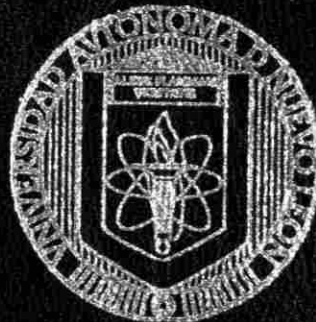


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



UTILIZACION DE LA COMPUTADORA COMO
HERRAMIENTA EN EL ANALISIS Y DISEÑO
DE REDES ELECTRICAS

POR
ING. ALFREDO GONZALEZ FUENTEVILLA

TESIS
EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS ELECTRICOS
DE POTENCIA

MONTERREY, N. L.

MARZO DE 1999

Á. G. F.

UTILIZACIÓN DE LA COMPUTADORA COMO
HERRAMIENTA EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO
DE REDES ELÉCTRICAS

TM
Z5853
.M2
PIME
1999
G6



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



UTILIZACION DE LA COMPUTADORA COMO
HERRAMIENTA EN EL ANALISIS Y DISEÑO
DE REDES ELECTRICAS

POR

ING. ALFREDO GONZALEZ FUENTEVILLA

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
TESIS

EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS ELECTRICOS
DE POTENCIA

MONTERREY, N. L.

MARZO DE 1999

0131-60760

TM
25853
.M2
FIME
1999
56



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



**FONDO
TESIS**

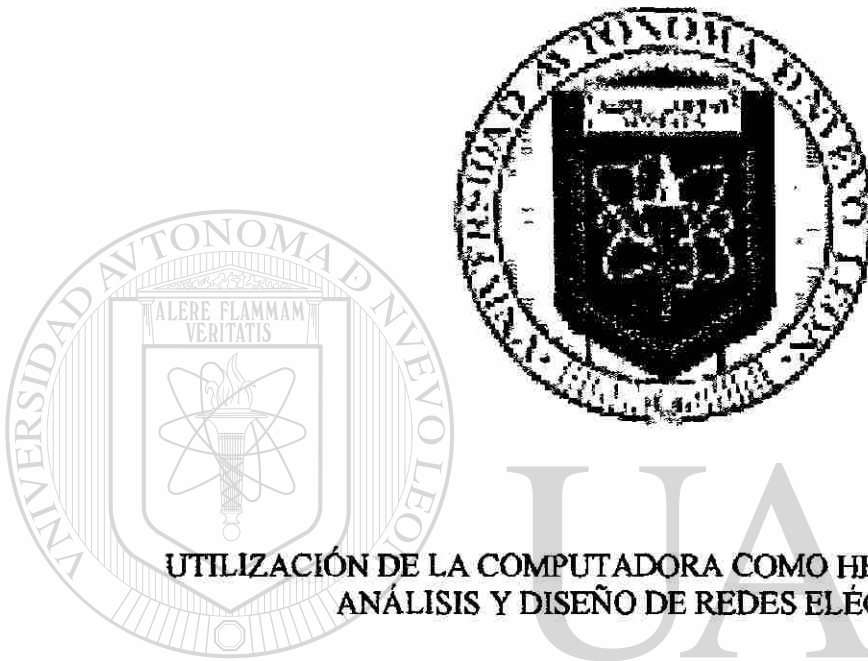
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



UTILIZACIÓN DE LA COMPUTADORA COMO HERRAMIENTA EN EL
ANÁLISIS Y DISEÑO DE REDES ELÉCTRICAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

POR

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
ING. ALFREDO GONZÁLEZ FUENTEVILLA

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

MONTERREY, N. L., ENERO DE 1999.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



**FONDO
TESIS**

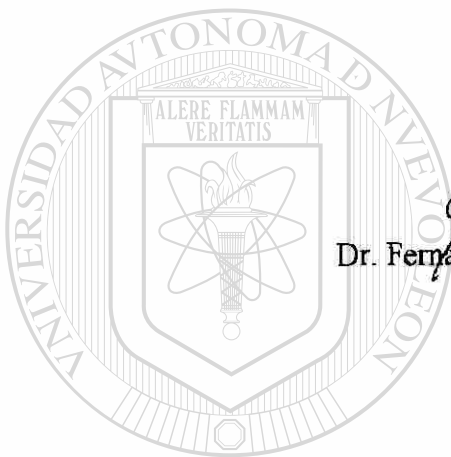
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Utilización de la Computadora como Herramienta en el Análisis y Diseño de Redes Eléctricas" realizada por el Ing. Alfredo González Fuentevilla sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería con especialidad en Sistemas Eléctricos de Potencia.

El comité de Tesis



Dr. Fernando Manuel Betancourt Ramírez

Coasesor

M. C. Enrique Betancourt Ramírez

Coasesor

M. C. Evelio González Flores

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

M. C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Post-grado

San Nicolás de los Garza, N. L., Enero de 1999.

PROLOGO

Esta Tesis sobre la Utilización de la Computadora como Herramienta en el Análisis y Diseño de Redes Eléctricas tiene la finalidad de presentar en forma clara y objetiva los conceptos de aplicación en forma practica de los paquetes computacionales tales como el Pspice, MatLab y EMTP, de tal forma que a algún usuario se le facilite el manejo de estos poderosos software de computación numérica y análisis de datos al mismo tiempo que van conociendo una herramienta que les resultará muy valiosa a lo largo de su carrera.

En general, se han tratado los temas superficialmente de los diferentes capítulos, ya que el objetivo que se persigue en esta Tesis es presentar en forma didáctica el estudio de la teoría de los circuitos eléctricos, electrónicos y de control, haciendo énfasis en la solución de los problemas por medio de los paquetes computacionales. Resulta ser de gran utilidad para los estudiantes de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y Académicos en el modelado de los circuitos y redes de distribución. Al final se presenta una bibliografía en la que se enlistan las obras que el lector pueda consultar para ampliar sus conocimientos en determinados temas.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Cada capítulo cuenta con numerosos ejemplos resueltos paso a paso y finaliza con las respuestas de los mismos. El apéndice incluye material antecedente sin interrumpir el flujo básico de la narrativa. También se proporciona un disket en donde estan almacenados los archivos de los programas que se corrieron en los distintos paquetes.

INDICE

PROLOGO i

SINTESIS xii

CAPITULO 0.

INTRODUCCIÓN

0.1	Objetivo de la Tesis.	1
0.2	Justificación.	2
0.3	Metodología.	3

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

CAPÍTULO 1.

ANÁLISIS DE CIRCUITOS EN FORMA ANALÓGICA.

INTRODUCCIÓN.		4
1.1	Análisis de Mallas y Nodos.	5
1.2	Análisis de Circuitos Trifásicos.	8
1.3	Componentes Simétricas.	13
1.4	Representación del Generador.	16
1.5	Representación del Transformador.	21
1.6	Representación de las Líneas de Transmisión.	27
1.7	El Diagrama Unifilar.	28
1.8	Diagrama de Reactancias.	30

1.9	Diagrama de Secuencias.	31
1.10	Cantidades en Por Unidad (PU).	33
1.11	Fallas Asimétricas.	39
1.11.1	Falla de Línea a Tierra.	40
1.11.2	Falla de Línea a Línea.	41
1.11.3	Falla de Doble Línea a Tierra.	43

CAPÍTULO 2.

CODIFICACIÓN DE CIRCUITOS EN ESTADO ESTABLE EN PSPICE.

INTRODUCCIÓN.	54
2.1 Fasor y Diagrama Fasorial.	55
2.2 Guía de Referencia del Pspice.	56
2.3 Como Entrar al Pspice.	58
2.4 Codificación como Diagrama Unifilar.	63

CAPÍTULO 3.

ANÁLISIS DE CIRCUITOS TRANSITORIOS.

3.1 El Circuito RLC como de Segundo Orden.	87
3.1.1 Caso Sobreamortiguado.	89
3.1.2 Caso Subamortiguado.	89
3.1.3 Caso Críticamente Amortiguado.	90
3.1.4 Respuesta Forzada.	91
3.2 Transitorio en el Generador.	92
3.3 Simulación de Estado Transitorio de un Circuito RLC.	98
3.4 Guía de Referencia del EMTP.	114

CAPÍTULO 4.

FORMULACIÓN DE MATRICES PARA EL CÁLCULO UTILIZANDO MATLAB.

INTRODUCCIÓN.	143
4.1 Formación de Algoritmos para Circuitos Eléctricos.	144
4.2 Formación del Algoritmo Ybus.	152
4.3 Formación de Algoritmo para Sistemas Lineales.	166

CAPÍTULO 5.

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA.

INTRODUCCIÓN	177
5.1 PROGRAMA DE CORTO CIRCUITO.	178
5.2 PROGRAMA DE FLUJO DE POTENCIA.	191
5.3 PROGRAMA DE ESTABILIDAD.	201

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 CONCLUSIONES.	207
6.2 APORTACIONES.	208
6.3 RECOMENDACIONES.	209

APENDICES.

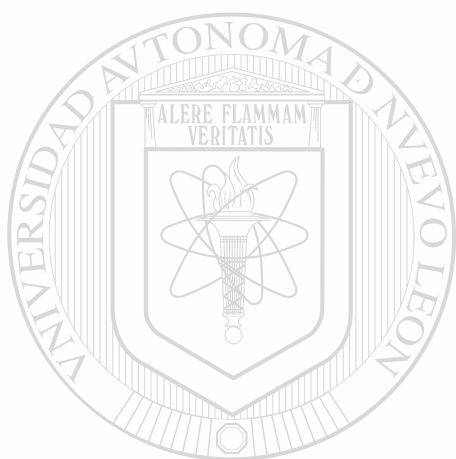
A.1.1 NUMEROS COMPLEJOS.	210
A.1.2 TRANSFORMACIONES ESTRELLA – DELTA.	211
A.1.3 EL OPERADOR a .	214

REFERENCIAS.

216

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO.

218



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

1.1	(a) Circuito serie con dos impedancias; (b) Circuito equivalente.	5
1.2	(a) Circuito paralelo con dos impedancias; (b) Circuito equivalente.	7
1.3	Fuente conectada en estrella.	9
1.4	Secuencias de Fase; (a) Positiva, y (b) Negativa.	9
1.5	Sistema de cuatro hilos conectada en estrella.	10
1.6	Diagrama de un circuito conectado en delta.	11
1.7	Diagrama fasorial que muestra voltajes de fase y de línea.	12
1.8	Componentes simétricas de tres fasores desbalanceados.	13
1.9	Adición gráfica de las componentes mostradas en la Fig. 1.8.	13
1.10	(a) Representación gráfica de una máquina síncrona con rotor cilíndrico; (b) Desplazamiento de fases.	17
1.11	Circuito de una máquina síncrona con corriente de campo constante.	18
1.12	Circuitos de secuencia de una máquina síncrona.	21
1.13	(a) Circuito equivalente exacto de un transformador de dos devanados; (b) Circuito aproximado de un transformador de dos devanados.	21
1.14	Otras aproximaciones para los transformadores de dos devanados.	22
1.15	Tres transformadores de tres devanados, con el devanado 1 conectado en Estrella a través de Zn1 y devanado 2 y 3 en circuito abierto.	23
1.16	Circuitos de secuencia del transformador correspondiendo a conexiones Estrella aterrizada.	24
1.17	Diagrama esquemático de un transformador de tres devanados; (b) Circuito Equivalente aproximado del transformador de tres devanados.	25
1.18	Prueba de corto circuito en un transformador de tres devanados.	26
1.19	(a) Diagrama esquemático del autotransformador; (b) Circuito equivalente del autotransformador.	27
1.20	Circuitos equivalentes de una línea de transmisión.	28
1.21	Símbolo de aparatos y equipos utilizado más comúnmente en redes.	29

1.22	Diagrama unifilar de un sistema eléctrico de potencia.	29
1.23	Circuitos equivalentes para el diagrama de reactancias.	30
1.24	Circuitos equivalentes de secuencia cero de transformadores trifásicos.	32
1.25	Diagrama unifilar para el problema 1.	35
1.26	Diagrama de secuencia positiva del circuito de la Fig. 1.25.	38
1.27	Diagrama de secuencia negativa del circuito de la fig. 1.25.	38
1.28	Diagrama de secuencia cero del circuito de la Fig. 1.25.	38
1.29	Diagrama del circuito para una falla de línea a tierra.	41
1.30	Diagrama de secuencias (+), (-) y (0) para una falla de línea a tierra.	41
1.31	Diagrama del circuito para una falla de doble línea.	42
1.32	Circuitos de secuencia (+) y (-).	42
1.33	Circuito para una falla de doble línea a tierra.	44
1.34	Conexiones de las redes de secuencias (+), (-) y (0).	44
1.35	Sistema de potencia para calcular la falla en el Bus 1.	46
1.36	Diagrama de reactancias del circuito de la Fig. 1.35.	48
1.37	Reducción de la red de la Fig. 1.36.	49
1.38	Diagrama simplificado de la Fig. 1.37.	50
1.39	Diagrama simplificado de la Fig. 1.38.	50
1.40	Diagrama simplificado de la Fig. 1.39.	51
1.41	Diagrama simplificado de la Fig. 1.40.	52
1.42	Diagrama simplificado de la Fig. 1.41.	52
1.43	Simplificaciones y Circuito equivalente de la Fig. 1.36.	53

CAPITULO 2

2.1	Circuito de fasores RLC en serie.	55
2.2	Diagramas fasoriales de la Fig. 2.1.	56
2.3	Pantalla de entrada de Spice.	58
2.4	Pantalla activado current file para nombrar el archivo Spice.	58
2.5	Pantalla en donde se codificará el circuito.	58
2.6	Circuito para el ejemplo 1 con Pspice.	63

2.7	Circuito para analizarlo con la función Sweep.	65
2.8	Pantalla para la selección de los voltajes de barrido.	67
2.9	Representación gráfica del voltaje V(2) seleccionado en Spice.	68
2.10	Representación gráfica de todos los voltajes seleccionados en Spice.	69
2.11	Pantalla para salir del graficador de Spice.	69
2.12	Circuito para análisis de CA.	70
2.13	Gráfica de la variación del voltaje V1 con respecto a la frecuencia.	73
2.14	Gráfica de la variación de I(C1) con respecto a la frecuencia.	74
2.15	Variación de IL e IC con respecto a la frecuencia.	74
2.16	Circuito trifásico para su análisis en estado estable.	75
2.17	Circuito con acoplamiento magnético.	78
2.18	Filtro pasabanda con modelo de Opamp dependiente de la frecuencia.	80
2.19	Gráfica del voltaje de entrada y del voltaje del Opamp.	83
2.20	Gráfica del voltaje de salida del Opamp.	83
2.21	Gráfica de las corrientes de entrada del Opamp.	84
2.22	Circuito para graficar el diagrama de Bode.	84
2.23	Gráfica de un filtro pasa alta.	86

CAPÍTULO 3

3.1	Circuito RLC de segundo orden.	88
3.2	Gráficas de las respuestas de un circuito de segundo orden.	90
3.3	Circuito RL para obtener la ecuación de corriente instantánea.	92
3.4	Gráfica de la componente transitoria de la corriente como una función de Tiempo.	97
3.5	(a) Circuito para el análisis transitorio, (b) Circuito auxiliar.	98
3.6	Gráfica de I(L) para $t > 0$ de la Fig. 3.5.	101
3.7	Circuito serie RLC para el análisis de la variación de la resistencia.	102
3.8	Pantalla en donde se nos presenta una lista de la variación de R para el Análisis transitorio.	103
3.9	Gráfica de la variación de R en un circuito RLC.	103

3.10	Gráfica del voltaje y la corriente en C para el caso sobreamortiguado.	105
3.11	Gráfica del voltaje y la corriente en C para el caso subamortiguado.	106
3.12	Idem al anterior pero con $R=0.25\Omega$.	106
3.13	Idem al anterior pero para el caso críticamente amortiguado.	107
3.14	Diagrama de un Mosfet de canal inducido.	108
3.14A	Gráfica de V_{out} con $R_L=1000MEG$.	111
3.14B	Gráfica de V_{out} con $R_L=5K$.	112
3.15A	Gráfica de las corrientes de dren +.	113
3.15B	Gráfica de las corrientes de dren -.	113
3.16	Gráfica de la fuente de voltaje y de las caídas de tensión en R y L.	125
3.17	Gráfica de la corriente transitoria.	125
3.18	Gráfica del voltaje transitorio en L.	125
3.19	Gráfica de estado estable del voltaje y corriente (5 ciclos).	125
3.20	Gráfica de la corriente en una línea de transmisión tipo-1.	129
3.21A	Gráfica del voltaje de la fuente y del voltaje al final de la línea.	129
3.21B	Zoom de la gráfica anterior.	129
3.22A	Corriente al principio de la línea de transmisión.	129
3.22B	Zoom de la gráfica anterior.	129
3.23	Gráfica de la corriente en una línea de transmisión II.	133
3.24A	Gráfica del voltaje de la fuente y del voltaje al final de la línea.	133
3.24B	Zoom de la gráfica anterior.	133
3.25A	Gráfica de la corriente al final de la línea de transmisión.	133
3.25B	Zoom de la gráfica anterior.	133
3.26	Gráfica V-I ($\pm 10KA$).	136
3.27	Gráfica del voltaje y corriente respecto al tiempo.	136
3.28	Gráfica de la corriente de disparo del apartarrayos.	136
3.29	Gráfica de la corriente de excitación.	141
3.30	Medición de ZHX.	141
3.31	Medición de ZHY.	141
3.32	Medición de ZXY.	141
3.33	Corrida a 0° de IAB.	142

3.34	Corrida de 0° de IAH.	142
3.35	Voltajes A, B y C en X.	142
3.36	Voltajes A, B en Y, con Vc aterrizado.	142
3.37	Corrida a 15° de IABC en H.	142
3.38	Corrientes A y B a 15° en Y, con C aterrizado.	142
3.39	Voltajes A, B y C en X, a 15°.	142
3.40	Voltajes A, B en Y a 15°, con C aterrizado.	142

CAPÍTULO 4.

4.1	Diagrama de un circuito DC.	144
4.2	Diagrama para el ejemplo 2 con MatLab.	146
4.3	Diagrama para encontrar los fasores de las corrientes.	148
4.4	Gráficas de voltajes, corrientes y potencia con Matlab.	151
4.5	Diagrama unifilar para formar la matriz jacobiana.	154
4.6	Diagrama esquemático para un estudio de carga.	156
4.7	Representación de una familia polinomial.	167

CAPÍTULO 5.

5.1	Diagrama del sistema de potencia para el cálculo de falla	179
-----	---	-----

APENDICES.

A1.1	Plano complejo.	211
A1.2	(a) Conexión Y; (b) Conexión Δ .	213
A1.3	Conexiones superpuestas para la transformación Y- Δ .	213

LISTA DE TABLAS.

CAPÍTULO 3.

3.1	Soluciones para Funciones Forzadas.	91
3.2	Propiedades de la Transformada de Laplace.	93
3.3	Transformada de Laplace.	93
3.4	Estructura del Archivo de Entrada del EMTP.	115
3.5	Programa Auxiliar del EMTP.	119

CAPÍTULO 5.

5.1	Datos de la máquina síncrona.	179
5.2	Datos de las líneas de transmisión.	179
5.3	Datos del transformador.	180

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



SINTESIS

UTILIAZCIÓN DE LA COMPUTADORA COMO HERRAMIENTA EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE REDES ELÉCTRICAS.

El avance tecnológico de nuestra época ha revolucionado la teoría de los circuitos eléctricos y electrónicos, desde que Alejandro Volta invento la batería eléctrica para producir Corriente en 1800, desde entonces, grandes hombres como André Marie Ampere, Georg Simon Ohm, Gustav Robert Kirchhoff, Michael Faraday, Joseph Henry, Thomas Alva Edison, James Joule, Nikola Tesla, Pierre Simon Laplace, Heinrich Rudolf Hertz, Jean Baptiste Fourier, James Clark Maxwell, entre otros, contribuyeron con su granito de arena en la experimentación y formulación de leyes y ecuaciones que hoy en día continuamos utilizando.

En la última década con el desarrollo de paquetes computacionales, estos han contribuido a minimizar el esfuerzo humano en todas las áreas del conocimiento, ya que la formulación de algoritmos para redes que, como los sistemas de potencia han crecido enormemente y continúan expandiéndose más con interconexiones entre otros sistemas, la planeación apropiada, la operación y el control de éstos sistemas de potencia, requieren de técnicas computacionales de las cuales se explicarán en ésta tesis, por medio de los paquetes computacionales que existen en el mercado, y que se utilizan para el análisis sistemático tanto de los sistemas de potencia, como de los circuitos eléctricos que se estudian en la carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

Iniciaremos la tesis con los conceptos básicos de los circuitos eléctricos en estado estable (capítulo 1), desarrollando las ecuaciones de los métodos de mallas y nodos en la

sección 1.1, así como sus arreglos matriciales que se utilizan en grandes sistemas eléctricos de potencia, en la sección 1.2 daremos una referencia genérica de los circuitos trifásicos equilibrados en estado estable, ya que se sigue con la misma formulación de ecuaciones en el desequilibrio del sistema. En la sección 1.3 iniciaremos con el estudio de las componentes simétricas, analizando el concepto del porqué tres sistemas equilibrados de vectores nos proporcionan un sistema desequilibrado de vectores, en las secciones 1.4, 1.5 y 1.6, desarrollamos los modelos para representar al generador, transformador y líneas de transmisión en base a sus componentes simétricas e introducimos el concepto de redes de secuencia, las cuales se analizan en la sección 1.7 como la representación del diagrama unifilar de un sistema de potencia, y en la sección 1.8 se analiza las interconexiones de las reactancias en un sistema de potencia en base a los elementos que intervienen en la interconexión, y estos valores son los que nos representa el diagrama de reactancias, para que en la sección 1.9 analicemos las redes de secuencia positiva, negativa y cero y su representación en el sistema de potencia, dando mayor énfasis a las conexiones de los transformadores dentro del sistema a analizar. En la sección 1.10, describiremos las fallas asimétricas en sus tres casos, como son las fallas de línea a tierra, falla de doble línea y de doble línea a tierra, con los cambios de base de un sistema al sistema por unidad, el cual nos representará los valores de reactancia, niveles de voltaje, etc., a valores indicativos dentro y a todo lo largo del sistema de potencia.

El capítulo 2, lo iniciaremos describiendo el concepto de fasor y diagrama fasorial, para que en la sección 2.2 iniciemos el manejo del paquete computacional Pspice, dando todas las referencias necesarias para la codificación de un sistema en estado estable, utilizando los diagramas unifilares y trifilares, como interpretar los resultado de voltaje y corriente en el sistema de potencia a base de los parámetros preestablecidos y dibujaremos las gráficas en estado estable en varios puntos del sistema.

El capítulo 3 inicia con el cálculo de transitorios en un circuito RLC en serie (ya que en paralelo se resuelve en una forma similar), para encontrar la ecuación de segundo

orden, describiendo los tres casos dependiendo de las raíces de la solución de la ecuación de segundo orden, las cuales pueden ser sobreamortiguado, subamortiguado y críticamente amortiguado, así como la respectiva respuesta forzada. En la sección 3.2 analizaremos el transitorio en el generador para encontrar su respuesta de corriente en el tiempo, ya que este es un tipo de falla especial (falla trifásica simétrica), y en la sección 3.3 analizaremos circuitos en estado transitorio con el paquete Pspice. En la sección 3.4 describiremos el manejo del paquete EMTP y continuaremos con la codificación del sistema de potencia y simularemos el estado transitorio en el generador, transformador y líneas de transmisión dibujando sus gráficas en dicho estado, haremos un análisis comparativo entre el paquete EMTP y Pspice en el cálculo de transitorios.

El capítulo 4, dedicado al paquete computacional MatLab, iniciaremos nuestra discusión formulando las matrices para el cálculo de voltajes, corrientes y potencias, en la sección 4.2 haremos una simulación del método de la matriz de admitancia de un sistema de potencia con tres iteraciones, formulando la matriz para el cálculo de flujo de potencia, en la sección 4.3 describiremos algoritmos para codificar sistemas lineales de potencia y control, en base a los datos suministrados, realizaremos el cálculo de estabilidad robusta en base a los parámetros del sistema, para que con los resultados aquí obtenidos, se pueda tener la idea de que si un sistema es robustamente estable, o si no lo es.

El capítulo 5 está dedicado a manejar y comprender el software de Sarma y Grover para el análisis de SEP, en 5.1 simulamos un SEP bajo condiciones de falla y realizamos la corrida del paquete para calcular una falla trifásica, en 5.2 dedicado al flujo de potencia, quien se debe de correr previo para la simulación de estabilidad transitoria del SEP.

Por último en el capítulo 6 tenemos las conclusiones y recomendaciones del análisis de las redes bajo simulaciones de los distintos paquetes computacionales.

