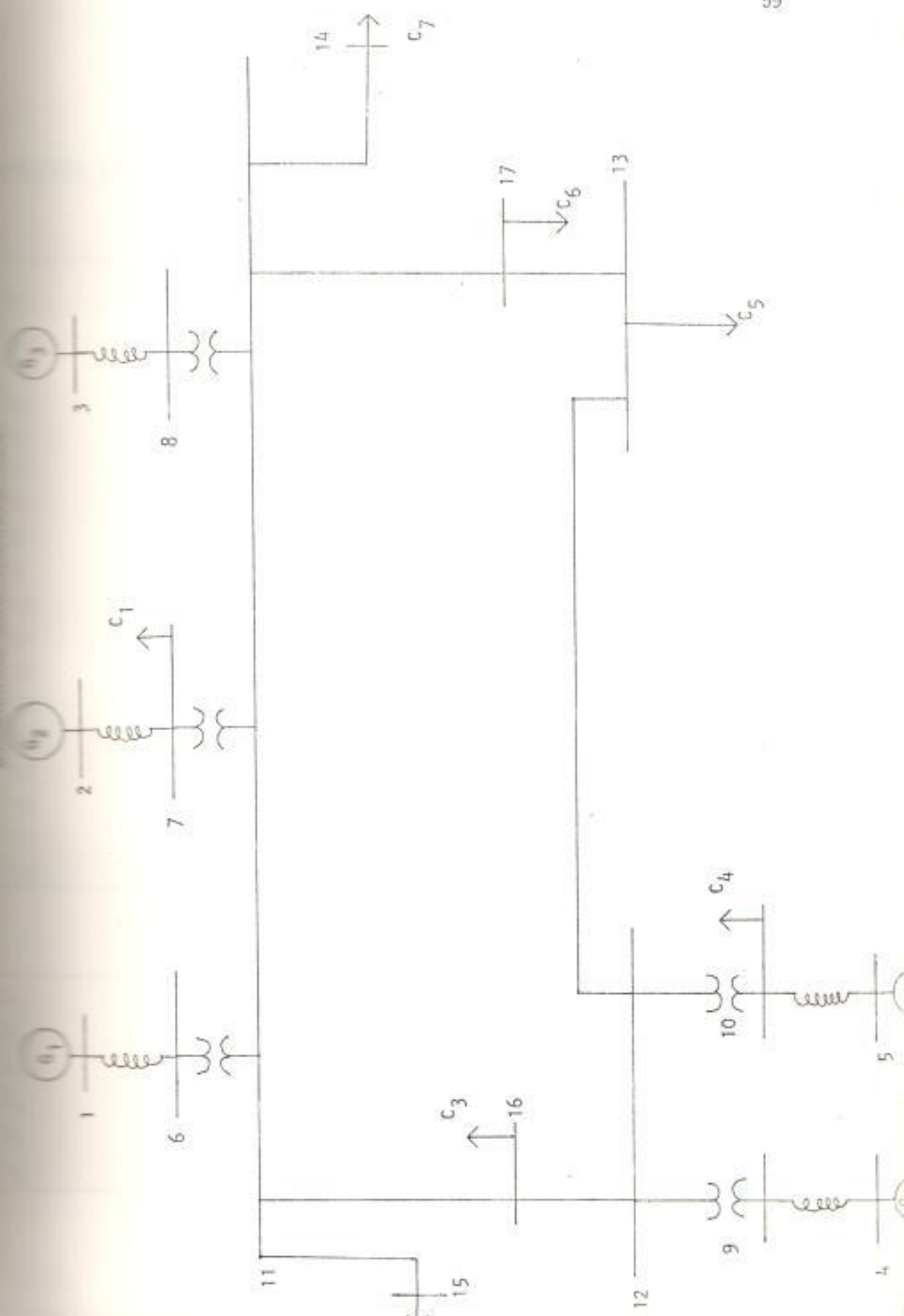


TABLA 5

PARAMETROS DEL SISTEMA GUAYAQUIL 1.980.

	R	X
	0.21	0.31
	0.21	0.31
	0.0201	0.2549
	0.21	0.31
	0.21	0.31
	0.21	0.31
	0	0.407
	0	0.231
	0	0.231
	0.059	0.6128
	0.0402	0.5239
	0.0107	0.0335
	0.0291	0.0669
	0.0107	0.0248
	0.0165	0.038
	0.0133	0.0307
	0.0149	0.0465
	0.0149	0.0465

POTENCIA GENERACION

	MW	MVAR
	14	3.8
	14	3.8
	14	3.8
	10	3.4
	22	4.4
	22	4.4

continua...

	33	9.2
	70	13.6
	70	13.6

CARGAS

	MW	MVAR
	10.2	3
	41.0	12
	19.0	6.0
	35	9.0
	41	
	26	
	33	9

TABLA 6.

PARAMETROS DEL DIAGRAMA REDUCIDO

	R	X
L ₁	0.09	0.15
L ₂	0.02	0.25
L ₃	0.0	0.64
L ₄	0.06	0.61
L ₅	0.04	0.52
L ₆	0.0167	0.0335
L ₇	0.0291	0.0669
L ₈	0.0107	0.0248
L ₉	0.0165	0.038
L ₁₀	0.0133	0.0307
L ₁₁	0.0149	0.0465
L ₁₂	0.0149	0.0465
	POTENCIA GENERACION	
	MW	MVAR
G ₁	65	12
G ₂	30	17
G ₃	80	17
G ₄	--	--
G ₅	30	17

continua.....

Name.....

	MW	MVAR
C ₁	10.2	3.0
C ₂	41.0	12.0
C ₃	19.0	6.0
C ₄	35.0	9.0
C ₅	41.0	---
C ₆	26.0	---
C ₇	33.0	9.0

TABLA 7

VALORES EN P.U. DEL DIAGRAMA REDUCIDO

DE BARRA	A BARRA	R (PU)	X (PU)
1	6	-----	0.53
2	7	-----	0.34
3	8	-----	0.21
4	9	-----	0.69
5	10	-----	0.35
6	11	0.09	0.15
7	11	0.02	0.25
8	11	-----	0.64
9	12	0.06	0.61
10	12	0.04	0.52
11	14	0.04	0.52
12	15	0.15	0.47
13	16	0.29	0.67
14	17	0.15	0.47
15	13	0.17	0.38
16	16	0.11	0.25
17	17	0.13	0.31

CARGA

GENERACION

CARGA

MW (PU)

MVAR (PU)

MW (PU)

MVAR (PU)

1	0.65	0.12	-----	-----
2	0.30	0.17	0.1	0.03
3	0.80	0.17	-----	-----
4	-----	-----	-----	-----
5	0.30	0.17	0.35	0.09
6	-----	-----	0.41	-----
7	-----	-----	0.33	0.09
8	-----	-----	0.41	0.12
9	-----	-----	0.19	0.06
10	-----	-----	0.26	-----

Como se observa en la figura 3.3.3., se han aumentado barras en los generadores, esto es con la finalidad de utilizar esta configuración en la sección 3.4. del presente capítulo.

3.3.4. Preparación del sistema para flujo de carga

Procedemos ahora a elaborar un diagrama de medición de acuerdo a la distribución física de los puntos de medida en el simulador para obtener un cableado relativamente homogéneo, siguiendo las sugerencias mencionadas en la sección - 3.2.1. De ésta forma, el diagrama de medición es el presentado en la figura 3.3.4.

Una vez realizado el diagrama de medición en el simulador, y con los generadores del sistema a 0.1 por unidad de voltaje, procedemos a desarrollar potencia en los mismos, tomando en consideración que se tomó la barra de generación de la turbina a gas de la Subestación Guayaquil, como barra de oscilación.

3.3.5. Energización del Simulador y Obtención de Resultados

Luego de efectuar las respectivas variaciones de voltaje en las cargas, y de voltaje y ángulo en los generadores, se llegó al resultado mostrado en la tabla 8.

3.4. ANALISIS DEL SISTEMA ESCOGIDO UTILIZANDO UN PROGRAMA DIGITAL

El problema de flujo de carga consiste en el cálculo del flujo de potencia y voltajes de una red bajo ciertas condiciones especificadas. Identificamos tres tipos de barras en el sistema: barra de oscilación, barra de voltaje controlado y barra de carga. Seleccionamos la barra de oscilación cuyo voltaje terminal se desea mantener, a fin de proveer la potencia activa y reactiva para suministrar las pérdidas de transmisión, puesto que estas son desconocidas hasta que la solución final sea obtenida. Para esta barra se especifican la magnitud y la fase del voltaje, mientras que en la barra de carga son especifica

TABLA 8

RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA EN EL SIMULADOR

BARRA	VOLTAJE (p.u.)	ANGULO
6	1.05	15°
7	1.03	10°
8	0.99	10°
9	1.01	0°
10	0.96	-5°
11	0.97	---
12	0.92	---
13	0.85	---
14	0.84	---
15	0.85	---
16	0.90	---
17	0.87	---

POTENCIA Y BARRA EN CADA CARGA		
BARRA	P(p.u.)	Q(p.u.)
6	0.65	0.16
7	0.19	0.16
8	0.73	0.32
9	0.17	0.11
10	-0.05	0.08
11	0.05	-0.05
12	0.02	0.02
13	-0.40	0.01
14	-0.33	-0.09
15	-0.41	-0.12
16	-0.19	-0.07
17	-0.25	-0.01

POTENCIA GENERADA EXISTENTE		
GENERADOR	P(p.u.)	Q(p.u.)
1	0.65	0.16
2	0.30	0.19
3	0.73	0.32
4	0.18	0.11
5	0.30	0.17

das la potencia real y reactiva.

La formulación matemática del problema de flujo de carga resulta en un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales o lineales.

Estas pueden ser establecidas usando como sistema de referencia ya sea un lazo o una barra de la red. Los coeficientes de las ecuaciones dependen de la selección de las variables independientes, esto es, voltajes o corrientes. De esta manera, pueden utilizarse las matrices impedancia o admitancia de la red.

La solución de las ecuaciones algebraicas que describen el funcionamiento del sistema está basada en técnicas iterativas debido al carácter de estas ecuaciones. La solución debe satisfacer las leyes de Kirchhoff, esto es, la suma algebraica de todos los voltajes en un lazo debe ser igual a cero, y la suma algebraica de todos los flujos en una barra debe ser igual a cero.

Las ecuaciones que describen el funcionamiento de la

red de un sistema de potencia usando barras del mismo como ejes de referencia son:

$$\bar{E}_{\text{barra}} = \bar{Z}_{\text{barra}} \bar{I}_{\text{barra}} \quad (3.4.1)$$

ó

$$\bar{I}_{\text{barra}} = \bar{Y}_{\text{barra}} \bar{E}_{\text{barra}} \quad (3.4.2.)$$

Donde:

\bar{E}_{barra} : es la matriz columna de las tensiones de nudos

\bar{Z}_{barra} : es la matriz que representa las impedancias - propias y las impedancias mutuas de las líneas del sistema en análisis.

\bar{I}_{barra} : es la matriz columna de las corrientes que entran a los nudos.

\bar{Y}_{barra} : es la matriz admitancia de nudos.