Los apéndices de esta tesis nos auxilian a profundizar en los conceptos que, por la forma de ser tratados, es recomendable que se estudien, en el apéndice A tratamos los conceptos de números complejos que por lo general se estudian en un curso de álgebra lineal, así como el operador a que es otra forma de representar a los valores complejos pero con defasamiento de 120° , en fin, estos apéndices se utilizan para aclarar puntos importantes relativos a la formulación y resolución de ecuaciones algebraicas, así como los algoritmos que intervienen en la formulación y codificación de los paquetes computacionales.

Agradezco al Dr. Fernando Manuel Betancourt Ramirez, la asistencia y los consejos que me proporcionó en la elaboración de esta tesis, quien me ha guiado con sus valiosas apreciaciones, así como a mi colega y amigo Ing. Alfredo Puente Martinez quien dio con agrado su tiempo y esfuerzo cuando necesite su ayuda, consejo y sugerencias cuando inicié en la elaboración de la tesis. A todos mis compañeros, colegas y amigos a quienes el amor de los Dioses les hace ser Libres. Ing's. Alfredo Alavez Murillo, Humberto Arroyo, Adex Francisco González Valdez, Oscar Alejandro Reyes, Karina Azuara, Claudia Alina Madrigal, Evaristo Ramírez, Miguel Madrigal, Pedro Alor, Oscar Villalon, Javier Aguirre y Francisco Susteita.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN[®]
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 0

INTRODUCCIÓN

0.1. OBJETIVOS.

El objetivo de esta tesis es el de analizar circuitos eléctricos y electrónicos en los sistemas y redes eléctricas utilizando los paquetes computacionales existentes en el mercado para la computadora personal, dando énfasis a los siguientes puntos:

1.- Formulación de vector-matriz y soluciones de ecuaciones lineales invariante en el tiempo.

2.- Dar entendimiento a los conceptos del análisis de sistemas de potencia que se encuentran en el estudio y en la practica de la ingeniería eléctrica, así como a los fundamentos y principios básicos.

3.- El enfoque está dirigido a maestros y estudiantes de ingeniería eléctrica.

4.- Emplear la computadora en el estudio - aprendizaje y el diseño.

5.- Demostración de la resolución de problemas complejos con la ayuda de paquetes computacionales o software.

6.- Demostrar como el modelado conduce a la solución por computadora.

0.2.- JUSTIFICACIÓN.

Esta tesis ha sido escrita para suplir las necesidades en los programas académicos y proporcionar un texto para el curso universitario a nivel licenciatura, tomando en cuenta que el uso de las computadoras hoy en día en la vida profesional de cualquier persona, es una herramienta esencial en la resolución de tareas y problemas que, si se realizaran en la forma tradicional que significa muchas horas- hombres en el trabajo a realizar, nos ahorraría considerablemente el tiempo de la solución del problema a resolver.

Con base a lo anteriormente expuesto, y ya que el avance tecnológico nos hace cada día ser más competitivo, se cubren los fundamentos esenciales, métodos analíticos y normas en el contenido de esta tesis, tratando todos los tópicos a un nivel que no se requiere un conocimiento avanzado por parte del lector en el manejo de los paquetes computacionales que se aplican en la tesis.

0.3.- METODOLOGÍA.

Cada capítulo describe sustancialmente el paquete a utilizar, con un problema resuelto al finalizar el capítulo con un alto nivel de dificultad. Las ecuaciones enmarcadas son importantes, ya que una comprensión clara depende mucho de ellas, y así se le da mayor énfasis.

Los apéndices incluyen material que contiene antecedentes básicos para aclarar puntos importantes relativos a la formación y resolución de ecuaciones algebraicas simultaneas del tipo que se necesitan en el análisis de circuitos.

Los software han llegado a ser una "norma oficial" junto con la ayuda de la computadora en el análisis y simulación de circuitos. Existen dos razones en el manejo

de software, en ganar experiencia con circuitos demasiados grandes para justificar el nivel a menudo catastrófico del esfuerzo computacional que se requiere para extraer simplemente ciertas respuestas (que en un laboratorio podría ser incosteable), y en el diseño. En diseño los paquetes computacionales permiten que el usuario trate de usar sus propias ideas de cómo resolver problemas de circuitos reales y cómo pueden ser configurados.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 1.

ANÁLISIS DE CIRCUITOS EN ESTADO ESTABLE EN FORMA ANALÓGICA.



UANL

INTRODUCCIÓN.

Un circuito eléctrico se puede describir con base a los elementos que contiene y como se interconectan a las fuentes de voltaje o corriente. Los elementos de un circuito se componen de resistencias, inductancias y capacitancias. Para determinar los voltajes y corrientes a lo largo de toda la red, existen diversos métodos de análisis, tales como análisis de mallas, análisis de nodos, equivalentes de Thevenin y Norton, división de voltaje o corriente, superposición, reciprocidad, transferencia máxima de potencia, etc.

Los circuitos se subdividen en monofásicos y trifásicos, siendo el más utilizado este último debido a razones de economía y eficiencia, y por esta razón, casi toda la energía eléctrica es producida por fuentes trifásicas a 50 o 60 Hz. , siendo esta última la frecuencia convencional en nuestro País.

Iniciaremos la presente tesis describiendo los sistemas monofásicos, pero nos concentraremos en los circuitos trifásicos que es lo más común en los sistemas eléctricos de potencia y en forma balanceada para la utilización del paquete Pspice, dejando la forma desbalanceada de un sistema de potencia al calculo de fallas.

1.1. - ANÁLISIS DE MALLAS Y NODOS.

Para el análisis de una red por medio de mallas, esta en base a la primera Ley de Kirchhoff [1], [2], [3], la cual dice que la suma de los voltajes a través de una malla o lazo cerrado debe de ser igual a cero, o en otras palabras, la suma de las subidas de voltajes debe de ser igual a la suma de las caídas de voltaje. Por el ejemplo en el circuito de la Fig. 1.1, observamos una fuente de voltaje en serie con dos impedancias, y tomando en cuenta que la corriente es la misma a lo largo del circuito tenemos:

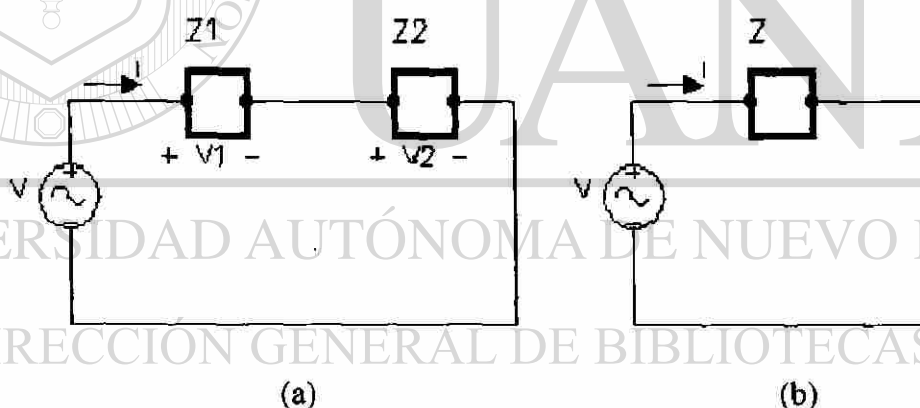


Fig. 1.1.- (a) Circuito serie con dos impedancias; (b) Circuito equivalente.

$$V - V_1 - V_2 = 0 \Rightarrow V = V_1 + V_2$$

por la Ley de Ohm sabemos que: $V = IZ$, sustituyendo esta ecuación en la anterior tenemos:

$$V = IZ_1 + IZ_2 \Rightarrow V = I(Z_1 + Z_2)$$

con lo que podemos calcular la corriente que circula en el circuito, despejando, por lo tanto

$$I = V/Z \quad (1.1)$$

$$\therefore Z = Z_1 + Z_2$$

como la impedancia puede estar compuesta por resistencias, inductancias y capacitancias [1], [2], [3], podemos suponer que:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L \quad \& \quad Z_2 = R_2 + 1/j\omega C$$

$$\therefore Z = (R_1 + j\omega L) + (R_2 + 1/j\omega C) \Rightarrow Z = (R_1 + R_2) + j(\omega L - 1/\omega C)$$

Si hacemos que: $R = (R_1 + R_2)$ & $X = (\omega L - 1/\omega C)$, tendremos:

$$Z = R + jX$$

con lo que resulta que la impedancia es un número complejo, o sea que tiene una magnitud $|Z|$ y un ángulo θ , (ver apéndice A.1), en la cual:

$$Z = |Z| \angle \theta$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Sustituyendo en la Ec. 1 tenemos

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$I = V \angle(\alpha \pm \theta) / Z \quad (1.2)$$

siendo α el ángulo de defasamiento del voltaje.

Para el análisis de nodos de una red, esta en base a la segunda ley de Kirchhoff [1], [2], [3], la cual dice que la suma de las corrientes que convergen en un nodo debe de ser igual a cero, o en otras palabras, las corrientes que entran al nodo debe de ser igual a las corrientes que salen de dicho nodo. Consideremos el circuito de la Fig. 1.2, el cual

consiste de una fuente de corriente en paralelo con dos impedancias, y tomando en cuenta que el voltaje es el mismo en un circuito en paralelo tenemos:

$$I - I_1 - I_2 = 0 \Rightarrow I = I_1 + I_2$$

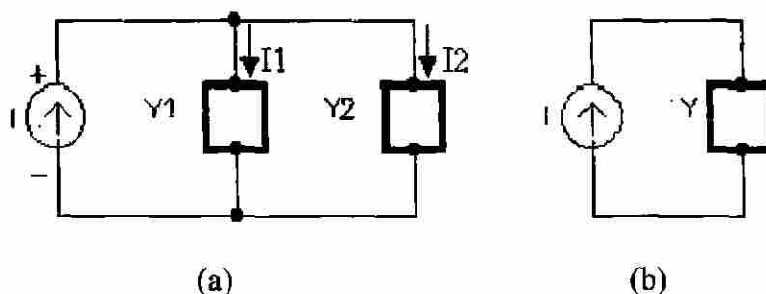


Fig. 1.2.- (a) Circuito paralelo con dos impedancias; (b) Circuito equivalente.

por la Ley de Ohm sabemos que $I = V/Z$, sustituyendo esta ecuación en la anterior, tenemos:

$$I = V/Z_1 + V/Z_2 \Rightarrow I = V (1/Z_1 + 1/Z_2)$$

si llamamos Y al termino $1/Z$ (conocido como admitancia), simplificamos la ecuación anterior a la forma:

$$I = V(Y_1 + Y_2)$$

con lo que podemos calcular el voltaje del circuito [1], [2], [3], por lo tanto:

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$V = I/Y \quad \therefore Y = Y_1 + Y_2$$

$$V = IZ \tag{1.3}$$

al igual que el análisis anterior, Z es un número complejo, y sustituyendo lo anteriormente descrito tenemos:

$$V = |Z| |I| \angle (\beta \pm \theta) \tag{1.4}$$

siendo β el ángulo de defasamiento de la corriente.

1.2. - ANÁLISIS DE CIRCUITOS TRIFÁSICOS.

Los sistemas de potencia se suministran por generadores trifásicos, que suministran potencia a las cargas trifásicas las cuales pueden estar balanceadas o desbalanceadas, para el análisis consideraremos el sistema trifásico balanceado, esto es, que las cargas tienen impedancias idénticas en las tres fases, aunque se sigue la misma secuencia para el cálculo en los sistemas desbalanceados.

Consideremos el circuito de la Fig. 1.3, donde se muestra un generador conectado en Y, el punto marcado con una n, representa el neutro del generador. Los voltajes V_{an} , V_{bn} , y V_{cn} entre las terminales de la terminal neutra se conocen como voltaje de fase [1], [2], [3], y están dadas por:

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_p \angle 0^\circ \\ V_{bn} &= V_p \angle -120^\circ \\ V_{cn} &= V_p \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (1.5)$$

o también por:

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_p \angle 0^\circ \\ V_{bn} &= V_p \angle 120^\circ \\ V_{cn} &= V_p \angle -120^\circ \end{aligned} \quad (1.6)$$

conocidas como secuencias abc o positiva y secuencia cba o negativa, respectivamente [1], [2], [3]. En ambos casos, cada voltaje de fase tiene la misma magnitud V_p rms y las fases están desplazadas en 120° con respecto a V_{an} seleccionado como el voltaje de referencia, como indica la Fig. 1.4. Para el efecto del análisis consideraremos la secuencia positiva. Este conjunto de voltajes balanceados está caracterizado por:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (1.7)$$

Los voltajes de secuencia abc pueden estar relacionados cada uno a V_{an} , mediante:

$$\begin{aligned} V_{bn} &= V_{an} \underline{-120^\circ} \\ V_{cn} &= V_{an} \underline{120^\circ} \end{aligned} \quad (1.8)$$

estas relaciones nos serán muy útiles cuando veamos el método de componentes simétricas (ver apéndice A.3).

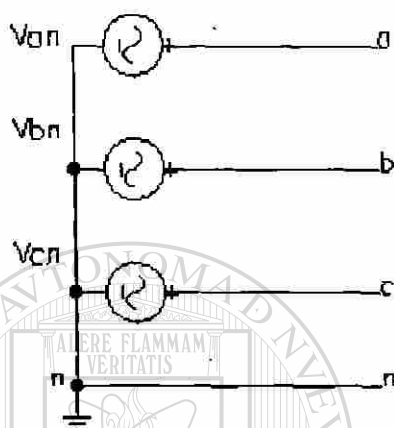
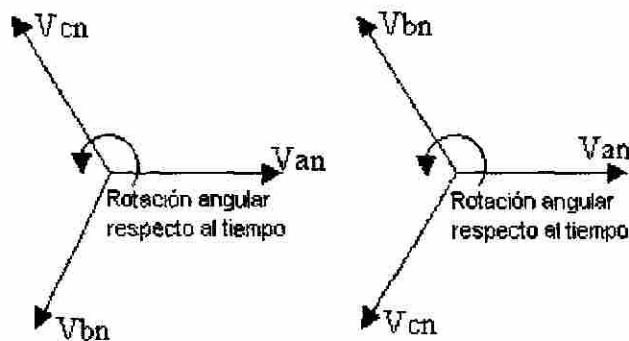


Fig. 1.3. Fuente conectada en estrella.



(a)

(b)

Fig. 1.4. Secuencias de fase, (a) positiva, y (b) Negativa.

Los voltajes de línea a línea, o simplemente voltaje de línea, de la Fig. 1.3 son V_{ab} , V_{bc} , y V_{ca} , [1], [2], [3], que se obtienen de los voltajes de fase al desplazar 180° cualquiera de las otras fases, por lo tanto:

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{an} + V_{bn} \\ &= V_p \underline{0^\circ} + V_p \underline{60^\circ} \\ &= V_p + V_p(0.5 + j0.866) \\ \therefore V_{ab} &= \sqrt{3} V_p \underline{30^\circ} \end{aligned}$$

de forma similar:

$$\begin{aligned} V_{bc} &= \sqrt{3} V_p \underline{-90^\circ} \\ V_{ca} &= \sqrt{3} V_p \underline{-210^\circ} \end{aligned}$$

si denotamos a V_L como la magnitud de los voltajes de línea, entonces tenemos la relación

$$V_L = \sqrt{3} V_p \quad (1.9)$$

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_L \angle 30^\circ, \quad V_{bc} = \sqrt{3} V_L \angle -90^\circ, \quad V_{ca} = \sqrt{3} V_L \angle -210^\circ \quad (1.10)$$

Examinando la Fig. 1.4, los voltajes de línea son también un conjunto balanceado cuya magnitud excede por un factor $\sqrt{3}$, y están 30° fuera de fase respecto a ellos.

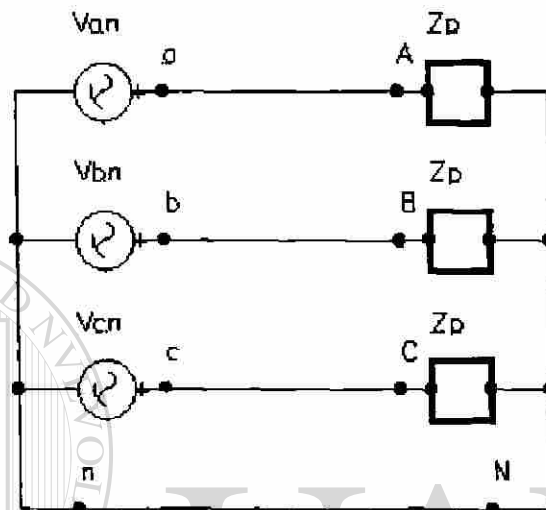


Fig. 1.5. - Sistema de 4 hilos conectado en estrella.

Si interconectamos los neutros como en la Fig.1.5, tendremos un sistema de cuatro hilos trifásico balanceado, este cuarto hilo es una línea neutra que no transmite corriente en este circuito. Aplicando LVK alrededor de las trayectorias cerradas que contienen al hilo neutro, [1], [2], [3], las corrientes de línea son:

$$\begin{aligned} I_{aA} &= V_{an} / Z_p = V_p \angle 0^\circ / Z_p \\ I_{bB} &= V_{bn} / Z_p = V_p \angle -120^\circ / Z_p = V_{an} \angle -120^\circ / Z_p = I_{aA} \angle -120^\circ \\ I_{cC} &= V_{cn} / Z_p = V_p \angle 120^\circ / Z_p = V_{an} \angle 120^\circ / Z_p = I_{aA} \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (1.11)$$

Los últimos resultados demuestran también que las corrientes de línea forman un conjunto balanceado, por consiguiente, su suma es:

$$I_{nN} = I_{aA} + I_{bB} + I_{cC} = 0 \quad (1.12)$$

lo que confirma que el hilo neutro no transmite corriente en un sistema balanceado de cuatro hilos [1], [2], [3]. En una conexión Y-Y, las corrientes de línea I_L son iguales a las corrientes de fases I_p , entonces, si $I_L = I_p$ nuestras ecuaciones se convierten en:

$$\begin{aligned} I_{aA} &= I_L \angle \pm\theta = I_p \angle \pm\theta \\ I_{bB} &= I_L \angle \pm\theta - 120^\circ = I_p \angle \pm\theta - 120^\circ \\ I_{cC} &= I_L \angle \pm\theta + 120^\circ = I_p \angle \pm\theta + 120^\circ \end{aligned} \quad (1.13)$$

donde $\pm\theta$ es el ángulo de la impedancia Z_p .

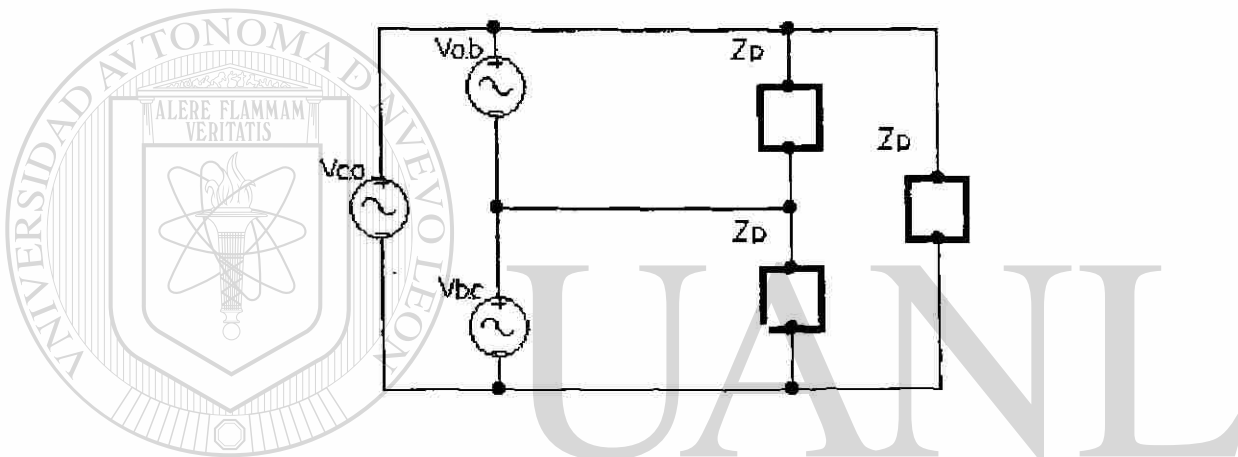


Fig. 1.6. - Diagrama de un circuito conectado en delta.

Consideremos ahora un generador conectado Δ a una carga balanceada conectada en Δ como el de la Fig. 1.6, podemos ver que en el caso de una carga en, los voltajes de línea son los mismos que los voltajes de fase [1], [2], [3]. Por consiguiente, si los voltajes de línea están dados por las Ec's 10, entonces los voltajes de fase son:

$$V_{AB} = V_L \angle 30^\circ, \quad V_{BC} = V_L \angle -90^\circ, \quad V_{CA} = V_L \angle 150^\circ \quad (1.14)$$

donde:

$$V_L = V_p \quad (1.15)$$

Las corrientes de fase están dadas por:

$$\begin{aligned}
 I_{AB} &= V_{AB}/Z_P = I_p \angle 30^\circ + \theta \\
 I_{BC} &= V_{BC}/Z_P = I_p \angle -90^\circ + \theta \\
 I_{CA} &= V_{CA}/Z_P = I_p \angle 150^\circ + \theta
 \end{aligned}
 \tag{1.16}$$

dónde la magnitud de la corriente de fase está dada por:

$$I_p = V_L / |Z_P| \tag{1.17}$$

La corriente en la línea aA está dada por:

$$I_{aA} = I_{AB} - I_{CA}$$

que al simplificarla es:

$$I_{aA} = \sqrt{3} I_p \angle \pm \theta^\circ$$

las otras corrientes de línea se obtienen de forma similar, y son:

$$\begin{aligned}
 I_{bB} &= \sqrt{3} I_p \angle -120^\circ + \theta \\
 I_{cC} &= \sqrt{3} I_p \angle 120^\circ + \theta
 \end{aligned}$$

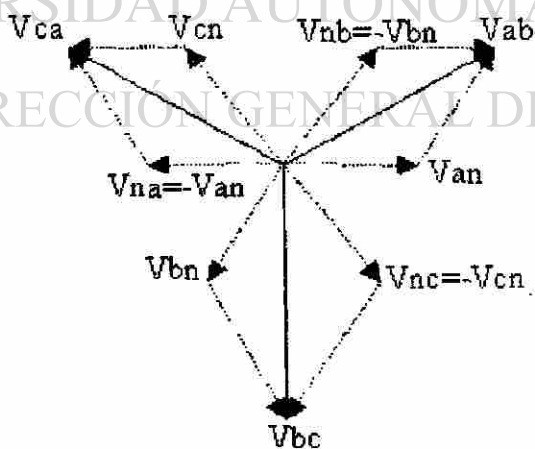


Fig. 1.7. - Diagrama fasorial que muestra voltajes de fase y de línea.

Por lo tanto las relaciones entre las magnitudes de corriente de fase y de línea en el caso de una Δ es:

$$I_L = \sqrt{3} I_p \quad (1.18)$$

Las relaciones entre los voltajes de línea y de fase, par la carga conectada en Δ aparecen resumidas en el diagrama fasorial de la Fig. 1.7. En un sistema de potencia se pueden hacer conversiones de la conexión Δ a la conexión Y, esto se discute en el apéndice A.1.

1.3. - COMPONENTES SIMÉTRICAS.

El método de las componentes simétricas se basa en el estudio de tres sistemas equilibrados de vectores de tal forma de que al sumarlos nos dé un sistema desequilibrado en magnitud y ángulo de fase, tal como lo representa la Fig. 1.8. Como discutimos anteriormente, estos vectores son iguales en magnitud pero defasados 120° (ver apéndice A.3), los cuales representan a la secuencia positiva (1) o secuencia abc y a la secuencia negativa (2) o secuencia cba, y la secuencia cero (0) que son tres vectores iguales en magnitud pero sin defasamiento de fase entre ellos [4], [5], [6].

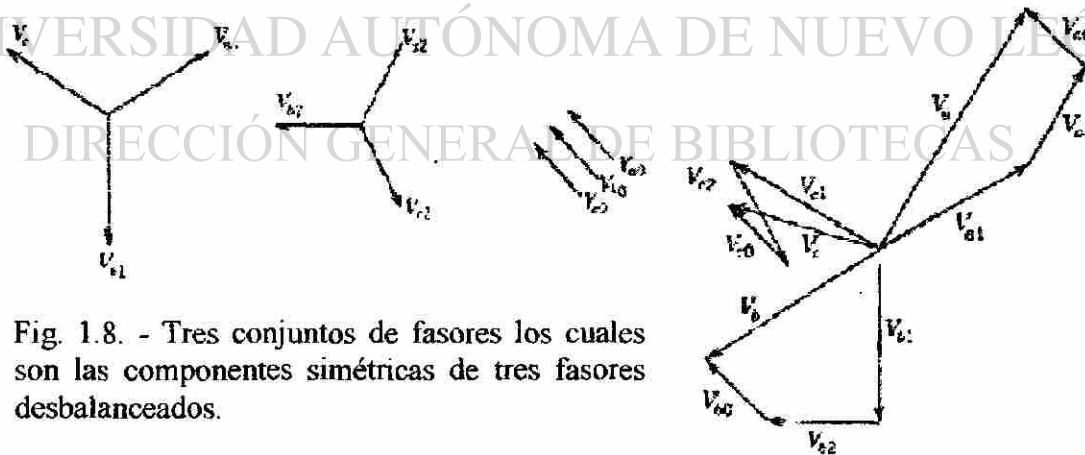


Fig. 1.8. - Tres conjuntos de fasores los cuales son las componentes simétricas de tres fasores desbalanceados.