Notar que: $\bar{Z}_{\text{barra}} = \bar{Y}_{\text{barra}}^{-1}$

Las matrices impedancia o admitancia de la red pueden ser formadas incluyendo la barra de tierra. Los elementos de las matrices, por tanto, incluirán los efectos de los elementos en derivación (shunt) a tierra, tales como capacitores estáticos y reactores, carga de la línea y elementos derivación (shunt) de transformadores equivalentes. Cuando la barra de tierra es incluida y seleccionada como nodo de referencia, los voltajes de barra en las ecs. 3.4.1. y 3.4.2, son medidos con respecto a tierra. Si la barra de tierra no es incluida en la red, los elementos de las matrices impedancia o admitancia no incluirán los efectos de los elementos en derivación (shunt) y debe seleccionarse una barra de la red como barra de referencia. En este caso, los efectos de los elementos en derivación (shunt) son tratados como fuentes de corriente en las barras de la red y los voltajes de barra en las ecs. 3.4.1. y 3.4.2, son medidas con respecto a la barra de referencia seleccionada.

Analizaremos ahora las ecuaciones específicas de la red. La potencia real y reactiva en cualquier barra p

está dada por:

$$S_p = P_p - jQ_p = E_p \times I_p$$

y la corriente es:

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{E_p} \quad (3.4.3.)$$

Donde:

S_p : es la potencia aparente que sale de la barra P

P_p : es la potencia activa que sale de la barra P

Q_p : es la potencia reactiva que sale de la barra P

E_p : es la diferencia de potencial entre la barra P y tierra.

I_p : es la corriente que pasa por la barra P.

Donde I_p es positiva si fluye hacia dentro del sistema.

En la formulación de la ecuación de la red, si los elementos en derivación a tierra son incluidos en los parámetros matriciales, entonces la ec. 3.4.3, es la

corriente total en la barra.

Por otro lado si los elementos en derivación son excluidos en los parámetros de la matriz, la corriente total en la barra P es:

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{E_p x} + y_p E_p$$

Donde y_p es la admitancia (paralelo) total en la barra y $y_p E_p$ es la corriente que está fluyendo desde la barra P a tierra.

Después de que la solución iterativa de los voltajes en las barras es completada, se calcula el flujo de potencia entre líneas. La corriente en la barra P, en la línea que conecta la barra P con la barra q, es:

$$i_{pq} = (E_p - E_q) y_{pq} + E_p \frac{y'_{pq}}{2}$$

Donde:

y_{pq} : admitancia de la línea

y'_{pq} : admitancia total de carga de la línea

$E_p y'_{pq}/2$: contribución de corriente a la barra p debido a la carga de la línea.

El flujo de potencia real y reactiva está dado por:

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p I_{pq}$$

ó

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p = (E_p - E_q) y_{pq} + E_{p+} = E_q \frac{y'_{pq}}{2} \quad (3.4.4.)$$

P_{pq} equivale al flujo de potencia real desde la barra p a la barra q y Q_{pq} equivale al flujo de potencia reactiva desde la barra p a la q. Similarmente en la barra q el flujo de potencia de q hacia p está dado por:

$$P_{qp} - jQ_{qp} = E_q = (E_q - E_p) y_{pq} + E_q = E_p \frac{y'_{pq}}{2} \quad (3.4.5.)$$

Las pérdidas de potencia en la línea p-q equivalen a la suma algebraica de los flujos de potencia determinados de las ecs. (3.4.4) y (3.4.5).

Emplearemos el método iterativo de Gauss - Seidel utilizando la matriz admitancia de barra del sistema.

La solución del problema de flujo de carga es iniciada asumiendo voltajes para todas las barras, excepto para la barra de oscilación, donde el voltaje es especificado y permanece fijo. Luego se calculan las corrientes para todas las barras excepto para la barra de oscilación, la cual denominaremos de ahora en adelante por la letra s .

Las ecuaciones que representan la performance de la red son:

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{E_p} \quad \begin{array}{l} p = 1, 2, \dots, n \\ p \neq s \end{array} \quad (3.4.6.)$$

donde n es el número de barras de la red. Por otra parte:

$$\bar{I}_{\text{barra}} = \bar{Y}_{\text{barra}} \bar{E}_{\text{barra}} \quad (3.4.7.)$$

Seleccionando la tierra como barra de referencia, podemos establecer un grupo de $(n-1)$ ecuaciones simultáneas:

$$E_p = \frac{1}{y_{pq}} \left(I_p - \sum_{q=1}^n Y_{pq} E_q \right)$$

$$p = 1, 2, \dots, n \quad (3.4.8.)$$

$$p \neq s$$

Las corrientes de barra calculadas de la ecuación (3.4.6), el voltaje de la barra de oscilación, y los voltajes de barras estimados son sustituidos en la ecuación (3.4.8) para obtener un nuevo grupo de voltajes de barra. Estos nuevos voltajes son usados en la ecuación (3.4.6) para recalcular las corrientes de barra en una solución subsecuente de la ecuación (3.4.8). Este proceso continúa hasta que los cambios en todos los voltajes de las barras sean despreciables. Después que se obtiene la solución para los voltajes en las barras del sistema, se procede a evaluar la potencia en la barra de oscilación y el flujo de potencia entre líneas. Combinando las ecuacio

nes (3.4.8) y (3.4.6) se obtiene:

$$E_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left(\frac{P_p - jQ_p}{E_p} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} E_q \right) \quad (3.4.9)$$

$$p = 1, 2, \dots, n$$

$$p \neq s$$

Esta ecuación involucra solamente voltajes de barra como variables.

Formulando de ésta manera el problema de flujo de carga obtenemos un grupo de ecuaciones lineales que pueden ser resueltas por métodos iterativos.

Una significativa reducción en el tiempo computacional para la obtención de una solución se obtendrá realizando tantas operaciones matemáticas posibles antes de iniciar el método iterativo. De esta forma llamando:

$$\frac{1}{Y_{pp}} = L_p$$

La ecuación (3.4.9) puede ser escrita

$$E_p = \frac{(P_p - jQ_p) L_p}{E_p} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} L_p E_q \quad (3.4.10)$$

$$p = 1, 2, \dots, n$$

$$p \neq s$$

Considerando ahora:

$$(P_p - jQ_p) L_p = KL_p$$

$$Y_{pq} L_p = YL_{pq}$$

La ecuación (3.4.10) se reduce a:

$$E_p = \frac{KL_p}{E_p} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n YL_{pq} E_q \quad (3.4.11)$$

$$p = 1, 2, \dots, n$$

$$p \neq s$$

En el método iterativo de Gauss - Seidel) el nuevo -

voltaje calculado en la iteración $(k + 1)$: E_p^{k+1} , reemplaza inmediatamente al voltaje E_p^k y es usado en la solución de las ecuaciones subsecuentes.

Para la lectura de datos del programa digital, se utiliza un formato libre indicado por un asterisco - en la proposición READ, por ejemplo se tiene READ(4, *). De esta manera los datos deben escribirse separados por una coma sin necesidad de especificar un área determinada para cada uno. Cuando se escribe un grupo de datos, separado por comas, el último de ellos no debe llevar coma al final, debiendo escribirse el siguiente grupo de datos, si los hay, en una nueva línea.

Los datos se digitan en el siguiente orden:

A) NUMG, NTRANS, NUMB, NL, EPS, MAX, BOSCIL, ALFA, MVA, en donde :

NUMG : número de generadores del sistema

NTRANS: número de transformadores

NUMB : número de barras

NL : número de líneas
 EPS: factor de error
 MAX: máximo número de iteraciones
 BOSCIL: Barra de oscilación
 ALFA: Factor de aceleración
 MVA: megavoltios-amperios base

- B. Los siguientes datos de entrada son los de las líneas formadas por la reactancia transiente de los generadores del sistema y los de las líneas que tienen transformadores.

LINEA(I), BI(I), BF(I), ZSERR(I), ZSERI(I), TAP(I)

En donde:

LINEA (I): número de línea (las líneas se numeran previamente en el diagrama unifilar del sistema.

BI(I): Barra inicial de la línea I

BF(I): Barra final de la línea I.

ZSERR(I): parte real de la impedancia del generador o transformador de la línea I.

ZSERI(I): Parte imaginaria de la impedancia del generador o transformador de la línea I.

TAP(I): Tap del transformador de la línea I

C. A continuación entran los datos de las líneas que no tienen transformadores.

LINEA (I), BI(I), BF(I), LONG(I), YSHTR(I), YSHTI(I), ZSERR(I), ZSERI(I), en donde:

LONG(I): Longitud de la línea I (se supone que los datos de línea están dados en p.u. unidad de longitud).

YSHTR(I): Parte real de la admitancia en paralelo (Y') de la línea I

YSHTI(I): Parte imaginaria de la admitancia en paralelo (Y') de la línea I.

ZSERR(I): Resistencia de la línea I

ZSERI(I): Reactancia de la línea I

En el caso de que los valores de Y^* y Z sean valores totales de la línea, entonces el valor de $LONG(I)$ es igual a 1.0 (valor unitario). Los datos de impedancias y admitancias deben estar dados en por unidad de longitud.

Es importante la identificación correcta del número de cada barra y línea del sistema. Las barras internas de los generadores toman siempre los valores iniciales seguidas de las barras colocadas luego de la reactancia transiente de cada generador.

- D. Datos de los voltajes asumidos en todas las barras, desde la barra $NG(NG = NUMG + 1)$ hasta la barra $NUMB$, entrando parte real y parte imaginaria.
- E. Datos de cargas de cada barra, desde la barra NG , hasta la barra $NUMB$, entrando parte real y parte imaginaria.

F. Datos de potencia generada en cada barra desde la barra NG hasta la barra NUMB, entrando parte real y parte imaginaria.

Notar que las lecturas previas comienzan a partir de la barra NG, con lo cual no consideramos las barras internas de los generadores, que no intervienen en el flujo de carga del sistema.

En primer lugar se forma la matriz admitancia de barra sin considerar las barras internas que mencionamos anteriormente; de esta manera, las barras internas no intervienen en el flujo de carga del sistema. Previo a la formación de la matriz admitancia de barra debemos hacer dos diferenciaciones:

1. Consideramos un sistema que presenta transformadores con tap variable; y
2. Consideramos un sistema sin transformadores.

Para ambos casos, la formación de ésta matriz es similar, salvo que en el primer caso tenemos otro tipo

de ecuaciones debido a la diferente representación - del circuito equivalente de un transformador con tap y de una línea sencilla.

Observando las figuras 3.4.1 y 3.4.2, parecen iguales salvo que en la figura 3.4.1, tenemos $Y_1 = Y_3 = \text{car}$ ga de la línea.

$$Y_2 = \frac{1}{Z_t}$$

Siendo Z_t la impedancia serie de la línea. En cambio en la figura 3.4.2, tenemos:

$$Y_1 = \frac{1-n}{n^2 Z_t}$$

$$Y_2 = \frac{1}{n Z_t}$$

$$Y_3 = \frac{n-1}{n Z_t}$$

Siendo Z_t la impedancia del transformador y n el tap. Debido a que $Y_1 \neq Y_3$ es importante anotar que, en

FIGURA 3.4.1.

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA LINEA

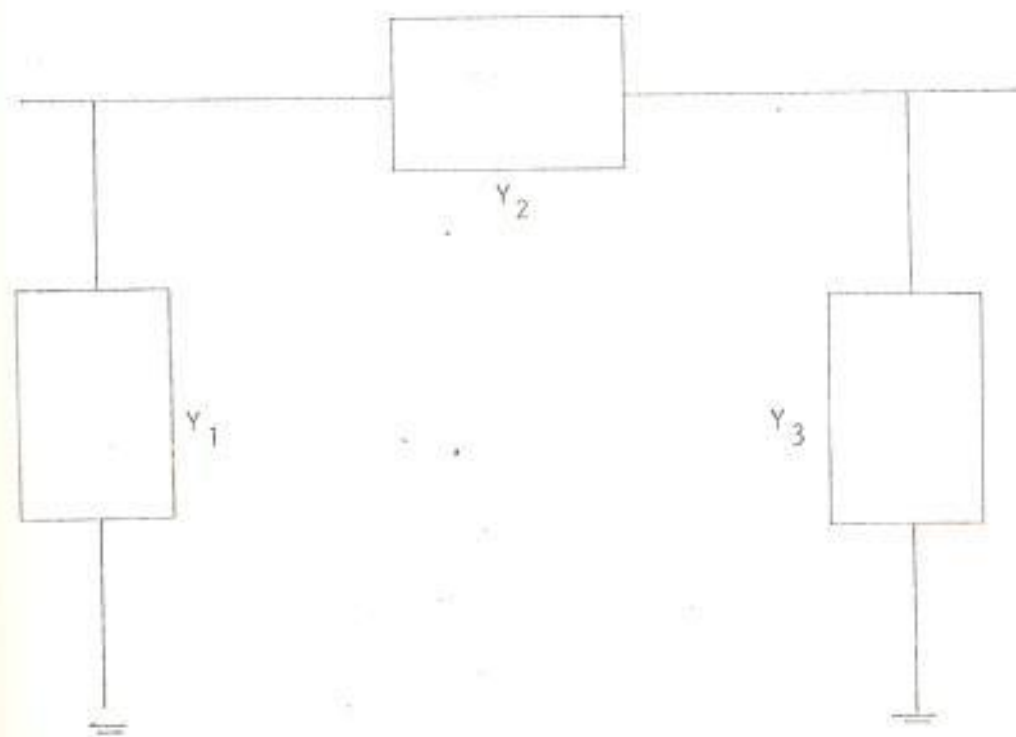
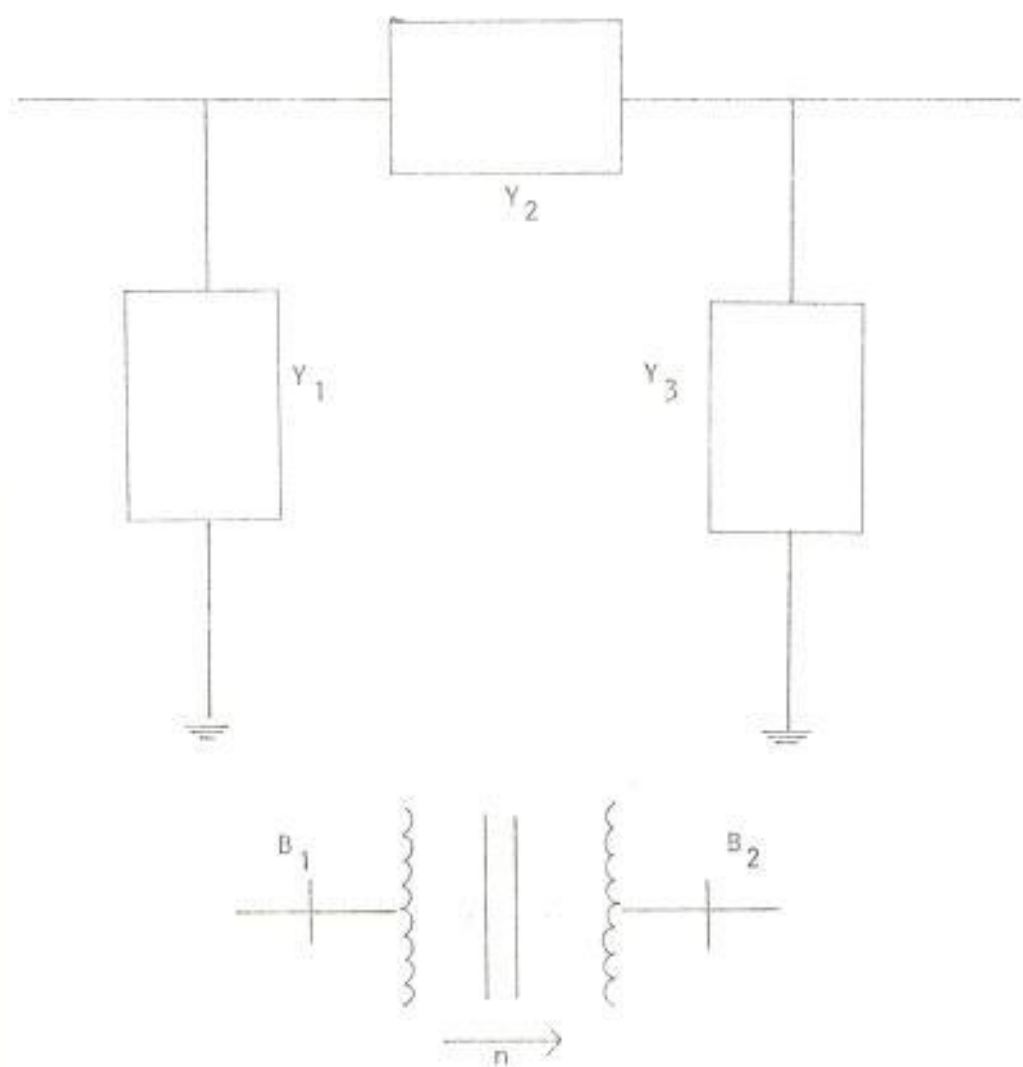


FIGURA 3.4.2.

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR
CON TAP VARIABLE



la lectura de datos, debe considerarse como B1 a la barra que señala la flecha en la figura 3.4.2, en este caso B2 y como BF a la barra opuesta a la flecha, en este caso B1.

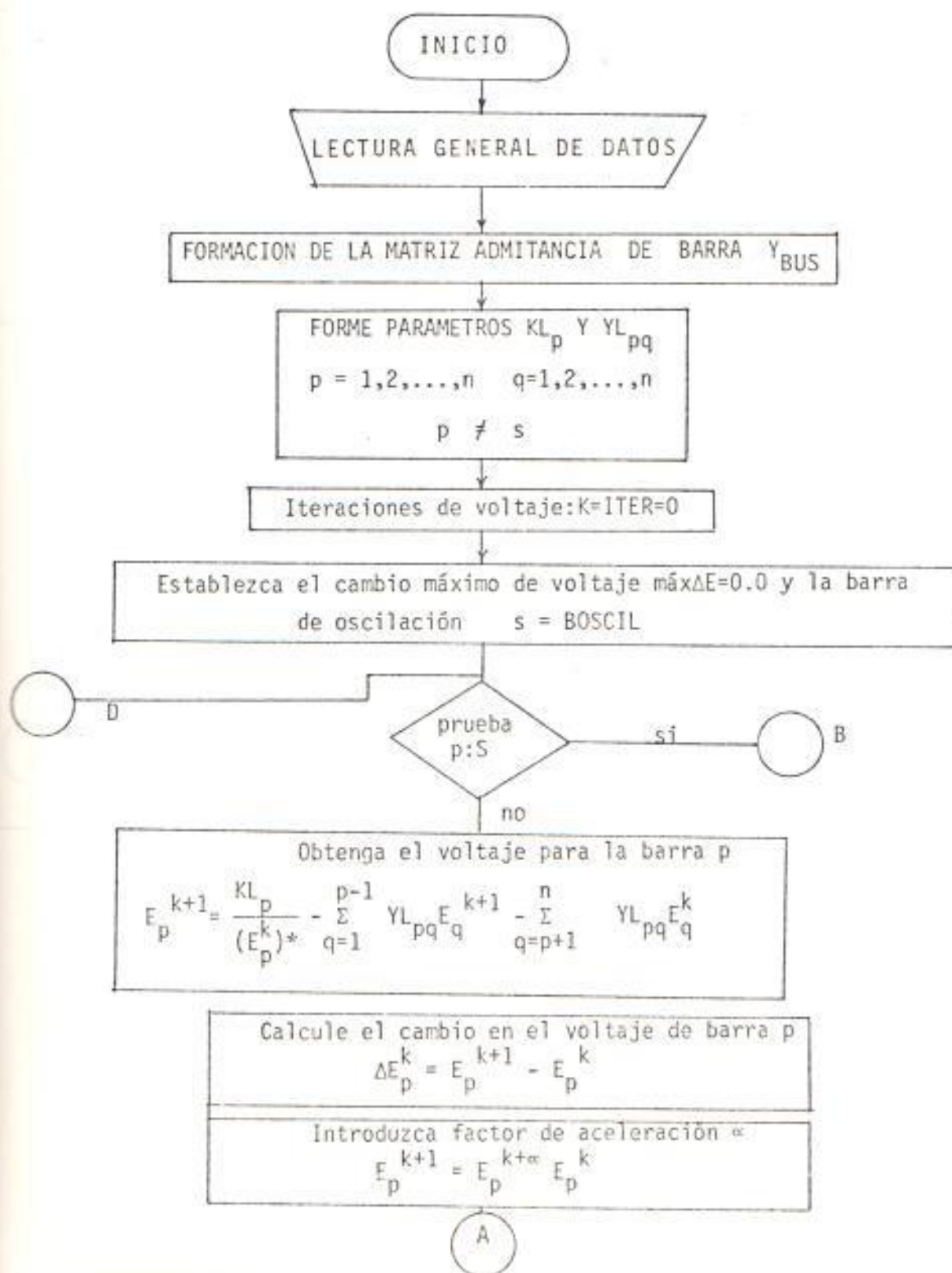
A continuación se muestra el diagrama de flujo del programa FLUCAR.