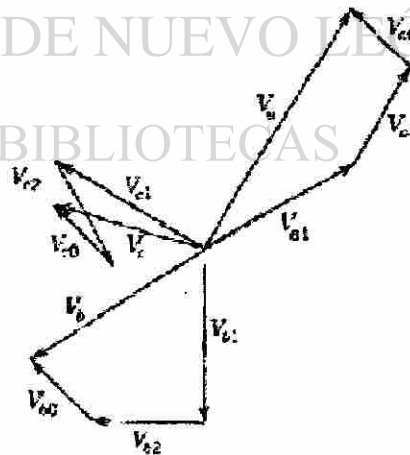


Fig. 1.9. - Adición gráfica de las componentes mostradas en la Fig. 1.8 para obtener tres fasores desbalanceados.

El análisis se basa en el siguiente concepto, de que cada uno de sus fasores desbalanceados es la suma vectorial de los componentes de fasores balanceados [5], [6], [7], expresando estos términos con relación al voltaje tenemos:

$$\begin{aligned}V_A &= V_{A0} + V_{A1} + V_{A2} \\V_B &= V_{B0} + V_{B1} + V_{B2} \\V_C &= V_{C0} + V_{C1} + V_{C2}\end{aligned}\quad (1.19)$$

Este conjunto de los tres fasores desbalanceados a partir de los tres conjuntos de componentes simétricas de la Fig. 1.8, se muestra en la Fig. 1.9. Podemos representar el sistema sobre la base del voltaje V_A por medio del operador a , [4], [5], [6], [7], el cual tiene una magnitud igual a la unidad y un ángulo de fase de 120° (ver apéndice A.3), por lo tanto, la representación de los vectores es la siguiente:

$$\begin{aligned}V_A &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\V_B &= V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2} \\V_C &= V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2}\end{aligned}\quad (1.20)$$

O, en forma matricial;

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}\quad (1.21)$$

si hacemos que:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\quad (1.22)$$

nuestras incógnitas son los voltajes de secuencia V_{a0} , V_{a1} y V_{a2} , si multiplicamos por la inversa de la matriz A (A^{-1}) al sistema de Ec's. 21, podemos verificar fácilmente que:

$$A^{-1} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} A = A^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

con lo cual resulta que:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

pero

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

con lo cual resulta que:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

por consiguiente:

$$\begin{aligned} V_{a0} &= 1/3(V_A + V_B + V_C) \\ V_{a1} &= 1/3(V_A + aV_B + a^2V_C) \\ V_{a2} &= 1/3(V_A + a^2V_B + aV_C) \end{aligned} \quad (1.27)$$

Se sigue un análisis idéntico para el cálculo de las corrientes de secuencia [4], [5], [6], [7], como las ecuaciones anteriores son fundamentales se resume que:

$$I_A = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$

$$I_B = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (1.28)$$

$$I_C = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}$$

y las corrientes de secuencia son:

$$\begin{aligned} I_{a0} &= 1/3(I_A + I_B + I_C) \\ I_{a1} &= 1/3(I_A + a I_B + a^2 I_C) \\ I_{a2} &= 1/3(I_A + a^2 I_B + a I_C) \end{aligned} \quad (1.29)$$

Como en los circuitos trifásicos, las sumas de las corrientes de líneas son iguales a la corriente en el neutro I_n en la trayectoria de retorno [4], [5], [6], [7], tenemos que:

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (1.30)$$

tomando en cuenta que $(1 + a + a^2) = 0$, resulta que la corriente I_n es igual a:

$$I_n = 3I_{a0} \quad (1.31)$$

En ausencia de una trayectoria a través del neutro en un sistema trifásico (conexión delta), I_n es igual a cero, y la corriente de línea no tiene componente de secuencia cero, así como en las Ec's 27, se puede demostrar que no hay componente de secuencia cero si la suma de los fasores desbalanceados es cero.

1.4. -REPRESENTACIÓN DEL GENERADOR.

Consideremos a una máquina síncrona bipolar [5] con un rotor cilíndrico como el de la Fig. 1.10a, el devanado del estator trifásico simplificado es representado con un voltaje inducido en las bobinas de fase la cual está determinada por la Ley de Faraday

$$e = N \, d\phi/dt \quad (1.32)$$

El valor rms del voltaje por fase es hallado por medio de:

$$E_{\text{fase}} = 4.44fN\phi_{\text{polo}}K_pK_d \quad (1.33)$$

donde f es la frecuencia en **Hz**, N es el número de vueltas por fase, ϕ_{polo} es el flujo del polo en **Wb.**, K_p es el factor de corrección de paso y corrige el voltaje para los devanados que no están completamente a 180° (un devanado de paso fraccional cuyo paso es inferior a 180° , reduce los efectos distorsionadores de los armónicos y produce una onda senoidal más pura) y K_d es el factor de distribución, corrige el voltaje para devanados cuyas vueltas no están concentradas dentro de un par de ranuras, pero están distribuidas a lo largo de la periferia del estator.

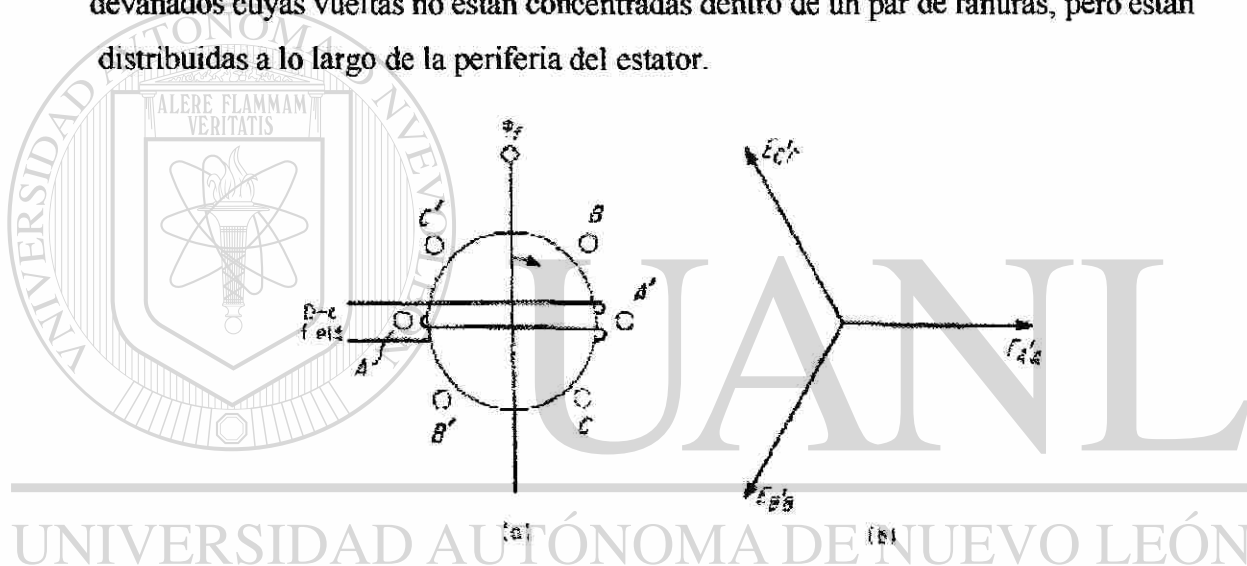


Fig. 1.10. - (a) Representación de una máquina síncrona bipolar con rotor cilíndrico; (b) Desplazamiento de fases.

Los voltajes para las fases **A**, **B** y **C** son iguales en magnitud ya que todos los voltajes dependen directamente del mismo flujo [5]. Sin embargo, el atraso el cual está presente le corresponde al tiempo que ϕ_f (flujo del campo) alcanza las fases **A**, **B** y **C** y es responsable del desplazamiento de fase del voltaje como se muestra en la Fig. 1.10b.

Ahora es conocido que si una carga balanceada se agrega a los devanados de la armadura que separa a los tres flujos de la armadura se podrá distribuir con la densidad pico por el eje magnético de la fase individual de los devanados. El resultado de estos

tres flujos pulsantes nos hacen girar el campo, rotando a la misma velocidad y en la misma dirección del campo principal ϕ_r del rotor, induciendo voltajes senoidales balanceados en los devanados del estator [5], [6]. Como la corriente de campo del rotor es constante, estos voltajes inducidos son independientes de las corrientes del estator y están correctamente modelados como fuentes ideales de voltaje.

El circuito equivalente de la Fig. 1.11 representa a un generador síncrono como un voltaje a circuito abierto en serie con una impedancia síncrona $R_e + jX_s$. De acuerdo a los valores ajustados de X_s se puede ajustar para los efectos de saturación. La simetría de la máquina exige que las tres autoimpedancias, así como las impedancias mutuas sean iguales, la impedancia externa Z_n es externa a la máquina [7].

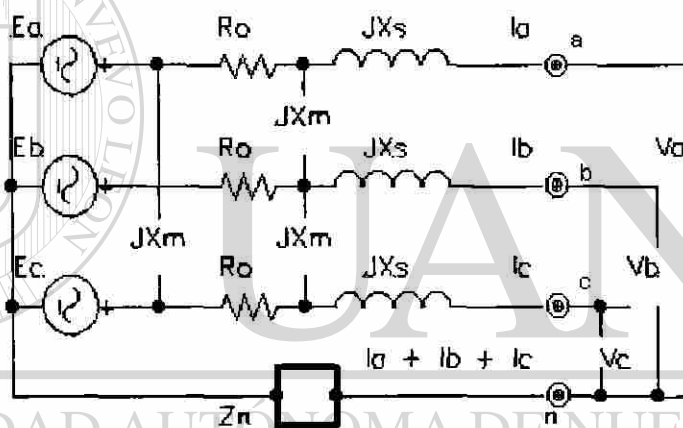


Fig. 1.11. - Circuito equivalente de una máquina síncrona con corriente de campo constante.

Aplicando LVK se producen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} E_a &= (R_e + jX_s + Z_n)I_a + (jX_m + Z_n)I_b + (jX_m + Z_n)I_c + V_a \\ E_b &= (jX_m + Z_n)I_a + (R_e + jX_s + Z_n)I_b + (jX_m + Z_n)I_c + V_b \\ E_c &= (jX_m + Z_n)I_a + (jX_m + Z_n)I_b + (R_e + jX_s + Z_n)I_c + V_c \end{aligned} \quad (1.34)$$

Si hacemos que:

$$\begin{aligned} Z_s &= R_e + jX_s + Z_n \\ Z_m &= jX_m + Z_n \end{aligned} \quad (1.34A)$$

Y, pasando a notación matricial la ecuación anterior tenemos:

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

Tomando como base a las componentes simétricas de las Ec's 28, [7], y tomando en cuenta que $E_a = E$, $E_b = a^2E$ y $E_c = aE$, podemos hacer las siguientes sustituciones que nos simplificarán las Ec's. 35:

$$\begin{bmatrix} E \\ a^2E \\ aE \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.36)$$

multiplicando por la matriz inversa de A (Ec. 25) la ecuación anterior

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ a^2E \\ aE \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.36A)$$

observamos que al efectuar las multiplicaciones de la matriz del lado izquierdo, esta se reduce a:

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ a^2E \\ aE \end{bmatrix} = E/3 [1 + a^2 + a, 1 + a^3 + a^3, 1 + a + a^2] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ 3E \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.36B)$$

y por el lado derecho efectuando las operaciones matriciales, tenemos:

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s + Z_m + Z_m & Z_s + a^2Z_m + aZ_m & Z_s + aZ_m + a^2Z_m \\ Z_m + Z_s + Z_m & Z_m + a^2Z_s + aZ_m & Z_m + aZ_s + a^2Z_m \\ Z_m + Z_m + Z_s & Z_m + a^2Z_m + aZ_s & Z_m + aZ_m + a^2Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 3Z_s + 6Z_m & 0 & 0 \\ 0 & 3Z_s - 3Z_m & 0 \\ 0 & 0 & 3Z_s - 3Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} Z_s + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.36C)
 \end{aligned}$$

sustituyendo los valores 36 A, y los de la de la Ec. 34A en la Ec. 36B resulta:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e + j(X_s + 2X_m) + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & R_e + j(X_s - X_m) & 0 \\ 0 & 0 & R_e + j(X_s - X_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.36D)$$

Podemos definir las impedancias secuenciales de la máquina como [7]:

$$Z_0 = R_e + j(X_s + 2X_m) + 3Z_n$$

$$Z_1 = R_e + j(X_s - X_m) \quad (1.37)$$

$$Z_2 = R_e + j(X_s - X_m)$$

y, sustituyendo estos valores en la Ec. 36C

$$\begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

Es muy sencilla la sintetización de los circuitos secuenciales de la Ec. 37, Los resultados se muestran en la Fig. 1.12. Estos circuitos son completamente satisfactorios para aplicaciones al sistema, aunque en la practica se desprecia la resistencia así como los efectos inductivos de la reactancia mutua, que son de valor sumamente pequeños en

comparación con la reactancia síncrona, y son de un valor razonable de exactitud y simplicidad.

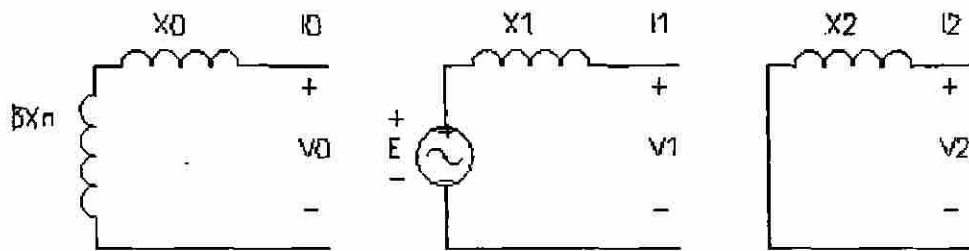


Fig. 1.12. - Circuitos de secuencia de una máquina síncrona.

1.5. - REPRESENTACIÓN DEL TRANSFORMADOR.

Los transformadores de potencia son un componente esencial en los sistemas de potencia y que sirve para una diversidad de propósitos, tales como: acoplamiento de impedancias, aislamiento de circuitos eléctricos, transformación de voltaje, etc., cualquiera que sea su propósito, los principios operacionales no cambian aunque sus características de funcionamiento pueden ser diferentes.

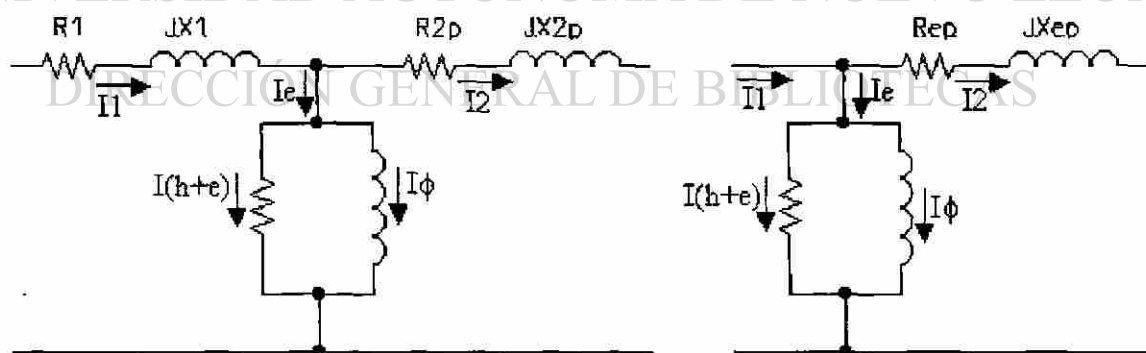


Fig. 1.13. - (a) Circuito equivalente exacto de un transformador de dos devanados; (b) Circuito equivalente aproximado de un transformador de dos devanados.

El tipo de transformador más común es el transformador de dos devanados en cualquiera de los dos casos, monofásico ó trifásico representado sobre una base por fase.

Dos circuitos equivalentes se muestran en la Fig. 1.13, el circuito de la Fig. 1.13a tiene todas las impedancias referidas al lado primario [6]. La impedancia aparente del devanado secundario como vista desde el lado primario es:

$$Z_{2p} = Z_2 (N_p/N_s)^2 \quad (1.39)$$

La Fig. 1.13b es un circuito equivalente aproximado el cual mueve la rama shunt de la izquierda. Esta aproximación se basa directamente en el hecho de que la corriente de excitación I_e de la rama shunt es muy pequeña con respecto a la corriente de carga, y moviendo ésta rama de la izquierda se tendrá un pequeño efecto sobre la caída I_Z de la rama serie. Los elementos series Z_e se juntan en la Fig. 1.13b como [6]:

$$Z_{ep} = Z_1 + (N_p/N_s)^2 \quad (1.40)$$

Se pueden efectuar más aproximaciones en el transformador. Ya que la rama shunt produce pequeñas corrientes de excitación, puede a veces ser omitida como se muestra en la Fig. 1.14. En los grandes transformadores de potencia donde $X_e \gg R_e$, una última aproximación se puede hacer despreciando R_e . Esta reactancia serie X_e nos representa al transformador.

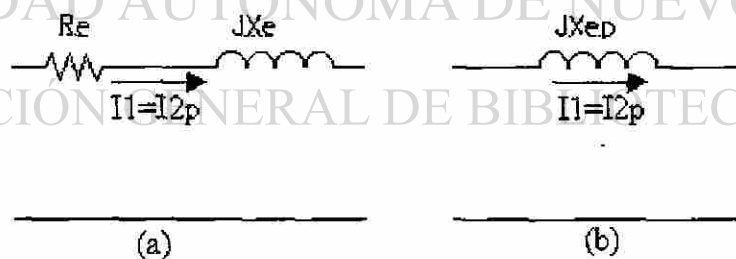


Fig. 1.14. - Otras aproximaciones para los transformadores de dos devanados.

Para su análisis, consideremos el circuito de la Fig.1.15, la sección en estrella del transformador, con el punto común conectado a tierra por medio de una impedancia Z_n , y sea [7]:

$$Z_{\phi} = R_{\phi}(jX_{\phi})/(R_{\phi} + jX_{\phi}) \quad \& \quad Z_{\phi 1} = Z_{\phi} + R_1 + jX_1 \quad (1.41)$$

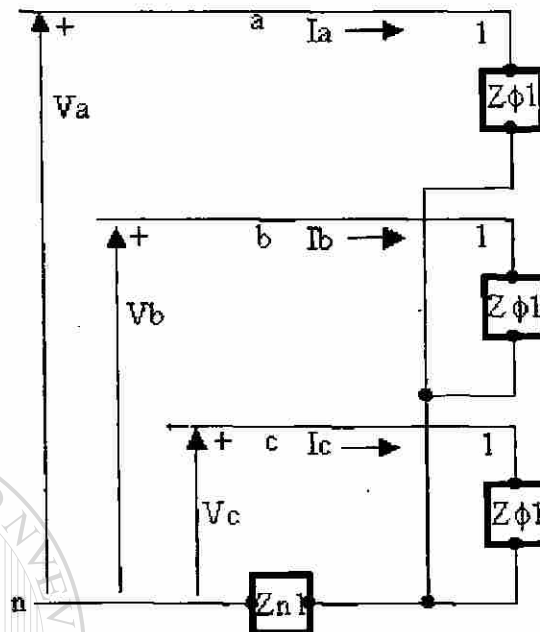


Fig. 1.15. Tres transformadores de tres devanados, con el devanado 1 conectado en estrella a través de \$Z_n\$ y devanado 2 y 3 en circuito abierto.

Aplicando LVK se obtiene:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\phi} + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_{\phi} + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_{\phi} + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1.42) \text{®}$$

sustituyendo los voltajes y las corrientes en base a sus componentes simétricas resulta:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\phi} + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_{\phi} + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_{\phi} + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (1.42A)$$

multiplicando a ambos lados de la ecuación por la inversa de A resulta:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{\phi} + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_{\phi} + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_{\phi} + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (1.42B)$$

efectuando las multiplicaciones matriciales resulta:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\phi} + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_{\phi} + 3Z_n & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\phi} + 3Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (1.42C)$$

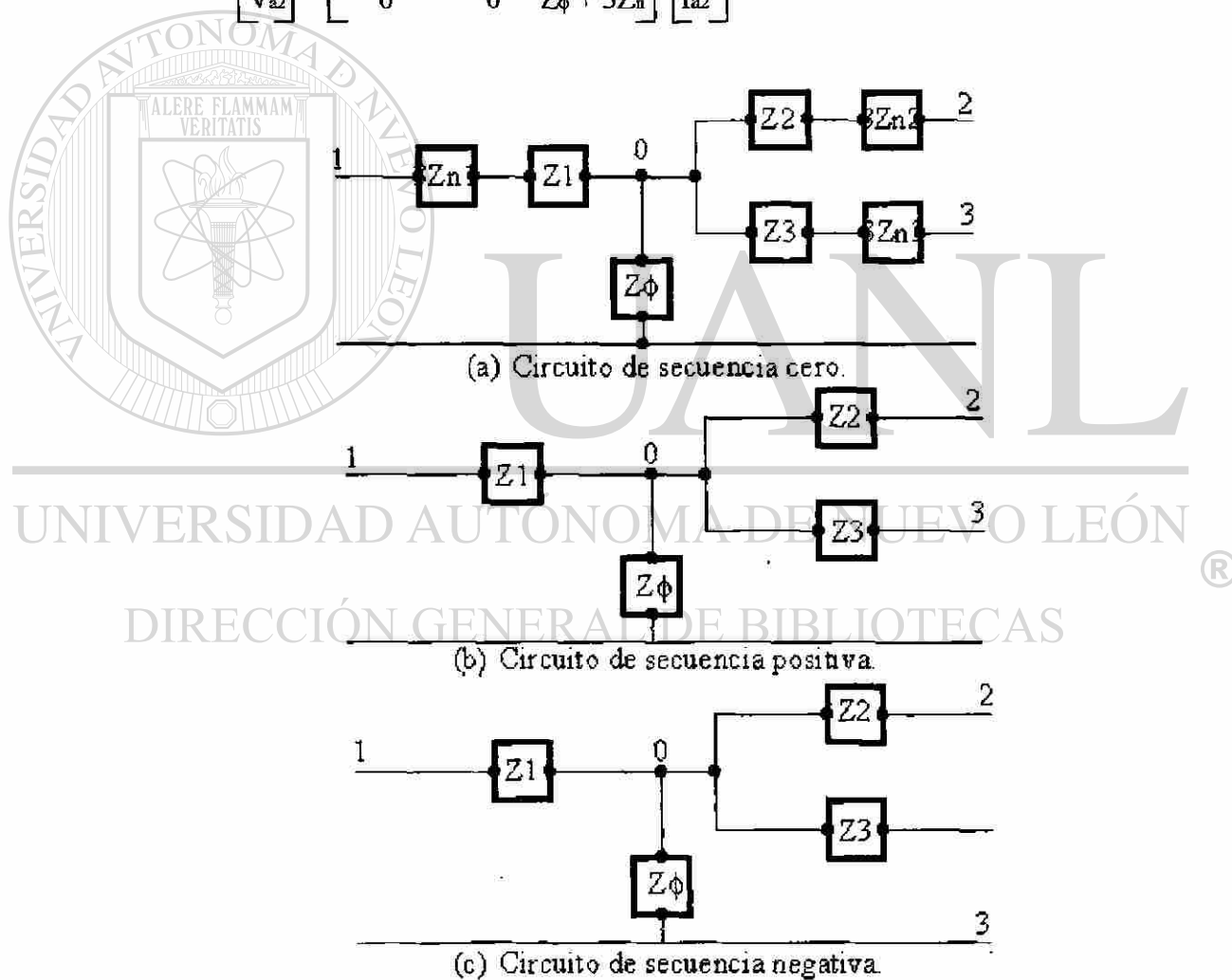


Fig. 1.16. Circuitos de secuencia del transformador correspondiendo a conexiones estrella aterrizada.

Utilizamos esta ecuación para sintetizar la secuencia de los circuitos que se muestran en la Fig. 1.16, en los circuitos resultantes, se pueden calcular secuencias de cantidades independientes en cada red [7]. Si el neutro está solidamente aterrizado, esto quiere decir que Z_n tiene valor 0, y por lo tanto, $3Z_n$ será sustituido por un corto circuito. Si la conexión no está aterrizada, significa que Z_n tiene un valor infinito y que $3Z_n$ será sustituido por un circuito abierto [5], [6], [7], [8], [9]. Observamos que la puesta a tierra de un equipo solo modifica la secuencia cero de la red, la secuencia positiva y negativa son idénticas y no se ven afectadas. Se sigue un análisis idéntico a la conexión en delta, o transformar la delta a su estrella equivalente.