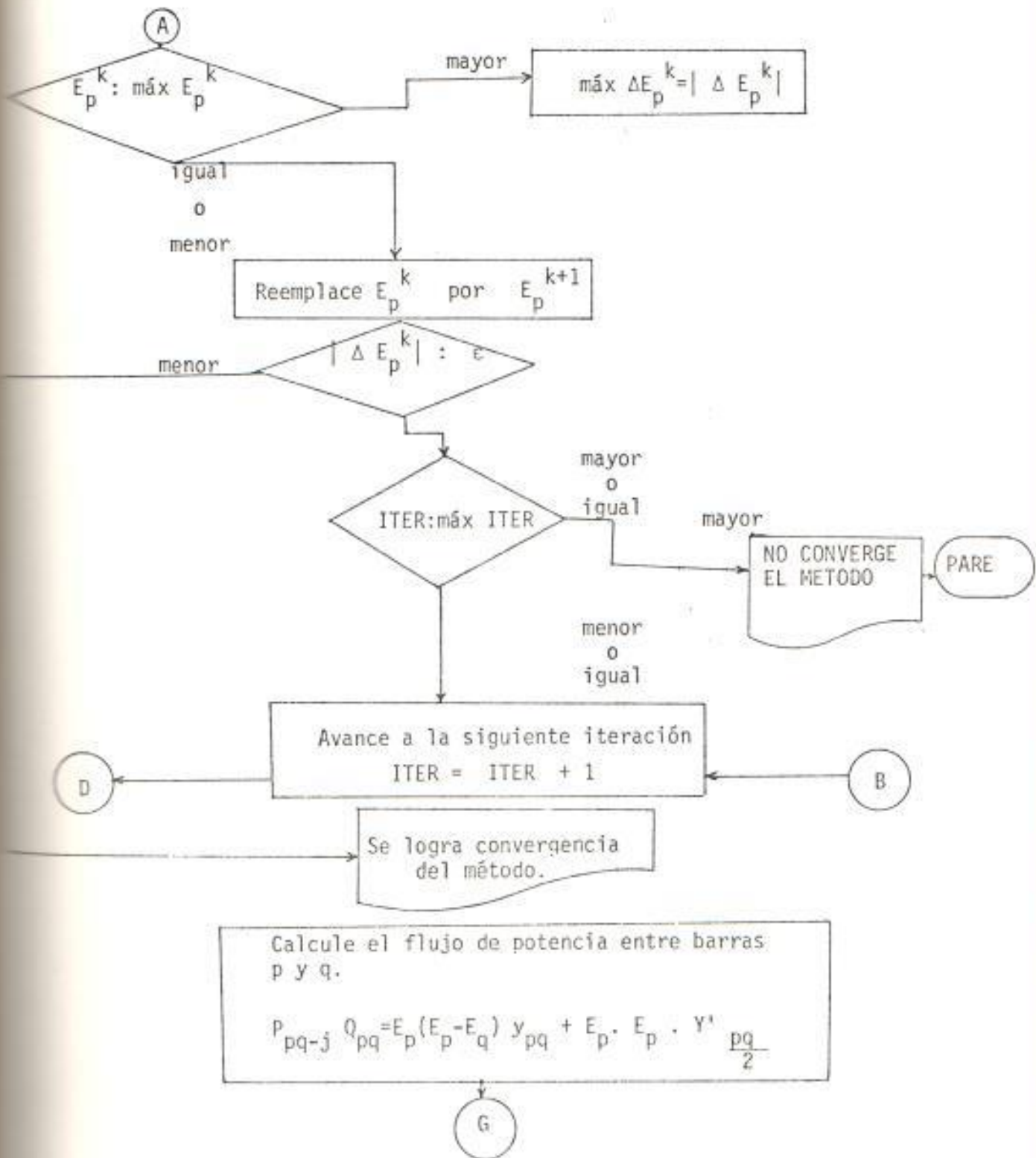
La forma de ingresar los datos en el sistema S/34, consiste en crear un procedimiento mediante la siguiente instrucción:

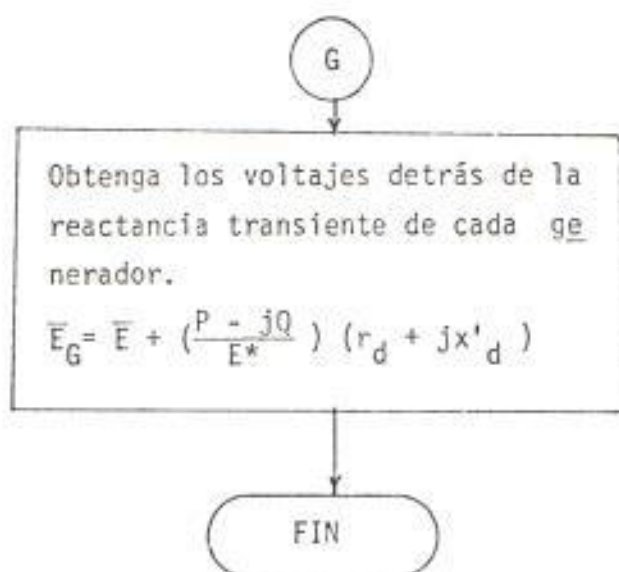
SEU nombre del procedimiento, P,... nombre de la librería donde se encuentra el programa principal

Se pulsa entonces la tecla ENTER y aparece en la pantalla la primera línea a ser digitada. Luego de cada línea digitada, se deberá presionar la tecla ENTER. Antes de comenzar a digitar los datos de entrada es necesario cargar el procedimiento mediante dos líneas de control al programa principal (en nuestro caso FLUCAR), tal como se indica a continuación:

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA
DIGITAL







```
// LOAD FLUCAR
```

```
// RUN
```

DATOS DE ENTRADA

La primera hoja de salida del programa corresponde a la descripción general del sistema de potencia en estudio, luego se presentan los datos de líneas y transformadores de la red y a continuación los resultados del flujo de carga del sistema: voltajes en cada barra, flujo de potencia entre barras, potencia generada existente y los voltajes tras la reactancia transiente de cada generador.

El programa puede ser utilizado para estudios de sistemas de potencia conformados por 10 generadores, 28 barras y 28 líneas. Es necesario hacer una aclaración en cuanto al número de barras que acepta el programa. De las 28 barras mencionadas anteriormente, 10 corresponden a barras internas creadas antes de la reactancia transiente de cada generador, es decir, que el sistema en estudio puede estar constituido hasta por 18 barras externas entre las que contabilizamos barras de generación y barras de carga.

El espacio de memoria utilizado es de 64 K; a continuación se muestran los resultados del flujo de carga utilizando el programa digital.

3.5. COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SIMULADOR CON LOS OBTENIDOS EN EL PROGRAMA DIGITAL.

Por simple observación de los resultados obtenidos - del programa digital, y de los resultados obtenidos utilizando el simulador que se encuentran en la tabla 8., se nota una gran similitud en los valores.

El porcentaje de error oscila entre el 1 % y el 2 %, lo que concuerda con la exactitud provista por los componentes electrónicos del simulador; cabe anotar que para elaborar el programa digital, se requirió - de algún tiempo de computadora en realizarlo, corregirlo y probarlo, por lo que se resalta que la utilización del simulador es altamente ventajosa en comparación con el tiempo empleado en el computador, y como ente físico y matemático, ya que ha proporcionado una acertada visualización de los parámetros que varían en un flujo de carga de un sistema, cosa que no provee precisamente el programa digital; el cual a

su vez, sólo tiene la ventaja de la precisión de resultados que podrían ser utilizados en un estudio de mayor complejidad, para el que se tendría que desarrollar un esquema mucho más complicado con el expuesto anteriormente.

CAPITULO IV

ANALISIS DE TRANSIENTES QUE SE PRESENTAN EN UNA LINEA DE TRANSMISION POR CONEXION Y DESCONEXION DE FUENTES DE ENERGIA.

4.1. GENERALIDADES

Cualquier disturbio en una línea de transmisión, tales como descargas eléctricas o alguna interrupción de las condiciones de estado estable, producen el inicio de ondas viajeras, las que se propagan hacia el final de las líneas donde son reflejadas y modificadas, atenuadas y distorsionadas por efecto corona y otras pérdidas.

Se han hecho amplios estudios donde las constantes R , L , y C , han sido parámetros distribuidos o concentrados, o donde han sido aproximados entre sí. Asumiremos que estos parámetros están realmente distribuidos en cualquier circuito o pieza de un equipo, así es posible sorprenderse de la forma como un comportamiento transiente de tales circuitos puede ser calculado en

base a un análisis de circuitos con parámetros distribuidos.

4.2. ANALISIS TEORICO DEL PROBLEMA POR CONMUTACION

Representaremos diferencialmente una línea de transmisión.

Donde:

ΔX es la longitud de la sección de línea

r es la resistencia de la línea por unidad de longitud.

l es la inductancia de la línea por unidad de longitud.

g es la conductancia de la línea por unidad de longitud.

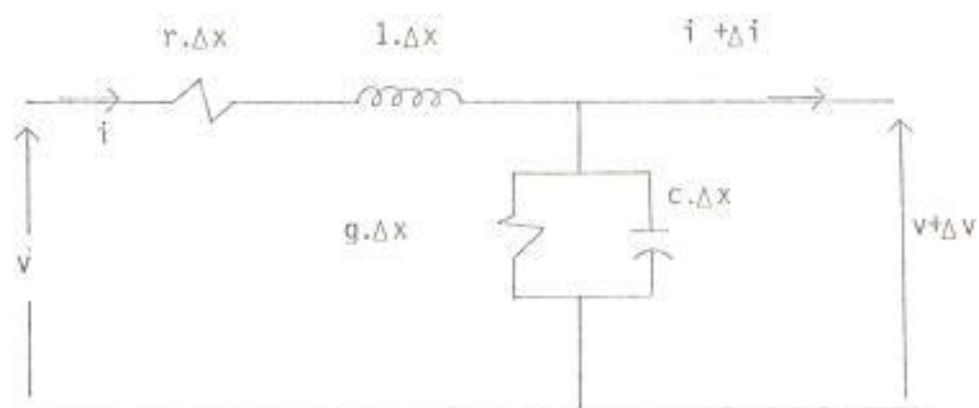
c es la capacitancia de la línea por unidad de longitud.

Planteando las ecuaciones iniciales:

$$v = i \cdot r \Delta X + l \Delta X \frac{di}{dt} + v + \Delta v$$

FIGURA N° 4.2.1.

REPRESENTACION DIFERENCIAL DE UNA LINEA DE TRANSMISION



$$-v = (ir + 1) \frac{di}{dt} \Delta x$$

$$- \frac{\Delta v}{\Delta x} = i.r + 1 \frac{di}{dt}; \text{ tomando el límite cuando } x \rightarrow 0$$

$$- \frac{dv}{dx} = r.i + 1 \frac{di}{dt} \quad \text{ec. (4.2.1)}$$

De la misma forma planteando ecuaciones de nodo, tenemos:

$$-\Delta i = g \Delta x (v + \Delta v) + c \Delta x \cdot \frac{d}{dt} (v + \Delta v) + i + \Delta i$$

$$-\Delta i = g \cdot \Delta x v + g \cdot \Delta x \cdot \Delta v + c \Delta x \cdot \frac{d}{dt} v + c \Delta x \cdot \frac{d}{dt} \Delta v$$

$$-\Delta i = (g \cdot v + c \frac{dv}{dt}) \cdot \Delta x$$

$$- \frac{\Delta i}{\Delta x} = g \cdot v + c \frac{dv}{dt}; \text{ tomando el límite cuando } x \rightarrow 0$$

$$- \frac{di}{dt} = g \cdot v + c \frac{dv}{dt} \quad \text{ec. (4.2.2)}$$

Se requiere determinar el voltaje y la corriente en función del espacio y del tiempo; en otras palabras,

resolver el sistema de ecuaciones diferenciales.

Tenemos como condiciones iniciales:

$t = 0$ corresponde a la línea desenergizada.

$$v(x,0) = 0$$

$$i(x,0) = 0$$

Es necesario recordar que:

$$L\left\{\frac{dv}{dt}\right\} = sV(x,s) - v(x,0) = sV(x,s)$$

$$L\left\{\frac{di}{dt}\right\} = sI(x,s) - i(x,0) = sI(x,s)$$

$$L\{v(x,t)\} = V(x,s) = V$$

$$L\{i(x,t)\} = I(x,s) = I$$

Obteniendo las transformadas de las ecuaciones 4.2.1 y 4.2.2, se tiene:

$$-\frac{dv}{dx} = r \cdot I + |s|I = (r + |s|) I = -\frac{dI}{dx} \quad \text{ec. (4.2.3)}$$

$$-\frac{dI}{dx} = g \cdot V + |c|V = (g + |c|) V = -\frac{dV}{dx} \quad \text{ec. (4.2.4)}$$

Derivando la ecuación (4.2.3), con respecto a x :

$$-\frac{d^2v}{dx^2} = (r + |s|) \frac{dI}{dx}$$

Reemplazando la $\frac{dI}{dx}$ de la ecuación (4.2.4), tenemos:

$$-\frac{d^2v}{dx^2} = -(r + |s|) (g + |c|) V, \text{ de donde:}$$

$$-\frac{d^2v}{dx^2} = (r + |s|) (g + |c|) V \quad \text{ec. (4.2.3)}$$

Derivando la ecuación (4.2.4) con respecto a x , te
nemos:

$$-\frac{d^2I}{dx^2} = (g + |c|) \frac{dv}{dx} = -(g + |c|) (r + |s|) I$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = (r + s1) (g + sc) I \quad \text{ec. (4.2.4)}$$

asumimos que $\gamma^2 = (r + s1) (g + sc)$

Luego:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = \gamma^2 v$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = \gamma^2 I$$

La forma de la solución de este sistema es la siguiente:

$$v(x,s) = A e^{\gamma x} + B e^{-\gamma x} \quad \text{ec. (4.2.5)}$$

$$I(x,s) = C e^{\gamma x} + D e^{-\gamma x} \quad \text{ec. (4.2.6)}$$

Debemos determinar los parámetros A, B, C, y D; derivando las ecuaciones (4.2.5) y (4.2.6) con respecto a x, tenemos:

$$-\frac{dv}{dx} = -AY_2 Y^X + BY_e^{-YX} \quad \text{ec. (4.2.7)}$$

De la ecuación (4.2.3) sabemos que:

$$-\frac{dv}{dx} = (r + s1) I$$

Reemplazando en la expresión anterior la ec. (4.2.6), se tiene:

$$-\frac{dv}{dx} = (r + s1) \cdot (C_e^{YX} + D_e^{-YX}) \quad \text{ec. (4.2.8)}$$

$$-\frac{dv}{dx} = (r + s1) C_e^{YX} + (r + s1) D_e^{-YX} \quad \text{ec. (4.2.8)}$$

Para que las ecuaciones (4.2.7) y (4.2.8) sean iguales, debe cumplirse que:

$$-AY = C(r + s1)$$

$$BY = D(r + s1)$$

De donde:

$$C = \frac{-AY}{r + s1}$$

$$D = \frac{By}{r + s1}$$

Y como: $\gamma^2 = (r + s1)(g + sc)$

$$C = -A \sqrt{\frac{(r + s1)(g + sc)}{(r + s1)^2}}$$

$$C = -A \sqrt{\frac{g + sc}{r + s1}}$$

$$D = B \sqrt{\frac{g + sc}{r + s1}}$$

Introduciendo la impedancia característica, tenemos:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{r + s1}{g + sc}}$$

$$Y_0 = \sqrt{\frac{g + sc}{r + s1}}$$

Luego: $C = -AY_0$

$$D = BY_0$$

Por lo tanto:

$$V(x,s) = Ae^{cx} + Be^{-x} \quad \text{ec. (4.2.9)}$$

$$I(x,s) = -AY_0 e^x + BY_0 e^{-x} \quad \text{ec. (4.2.10)}$$

Para hallar los parámetros A y B, necesito otra condición inicial, la cual tomaremos de la figura 4.2.2.

Sabemos que:

$$L\{v(0,t)\} = V(0,s) \quad \text{luego:}$$

$$\text{Para } x = 0 \quad V(0,s) = A + B$$

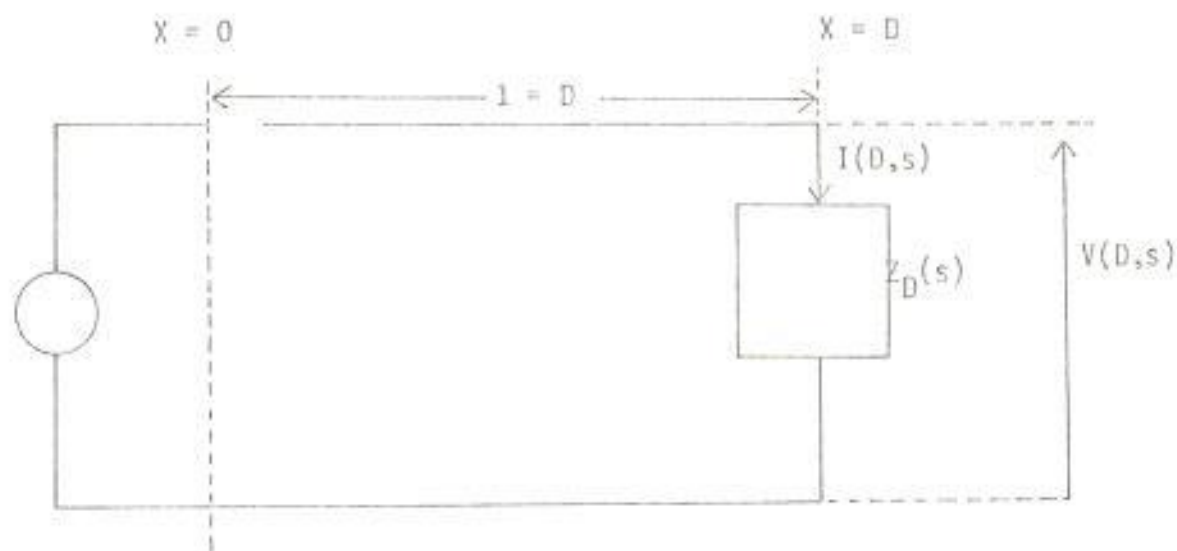
$$B = V(0,s) - A$$

Reemplazando el valor de B en las ecs. (4.2.9) y (4.2.10), tenemos:

$$V(x,s) = Ae^{Yx} + \{V(0,s) - A\} e^{-Yx}$$

FIGURA 4.2.2.

CONDICIONES INICIALES PARA DETERMINAR LOS PARAMETROS A Y B



$$V(x,s) = A(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}) + V(0,s)e^{-\gamma x} \quad \text{ec. (4.2.11)}$$

$$I(x,s) = -Y_0 A e^{\gamma x} + Y_0 \{V(0,s) - A\} e^{-\gamma x}$$

Agrupando términos:

$$I(x,s) = -Y_0 A (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}) + Y_0 V(0,s) e^{-\gamma x} \quad \text{ec. (4.2.12)}$$

Necesitamos determinar el coeficiente A, para obtener la solución de las ecuaciones diferenciales.

Conocemos que la impedancia donde termina la línea es:

$$Z_D = \frac{V(D,s)}{I(D,s)}$$

Luego:

$$Z_D(s) = \frac{A(e^{\gamma D} - e^{-\gamma D}) + V(0,s)e^{-\gamma D}}{-Y_0 A (e^{\gamma D} + e^{-\gamma D}) + Y_0 V(0,s)e^{-\gamma D}}$$

Despejando A, se tiene:

$$A = V(0, s) \frac{(Z_D Y_o - 1) e^{-\gamma D}}{e^{\gamma D} (\gamma_o Z_D + 1) + e^{-\gamma D} (\gamma_o Z_D - 1)} \quad \text{ec. (4.2.13)}$$

Llamando coeficiente de reflexión a:

$$K(s) = \frac{Z_D Y_o - 1}{Z_D Y_o + 1} \quad *$$

Y dividiendo a la ecuación (4.2.13) para:

$Z_D Y_o + 1$, se tiene:

$$A = V(0, s) \frac{K(s)}{e^{\gamma D} + K e^{-\gamma D}} e^{-\gamma D}$$

Reemplazando A en las ecs. (4.2.11) y (4.2.12), tenemos:

$$V(x, s) = V(0, s) \frac{e^{\gamma(D-x)} + K e^{-\gamma(D-x)}}{e^{\gamma D} + K e^{-\gamma D}} \quad \text{ec. (4.2.14)}$$

$$I(x, s) = Y_o V(0, s) \frac{e^{\gamma(D-x)} - K e^{-\gamma(D-x)}}{e^{\gamma D} + K e^{-\gamma D}} \quad \text{ec. (4.2.15)}$$

Desarrollando el denominador mediante series:

$$(e^{\gamma D} + Ke^{-\gamma D})^{-1} = \sum_{n=0}^{\infty} (-K(s))^n e^{-(2n+1)\gamma D} \quad \text{ec. (4.2.16)}$$

Reemplazando la ecuación (4.2.16) en las ecuaciones (4.2.14) y (4.2.15) tenemos:

$$V(x,s) = V(0,x) \left\{ e^{\gamma(D-x)} + Ke^{-\gamma(D-x)} \right\} \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n e^{-(2n+1)\gamma D}$$

Desarrollando la expresión anterior, se tiene:

$$V(x,s) = V(0,s) \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n e^{-2n\gamma D - \gamma D - \gamma x} - \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n (-K) e^{-2n\gamma D - \gamma D - \gamma D + \gamma x} \right\}$$

Luego:

$$V(x,s) = V(0,s) \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n e^{-\gamma(2nD+x)} \quad \text{ondas incidentes} - \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^{n+1} e^{-\gamma(-x+2(n+1)D)} \quad \text{ondas reflejadas} \right\}$$

igualmente :

$$I(x,s) = \frac{V(0,s)}{Z_0} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n e^{-\gamma(2nD+x)} + \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^{n+1} e^{-\gamma[-x+2(n+1)D]} \right\}$$

ondas incidentes ondas reflejadas.

En base a estos resultados analizaremos a una línea infinita sin pérdidas.

En una línea extremadamente larga, se cumple que:

$$D = \infty, \quad r = g = 0.$$

Sabemos que:

$$A = V(0,s) \frac{Ke^{-\gamma D}}{e^{\gamma D} + Ke^{-\gamma D}}$$

Si ocurre que $D \rightarrow \infty$, el valor de $A \rightarrow 0$

de ésta manera:

$$V(x,s) = V(0,s) e^{-\gamma x}$$

$$I(x,s) = \frac{V(0,s)}{Z_0} e^{-\gamma x}$$

Pero:

$$\gamma = \sqrt{(r + sl)(g + sc)}$$

$$= \sqrt{s^2 lc} = s/lc$$

Por lo tanto:

$$V(x, s) = V(0, s) e^{-s/lc x}$$

$$I(x, s) = \frac{V(0, s)}{Z_0} e^{-s/lc x}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{r + sl}{g + sc}} = \sqrt{\frac{1}{c}} = Z_0$$

Donde la impedancia característica de la línea es un número real.

Obteniendo la transformada inversa de Laplace de $V(0, s)$ tenemos:

$L^{-1}\{V(0, s)\} = V(0, t)$, lo que representa la fuente al comienzo de la línea.

$$L^{-1}\{V(x,s)\} = V(x,t) = V(0,t) = V(0,t-x\sqrt{1c})$$

y de la misma manera:

$$i(x,t) = \frac{V(0,t-x\sqrt{1c})}{Z_0}$$

Estas dos ecuaciones representan las ondas viajeras de voltaje y de corriente que existen en una línea de transmisión de longitud infinita.

Analizaremos el caso que nos interesa, el cual es - las líneas de longitud finita.

Conocemos por el análisis anterior que:

$$V(x,s) = V(0,s) \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n e^{-\gamma(2nD+x)} - \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^{n+1} e^{-\gamma[-x+2(n+1)D]} \right\}$$

Se analizarán los siguientes casos:

1. Si la carga de la línea es igual a su impedancia característica, es decir:

$$Z_D = Z_0.$$

Sabemos que:

$$K(s) = \frac{Z_D Y_0 - 1}{Z_D Y_0 + 1}$$

Si $Z_D = Z_0$, ocurre que $K(s) = 0$.