Para los transformadores de tres devanados, se puede tomar la forma de un transformador monofásico con dos cargas secundarias, el tipo más común es el transformador trifásico Y-Y con el terciario en conexión Δ . Sin embargo, el circuito equivalente resultante de la Fig. 1.17a se aplica a los transformadores de tres devanados en general [6].

Se aplican tres pruebas de corto circuito que determinan los valores de Z_p , Z_s y Z_t . Estas tres pruebas son similares en que en cada caso un devanado está abierto, uno en corto, y el voltaje se aplica en el devanado restante. La impedancia se mide sobre el lado

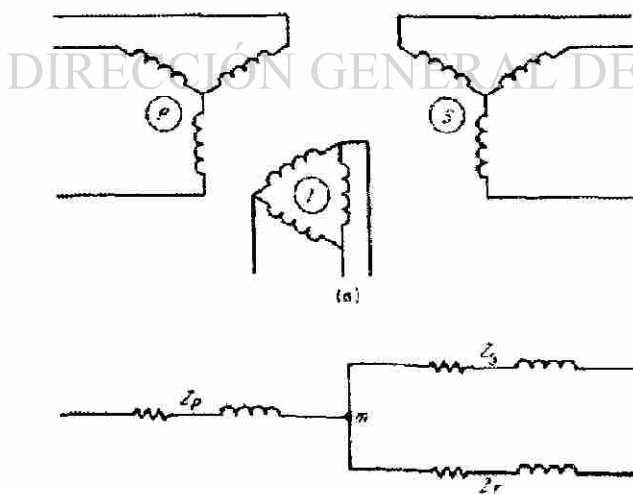


Fig. 1.17. - (a) Diagrama esquemático de un transformador de tres devanados. (b) Circuito equivalente aproximado del transformador de tres devanados.

en la cual el voltaje es aplicado. Un ejemplo de esta prueba se muestra en la Fig. 1.18, la cual muestra el secundario cortocircuitado, el terciario a circuito abierto y el voltaje aplicado en el lado primario [6].

Los resultados de las tres pruebas similares son:

$$\begin{aligned} Z_{ps} &= Z_p + Z_s \\ Z_{pt} &= Z_p + Z_t \\ Z_{st} &= Z_s + Z_t \end{aligned} \quad (1.43)$$

Resolviendo para la Ec. 1.43 para Z_p , Z_s y Z_t , resulta:

$$\begin{aligned} Z_p &= 1/2 (Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \\ Z_s &= 1/2 (Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \\ Z_t &= 1/2 (Z_{st} + Z_{pt} - Z_{ps}) \end{aligned} \quad (1.44)$$

Estos tres resultados para el circuito equivalente de la Fig. 1.17b tiene despreciada la rama paralelo de la corriente de excitación.

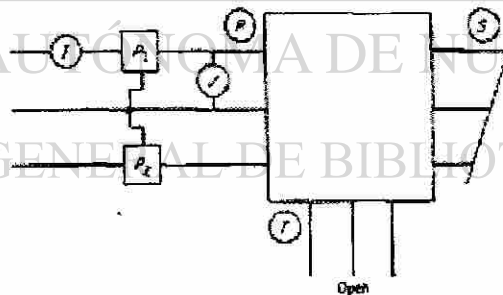


Fig. 1.18. - Prueba de cortocircuito en un transformador de tres devanados

Para el autotransformador de la Fig. 1.19a puede ser representado por una simple impedancia serie (Z_e) referida al lado primario [6]. Z_e puede ser hallada por medio de una prueba de corto circuito o puede ser escrita en términos de las impedancias del común y el devanado serie.

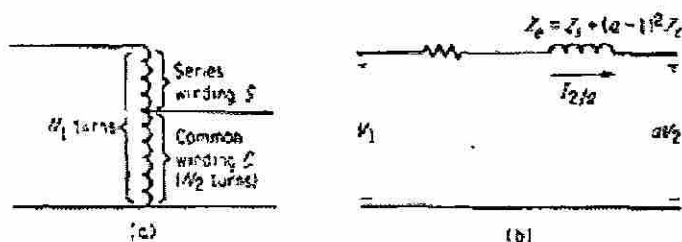


Fig. 1.19. - (a) Diagrama esquemático del autotransformador;
(b) Circuito equivalente del autotransformador.

Se determina que [6]:

$$Z_e = Z_s + (a - 1)^2 Z_c \quad (1.45)$$

En esta ecuación, Z_s es la resistencia y la reactancia de enlace del devanado serie o $Z_s = R_s + jX_s$. Igualmente Z_c es la resistencia y reactancia de enlace del devanado común, a es la relación de N_1/N_2 . En la Fig. 1.19b se ha despreciado la rama de excitación.

1.6.- REPRESENTACIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

Para hablar de las líneas de transmisión requeriríamos de todo un capítulo para conocer todos los parámetros que intervienen en el análisis de las líneas, ya sean líneas de transmisión cortas, medias o largas, así como si su arreglo es una línea tipo T ó Π , pero los propósitos de ésta tesis es el de tener una red simplificada y conocer el uso de estos parámetros de importancia primaria en el cálculo [4], [5], [6], [7], [8].

Sea la representación de una línea en su equivalente, en el cual su capacitancia está dividida en dos partes iguales en los extremos de recepción y transmisión, y cuya impedancia está entre las capacitancias. Tres de las variaciones de la línea equivalente están representadas en la Fig. 1.20a de acuerdo a su exactitud. En la Fig. 1.20b se ha despreciado el capacitor, ya que su valor es muy pequeño en comparación al inductor, y

en la Fig. 1.20c se ha despreciado la resistencia ya que las pérdidas que sufre la línea también son muy pequeñas en comparación al inductor, y, por lo tanto, muchas veces se considera el valor de la inductancia como suficiente en exactitud para utilizarla en el estudio de corto circuito, pero no puede ser suficiente para otros tipos de análisis.

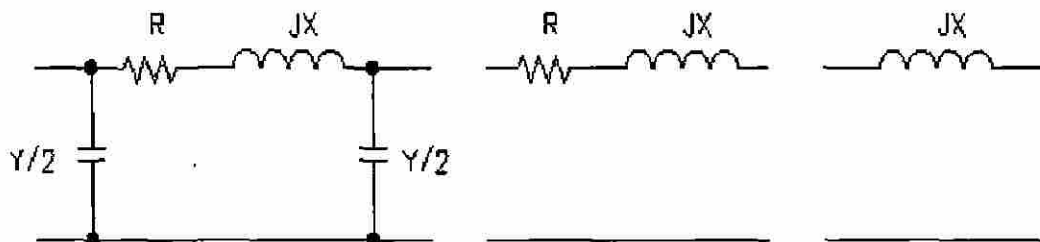


Fig. 1.20. - (a) Circuito equivalente PI, (b) Reducción eliminando los capacitores, (c) Circuito equivalente para efectos de cálculos.

1.7. - EL DIAGRAMA UNIFILAR.

En los capítulos previos, se desarrollaron modelos de circuitos para máquinas síncronas, transformadores y líneas de transmisión, ahora, representaremos estos la unión de estos componentes para modelar una red completa. Como un modelo trifásico balanceado se puede representar como un circuito equivalente monofásico compuesto de una de las fases y el neutro de retorno para el análisis balanceados muy raro mostrar más de una fase y el neutro de retorno cuando se representa un diagrama de circuito, éste se simplifica omitiendo el neutro del circuito e indicando las partes que lo componen mediante símbolos estándar en lugar de sus circuitos equivalentes. A este diagrama simplificado de un sistema de potencia se le llama **diagrama unifilar**.

El diagrama unifilar nos suministra en forma objetiva la información significativa del sistema de potencia, pudiendo variar bajo el problema en consideración,

y la cantidad de datos que se incluyen depende del propósito para el que se realiza. En la Fig. 1.21 se muestran algunos símbolos usados comúnmente [5].

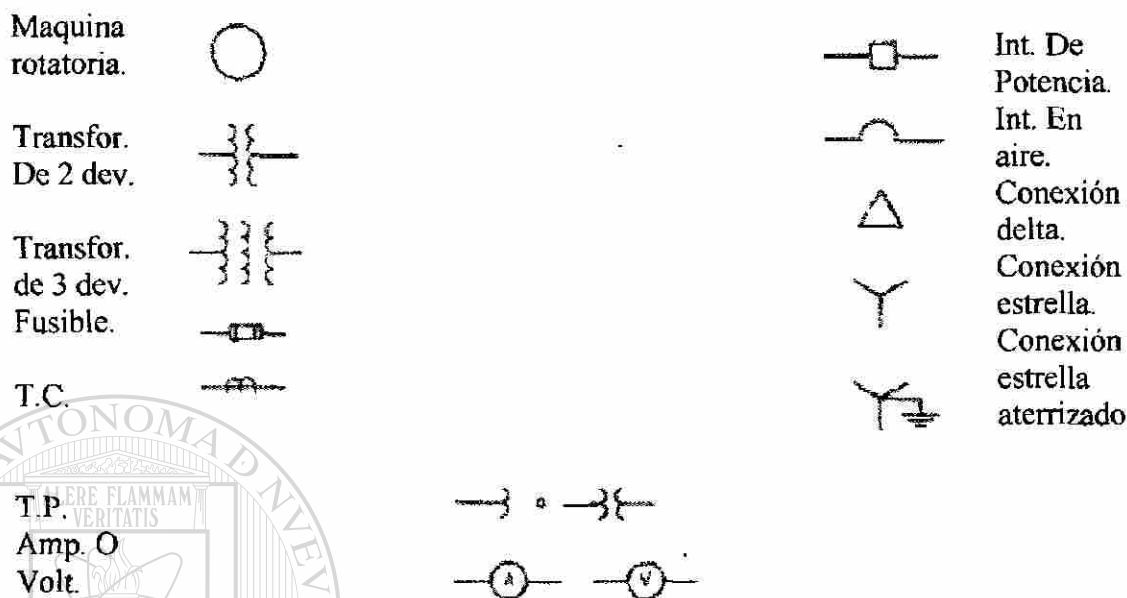


Fig. 1.21. - Símbolos de aparatos y equipos utilizados más comúnmente en redes.

Es de suma importancia conocer la localización de los puntos en que el sistema se aterriza, con el fin de calcular la corriente que fluye cuando ocurre una falla asimétrica en donde se involucre la tierra. En la Fig. 1.22 se muestra el diagrama unifilar de una red [6], mostrando la conexión trifásica Y con el punto neutro aterrizado por medio de una resistencia (G_2) y los otros generadores por medio de una reactancia, estas se utilizan para limitar el flujo de corriente a tierra durante una falla de corto circuito, y en cambio los transformadores se representan con el neutro sólidamente aterrizados común dar información sobre el diagrama los valores nominales de todos los componentes que intervienen.

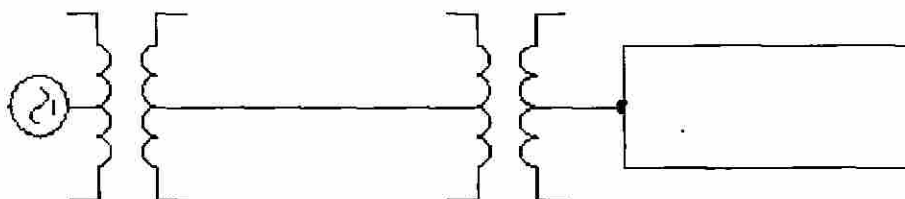


Fig. 1.22. - Diagrama unifilar de un SEP.

1.8. - DIAGRAMA DE REACTANCIAS.

El siguiente paso a seguir es dibujar el diagrama de reactancias del sistema de potencia a analizar, en el circuito de la Fig. 1.23 se tiene la representación de todos los componentes del sistema que intervienen en la red de la Fig. 1.22 para formar el diagrama de impedancias [6]. En este diagrama no se incluyen las impedancias limitadoras de corriente que se muestran en el diagrama unifilar entre los neutros del generador y tierra, ya que no fluye corriente a tierra en condiciones balanceadas y los neutros de los generadores están al mismo potencial que el sistema.

Cuando se efectúan cálculos de fallas, es común no considerar las resistencias, esta omisión introduce algún error, pero los resultados son satisfactorios ya que el valor

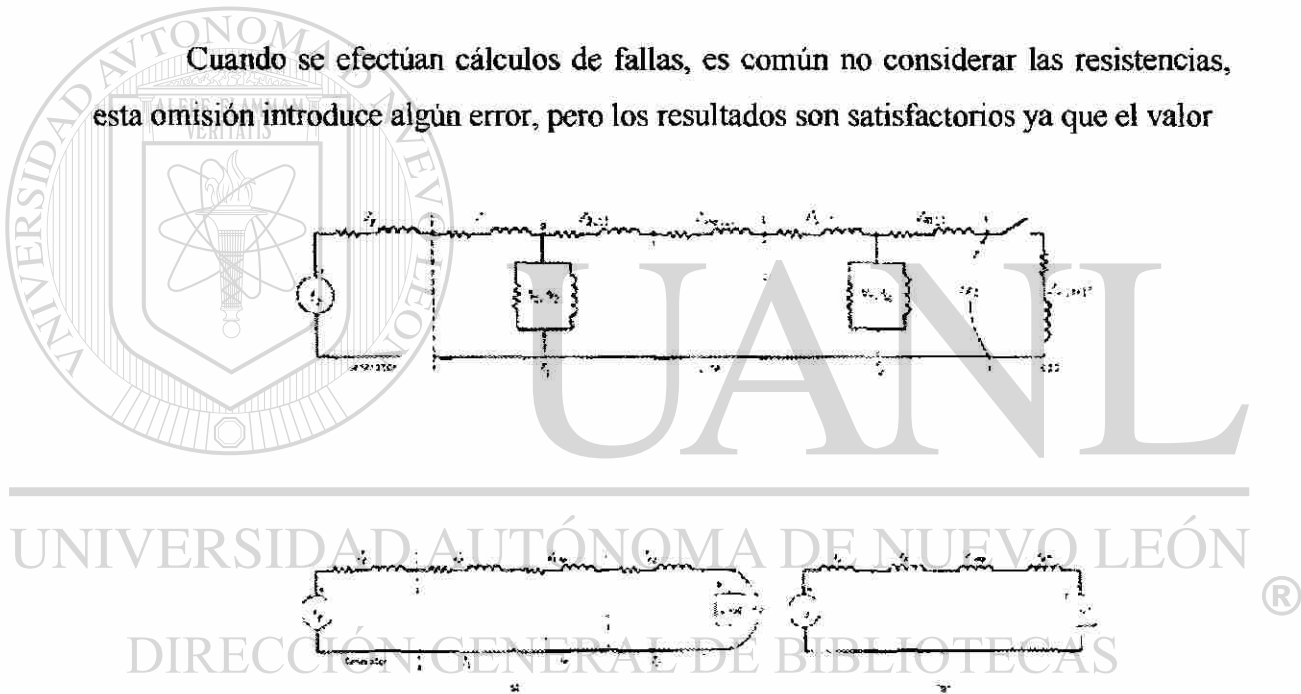


Fig. 1.23. - (a) Diagrama de impedancias del SEP; (b) Omisión de la rama shunt del transformador; (c) Circuito equivalente.

de la reactancia inductiva de un sistema es mucho mayor que su resistencia, por lo tanto la impedancia viene siendo a ser igual a la reactancia inductiva. También, debido a que la corriente de magnetización de un transformador es por lo general insignificante con respecto a la corriente de plena carga, el circuito equivalente del transformador omite la rama de admitancia en paralelo, como se vio en la sección 1.5.

El diagrama de impedancias se reduce al diagrama de reactancias de la Fig. 1.23b, si se decide simplificar el cálculo de la corriente de falla omitiendo las cargas estáticas, las resistencias, la rama de admitancia en paralelo de cada transformador y la capacitancia de la línea de transmisión. A este diagrama también se le conoce como diagrama de secuencia positiva, Fig. 1.23c. [6].

1.9. - DIAGRAMAS DE SECUENCIAS.

En la sección 1.4, analizamos al generador síncrono aterrizado por medio de una reactancia, y en la cual obtuvimos la Ec. 37, en esta ecuación observamos que los circuitos que se utilizan para modelar la máquina síncrona se muestran en la Fig. 1.14, estos son los circuitos de secuencia, sobre la base de los voltajes y corrientes de las componentes simétricas, estas redes de secuencia se conocen como secuencia positiva, negativa y cero. Para análisis de estado estable senoidal trifásico balanceado solo se requiere del circuito de secuencia positiva.

Las ecuaciones desarrolladas se basan en un modelo simple de la máquina en el que se supone solo la existencia de las componentes fundamentales de las corrientes, sobre esta base se encuentra que las reactancias de secuencia positiva y negativa son iguales pero muy diferentes a la de secuencia cero.

Sin embargo, las impedancias que presentan las máquinas rotatorias a las corrientes de las tres secuencias, por lo general son diferentes para cada secuencia, pero para los efectos de un cálculo de falla, estas se toman como iguales a la reactancia subtransitoria o transitoria según se estudien las condiciones del problema.

En los transformadores analizados en la sección 1.5, se dijo que los circuitos equivalentes de secuencia, dependen de las conexiones de los devanados primarios y secundarios del transformador si estos están conectados en Y o. Las diferentes

combinaciones de los devanados determinan la configuración de los circuitos de secuencia cero, estas conexiones se resumen en la Fig. 1.24. [5].

La representación de las secuencias positivas, negativas y cero, es idéntica en la línea de transmisión, en este caso solo se modifica el valor de la impedancia que se le asigne a la línea.

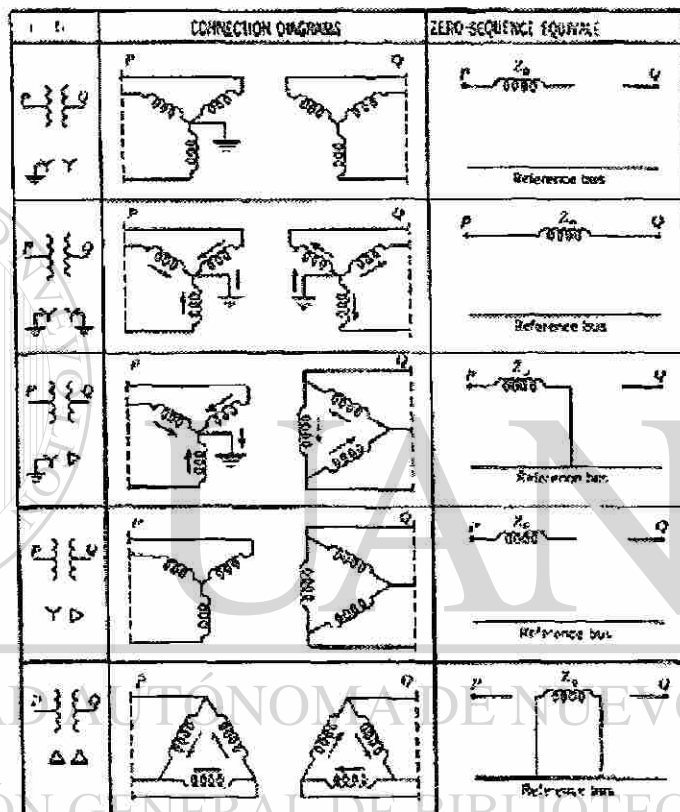


Fig. 1.24. - Circuitos equivalentes de secuencia cero de transformadores trifásicos.

1.10. - CANTIDADES EN POR UNIDAD (PU).

Un valor por unidad se define como la relación de la cantidad a su base y se expresa como un valor decimal. Consideremos un sistema monofásico, considerando su potencia aparente como el valor base a través del sistema (se acostumbra a tomar la máxima potencia), y consideremos un voltaje base en el sistema, cuando se utilizan transformadores, el voltaje base de una lado del transformador será diferente al voltaje base del otro lado, en otras palabras, el voltaje base de un devanado en particular será proporcional al número de vueltas sobre ese devanado. Si una componente del sistema (generador, transformador o línea de transmisión) se considera aparte del sistema, los volt-ampere base y el voltaje base se tomarán como la relación de esa pieza en particular del equipo en cuestión, los valores en pu necesitan corregirse a la base del sistema cuando se integren. Las siguientes formulas relacionan las siguientes cantidades [5], [6]:

Corriente base en Amp. $I_{base} = kVA_{1\phi base} / V_{baseLN}$ (1.46)

Impedancia base en Ohms $Z_{base\Omega} = V_{baseLN} / I_{base}$ (1.47)

Impedancia base en Ohms $Z_{base\Omega} = (kV_{baseLN})^2 \times 1000 / kVA_{1\phi base}$ (1.48)

Impedancia base en Ohms $Z_{base\Omega} = (kV_{baseLN})^2 / MVA_{1\phi base}$ (1.49)

Potencia base $kW_{1\phi} = kVA_{1\phi base}$ (1.50)

Potencia base $MW_{1\phi} = MVA_{1\phi base}$ (1.51)

Impedancia en pu de un elemento $Z_{pu} = Z_{real en \Omega} / Z_{base\Omega}$ (1.52)

Para cualquier valor $Valor en pu = valor real / valor base$ (1.53)

El valor en pu de los $kVA_{3\phi}$ sobre los $kVA_{3\phi base}$ es idéntico a los valores en pu de los $kVA_{1\phi}$. La impedancia base y la corriente base se pueden calcular directamente sobre desde valores trifásicos de los kV y KVA base, por lo tanto se tiene [5], [6]:

$$\text{Corriente base en Amp.} \quad I_{\text{base}} = \text{kVA}_{3\phi\text{base}} / \sqrt{3} \text{ kV}_{\text{baseLL}} \quad (1.54)$$

$$\text{Impedancia base en Ohms} \quad Z_{\text{base}\Omega} = (\text{kV}_{\text{baseLL}} / \sqrt{3})^2 \times 1000 / (\text{kVA}_{3\phi\text{base}} / 3) \quad (1.55)$$

$$\text{Voltaje base en} \quad V_{\text{base}} = V_{\text{actual}} \times (\text{relación de transformación}) \quad (1.56)$$

$$\text{Impedancia base en Ohms} \quad Z_{\text{base}\Omega} = (\text{kV}_{\text{baseLL}})^2 \times 1000 / \text{kVA}_{3\phi\text{base}} \quad (1.57)$$

$$\text{Impedancia base en Ohms} \quad Z_{\text{base}\Omega} = (\text{kV}_{\text{baseLL}})^2 / \text{MVA}_{3\phi\text{base}} \quad (1.58)$$

Se hará evidente las ventajas de los cálculos en pu cuando los problemas por resolver sean más complejos y en particular cuando se incluyan los transformadores, ya que todo quedará resumido a una sola base.

Cuando la impedancia en pu de una componente del sistema se expresa sobre una base diferente, es necesario convertir la impedancia en pu de una base a otra, debido de que al hacer los cálculos, todas las impedancias de un sistema se deben de expresar sobre la misma impedancia base, por lo tanto, se tiene para cualquier elemento del circuito [5], [6]:

$$\text{Impedancia en pu} \quad Z_{\text{pu}} = Z_{\text{real en } \Omega} \times \text{KVA}_{\text{base}} / ((\text{kV}_{\text{base}})^2) \times 1000 \quad (1.59) \quad \text{®}$$

para cambiar la impedancia en pu sobre una base dada a impedancia en pu sobre una base nueva, se aplica la siguiente ecuación:

$$Z_{\text{nva. pu}} = Z_{\text{dada pu}} (\text{KV}_{\text{dado base}} / \text{KV}_{\text{nvo. base}})^2 (\text{KV}_{\text{Anvo. base}} / \text{KV}_{\text{Adado base}}) \quad (1.56)$$

Aplicación de los conceptos.