Luego para $n = 0$

$$V(x,s) = V(0,s)e^{-\gamma x}$$

Notar que se está considerando una línea sin pérdidas, donde:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{1}{c}}$$

De ésta manera:

$$I(x,s) = \frac{V(0,s)}{Z_0} e^{-\gamma x}$$

y como la línea no tiene pérdidas:

$$\gamma = s/lc$$

donde:

$$V(x,s) = V(0,s) e^{-s/lcx}$$

$$I(x,s) = V(0,s) \frac{e^{-s/lcx}}{Z_0}$$

Soluciones que son las mismas que para una línea infinita sin pérdidas.

Lo cual significa que toda la energía que viaja en ondas se consume totalmente en la impedancia característica Z_0 de la línea, si ésta actúa como carga.

2. Si la carga de la línea $Z_D = R$; tenemos que:

$$K(s) = \frac{Z_D Y_0 - 1}{Z_D Y_0 + 1} = \frac{Z_D(s) - Z_0(s)}{Z_D(s) + Z_0(s)}$$

y reemplazando $Z_D = R$, se tiene:

$$K = \frac{R - Z_0}{R + Z_0}$$

Desarrollando la ecuación de las ondas de voltaje:

$$V(x,s) = V(0,s) \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n e^{-\gamma(2nD+x)} - \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^{n+1} e^{-\gamma(-x+2(n+1)D)} \right\}$$

Luego:

$$\begin{aligned} V(x,s) = V(0,s) & \sum_{n=0}^{\infty} \left[e^{-\gamma x} + K e^{-\gamma(-x+2D)} \right. \\ & n=1 \quad \left. - K e^{-\gamma(2D+x)} - K^2 e^{-\gamma(-x+4D)} \right. \\ & n=2 \quad \left. K^2 e^{-\gamma(4D+x)} + K^3 e^{-\gamma(-x+6D)} \right. \\ & n=3 \quad \left. - K^3 e^{-\gamma(6D+x)} - K^4 e^{-\gamma(-x+8D)} \right. \\ & \quad \cdot \\ & \quad \cdot \\ & \quad \cdot \end{aligned}$$

Luego la expresión del voltaje en función del tiempo y del espacio es:

$$v(x,t) = v(0,t - \frac{x}{u}) - K v(0,t - \frac{x+2D}{u}) + K^2 v(0,t - \frac{x+4D}{u}) \\ - K^3 v(0,t - \frac{x+6D}{u})$$

Las expresiones anteriores representan las ondas incidentes que viajan hacia la curva y son de la forma:

$$V(0,s) \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n e^{-\gamma(2nD+x)}$$

Continuando con el desarrollo:

$$K v(0,t - \frac{-x+2D}{u}) - K^2 v(0,t - \frac{-x+2D}{u}) + K^3 v(0,t - \frac{-x+6D}{u}) \\ - K^4 v(0,t - \frac{-x+8D}{u})$$

Estas expresiones representan las ondas reflejadas que viajan hacia la carga y son de la forma:

$$V(0,s) (-) \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^{n+1} e^{-\gamma(-x+2(n+1)D)}$$

Para visualizar este desarrollo, deberemos tomar en

cuenta que ninguna de las transformadas existirá hasta que transcurra un tiempo determinado, esto es:

Ninguna de las ondas incidentes existirá para un tiempo:

$$t < \frac{x + 2nD}{u}$$

Ninguna de las ondas reflejadas existirá para un tiempo:

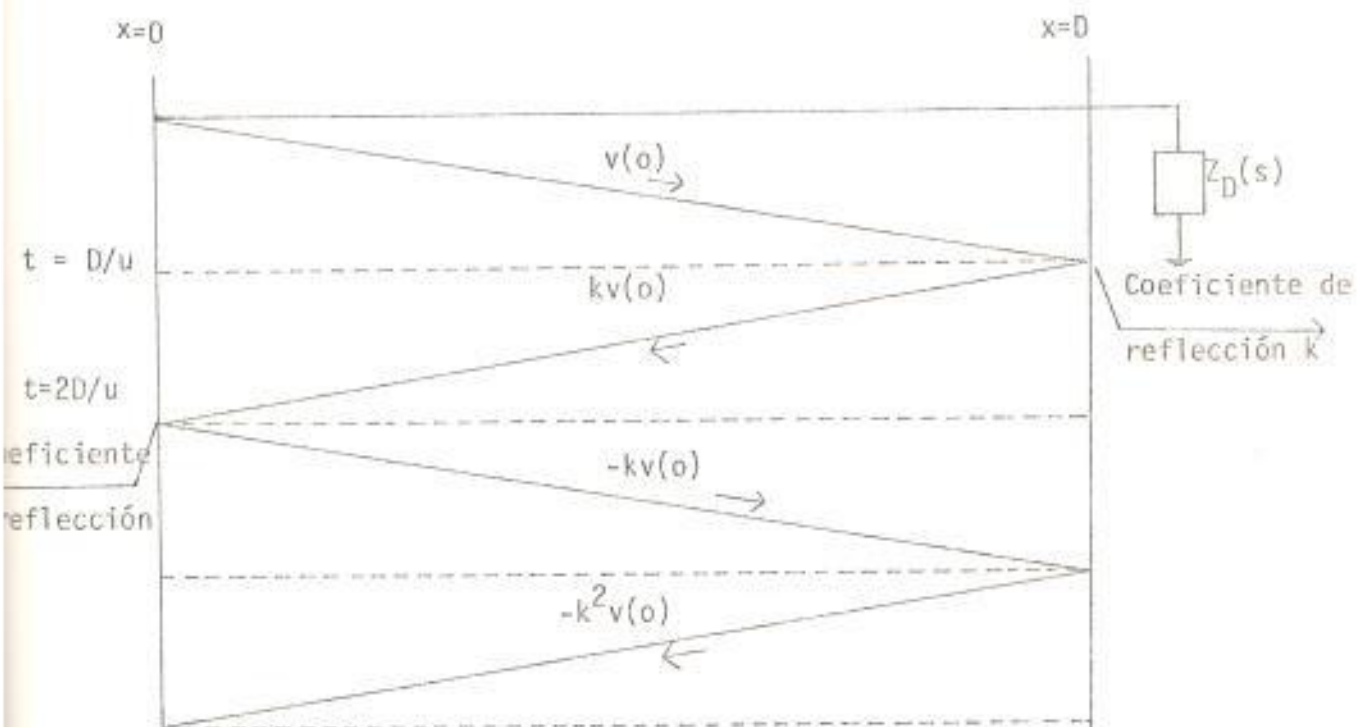
$$t < \frac{-x + 2(n+1)D}{u}$$

Veremos como se comportan las ondas en el punto de llegada, para lo cual utilizaremos el diagrama de Lattice, mostrado en la figura 4.2.3.

En donde el tiempo D/u llega la primera onda, la onda incidente multiplicada por el coeficiente de reflexión K nos da la onda reflejada, la onda incidente aparece para cada tiempo $t = \frac{2D}{u}$; para un tiempo

FIGURA 4.2.3.

DIAGRAMA DE LATTICE



po mayor a la mitad del expuesto anteriormente, la onda se refleja multiplicada por el coeficiente de reflexión.

Se asume que las fuentes son ideales, con lo cual su impedancia interna es igual a cero; por lo cual en el origen de la onda se tendrá un coeficiente de reflexión de:

$$K_0 = \frac{0 - Z_0}{0 + Z_0} = -1$$

Se analizan dos tipos de diagramas: el diagrama de tiempo y el diagrama espacial.

En el diagrama de tiempo se trata de representar las variaciones de voltaje y de corriente a través del tiempo, en un punto específico de la línea.

En el diagrama espacial se representan las variaciones de voltaje y de corriente a través de toda la línea pero en un determinado instante de tiempo.

3. El tercer caso se produce cuando la impedancia -

de carga Z_D representa otra línea de transmisión.

Observando la figura, 4.2.4. notamos que antes de llegar al punto a, se ve la impedancia característica de la otra línea, Z_2 , como una carga, pero no existirá un consumo de energía, sino una transmisión de la misma.

Para este caso se tendrá que:

$$K = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{coeficiente de reflexión})$$

y el coeficiente de refracción o transmisión será:

$$K_t = 1 + K$$

$$K_t = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Veremos en la figura 4.2.5. el efecto de la incidencia de un pulso sobre dos líneas de transmisión de impedancias características diferentes.

Donde:

FIGURA 4.2.4.

DOS L/T UNA A CONTINUACION DE OTRA

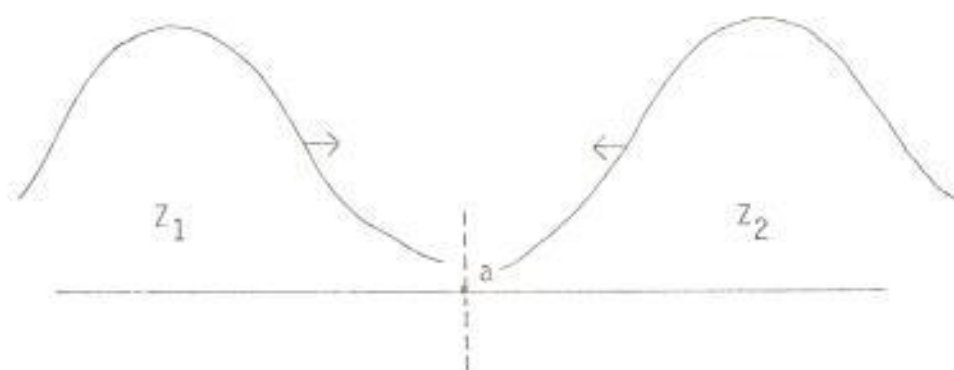
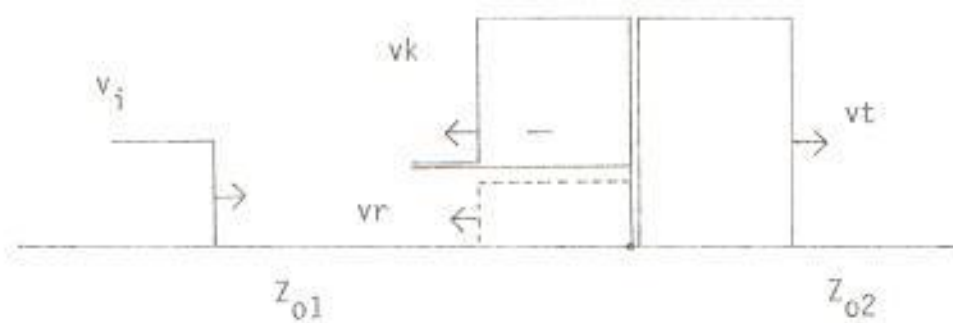


FIGURA 4.2.5.

INCIDENCIA DE UN PULSO SOBRE UNA L/T CON Z_0 DIFERENTES

V_i : onda incidente sobre la L/T de impedancia Z_{o1}

V_r : onda reflejada al llegar a la L/T de impedancia Z_{o2} .

V_t : onda incidente sobre la L/T de impedancia Z_{o2} .

V_R : onda resultante de la suma de las ondas incidente y reflejada.

Definiremos como coeficiente de reflexión a:

$$K_{11} = \frac{Z_{o2} - Z_{o1}}{Z_{o2} + Z_{o1}}$$

y como coeficiente de transmisión a:

$$K_{12} = 1 + K_{11}$$

$$K_{12} = \frac{2 Z_{o2}}{Z_{o2} + Z_{o1}}$$

Casos especiales :

Cuando la línea de transmisión de impedancia característica Z_{o2} está abierta, entonces $Z_{o2} = \infty$ y el coeficiente

ficiente de reflexión:

$$K_{11} = \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}} = \frac{1 - \frac{Z_{01}}{Z_{02}}}{1 + \frac{Z_{01}}{Z_{02}}} = 1$$

Según lo cual se refleja una onda de la misma magnitud.