PROBLEMA 1. - Iniciaremos esta sección con un problema de un SEP con el fin de aplicar lo anteriormente descrito, sea un SEP [6], [7] con las características que describe el diagrama unifilar representado por la Fig. 1.25 sin carga. Las reactancias de las dos secciones de líneas de transmisión se muestran sobre el diagrama. Los generadores y transformadores tienen los siguientes valores nominales:

Generador 1: 20 MVA, 13.8 KV, $X'' = 0.20$ pu

Generador 2: 30 MVA, 18 KV, $X'' = 0.20$ pu

Generador 3: 30 MVA, 20 KV, $X'' = 0.20$ pu

Transformador T1: 25 MVA, 220 Y/13.8 Δ KV, $X = 10\%$

Transformador T2: unidades monofásicas cada una de 10 MVA, 127/18 KV, $X = 10\%$

Transformador T3: 35 MVA, 220 Y/ 22 Y KV, $X = 10\%$

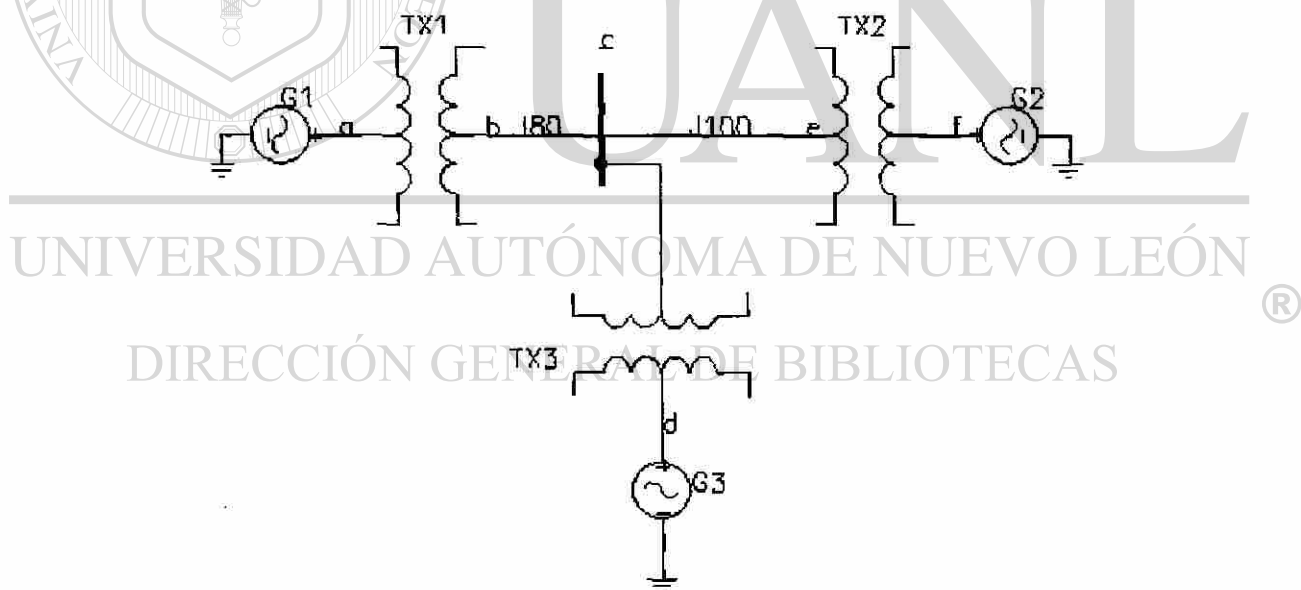


Fig. 1.25. - Diagrama unifilar para el problema 1.

Cada generador tiene reactancias de secuencia negativa y cero de 20 y 5%, respectivamente, sobre la base de sus valores nominales. La reactancia de secuencia cero de la línea de transmisión de B a C es de 210 Ω y de 250 Ω en la línea de C a E. A).-

Dibujar los diagramas de secuencia positiva, negativa y cero para el SEP. Señale los valores de todas las reactancias en pu sobre la base de 50 MVA y 13.8 KV en el generador uno. Los neutros de los generadores 1 y 3 se conectan a tierra a través de reactancias limitadoras de corriente de 5%, cada una sobre la base de la máquina a la que está conectada.

B).- Supongamos que el SEP está sin carga y que el voltaje en todo el sistema es de 1.0 pu sobre la base seleccionada en la parte (A). Encuentre el valor del fasor de la corriente de corto circuito en Amperes, si cada generador se representa por su reactancia subtransitoria, cuando ocurre un corto circuito trifásico desde la barra C a tierra.

Solución inciso (A):

De la Ec. 1.56 tenemos que en el generador 1 los valores nuevos de las secuencia (+), (-) y (0) son:

$$X_1 = X_2 = 0.20(13.8/13.8)^2 (50/20) = 0.5 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0.05(13.8/13.8)^2 (50/20) = 0.125 \text{ pu}$$

Voltaje base en el generador 2, una forma sencilla para relacionar las áreas de las bases es seccionando el transformador y aplicando el valor del voltaje del equipo por la relación de transformación, y, preguntándonos “hacia adonde vamos y de donde vengo”:

$$V_{\text{base}} = 220 (18/127) = 31.18 \text{ KV}$$

Voltaje base para el generador 3:

$$V_{\text{base}} = 220 (22/220) = 22 \text{ KV}$$

Reactancias en pu del generador 2:

$$X_1 = X_2 = 0.20 (18/31.18)^2 (50/30) = 0.1111 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0.05 (18/31.18)^2 (50/30) = 0.0278 \text{ pu}$$

Para el generador 3:

$$X_1 = X_2 = 0.20 (20/22)^2 (50/30) = 0.2755 \text{ pu}$$

$$X_0 = .05 (20/22)^2 (50/30) = 0.0689 \text{ pu}$$

Reactancias de secuencia (+), (-) y (0) para los transformadores:

Transformador T1:

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.1 (13.8/13.8)^2 (50/25) = 0.2 \text{ pu}$$

Transformador T2:

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.1 ((\sqrt{3} \times 18)/(31.18))^2 (50/3 \times 30) = 0.03851 \text{ pu}$$

Transformador T3:

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.1 (22/22)^2 (50/35) = 0.1429 \text{ pu}$$

Reactancias para las líneas de transmisión:

Impedancia base para la línea de transmisión B-C: (Ec. 1.55):

$$Z_{base} = (220)^2 / (50) = 968 \Omega$$

Reactancias de secuencia (+) y (-):

$$X_1 = X_2 = 80/968 = 0.0826 \text{ pu}$$

Reactancia de secuencia (0):

$$X_0 = 210 / 968 = 0.2169 \text{ pu}$$

Impedancia base para la línea de transmisión C - E, es la misma que para la línea de transmisión B - C, $Z_{base} = 968 \Omega$, pero no las de secuencias:

Reactancias de secuencia (+) Y (-):

$$X_1 = X_2 = 100/968 = 0.1033 \text{ pu}$$

Reactancia de secuencia (0):

$$X_0 = 250/968 = 0.2583 \text{ pu}$$

Las Fig's 1.26, 1.27 y 1.28 nos dan los circuitos de secuencia (+), (-) y (0), respectivamente.

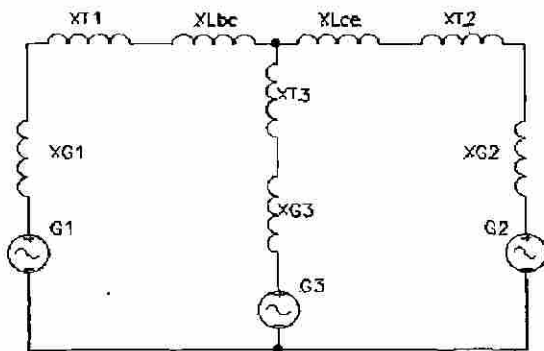


Fig. 1.26. - Diagrama de secuencia (+) del circuito de la Fig. 1.25.

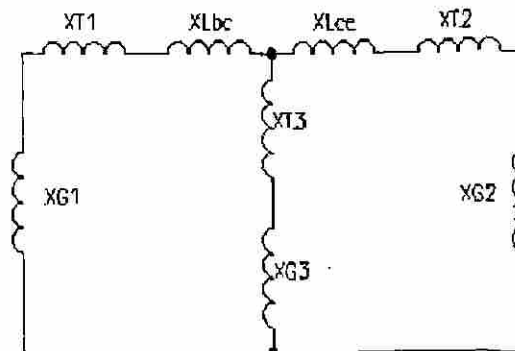


Fig. 1.27. - Diagrama de secuencia (-) del circuito de la Fig. 1.25.

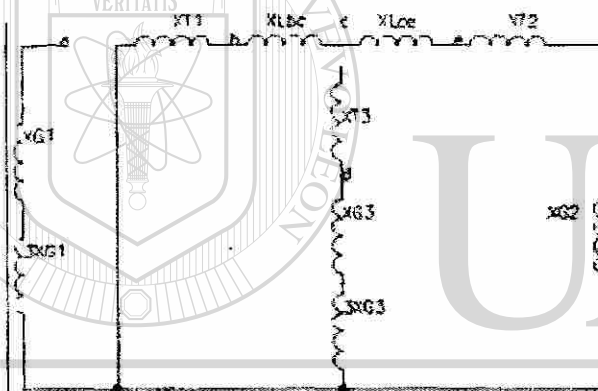


Fig. 1.28. - Diagrama de secuencia (0) del circuito de la Fig. 1.25

Solución inciso (B):

Para una falla trifásica simétrica, consideraremos únicamente el circuito de secuencia (+), debido a que la falla es balanceada, en esta red observamos que hacia la barra C, las reactancias de G1, T1 y LBC se encuentran en serie, así como las de LCD, T2 y G2, T3 y G3, reduciendo el circuito tenemos:

$$X_a = X_{g1} + X_{t1} + X_{bc} = j0.5 + j0.2 + j0.0826 = j0.7826 \text{ pu}$$

$$X_b = X_{g2} + X_{t2} + X_{ce} = j0.1111 + j0.0385 + j0.1033 = j0.2529 \text{ pu}$$

$$X_c = X_{g3} + X_{t3} = j0.2755 + j0.2 = j0.4755 \text{ pu}$$

Como todos los valores están interconectados en dos puntos comunes Fig. 1.27, las reactancias se encuentran en paralelo, aplicando un equivalente de Thevenin tenemos:

$$1/X = 1/X_a + 1/X_b + 1/X_c = 1/j0.7826 + 1/j0.2529 + 1/j0.4755 = -j7.3349$$

$$\therefore X = 1/-j7.3349 = j0.1363$$

El circuito resultante se muestra en la Fig. 1.27, ahora procedemos a calcular la corriente base (Ec's 1.50, 1.1 y 1.51), y la de corto circuito:

$$I_{base} = 50000 / (\sqrt{3} \times 220) = 157.58 \text{ Amp. Base}$$

$$I_{pu} = 1/j0.1363 = -j7.3349$$

$$I_{real} = 157.58 \times (-j7.3349) = -j1155.85 \text{ Amp.}$$

Una corriente de 1155.85 Amp. pasa a través del bus C a tierra.

1.11. - FALLAS ASIMÉTRICAS.

Un sistema de potencia en funcionamiento normal se puede considerar como un sistema balanceado, pero existen situaciones en la cual en un punto determinado el aislamiento puede fallar y hacer contacto con la tierra o con algún otro conductor, y es cuando se dice que ha ocurrido un corto circuito o falla. Las fallas de los SEP se pueden clasificar en cuatro tipos: falla de línea a tierra, falla de doble línea, falla de doble línea a tierra y falla trifásica. Las tres primeras constituyen operación del SEP de operación no balanceada y la última es una condición de falla balanceada. Es importante calcular los valores de voltaje y corriente del sistema durante la condición de falla, de tal forma para que se ajusten los dispositivos de protección para detectar y reducir los efectos perjudiciales que nos ocasionan.

1.11.1. - FALLA DE LÍNEA A TIERRA.

Éste tipo de falla es el que se presenta más comúnmente en todas las redes de un SEP, y por su ocurrencia, es el tipo de falla más estudiada. Supongamos que en el circuito de la Fig. 1.29, la fase a del generador es aterrizada, las condiciones para éste tipo de falle son: $I_b = 0$, $I_c = 0$ y $V_a = 0$, aplicando las componentes simétricas de las corrientes [5], [6], [7]

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.57)$$

con lo que deducimos que:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = (1/3) I_a \quad (1.58)$$

y en la cual:

$$I_a = 3I_{a1} \quad (1.59)$$

Ya que el voltaje en la fase a es igual a la suma de todas sus partes y tomando en cuenta su condición por lo que: $V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0$, deducimos que [5], [6], [7]:

$$-I_{a0}Z_0 + E_a - I_{a1}Z_1 - I_{a2}Z_2 = 0 \Rightarrow -I_{a1}(Z_1 + Z_2 + Z_0) = E_a$$

por lo tanto:

$$I_{a1} = E_a / (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (1.60)$$

$$\therefore Z_0 = Z_{g0} + 3Z_n$$

Esta ecuación se utiliza para determinar la corriente de falla, sin embargo, puede también interesarnos el comportamiento del voltaje y la corriente en las otras fases. Ahora, como las corrientes de secuencia son iguales ($I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$), deducimos que para una falla de línea a tierra las redes de secuencia positiva, negativa y cero están conectadas en serie, tal como se muestra en la Fig. 1.30 [4], [5], [6], [7], [8].

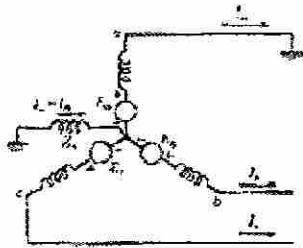


Fig. 1.29 - Diagrama del circuito para una falla de línea a tierra.

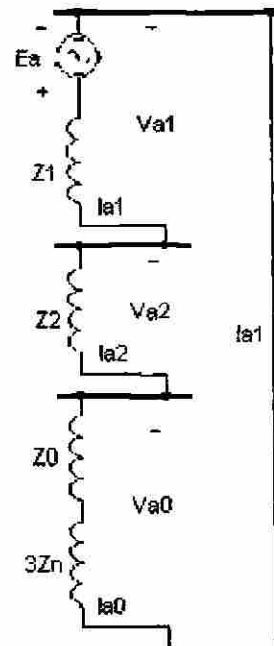


Fig. 1.30.- Diagrama de secuencia (+), (-) y (0) para una falla de línea a tierra.

1.11.2. - FALLA DE LÍNEA A LÍNEA.

Supongamos ahora que la fase a es la fase sin falla. La Fig. 1.31 nos muestra el corto circuito de línea a línea entre la fase b y c. Las condiciones para esta falla son: $I_a = 0$, $I_b = -I_c$ y $V_b = V_c$, aplicando las componentes simétricas de las corrientes [4], [5], [6]

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \quad (1.61)$$

por lo tanto

$$\begin{aligned} I_{a0} &= 0 \\ I_{a1} &= -I_{a2} \end{aligned} \quad (1.62)$$

En las Ec's. 1.62 observamos que la corriente de secuencia cero no influye y que su voltaje debe de ser cero, por lo tanto, los cálculos de una falla de línea a línea no incluye la red de secuencia cero, y , por lo tanto, las redes de secuencia positiva y negativa del circuito deben de estar en paralelo, como lo demuestra el siguiente cálculo, aplicando las componentes simétricas de los voltajes [4], [5], [6]

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.63)$$

con lo cual: $V_{a1} = V_{a2}$ y $V_{a0} = 0$

por medio de las redes de secuencia tenemos: $V_{a0} = 0$, $V_{a1} = E_a - I_{a1} Z_1$ e $I_{a2} = -I_{a1} Z_2$

con lo que resulta:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0 \Rightarrow E_a - I_{a1} Z_1 - I_{a1} Z_2 = 0$$

por lo tanto:

$$I_{a1} = E_a / (Z_1 + Z_2) \quad (1.64)$$

Esta ecuación se utiliza para determinar la corriente de falla, sin embargo, puede también interesarnos el comportamiento del voltaje y la corriente en las otras fases.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

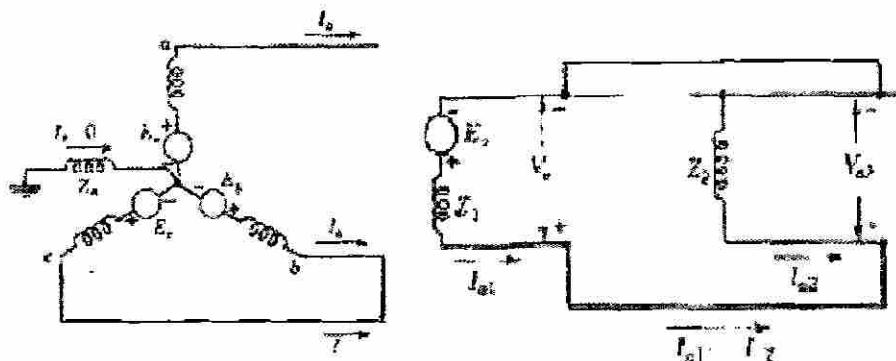


Fig. 1.31. - Diagrama del circuito para una falla de doble línea, y
Fig. 1.32. - Circuito de secuencia (+) y (-).

Ahora, como las corrientes de secuencia son iguales pero con el signo contrario ($I_{a1} = -I_{a2}$), deducimos que para una falla de línea a línea, las redes de secuencia positiva y negativa están conectadas en paralelo, tal como se muestra en la Fig. 1.32. [4], [5].

1.11.3. - FALLA DE DOBLE LÍNEA ATIERRA.

Supongamos ahora que la fase a es la fase sin falla. La Fig. 1.33 nos muestra el corto circuito de doble línea a tierra entre la fase b y c. Las condiciones para esta falla son: $I_a = 0$ y $V_b = V_c = 0$, aplicando las componentes simétricas de los voltajes [4], [5]

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.65)$$

con lo cual deducimos que:

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = (1/3)V_a$$

de esta expresión, deducimos que las redes de secuencia positiva, negativa y cero, para una falla de doble línea a tierra están conectadas en paralelo, tal como nos lo indica la Fig. 1.34. Para encontrar el voltaje de falla, la forma más simple es reducir el circuito serie-paralelo de la Fig. 1.34, y de ahí deducimos que la corriente para una falla de doble línea a tierra es [4], [5], [6]:

$$I_{a1} = E_a / (Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)) \quad (1.66)$$

Esta ecuación se utiliza para determinar la corriente de falla, sin embargo, puede también interesarnos el comportamiento del voltaje y la corriente en las otras fases. Ahora, como las corrientes de secuencia no son iguales debemos de encontrar las otras componentes de la corriente, y tomando en cuenta que $V_{a0} = V_{a1} = V_{a2}$, por lo tanto, como $V_{a1} = E_a - I_{a1} Z_1$ entonces por simple deducción tenemos:

$$I_{a2} = -V_{a1} / Z_2$$

$$I_{a0} = -V_{a1} / Z_0 \quad (1.67)$$

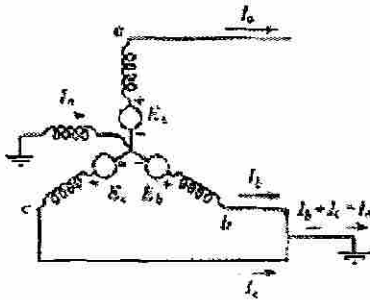


Fig. 1.33. - Circuito para una falla de doble línea a tierra.

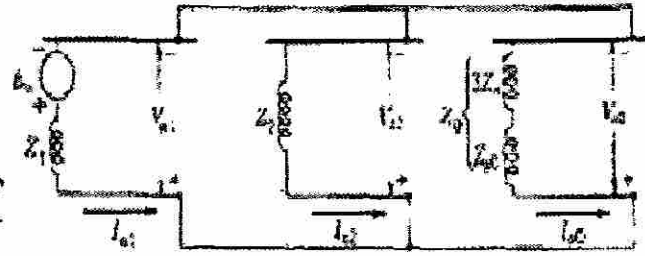
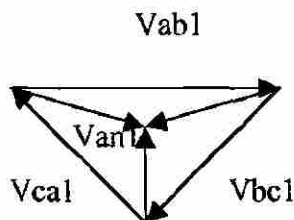


Fig. 1.34. - Conexión de las redes de secuencias (+), (-) y (0), para una falla de doble línea a tierra.

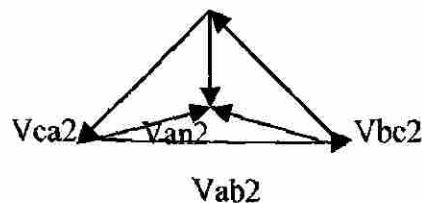
Continuaremos con la aplicación de los conceptos por medio de dos problemas, uno de ellos aplicando el concepto de componentes simétricas y el otro calculando una falla en un SEP.

PROBLEMA 2.- Los voltajes en las terminales de una carga balanceada que consisten en tres resistencias de 10Ω que están conectadas en Y son $V_{ab} = 100 \angle 0^\circ$, $V_{bc} = 90 \angle 240^\circ$, y $V_{ca} = 95.5 \angle 125.2^\circ$ volts. Encuentre una relación entre las componentes simétricas de los voltajes de línea y de fase, esto es, entre V_{ab1} y V_{an1} y entre V_{ab2} y V_{an2} . Se asume que no está conectado el neutro de la carga. Hallar las corrientes de línea a partir de las componentes simétricas de los voltajes de línea dados. Encuentre la potencia que consumen las tres resistencias de 10Ω , a partir de las componentes simétricas de las corrientes y voltajes.

SOLUCIÓN. El diagrama para los voltajes de secuencia (+) y (-) son:



Secuencia (+)



Secuencia (-)

En forma rectangular los voltajes de fase son:

$$V_{ab} = 100 + j0; \quad V_{bc} = -45 - j77.9423; \quad V_{ca} = -55.0493 + j78.03733 \text{ volts.}$$

De la Ec. 1.27 tenemos:

$$V_{ab1} = 1/3 (100 + 90 \angle 360^\circ + 95.5 \angle 365.2^\circ) = 95.03565 + j2.8851 = 95.1 \angle 1.74^\circ \text{ volts}$$

$$V_{ab2} = 1/3 (100 + 90 \angle 480^\circ + 95.5 \angle 245.2^\circ) = 4.9808 - j2.9168 = 5.77 \angle -30.35^\circ \text{ volts}$$

De las Ec's 1.5 y 1.6 tenemos:

$$V_{an1} = (V_{ab1} \angle -30^\circ) / \sqrt{3} = (95.1 \angle -28.26^\circ) / \sqrt{3} = 54.91 \angle -28.26^\circ = 48.365 - j25.998 \text{ V}$$

$$V_{an2} = (V_{ab2} \angle -30^\circ) / \sqrt{3} = (5.77 \angle -0.35^\circ) / \sqrt{3} = 3.33 \angle -0.35^\circ = 3.33 - j0.02 \text{ V}$$

De la ecuación 1.19 tenemos:

$$V_{an} = V_{an1} + V_{an2} = 51.7 - j26.02 = 57.9 \angle 26.72^\circ \text{ volts}$$

De la Ley de Ohm tenemos

$$I_a = (57.9 \angle -26.72^\circ) / 10 = 5.79 \angle -26.72^\circ \text{ Amp.}$$

Para los demás voltajes tenemos

$$V_{bn1} = 54.91 \angle -148.26^\circ = -46.6979 - j28.9287$$

$$V_{bn2} = 3.33 \angle 119.65^\circ = -1.6474 + j2.8939$$

$$V_{bn} = -48.35 - j26.03 = 54.91 \angle 151.7^\circ \text{ volts}$$

$$I_b = (54.91 \angle -151.7^\circ) / 10 = 5.49 \angle -151.7^\circ \text{ Amps.}$$

$$V_{cn1} = 54.91 \angle 91.74^\circ = -1.6673 + j54.8847$$

$$V_{cn2} = 3.33 \angle -120.35^\circ = -1.6826 - j2.8478$$

$$V_{cn} = -3.35 + j52.04 = 52.15 \angle 93.68^\circ \text{ volts}$$

$$I_c = (52.15 \angle 93.68^\circ) / 10 = 5.22 \angle 93.68^\circ \text{ Amps.}$$

Para la potencia, de las componentes simétricas de las corrientes y voltajes de fase son.

$$S = 3[V_{a0} \ V_{a1} \ V_{a2}] \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}^* = 3 \begin{bmatrix} 0 & 54.91 \angle -28.26^\circ & 3.33 \angle -0.35^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 5.49 \angle -28.26^\circ \\ 0.33 \angle -0.35^\circ \end{bmatrix}^*$$

$$\therefore S = 907.5 + j0 \text{ Var} = \text{Watts}$$

Por lo tanto la potencia activa es igual a la potencia aparente.

Finalizaremos este capítulo con un cálculo de falla de línea a tierra, de un problema de un SEP de los apuntes del M.C. José Manuel Merino Capellini [10], se aplicará el método porcentual. Tomar como base 100 MVA y 110 KV. Calcularemos la falla en el Bus 1.

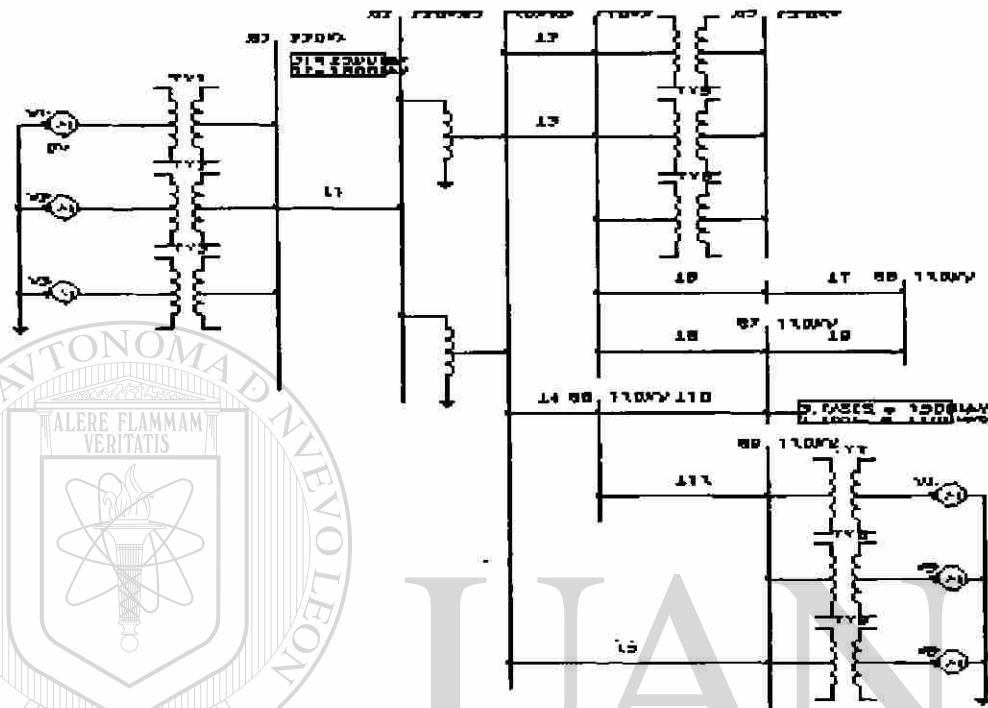


Fig. 1.35. - Sistema de potencia para calcular la falla en el bus 1, utilizando el método de los MVA.

PROBLEMA 3.- Del circuito de la Fig. 1.35, tenemos los siguientes datos:

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$G1 = G2 = G4 = G5 = 94 \text{ MVA}$; $X''_d = X'_d = X_d = 17.5\%$

$G3 = G6 = 133.33 \text{ MVA}$; $X''_d = X'_d = X_d = 13.6\%$

$T1 = T2 = 94 \text{ MVA}$; $Z = 17.09\%$

$T3 = T9 = 85 \text{ MVA}$; $Z = 8.1\%$

$T7 = T8 = 56 \text{ MVA}$; $Z = 8.5\%$

$T4 = T5 = T6 = 30 \text{ MVA}$; $Z = 8.9\%$

6 autotransformadores monofásicos con terciario en los que cada uno tiene los siguientes datos: $Z_{hx} = 5.64\%$ a 75 MVA; $Z_{ht} = 39.8\%$ a 75 MVA y $Z_{xt} = 11.4\%$ a 75 MVA.

$L1$: $Z1 = Z2 = 5.3\Omega$; $Z0 = 3.2 Z1$

$$L2 = L3 = 0.054 \text{ a } 200 \text{ MVA}; Z0 = 0.188$$

$$L4 : Z1 = Z2 = 4.35\Omega; Z0 = 3.22\Omega$$

$$L5 : Z1 = Z2 = 5.35\Omega; Z0 = 18.7\Omega$$

$$L6 : Z1 = Z2 = 3.56\Omega; Z0 = 12.4\Omega$$

$$L7 : Z1 = Z2 = 1\Omega; Z0 = 1.5v$$

$$L8 : Z1 = Z2 = 5.99\Omega; Z0 = 20.69\Omega$$

$$L9 : Z1 = Z2 = 4.2\Omega; Z0 = 13\Omega$$

$$L10 = L11 = 0.5\Omega; Z0 = 3.2\Omega$$

SOLUCIÓN: Iniciaremos nuestros cálculos encontrando todos los valores de reactancia aplicando una simple regla de tres:

a) Para los generadores G1, G2, G4 Y G5: $(94/0.175) = (100/X); \therefore X = J0.186$

b) Para los generadores G3 Y G6: $(133.33/0.136) = (100/X); \therefore X = J0.102$

c) Para los transformadores T1 Y T2: $(94/0.1709) = (100/X); \therefore X = J0.1818$

d) Para los transformadores T3 Y T9: $(85/0.081) = (100/X); \therefore X = J0.0953$

e) Para los transformadores T7 Y T8: $(56/0.085) = (100/X); \therefore X = J0.1517$

f) Para los transformadores T4, T5 Y T6: $(30/0.089) = (100/X); \therefore X = J0.2966$

g) Para los autotransformadores, tenemos que son monofásicos, por lo tanto su potencia

es de: $75 \times 3 = 225 \text{ MVA}; (225/0.0564) = (100/X); \therefore X = J0.0250 = Zhx; (225/0.398)$

$= (100/X); \therefore X = J0.1768 = Zht; (225/0.114) = (100/X); \therefore X = J0.0506 = Zxt; \text{ por lo tanto, de la Ec. 1.44: } Zh = J0.0756; Zx = J0.0506; \text{ y } Zt = J0.1012$

h) Para L1, de la Ec. 1.60 tenemos: $X = (5.3 \times 100) / (220)^2 = J0.0109$

i) Para L2 y L3: $(200/0.054) = (100/X); \therefore X = J0.027$

j) Para L4, de la Ec. 1.60 tenemos: $X = (4.35 \times 100) / (110)^2 = J0.0359$

k) Para L5: $X = (5.35 \times 100) / (110)^2 = J0.0442$

l) Para L6: $X = (3.56 \times 100) / (110)^2 = J0.0294$

m) Para L7: $X = (1 \times 100) / (110)^2 = J0.0083$

n) Para L8: $X = (5.99 \times 100) / (110)^2 = J0.0495$

o) Para L9: $X = (4.2 \times 100) / (110)^2 = J0.0347$

p) Para L10 y L11: $X = (0.5 \times 100) / (110)^2 = J0.0041$

q) Para la carga de 2500 MVA: $X = \text{MVA}_{\text{base}}/\text{Pcc}_{3\phi} = 100/2500 = \text{J}0.04$

r) Para la carga de 1500 MVA: $X = 100/1500 = \text{J}0.0666$

FALLA EN EL BUS 1.- La simplificación del diagrama de reactancias a una reactancia

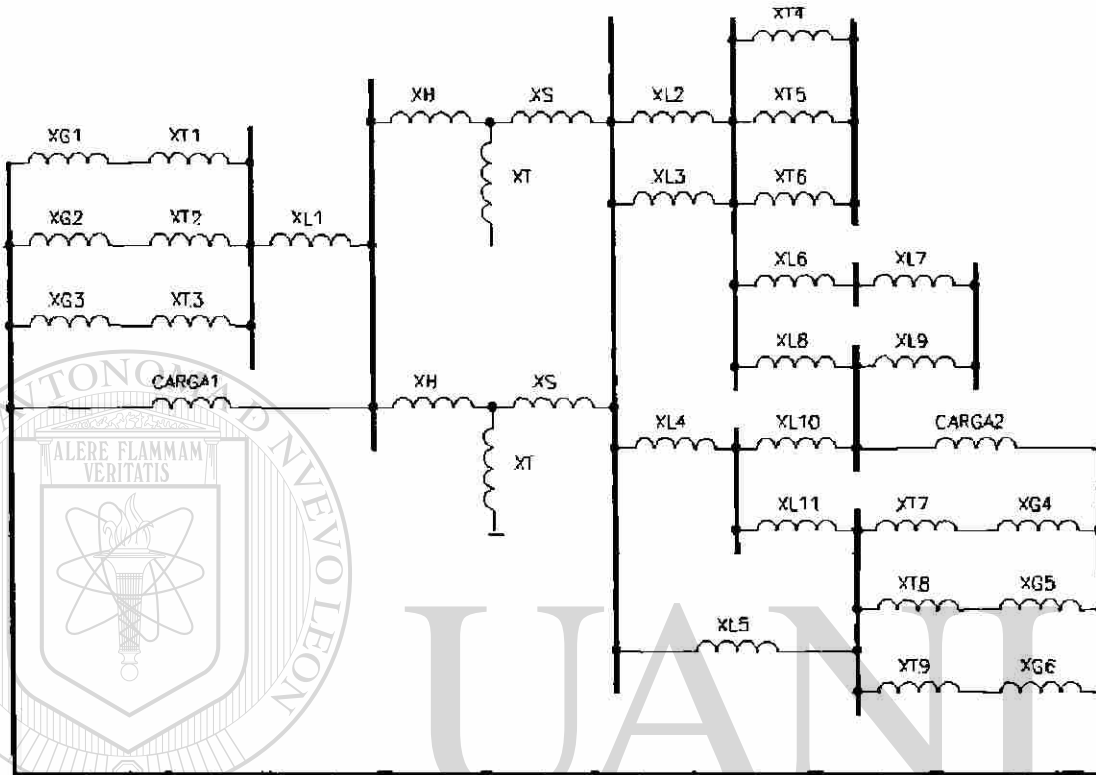


Fig. 1.36. - Diagrama de reactancias del circuito de la Fig. 1.35.

única equivalente se mostrará en las figuras subsiguientes para poder calcular la corriente de falla en el Bus 1. El diagrama de reactancias de la Fig. 1.35 se muestra en la Fig. 1.36.

SIMPLIFICACIONES: Para simplificar el circuito, se suman las reactancias en serie y se calculan las reactancias que están en paralelo:

$$X1 = X2 = XG1 + XT1 = j0.186 + j0.1818 = j0.3678$$

$$X3 = XG3 + XT3 = j0.102 + j0.0953 = j0.1973$$

$$X4 = X5 = XT7 + XG4 = j0.1517 + j0.186 = j0.3377$$

$$X6 = XT9 + XG6 = j0.0953 + j0.102 = j0.1973$$

$$(1/X7) = (1/XL2) + (1/XL3) = (1/j0.027) + (1/j0.027); \therefore X7 = j0.0135$$

$$(1/X_8) = (1/X_{T4}) + (1/X_{T5}) + (1/X_{T6}) = (1/j0.2966) + (1/j0.2966) + (1/j0.2966);$$

$$\therefore X_8 = j0.0988$$

$$X_9 = X_{L6} + X_{L7} + X_{L9} = j0.0294 + j0.0083 + j0.0347 = j0.0724$$

Como el terciario del autotransformador es una reactancia flotante, al igual que los transformadores T4, T5 y T6, se pueden despreciar sin que influyan significativamente en nuestros cálculos.

$$X_{10} = X_{11} = X_H + X_S = j0.0756 - j0.0506 = j0.025$$

El diagrama de reactancias simplificado queda como se muestra en la Fig. 1.37

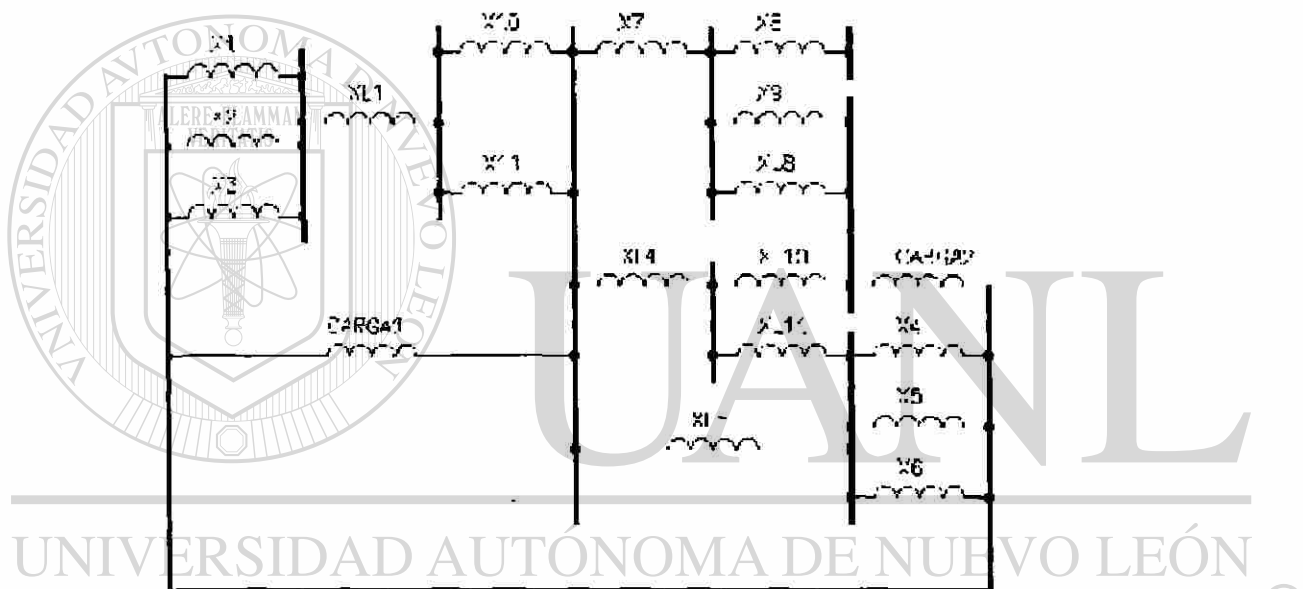


Fig. 1.37 Reducción de la red de la Fig. 1.36.

Continuando con las simplificaciones tenemos:

$$(1/X_{12}) = (1/X_1) + (1/X_2) + (1/X_3) = (2/j0.3678) + (1/j0.1973); \therefore X_{12} = j0.0952$$

$$(1/X_{13}) = (1/X_9) + (1/X_{L8}) = (1/j0.0724) + (1/j0.0495); \therefore X_{13} = j0.0294$$

$$(1/X_{14}) = (1/X_4) + (1/X_5) + (1/X_6) = (2/j0.3377) + (1/j0.1973); \therefore X_{11} = j0.0909$$

$$(1/X_{15}) = (1/X_{10}) + (1/X_{11}) = (2/j0.025); \therefore X_{15} = j0.0125$$

El diagrama simplificado del circuito de la Fig. 1.37 se muestra en la Fig. 1.38

Continuando con la simplificación del circuito tenemos:

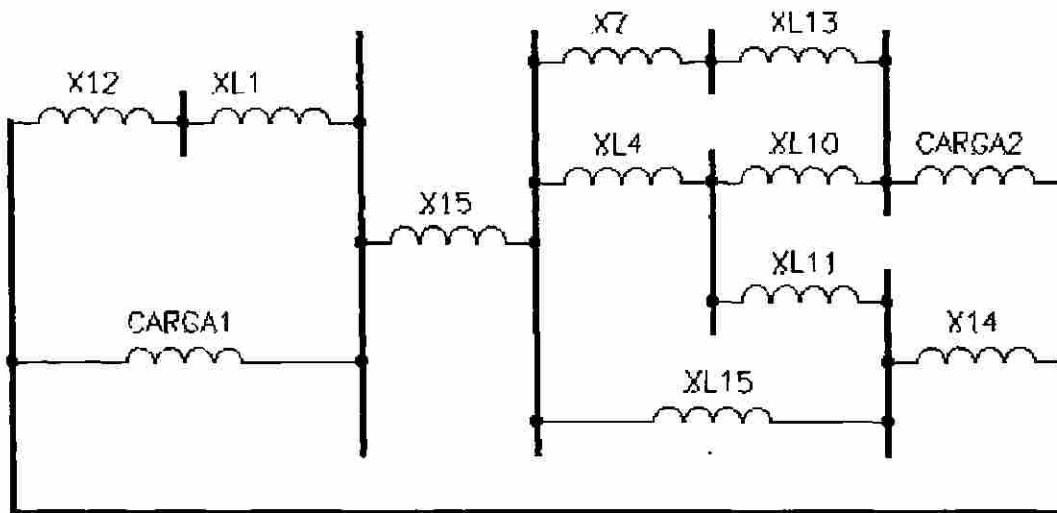


Fig. 1.38. Diagrama simplificado de la Fig. 1.37.

$$X16 = X7 + X13 = j0.0135 + j0.0294 = j0.0429$$

El diagrama de reactancias simplificado se muestra en la Fig. 1.39

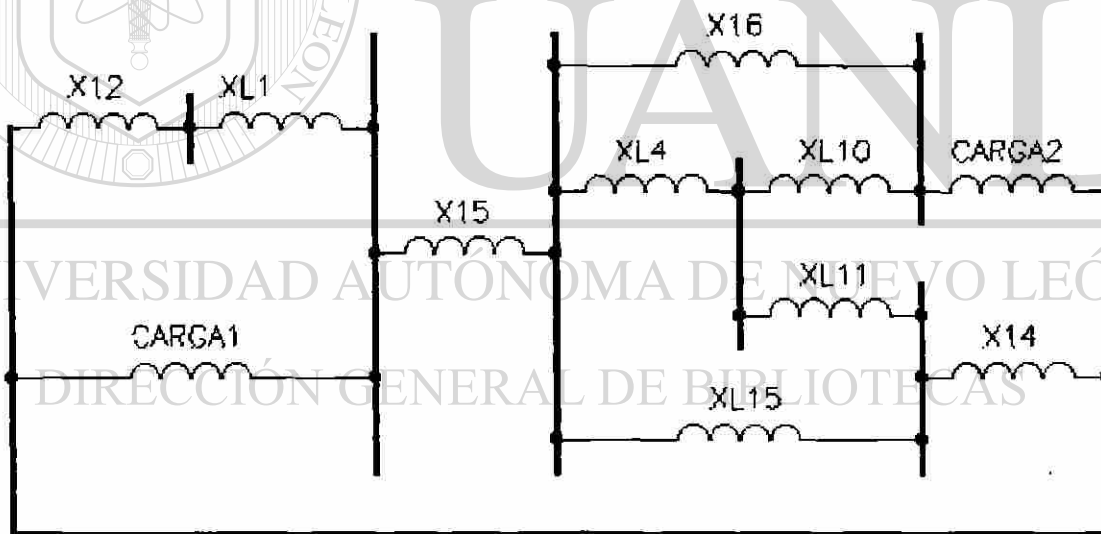


Fig. 1.39. Diagrama simplificado de la Fig. 1.38

Nuestras siguientes reducciones se efectuarán por medio de los equivalentes delta – estrella, de la Ec. B1 tenemos:

$$X17 = (X16 * XL10 + X16 * C2 + C2 * XL10) / XL10 = j^2(0.0429 * 0.0041 + 0.0429 * 0.0666 + 0.0041 * 0.0666) / 0.0041 = j0.8063$$

$$X18 = (X16*XL10 + X16*C2 + C2*XL10)/C2 = j^2 (0.0429*0.0041 + 0.0429*0.0666 + 0.0041*0.0666)/J0.0666 = J0.0496$$

$$X19 = (X16*XL10 + X16*C2 + C2*XL10)/X16 = j^2 (0.0429*0.0041 + 0.0429*0.0666 + 0.0041*0.0666)/J0.0429 = J0.0770$$

$$X20 = (XL11*X14 + XL11*XL5 + XL5*XL11)/XL5 = j^2 (0.0041*0.0909 + 0.0041*0.0442 + 0.0041*0.0442)/J0.0442 = J0.1034$$

$$X21 = (XL11*X14 + XL11*XL5 + XL5*XL11)/X14 = j^2 (0.0041*0.0909 + 0.0041*0.0442 + 0.0041*0.0442)/J0.0909 = J0.0503$$

$$X22 = (XL11*X14 + XL11*XL5 + XL5*XL11)/XL11 = j^2 (0.0041*0.0909 + 0.0041*0.0442 + 0.0041*0.0442)/J0.0041 = J1.115$$

El diagrama de estas simplificaciones resulta el de la Fig. 1.40

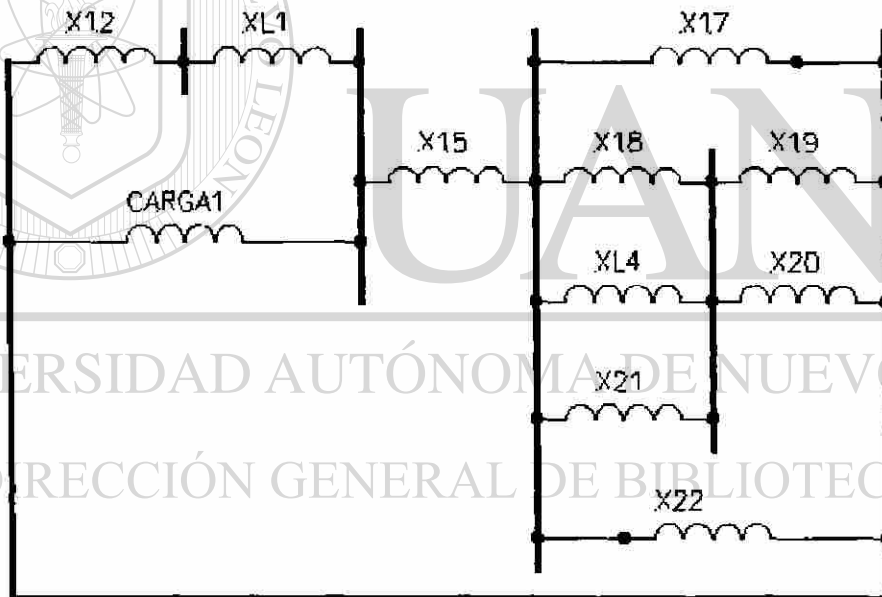


Fig. 1.40. Diagrama simplificado de la Fig. 1.39.

Continuando con nuestras reducciones tenemos:

$$(1/X23) = (1/X18) + (1/XL4) + (1/X21) = (1/J0.0496) + (1/J0.0359) + (1/J0.0503);$$

$$\therefore X23 = J0.0147$$

$$(1/X24) = (1/X17) + (1/X22) = (1/J0.8063) + (1/1.115); \therefore X24 = J0.4679$$

$$(1/X25) = (1/X19) + (1/X20) = (1/J0.0770) + (1/J0.1034); \therefore X25 = J0.0441$$

El diagrama simplificado es el de la Fig. 1.41

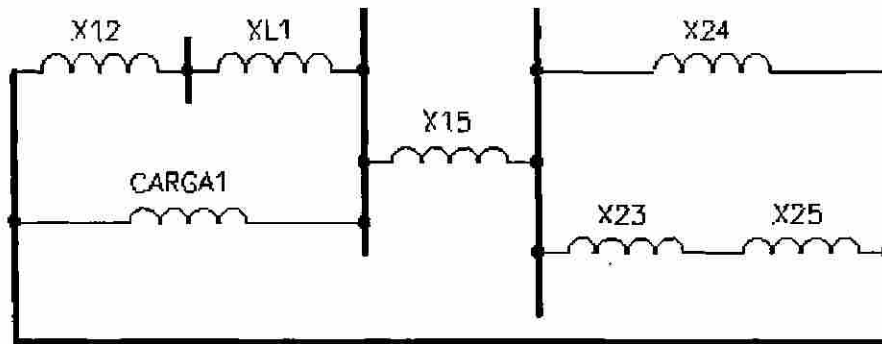


Fig. 1.41. - Diagrama simplificado de la Fig. 1.40.

Reduciendo el circuito serie paralelo

$$X_{26} = \frac{(X_{23} + X_{25}) * X_{24}}{(X_{23} + X_{24} + X_{25})} = \frac{(j0.0147 + j0.0441) * j0.4679}{(j0.0147 + j0.0441 + j0.4679)} = j0.0522$$

El circuito simplificado es el siguientes el de la Fig. 1.42

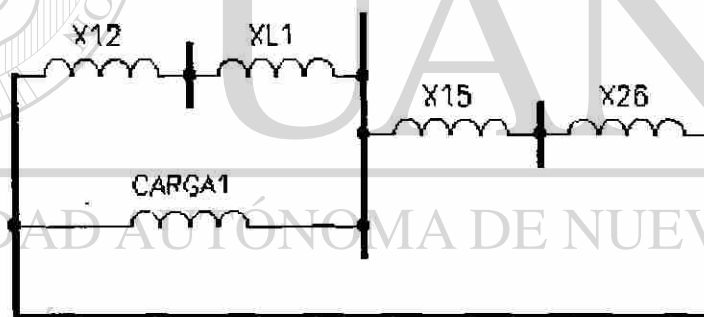


Fig. 1.42. - Circuito simplificado de la Fig. 1.41

Simplificando el circuito, observamos que las resistencias serie X15 y X26, están en paralelo con la carga 1, reduciendo

$$X_{27} = \frac{(X_{15} + X_{26}) * C1}{(C1 + X_{15} + X_{26})} = \frac{(j0.0125 + j0.0522) * j0.04}{(j0.0125 + j0.0522 + j0.04)} = j0.0247$$

Continuando la reducción de la red, observamos que las reactancias XL1 y X27 están en serie y a la vez en paralelo con X12, simplificando tenemos.

$$X_T = ((X_{27}+X_{L1}) \cdot X_{12}) / (X_{12}+X_{L1}+X_{27}) = ((J0.0247+J0.0109) \cdot J0.0952) / (J0.0247+J0.0109 + J0.0952) = J0.0259$$

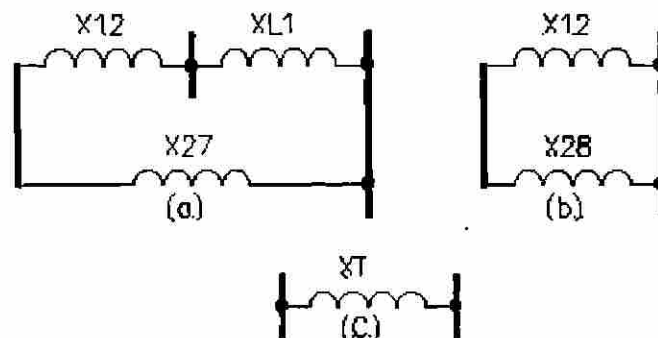


Fig. 1.43. Simplificaciones del diagrama de la Fig. 1.42. (a) Equivalente de X27; (b) Equivalente de X28; y, (c) Circuito equivalente de la Fig. 1.36.