Y en cuanto al coeficiente de refracción:

$$K_{12} = \frac{2Z_{02}}{Z_{02} + Z_{01}} = \frac{2}{1 + \frac{Z_{01}}{Z_{02}}} = 2$$

La onda reflejada total será de doble magnitud.

Cuando la línea de transmisión de impedancia característica Z_{02} es un cortocircuito:

$$Z_{02} = 0 ; \text{ luego } K_{11} = \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{02} + Z_{01}} = -1.$$

El valor obtenido nos indica que se refleja una onda

de igual magnitud, pero de sentido opuesto.

El coeficiente de refracción es:

$$K_{12} = \frac{2Z_{02}}{Z_{02} + Z_{01}} = 0$$

Lo que nos indica que no se tiene onda refractada alguna, lo cual era de esperarse.

Es necesario acotar que en éste análisis, la primera onda incidente y la primera onda reflejada son las más importantes, estas son:

$$v(x,t) = v(0,t - \frac{x}{u}) + Kv(0,t + \frac{x-2D}{u})$$

$$i(x,t) = \frac{1}{Z_0} v(0,t - \frac{x}{u}) + Kv(0,t + \frac{x-2D}{u})$$

4.3. ANALISIS PRACTICO EN EL SIMULADOR

4.3.1. Ejemplo Escogido

Utilizaremos una línea tipo π de reactancia

$x = 0.08$ pu y capacitancia $c = 0.001$ pu. Y se utilizarán tres secciones de línea. El diagrama es el de la figura 4.3.1.

4.3.2. Preparación para su estudio en el Simulador

El diagrama anterior se realizó físicamente en el simulador utilizando como fuente de voltaje a un generador de señales de amplitud y frecuencia variable.

El diagrama utilizado en el simulador fue el de la figura 4.3.2.

4.3.3. Energización del Simulador y obtención de resultados

Se realizaron tres pruebas, la primera fue con la impedancia de carga en circuito abierto, $Z_D = \infty$, donde se obtuvo que con un voltaje incidente de forma cuadrada y de una magnitud de 0,1 voltios, la onda de voltaje resultante tuvo una magnitud de 0,19 voltios,

FIGURA N° 4.3.1.

DIAGRAMA EJEMPLO PARA LA PRUEBA DE TRANSIENTES

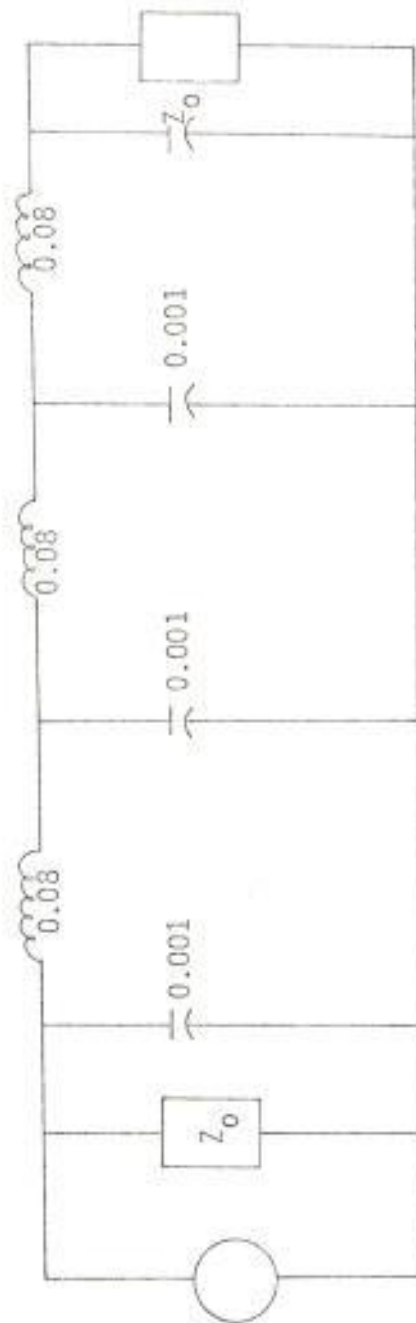
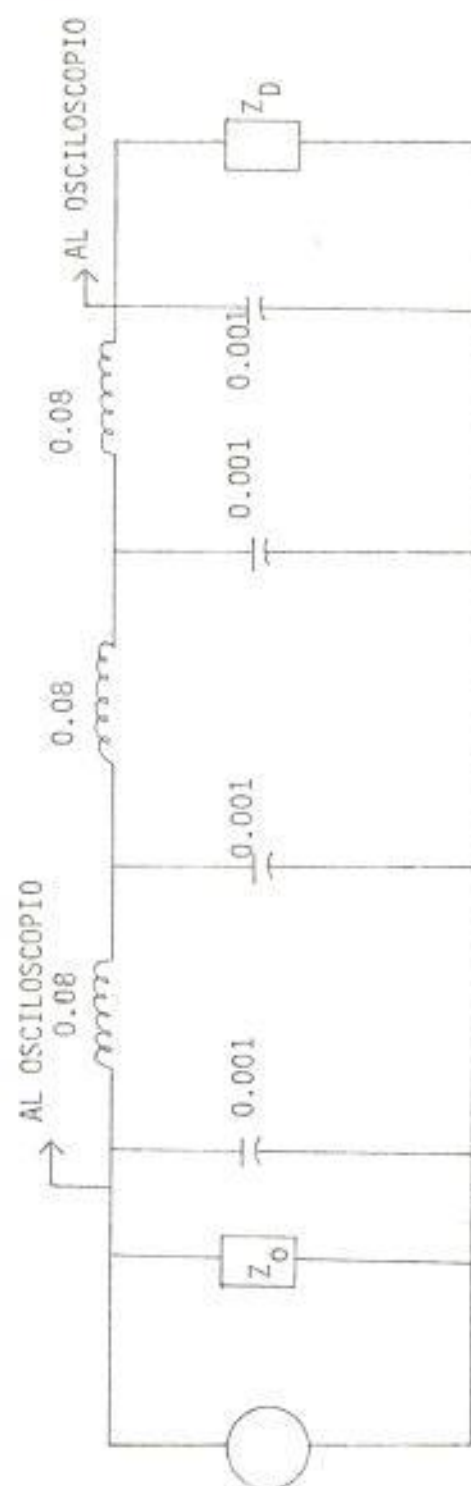


FIGURA Nº 4.3.2.

DIAGRAMA A CONSTRUIR EN EL SIMULADOR



partiendo la onda incidente en $t=$ cero segundos, y sumándose con la reflejada en $t = 0,32$ (mseg).

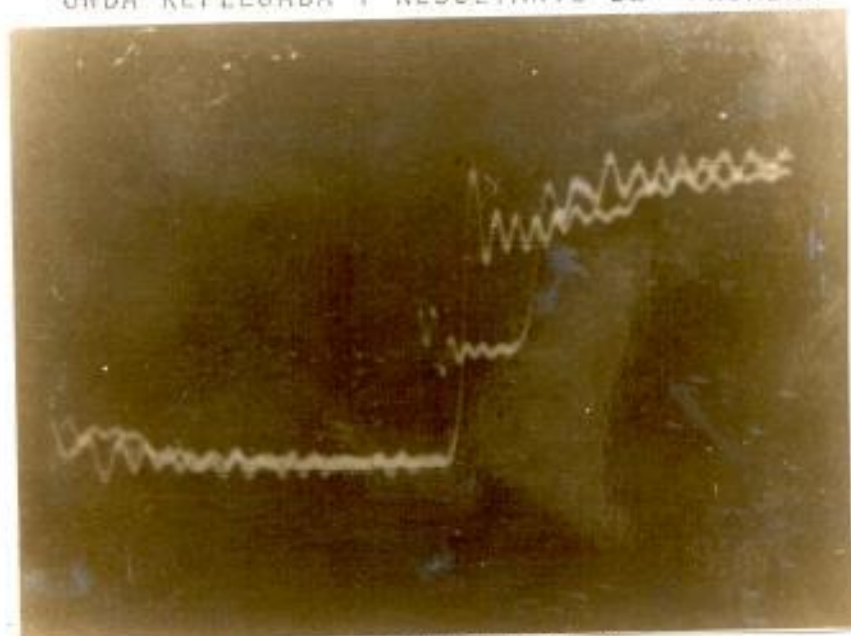
Como lo muestran la onda incidente, la onda reflejada y la onda resultante de voltaje, la segunda fotografía muestra la onda resultante de voltaje solamente.

En la segunda prueba se utilizó como carga la impedancia característica de la línea, notándose que la misma onda que incide en la carga, es la que se refleja debido a que toda la energía electromagnética de la onda se consume en la impedancia característica de la línea.

La tercera prueba se realizó colocando un cortocircuito como carga de la línea, dando como resultado una onda reflejada de igual magnitud de voltaje pero de signo contrario. con lo que la onda resultante fue de voltaje cero.

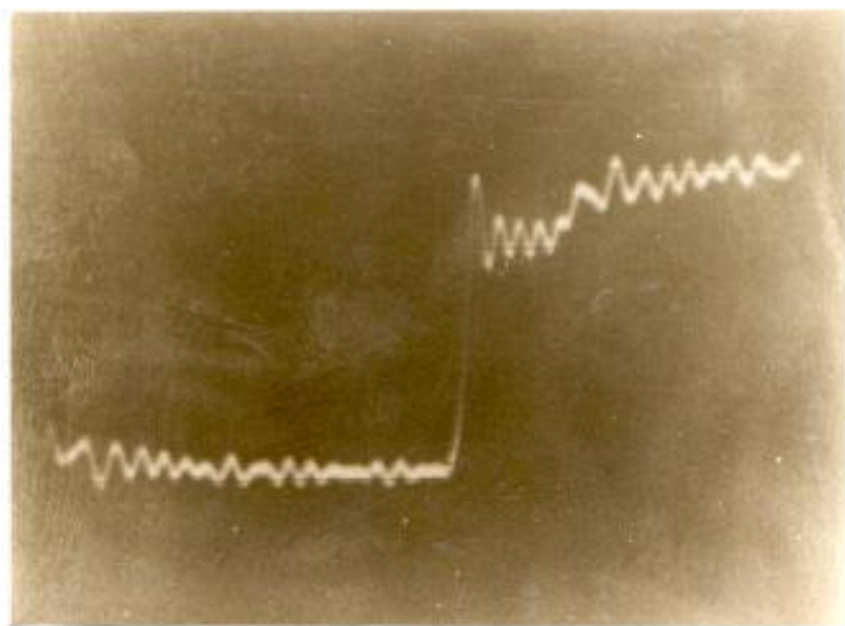
FOTOGRAFIA 1.

ONDA REFLEJADA Y RESULTANTE DE PRIMERA PRUEBA



FOTOGRAFIA 2.