El diagrama simplificado es como el que se muestra en la Fig.1.43, para calcular nuestra corriente de corto circuito, por medio de la potencia tenemos:

$$P_{cc} = MVA_{base} / X_{pu} = 100 / 0.0259 = 3861.0038$$

$$I_{cc3\phi bus1} = P_{cc3\phi} / \sqrt{3} \cdot KV = 3861.0038 \times 10^3 / \sqrt{3} \cdot 220 = 10144.52 \text{ Amperes.}$$

Esta es la corriente que pasará a través del bus 1 en caso de una falla, y aunque es un método aproximado nos da una referencia para tomar las medidas pertinentes.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 2.

CODIFICACIÓN DE CIRCUITOS EN ESTADO ESTABLE EN PSPICE.



UANL

INTRODUCCIÓN.-

Antes de entrar en detalle con la codificación de circuitos en estado estable, iniciaremos explicando el concepto de fasor, ya que este concepto es muy importante en el análisis de un circuito en estado estable, para que al codificar los elementos que intervienen en nuestro sistema de potencia, se tenga muy presente las cantidades fasoriales compuestas de magnitud y ángulo.

Posteriormente, hablaremos y codificaremos circuitos eléctricos en estado estable utilizando el paquete computacional Pspice, el cual es una herramienta poderosa en el análisis de circuitos eléctricos, tanto monofásicos como polifásicos, en estado estable y transitorio. No nos limitaremos exclusivamente a los circuitos eléctricos, sino también a

los circuitos electrónicos, ya que hoy en día, casi todas las ramas de la ingeniería tienen que ver con la electrónica y sus aplicaciones.

2.1. - FASOR Y DIAGRAMA FASORIAL.

Los fasores son números complejos que se representan por vectores en el plano, el cual se conoce como diagrama fasorial y son útiles en el análisis de circuitos en estado estable [1], [2], [3]. Consideremos el circuito de la Fig. 2.1 del cual dibujaremos los voltajes y corrientes en el diagrama fasorial. En este circuito, tomaremos a la corriente I como referencia, ya que es común a todos los elementos y en base a ello, calcularemos los demás fasores, denotemos a la corriente como:

$$I = |I| \angle 0^\circ \quad (2.1)$$

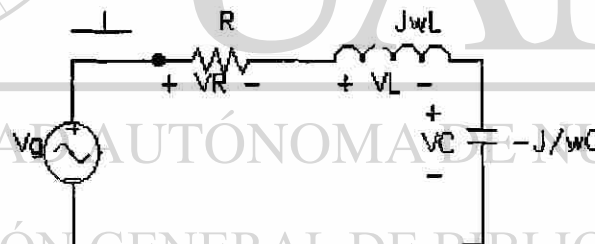


Fig. 2.1. - Circuito de fasores RLC en serie.

el ángulo de I se asigno arbitrariamente como cero. Los fasores de voltaje del circuito son:

$$V_R = RI = R|I| \quad (2.2)$$

$$V_L = j\omega LI = \omega L |I| \angle 90^\circ \quad (2.3)$$

$$V_C = (-j/\omega C)I = (1/\omega C) |I| \angle -90^\circ \quad (2.4)$$

pero como

$$V_g = V_R + V_L + V_C$$

estas representaciones aparecen en la Fig. 2.2, en donde podemos apreciar tres casos para los diagramas fasoriales [1]: $|V_L| > |V_C|$, $|V_L| < |V_C|$ y $|V_L| = |V_C|$. En el caso (a) la reactancia es inductiva y la corriente está atrasada con respecto al voltaje de la fuente por un ángulo θ que puede ser medido, en (b) la reactancia es capacitiva y la corriente se adelanta con respecto al voltaje y en (c) la corriente y el voltaje están en fase porque las componentes inductivas y capacitivas se cancelan una a la otra. Estas conclusiones también se derivan de la ecuación [1], [2], [3]:

$$I = V_g/Z = V_g/(R + j[\omega L - 1/\omega C]) \quad (2.5)$$

Lo anterior se desarrollo únicamente para que se tenga en claro el concepto de fasor, que es la cantidad que se compone de una magnitud y un argumento.

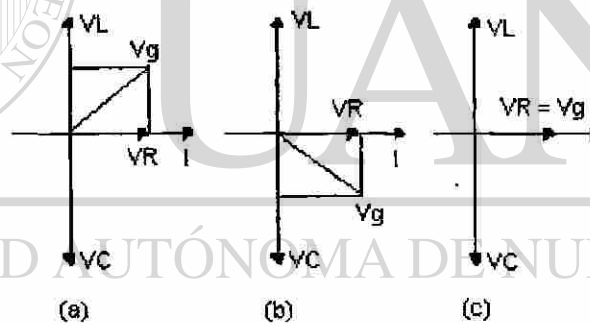


Fig. 2.2. - Diagramas fasoriales de la Fig. 2.1;
(a) reactancia inductiva; (b) reactancia capacitiva; (c) resistencia.

2.2. - GUIA DE REFERENCIA DEL PSPICE.

En esta sección, daremos una amplia referencia a cerca del software Pspice que nos será muy útil en el análisis y diseño de redes eléctricas, el cual es sumamente importante para la prueba y error, donde podemos probar varios valores de los elementos

de un circuito antes de adoptar aquel que por cuyo efecto sea para un mejor funcionamiento del circuito, [1], [2], [3], [9] [10], [11]. Toda la información descriptiva y de control pasa a Spice en un archivo de texto ordinario que se designa como archivo de entrada de Spice. Este archivo es un conjunto de enunciados separados por la tecla ENTER (↵), con un enunciado por fila, iniciando con el enunciado del título y se termina con el enunciado .END. Entre estos dos enunciados hay tres clases de enunciados: enunciados de lista de red que definen al sistema, enunciados de control y enunciados de comentarios. Los enunciados de lista de red definen al circuito: tipos de elementos, valores, parámetros e interconexiones. Los enunciados de control especifican el modo de análisis, las variables de salida y el tipo de salida que se desea y otra información de control. El enunciado de comentario va precedido de un asterisco (*) y es una instrucción para que Spice no tome en cuenta esa fila.

El lugar de todas las fuentes y de los elementos de la red y sus direcciones de referencia de voltajes y corrientes quedan indicados especificando sus nodos. Se inicia enunciando un nodo de referencia del circuito como nodo cero, los otros nodos quedan identificados por números enteros y están dados entre las interconexiones de red.

La caída de voltaje entre el nodo X y Y, se indica como $V(X,Y)$, con un signo positivo en el nodo X y un signo negativo en el nodo Y (siempre iremos de mas a menos tanto en las fuentes como en los elementos). Si se desea calcular una caída de voltaje entre $V(X,0)$ se puede abreviar como $V(X)$. Las corrientes se indican en la forma $I(\text{elemento})$, donde elemento es la codificación que se le asigno a una fuente o elemento de la red y se desea en ese punto conocer el valor de la corriente, por ejemplo $I(R1)$ es el valor de la corriente a través de la resistencia R1.

2.3. - COMO ENTRAR A PSPICE.

Una vez que se ha entrado al archivo Pspice y se tenga la pantalla azul, se siguen los siguientes pasos:

1. - En FILE se da un ↵ (Fig. 2.3), y cuando despliegue su ventana, en CURRENT FILE se da otro ↵ y aparecerá en la pantalla una ventana, la cual nos pedirá que a la red se le dé un nombre, por ejemplo, podemos llamarle Análisis de estado transitorio, con este nombre se identificará el archivo (Fig. 2.4), después volvemos a llamar a FILE ↵ y seleccionamos el comando EDIT y se nos cambiará la pantalla azul a una con un marco verde, es en esta pantalla en donde codificaremos a nuestra red (Fig. 2.5). El nombre que se le asigno a la red es con el fin de que se pueda llamar y hacerle los ajustes necesarios cuantas veces queramos.

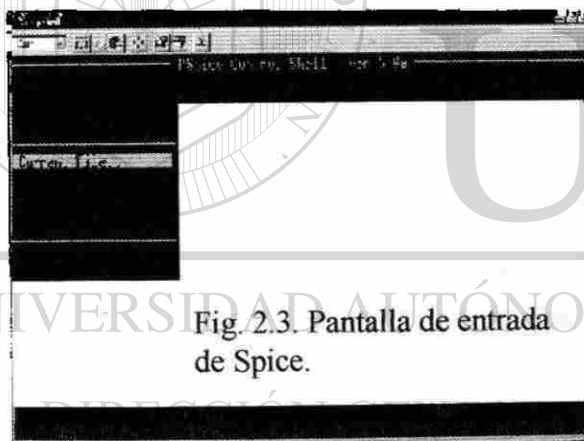


Fig. 2.3. Pantalla de entrada de Spice.

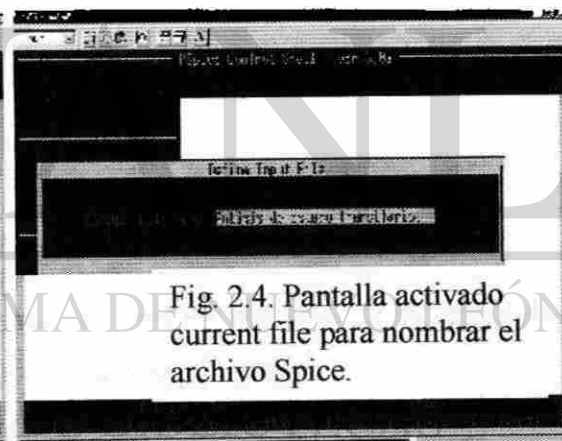


Fig. 2.4. Pantalla activado current file para nombrar el archivo Spice.

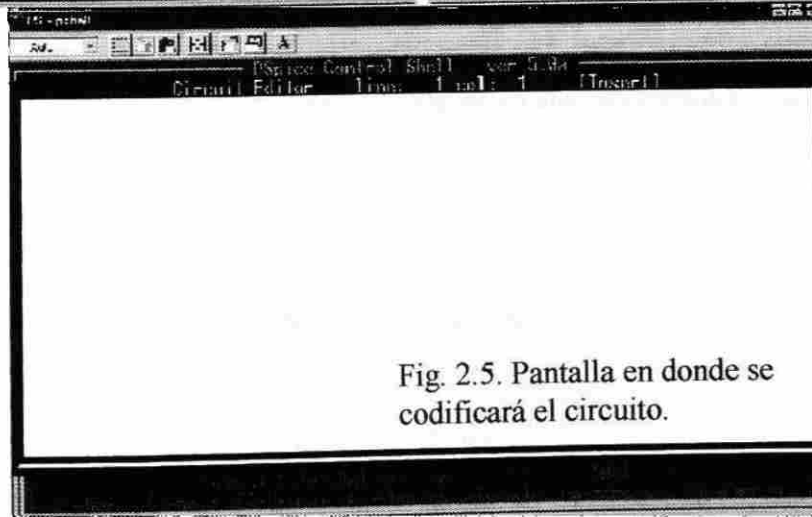


Fig. 2.5. Pantalla en donde se codificará el circuito.

2. - El primer renglón queda restringido al enunciado del título del archivo de entrada Pspice. se utiliza el enunciado de título para identificar al circuito que se estudia por ejemplo:

ANÁLISIS DE ESTADO ESTABLE DEL SISTEMA DE POTENCIA.

si se desean asignarle algunos comentarios, se deberá de iniciar con un asterisco, estos comentarios se pueden colocar indistintamente en cualquier fila de la hoja de cálculo del Spice, por ejemplo:

*SE DESEA CALCULAR LA CORRIENTE Y VOLTAJE EN EL PUNTO 3.

3. - A continuación se codifican las fuentes y los diversos elementos que intervienen en el circuito a analizar, codificando de la siguiente forma:

Para fuentes independientes de voltaje y corriente:

V<NOMBRE> <NODO +> <NODO -> <TIPO> <VALOR> [ESPECTRO TRANS.]

I<NOMBRE> <NODO +> <NODO -> <TIPO> <VALOR> [ESPECTRO TRANS.]

V denota a la fuente de voltaje independiente.

I denota a la fuente de corriente independiente.

NOMBRE denota a cualquier serie alfanumérica de 1 a 7 caracteres.

NODOS si es fuente de voltaje se toman del mayor al menor potencial, si es fuente de corriente se toma en sentido que indica la flecha, de la cola a la punta.

TIPO es DC por omisión y AC para una fuente senoidal.

VALOR es el valor de la fuente en DC o una magnitud y fase en grados para AC.

ESPECTRO TRANSITORIO se utiliza únicamente en análisis transitorio de un circuito.

Para los elementos:

R<NOMBRE> <NODO +> <NODO -> <VALOR>

L<NOMBRE> <NODO +> <NODO -> <VALOR>

C<NOMBRE> <NODO +> <NODO -> <VALOR>

NOMBRE denota a cualquier serie alfanumérica de 1 a 7 caracteres.

NODOS definen la polaridad de la conexión

VALOR es el valor de los elementos que intervienen en las conexiones, si es de resistencia, se expresa en Ohms, si es un inductor se expresa en Henrys y si es un capacitor se expresa en Faradays.

4. - A continuación se dan los enunciados de control para las soluciones [1], [2], [9], [10], [11], todos los enunciados se inician con un punto (.), los comandos principales para esta tesis son: .AC, .DC, .FOUR, .IC y .TRAN.

.AC éste enunciado se utiliza para calcular la frecuencia de un circuito sobre un rango de frecuencias, como a continuación se describe:

.AC [LIN] [OCT] [DEC] <VALOR (PUNTOS)> <VALOR (FREC. INICIAL)>
<VALOR (FREC. FINAL)>

LIN esta sentencia nos indica que la frecuencia varía linealmente desde la condición inicial hasta la final, tomando en cuenta el valor de puntos que es el número de puntos en el barrido, las otras sentencia OCT nos efectúa un barrido por octavas y la frecuencia en éste caso es barrida logarítmicamente, al igual que la sentencia DEC pero en décadas, se debe de especificar una sola de estas sentencias.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

.DC este enunciado hace que se realice un barrido DC para el circuito y tiene la forma:

.DC <NOMBRE (VARIABLE DE BARRIDO)> <VALOR (INICIAL)> <VALOR (FINAL)> <VALOR (INCREMENTO)>

NOMBRE (VARIABLE DE BARRIDO) es el nombre de una fuente independiente de voltaje o corriente a la cual se le hará un barrido desde una condición inicial hasta una condición final, por medio de un valor de incremento que puede variar desde un solo punto o todo el barrido especificando un sólo punto.

.FOUR éste enunciado es par realizar un análisis de Fourier, la cual realiza una descomposición en componentes de Fourier como resultado de un análisis transitorio, éste enunciado requiere de un enunciado TRAN que se describirá más adelante, y tiene la forma:

FOUR <VALOR (FRECUENCIA)> <VARIABLE DE SALIDA>*

VARIABLE DE SALIDA es una lista de una o más variables para las que se desean las componentes de Fourier. El análisis de fourier se realiza iniciando con los resultados del análisis momentáneo para las variables de salida especificadas. Para estos voltajes o corrientes, se calculan las componentes DC, la frecuencia fundamental y los armónicos segundo a noveno. La frecuencia fundamental es VALOR (FRECUENCIA) que especifica el periodo para el análisis. El análisis transitorio debe de tener por lo menos una duración de $1/\langle \text{VALOR (FRECUENCIA)} \rangle$, segundos.

.IC éste enunciado se utiliza cuando existen condiciones iniciales para el análisis transitorio, tiene la forma:

IC <V (<NODO>) = <VALOR>>*

En éste caso cada valor es un voltaje que se asigna al nodo para el voltaje del nodo inicial en el instante $t = 0$ para el análisis transitorio

.TRAN éste enunciado hace que se realice un análisis transitorio en un circuito y tiene la forma:

TRAN <VALOR (ETAPA DE IMPRESIÓN)> <VALOR (TIEMPO FINAL)> [UIC]

El análisis transitorio calcula el comportamiento del circuito respecto al tiempo, iniciándose en el tiempo $t = 0$ y hacia un VALOR (TIEMPO FINAL). El VALOR (ETAPA DE IMPRESIÓN) es el intervalo de tiempo que se utiliza para graficar o

imprimir los resultados del análisis. La palabra UIC hace que se utilicen condiciones iniciales fijas utilizadas para inductores y capacitores con la especificación IC.

5. - En este punto especificamos los enunciados de control de salida para imprimir o graficar, son los enunciados.PRINT, .PLOT y WIDTH.

.PRINT éste enunciado permite que los resultados de salida en AC, DC o transitorio, aparezcan en forma de tabla, tienen la forma:

`.PRINT [DC] [AC] [TRAN] [VARIBLE DE SALIDA]*`

En éste caso AC DC y TRAN son los tipos de análisis que pueden ser salida, se debe de especificar un tipo de análisis, no habiendo limite a la cantidad de variables de salida. El formato de salida (caracteres por línea) queda determinado con el comando.WIDTH

.PLOT éste enunciado permite que los resultados de los análisis transitorio, AC o DC sean en forma de gráficas, tienen la forma:

`.PLOT [DC] [AC] [TRAN] [VARIBLE DE SALIDA]* + ([<VALOR (LIMITE INFERIOR)> <VALOR (LIMITE SUPERIOR)>])`

En éste caso AC, DC y TRAN son los tipos de análisis que pueden ser salida, se debe de especificar un tipo de análisis. [VARIBLE DE SALIDA]* es una lista de las variables de salida deseadas para la gráfica, se permite un máximo de ocho variables de salida en este tipo de enunciados. El rango e incremento del eje x quedan fijos por el análisis que sé gráfica. El rango del eje y puede fijarse añadiendo ([<VALOR (LIMITE INFERIOR)> <VALOR (LIMITE SUPERIOR)>]) a las variables de salida, si no se especifican límites para el eje y, el programa automáticamente determina los límites de la gráfica.

.WIDTH éste enunciado fija la amplitud de la salida, tiene la forma:

.WIDTH SALIDA = <VALOR>

En donde valor es el número de columnas y debe ser 80 o 132.

6. - Finalmente, tenemos los enunciados finales, los enunciados de final para los archivos de subcircuitos y circuitos son .ENDS y .END.

.ENDS marca el final de una definición de subcircuito (iniciada por un enunciado .SUBCKT), y tiene la forma:

.ENDS [NOMBRE (SUBCIRCUITO)]

.END marca el final de un archivo.

2.4. - CODIFICACIÓN COMO DIAGRAMA UNIFILAR.

En esta sección realizaremos diversas operaciones para codificar y obtener resultados de los circuitos que se analizarán, tanto de CD como de CA, en estado estable y en estado transitorio, variando tiempo y frecuencia para el caso de C.A.

Sea la Fig. 2.6, el circuito a analizar, deseamos calcular todos los valores de voltajes que existen a lo largo de todo el circuito en condición estable C.D. [1].

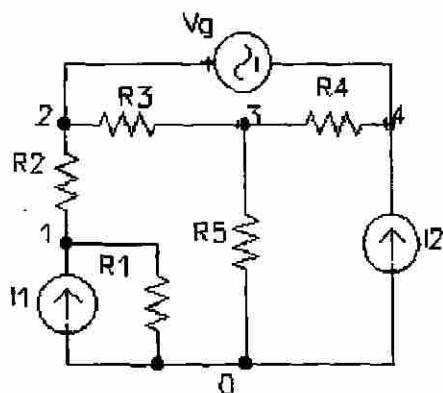


Fig. 2.6. Circuito para el ejemplo 1 con Pspice.

La codificación y su respectiva respuesta del circuito del ejemplo anterior, se nos muestra en la siguiente hoja de cálculo:

**** 10/19/98 19:36:55 ***** Evaluation PSpice (September 1991)

OBTENER VOLTAJE EN TODOS LOS PUNTOS DEL CIRCUITO.

**** CIRCUIT DESCRIPTION

I1 0 1 DC 1

R1 1 0 6

R2 1 2 2

R3 2 3 6

R4 3 4 3

R5 3 0 4

I2 0 4 DC 3

V1 2 4 12

.PRINT DC V(1) V(2) V(3) V(4)

.END

**** 10/19/98 19:36:55 ***** Evaluation PSpice (September 1991)

OBTENER VOLTAJE EN TODOS LOS PUNTOS DEL CIRCUITO.

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE

(1) 14.5710 (2) 17.4290 (3) 6.2857 (4) 5.4286

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME CURRENT

V1 -3.286E+00

TOTAL POWER DISSIPATION 3.94E+01 WATTS

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .05

La salida resultante de Pspice nos muestra los diferentes valores de voltajes de todos los nodos, y que la corriente de la fuente V1 es de -3.286 Amp. La potencia total disipada de 39.4 watts es la potencia emitida por cada fuente independiente, y es un problema D.C. sin que se pida. Sin embargo la potencia disipada por cualquier elemento debe de ser calculada.

Sea la Fig. 2.7 el circuito a analizar con un barrido (sweep) de la fuente de 12 volts, encontraremos como se comporta el voltaje en la resistencia de 5 ohms a los diferentes niveles de voltaje suministrado.

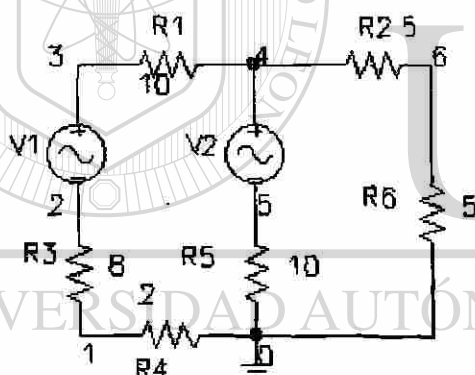


Fig. 2.7. Circuito para analizarlo con la función sweep.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La codificación y su respectiva respuesta del circuito del ejemplo anterior, se nos muestra en la siguiente hoja de cálculo:

**** 10/19/98 23:18:19 ***** Evaluation PSpice (September 1991)

ANALISIS CON LA FUNCION SWEEP .DC

**** CIRCUIT DESCRIPTION

R4 0 1 2


```

R3 1 2 8
V1 3 2 DC 6
R1 3 4 10
V2 4 5 DC 12
R5 0 5 10
R2 4 6 5
R6 6 0 5
.DC V2 -12 12 2
.PRINT DC V(1) V(2) V(3) V(4) V(5) V(6)
.END

```

```

**** 10/19/98 23:18:19 ***** Evaluation PSpice (September 1991)

```

```

*****

```

```

ANALISIS CON LA FUNCION SWEEP .DC

```

```

**** DC TRANSFER CURVES TEMPERATURE = 27.000 DEG C

```

```

*****

```

```

*****

```

V2	V(1)	V(2)	V(3)	V(4)	V(5)
-1.200E+01	-9.600E-01	-4.800E+00	1.200E+00	-3.600E+00	8.400E+00
-1.000E+01	-8.800E-01	-4.400E+00	1.600E+00	-2.800E+00	7.200E+00
-8.000E+00	-8.000E-01	-4.000E+00	2.000E+00	-2.000E+00	6.000E+00
-6.000E+00	-7.200E-01	-3.600E+00	2.400E+00	-1.200E+00	4.800E+00
-4.000E+00	-6.400E-01	-3.200E+00	2.800E+00	-4.000E-01	3.600E+00
-2.000E+00	-5.600E-01	-2.800E+00	3.200E+00	4.000E-01	2.400E+00
0.000E+00	-4.800E-01	-2.400E+00	3.600E+00	1.200E+00	1.200E+00
2.000E+00	-4.000E-01	-2.000E+00	4.000E+00	2.000E+00	0.000E+00
4.000E+00	-3.200E-01	-1.600E+00	4.400E+00	2.800E+00	-1.200E+00
6.000E+00	-2.400E-01	-1.200E+00	4.800E+00	3.600E+00	-2.400E+00
8.000E+00	-1.600E-01	-8.000E-01	5.200E+00	4.400E+00	-3.600E+00
1.000E+01	-8.000E-02	-4.000E-01	5.600E+00	5.200E+00	-4.800E+00
1.200E+01	1.776E-16	8.882E-16	6.000E+00	6.000E+00	-6.000E+00

**** 10/19/98 23:18:19 ***** Evaluation PSpice (September 1991)

ANALISIS CON LA FUNCION SWEEP .DC

**** DC TRANSFER CURVES TEMPERATURE = 27.000 DEG C

V2 V(6)