ONDA RESULTANTE DE PRIMERA PRUEBA



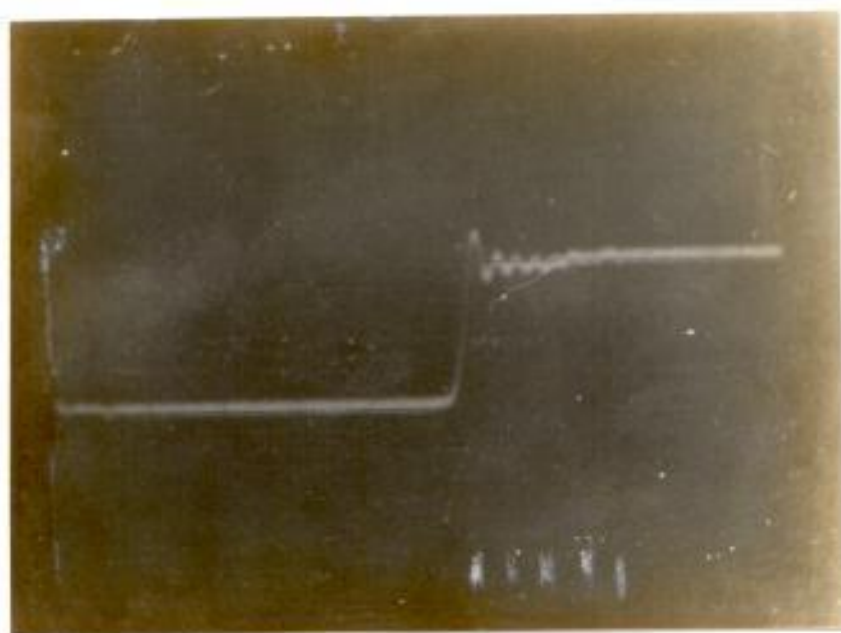
FOTOGRAFIA 3.

ONDA INCIDENTE, REFLEJADA Y RESULTANTE DE SEGUNDA PRUEBA



FOTOGRAFIA 4.

ONDA RESULTANTE DE SEGUNDA PRUEBA



4.4. COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SIMULADOR CON LOS DEL ANALISIS TEORICO

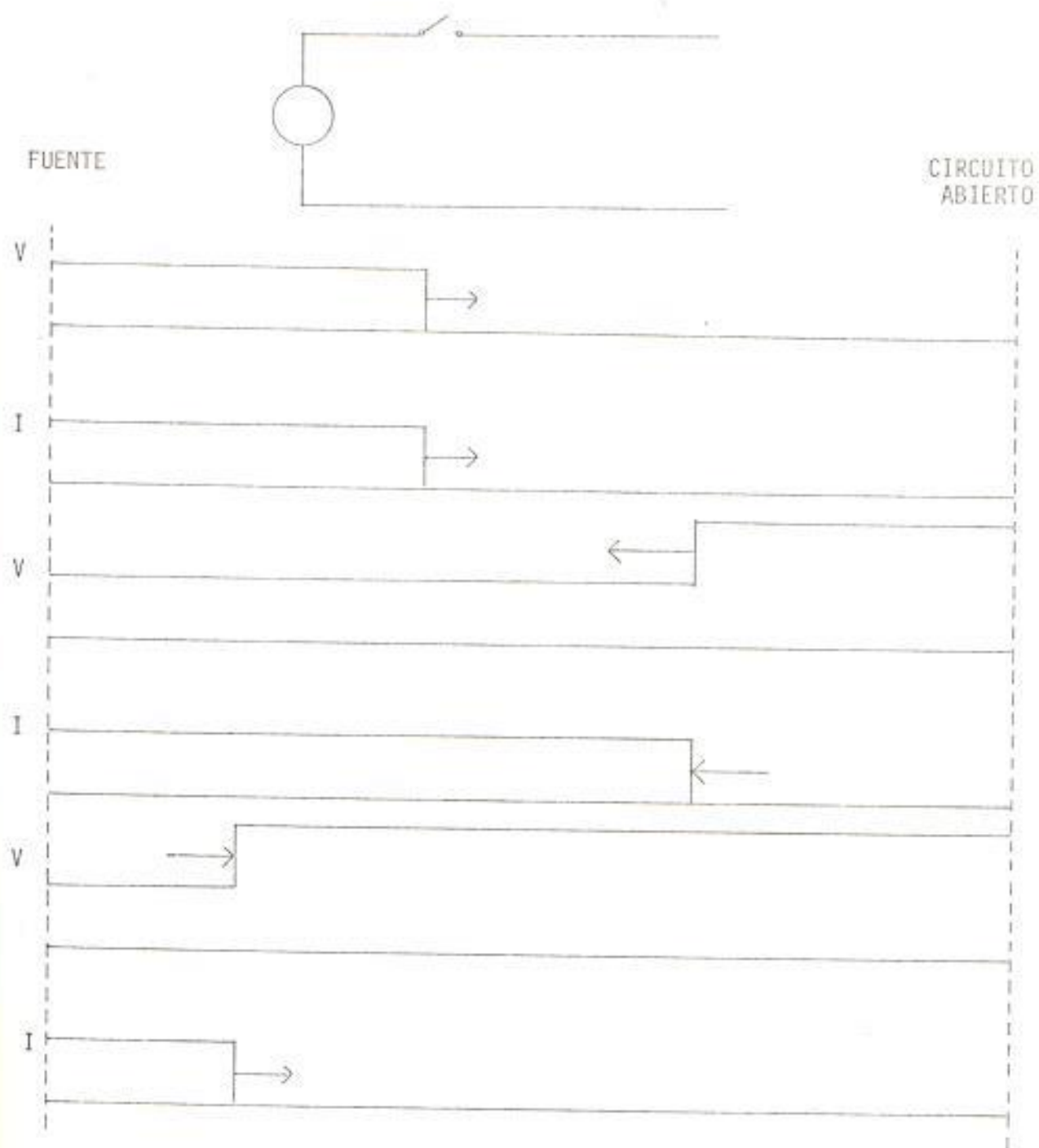
En el caso del circuito abierto, cuando la impedancia de carga Z_0 es infinita, al final de una línea de transmisión, ocurre que la corriente en dicho punto será cero todas las veces; así cuando una onda de corriente de amplitud positiva llega al punto de circuito abierto, una onda de corriente de amplitud negativa se inicia a la vez para satisfacer la condición límite. Esta viaja hacia la fuente en compañía de una onda de voltaje de amplitud positiva.

Una onda de corriente de amplitud negativa incidente en el circuito abierto sería reflejada como una onda de amplitud positiva y asociada con una onda de voltaje de amplitud negativa.

Lo que ocurre cuando una línea en circuito abierto es energizada desde una fuente de V voltios, se muestra en la figura 4.4.1.

FIGURA N° 4.4.1.

ONDAS QUE APARECEN EN UNA LINEA EN CIRCUITO ABIERTO AL INTRODUCIR UNA SEÑAL ESCALON.



En esta situación la energía magnética asociada con la corriente desaparece cuando la corriente es reducida a cero en circuito abierto. Dicha energía reaparece como energía eléctrica, la que a su vez se manifiesta al doblarse el voltaje.

Si el tiempo de viaje de la onda a través de la línea es T segundos, por el tiempo, las ondas iniciales de voltaje y de corriente alcanzan el terminal remoto, y una cantidad de energía VIT joules será enviada a la línea desde la fuente. La mitad de ésta residirá en el campo eléctrico y la otra mitad en el campo magnético, T segundos después, una cantidad de energía de $2VIT$ joules serán impartidos a la línea, pero ahora todo estará en el campo eléctrico, de tal manera que se tiene ahora cuatro veces la energía en el campo eléctrico que la que había en el tiempo T , el voltaje a través de la línea será dos veces más elevado, ya que la energía varía directamente con el cuadrado del voltaje. Los transientes de voltaje pueden tener efectos muy destructivos en el equipo que está en el terminal de la línea, ya que se está doblando la potencia de la onda.

Cuando la impedancia de carga fue igual a la impedancia característica de la línea, no existía onda resultante reflejada, esto es porque la onda incidente fue completamente absorbida por la carga esto en realidad es de mínimo significado práctico - en circuitos de potencia pero es muy importante - en circuitos de comunicación y en circuitos de medición.

En el caso de cortocircuito, la onda de voltaje incidente es cancelada por la onda reflejada ya que son de la misma magnitud pero de signo contrario, y la onda incidente de corriente se ve aumentada por la onda reflejada al doble de su magnitud.

El patrón de estos eventos puede ser explicado en términos de energía como en el caso del circuito - abierto.

En estas pruebas no se obtuvo fielmente la onda enviada por el generador de señales, esto se debe a que en el análisis teórico se tomó en cuenta condiciones ideales, es decir que no existan pérdidas, y

que la impedancia interna de la fuente sea cero. Cuando en realidad hay una distorsión de la onda debido a la configuración de la línea y a la no existencia de las condiciones ideales mencionadas anteriormente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La técnica utilizada con el simulador tiene una ventaja abrumadora sobre el método del computador digital en la enseñanza de los estudiantes de Sistemas de Potencia, ya que proporciona una experiencia directa acerca del modo en que trabaja un sistema de potencia.

Cuando se utiliza el simulador, el operador está en control del sistema de potencia y será capaz de hallar diferentes soluciones a un problema de diseño, ya que todos los parámetros son directamente controlables.

Un simulador puede proporcionar una experiencia invaluable para estudiantes de ingeniería de sistemas de potencia, pero debe ser visto como algo complementario al análisis por medio de un computador digital y no como un reemplazo de éste.

De esta manera, un simulador da un control inmediato y directo, no sólo de los parámetros, sino también sobre la estructura de la red, y esto, combinado con la respuesta

inmediata de los instrumentos, proporciona una excelente herramienta mental, para ayudar al diseño de un sistema y a su entendimiento.

El uso del simulador puede extenderse para otro tipo de estudios, pero ninguno de éstos sería tan completo como lo es el estudio del flujo de carga.

Se podría realizar un estudio de fallas, sean éstas simétricas o asimétricas, pero nos veríamos limitados por la máxima corriente que debe circular por los aparatos de medición, la cual es de un valor de dos por unidad; y al realizar cualquier tipo de falla, se deberá hacer un cálculo teórico antes de ejecutarla en el simulador, a fin de observar si la corriente de cortocircuito no sobrepasa el valor límite antes mencionado, con la finalidad de limitar el valor de la corriente de falla, a un valor - permisible, luego de este comentario se hace notoria la no utilización en la práctica del simulador para estudios de cortocircuito.

De la misma forma se puede realizar estudios de condiciones transientes, cosa que hemos realizado, pero en cuan-

to a variedad y complejidad de sistemas, para su análisis es mucho más positivo el uso del computador digital, ya que nos dá mayor información que lo que se pueda construir con el simulador, debido a las limitaciones en cuanto a capacidad de éste último.

La utilidad del simulador es de esta manera eminentemente didáctica y debe ser utilizado con propósitos de instrucción dirigidos hacia estudiantes que comienzan el estudio de los sistemas de potencia.

BIBLIOGRAFIA

1. STAGG, G.W., AND A.H. EL-ABIAD: "Computer Methods in Power Systems Analysis", McGraw Hill Book Company, New York, 1968.
2. STEVENSON, W.D.: "Elements of Power Systems Analysis", - McGraw Hill, Inc. USA, 1975.
3. WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION: "Electrical Transmission and Distribution", reference Book, East Pittsburg, Pennsylvania, 1964.
4. PETERSON - DOVER: "Transient in Power Systems".
5. ELGERD, O.: "Electric Energy Systems Theory: An Introduction" Tata McGraw Hill Publishing Company Ltd., New - Delhi, 1971.
6. ALLAN GREENWOOD: "Electrical Transients in Power Systems" John Wiley & Sons, Inc. USA., 1971.

7. SCHAUM: "Líneas de Transmisión".

8. ALVIN H. KNABLE: "Electrical Power Systems Engineering".