-1.200E+01 -1.800E+00

-1.000E+01 -1.400E+00

-8.000E+00 -1.000E+00

-6.000E+00 -6.000E-01

-4.000E+00 -2.000E-01

-2.000E+00 2.000E-01

0.000E+00 6.000E-01

2.000E+00 1.000E+00

4.000E+00 1.400E+00

6.000E+00 1.800E+00

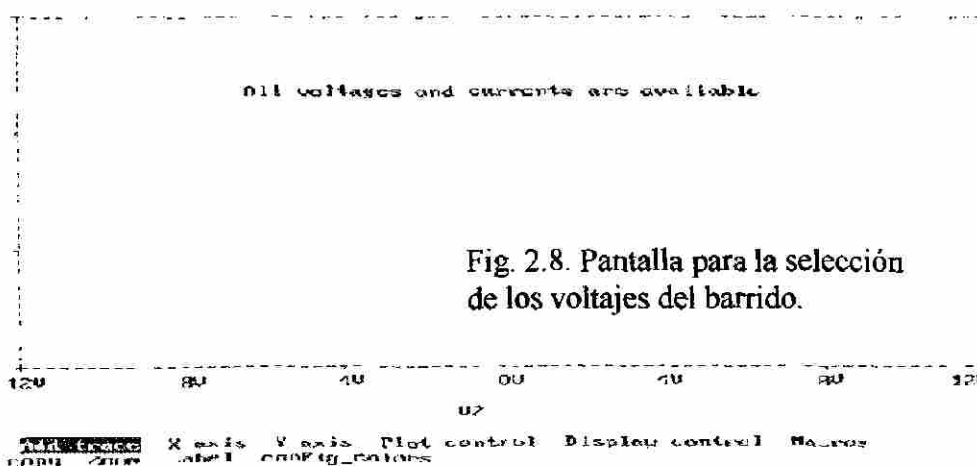
8.000E+00 2.200E+00

1.000E+01 2.600E+00

1.200E+01 3.000E+00

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .38



La salida resultante de Pspice nos muestra los diferentes valores de voltajes del barrido que se efectuó en la fuente V2, se le pidió que calculara todos los voltajes de los nodos, y que el voltaje partiera de -12 volts a 12 volts, con incremento de 2 volts, por default en esta versión de Spice nos entrega las gráficas del comportamiento del voltaje,

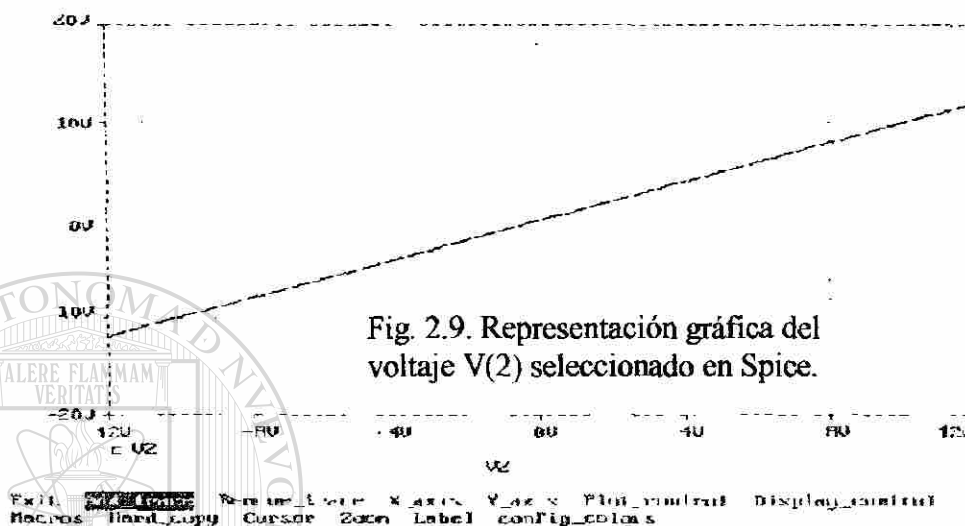
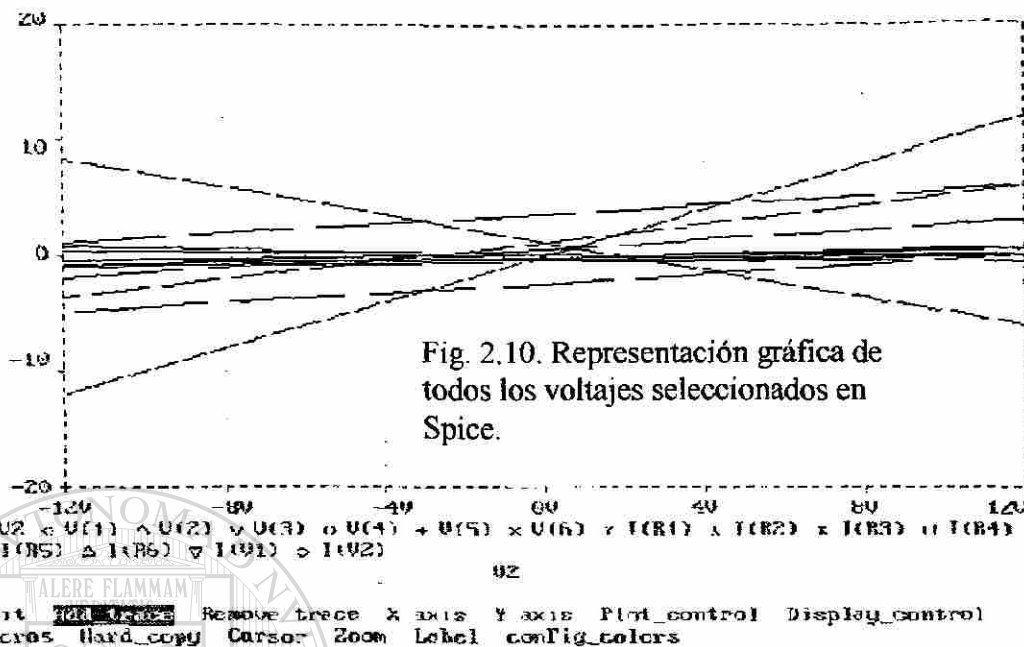
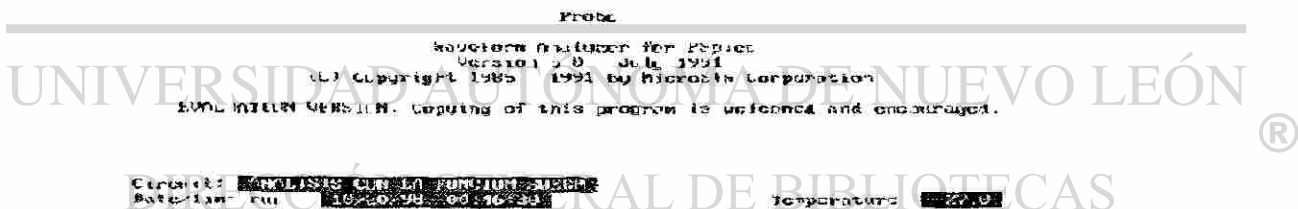


Fig. 2.9. Representación gráfica del voltaje V(2) seleccionado en Spice.

para poder visualizar estas gráficas se siguen lo siguiente: se nos aparecerá una pantalla con un rotulo que nos indica que todos los valores de voltaje y corriente están disponibles (Fig. 2.8), en la parte inferior hay varias leyendas, la que nos interesa es la que dice adherir trazos (ADD-TRACE), en esta leyenda se da un ↵, y en la parte superior aparecerán los puntos que se quieran trazar ya sea de voltaje o corriente, seleccionamos V2 y Spice nos enviara un titulo diciendo que pulsemos la tecla F4 para que inserte el voltaje V1 y un ↵ (Fig. 2.9), se pueden seleccionar todos los titulos o solo los que nos interese, para este ejemplo, seleccionamos todos, tal como se muestra en la Fig. 2.10.



Para salir de esta pantalla seleccionamos EXIT, y Spice nos enviara a la pantalla de la Fig. 2.11, en donde volveremos a seleccionar Exit-program para que estemos en el editor.



Continuando con nuestro análisis, ahora codificaremos circuitos de C.A., cabe hacer mención de que debemos de poner el valor de las fuentes en forma polar, y en el caso en donde haya una función de la onda seno o coseno, ésta se deberá de poner en función de una sola onda senoidal, ya sea seno o coseno, ya que Spice nos codificará estos valores como magnitud y ángulo de fase de la onda seleccionada.

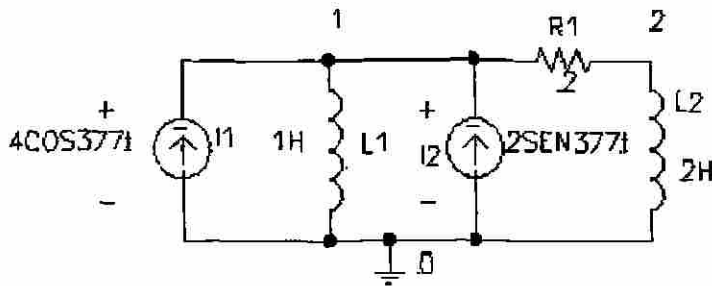


Fig. 2.12. Circuito para análisis de CA.

Del circuito de la Fig. 2.12 [1], deseamos encontrar la respuesta de estado estable de los voltajes y corrientes del circuito. Para este problema haremos la simulación para una variación de frecuencias desde 10 Hz a 60 Hz, y observar la variación del voltaje y de la corriente como a continuación se describe:

**** 10/21/98 23:48:47 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE UN CIRCUITO DE C.A.

**** CIRCUIT DESCRIPTION

I1 0 1 AC 4 0

L1 1 0 1

C1 1 0 0.5

I2 0 1 AC 2 90

R1 1 2 2

L2 2 0 2

[f=377/(2*pi)Hz]

.AC LIN 6 10 60

.PRINT AC VM(1) VP(1) VM(2) VP(2) IR(L1) II(L1) IR(R1) II(R1) IR(C1) II(C1)

.PLOT AC VM(1) VP(1) VM(2) VP(2) IR(L1) II(L1) IR(R1) II(R1) IR(C1) II(C1)

.END

**** 10/21/98 23:48:47 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE UN CIRCUITO DE C.A.

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE

(1) 0.0000 (2) 0.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME CURRENT

TOTAL POWER DISSIPATION 0.00E+00 WATTS

**** 10/21/98 23:48:47 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE UN CIRCUITO DE C.A.

**** AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

FREQ	VM(1)	VP(1)	VM(2)	VP(2)	IR(L1)
1.000E+01	1.425E-01	-6.343E+01	1.424E-01	-6.252E+01	-2.028E-03
2.000E+01	7.119E-02	-6.343E+01	7.119E-02	-6.298E+01	-5.067E-04
3.000E+01	4.745E-02	-6.344E+01	4.745E-02	-6.313E+01	-2.252E-04
4.000E+01	3.559E-02	-6.344E+01	3.559E-02	-6.321E+01	-1.267E-04
5.000E+01	2.847E-02	-6.344E+01	2.847E-02	-6.325E+01	-8.106E-05
6.000E+01	2.373E-02	-6.344E+01	2.373E-02	-6.328E+01	-5.629E-05

**** 10/21/98 23:48:47 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE UN CIRCUITO DE C.A.

**** AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

FREQ	II(L1)	IR(R1)	II(R1)	IR(C1)	II(C1)
1.000E+01	-1.014E-03	-1.006E-03	-5.230E-04	4.003E+00	2.002E+00
2.000E+01	-2.534E-04	-2.523E-04	-1.287E-04	4.001E+00	2.000E+00
3.000E+01	-1.126E-04	-1.123E-04	-5.689E-05	4.000E+00	2.000E+00
4.000E+01	-6.333E-05	-6.320E-05	-3.192E-05	4.000E+00	2.000E+00
5.000E+01	-4.053E-05	-4.046E-05	-2.039E-05	4.000E+00	2.000E+00
6.000E+01	-2.815E-05	-2.811E-05	-1.415E-05	4.000E+00	2.000E+00

**** 10/21/98 23:48:47 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE UN CIRCUITO DE C.A.

**** AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

LEGEND:

*: VM(1)

+: VP(1)

=: VM(2)

\$. VP(2)

0: IR(L1)

<: II(L1)

>: IR(R1)

?: II(R1)

FREQ	VM(1)				
(*=-)	1.0000E-02	1.0000E-01	1.0000E+00	1.0000E+01	1.0000E+02
(+)	-1.0000E+02	-8.0000E+01	-6.0000E+01	-4.0000E+01	-2.0000E+01
(\$)	-6.4000E+01	-6.3500E+01	-6.3000E+01	-6.2500E+01	-6.2000E+01
(0)	-3.0000E-03	-2.0000E-03	-1.0000E-03	0.0000E+00	1.0000E-03
(<)	-1.5000E-03	-1.0000E-03	-5.0000E-04	0.0000E+00	5.0000E-04
(?)	-6.0000E-04	-4.0000E-04	-2.0000E-04	5.4210E-20	2.0000E-04

1.000E+01	1.425E-01	?	XX	+	\$
2.000E+01	7.119E-02		X	+\$	?X
3.000E+01	4.745E-02	X		\$+	?X
4.000E+01	3.559E-02	X		\$+	X
5.000E+01	2.847E-02	X		\$+	X
6.000E+01	2.373E-02	X		\$+	X

**** 10/21/98 23:48:47 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE UN CIRCUITO DE C.A.

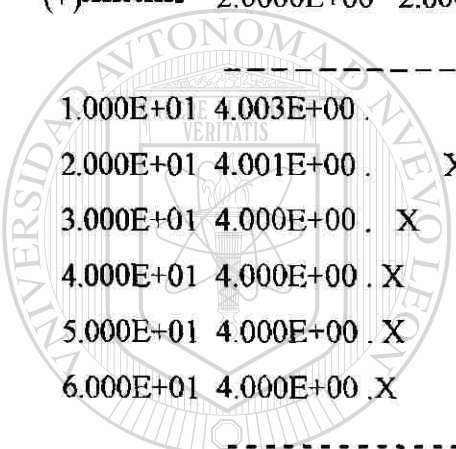
**** AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

LEGEND:

*: IR(C1)

+: II(C1)

FREQ	IR(C1)	II(C1)
(*)-----	4.0000E+00	4.0010E+00 4.0020E+00 4.0030E+00 4.0040E+00
(+)------	2.0000E+00	2.0005E+00 2.0010E+00 2.0015E+00 2.0020E+00



U A N L

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 33

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

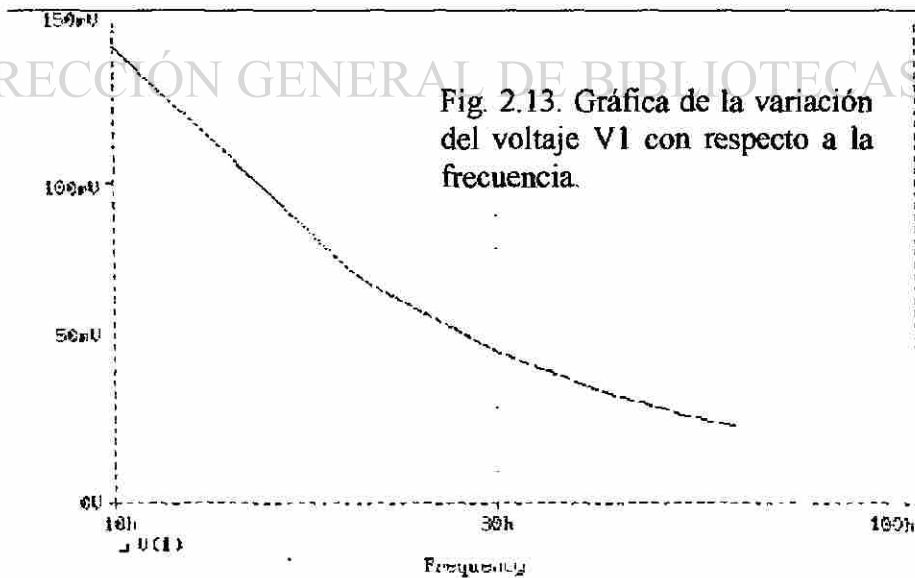
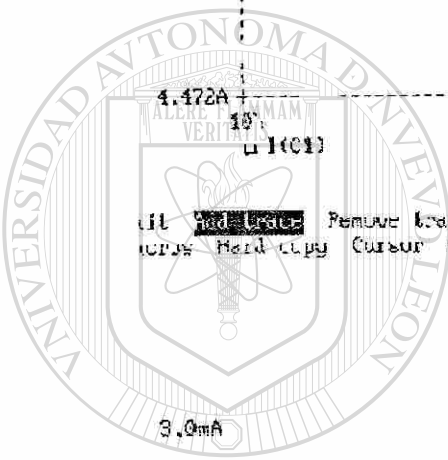
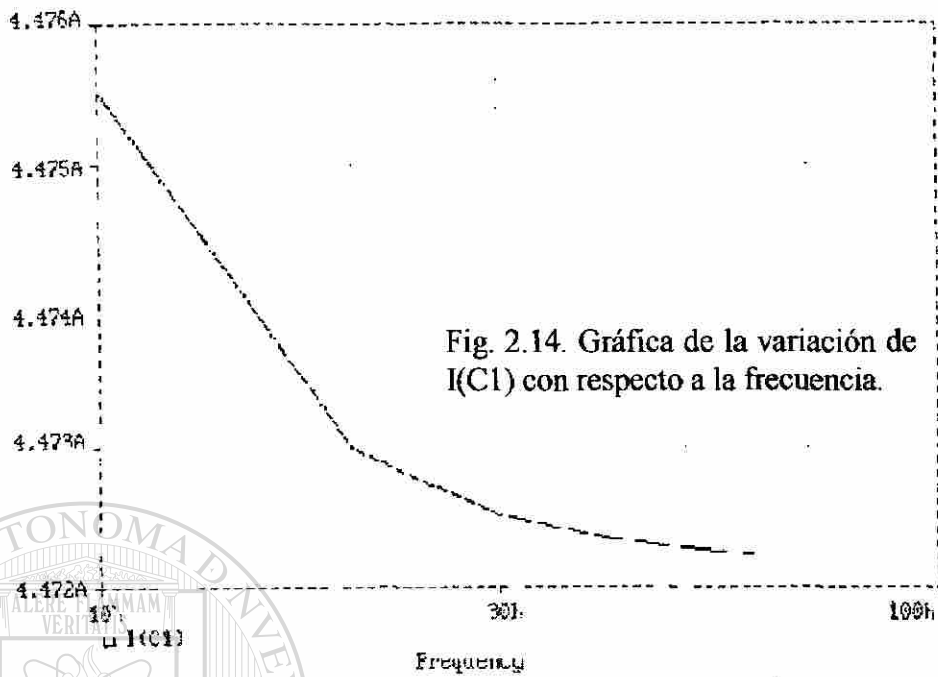


Fig. 2.13. Gráfica de la variación del voltaje V1 con respecto a la frecuencia.

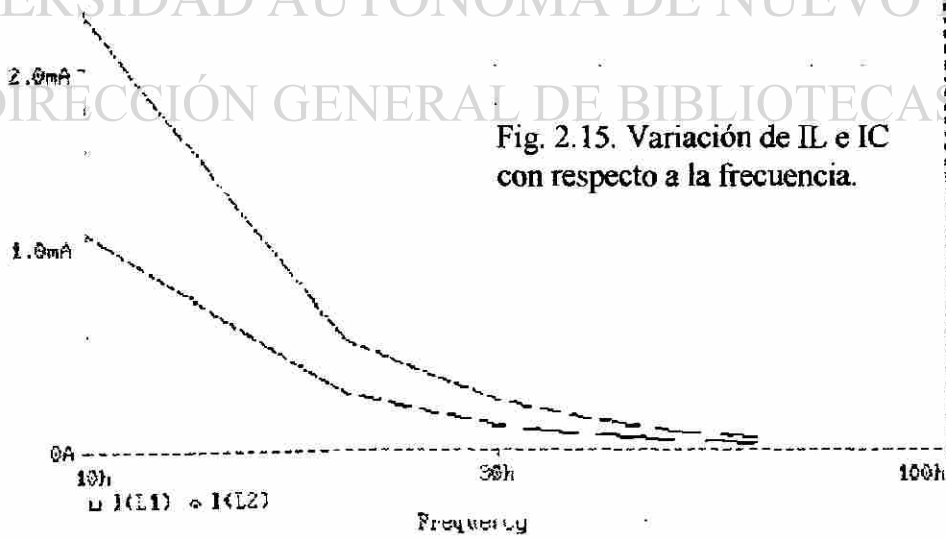
Exit: [F12] [F10] Remove cursor X axis Y axis Plot controls Display controls
 Macro: Hard copy Cursor Zoom Label config values



U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Exit Add Trace Remove trace X axis Y axis Plot control Display control
Macros Hard copy Cursor Zoom Label config colors

En estas gráficas observamos que tanto el voltaje como la corriente varían en función de la frecuencia, disminuyendo su valor al aumentar la frecuencia.

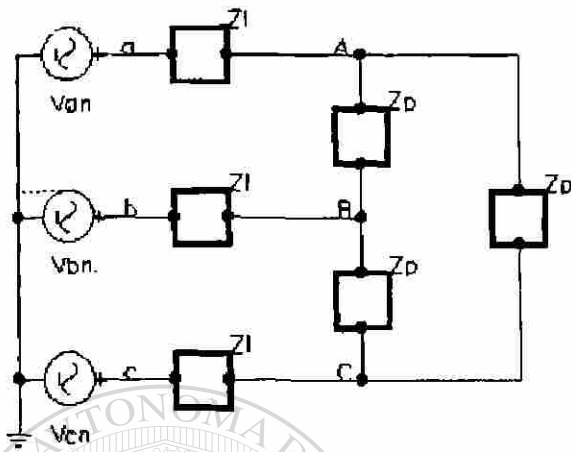


Fig. 2.16. Circuito trifásico para su análisis de estado estable.

Continuaremos con el análisis de un circuito trifásico Y- Δ (Fig. 2.16) [1], de secuencia (+), con voltaje de 1200 volts, $Z_1 = 0.5\Omega$ y $Z_p = 8 + j2\Omega$, encontraremos los voltajes y corrientes en todos los puntos del sistema [1]. Spice nos da los siguientes resultados:

**** 10/22/98 02:05:20 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

CALCULO DE VOLTAJES DE FASE Y CORRIENTE EN UN SISTEMA

TRIFASICO.

**** CIRCUIT DESCRIPTION

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS *****

VAN 1 0 AC 1200 0

VBN 2 0 AC 1200 -120

VCN 3 0 AC 1200 120

R1 1 4 0.5

R2 2 5 0.5

R3 3 6 0.5

R4 4 7 8

R5 5 8 8

```

R6 4 9 8
L1 7 5 0.005305
L2 8 6 0.005305
L3 9 6 0.005305
.AC LIN 1 60 60
.PRINT AC VM(4,5) VP(4,5) IM(VAN) IP(VAN) IM(R4) IP(R4)
.PRINT AC VM(5,6) VP(5,6) IM(VBN) IP(VBN) IM(R5) IP(R5)
.PRINT AC VM(6,4) VP(6,4) IM(VCN) IP(VCN) IM(R6) IP(R6)
.END

```

**** 10/22/98 02:05:20 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

CALCULO DE VOLTAJES DE FASE Y CORRIENTE EN UN SISTEMA

TRIFASICO.

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
(1)	0.0000	(2)	0.0000	(3)	0.0000	(4)	0.0000
(5)	0.0000	(6)	0.0000	(7)	0.0000	(8)	0.0000
(9)	0.0000						

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME	CURRENT
VAN	0.000E+00
VBN	0.000E+00
VCN	0.000E+00

TOTAL POWER DISSIPATION 0.00E+00 WATTS

**** 10/22/98 02:05:20 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

CALCULO DE VOLTAJES DE FASE Y CORRIENTE EN UN SISTEMA

TRIFASICO.

**** AC ANALYSIS

TEMPERATURE = 27.000 DEG C

FREQ	VM(4,5)	VP(4,5)	IM(VAN)	IP(VAN)	IM(R4)	IP(R4)
6.000E+01	1.765E+03	3.215E+01	3.708E+02	1.681E+02	2.141E+02	1.811E+01

**** 10/22/98 02:05:20 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

CALCULO DE VOLTAJES DE FASE Y CORRIENTE EN UN SISTEMA TRIFASICO.

**** AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

FREQ	VM(5,6)	VP(5,6)	IM(VBN)	IP(VBN)	IM(R5)	IP(R5)
6.000E+01	1.765E+03	-8.785E+01	3.708E+02	4.811E+01	2.141E+02	-1.019E+02

**** 10/22/98 02:05:20 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

CALCULO DE VOLTAJES DE FASE Y CORRIENTE EN UN SISTEMA TRIFASICO.

**** AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

FREQ	VM(6,4)	VP(6,4)	IM(VCN)	IP(VCN)	IM(R6)	IP(R6)
6.000E+01	1.765E+03	1.521E+02	3.708E+02	-7.189E+01	2.141E+02	-4.189E+01

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .11

Los resultados de esta simulación nos confirman que el circuito forma un conjunto balanceado de voltajes y corrientes, se sigue un procedimiento similar para sistemas con diferentes valores de carga para formar un conjunto desbalanceado.

A continuación simularemos con Spice un circuito con acoplamiento magnético tal como los transformadores, obteniendo su corriente de estado estable del secundario del circuito así como el voltaje [1].

Como los transformadores son dos subcircuitos eléctricamente aislados, y Spice no permite los nodos flotantes, se toma al igual que los ejemplos anteriores el nodo cero como nodo de referencia, conectando los extremos inferiores de los inductores entre sí. El rango del coeficiente de acoplamiento es por definición $0 < k < 1$, lo fijaremos en 0.99995 para formar la trayectoria cerrada. El resultado de Spice es el siguiente:

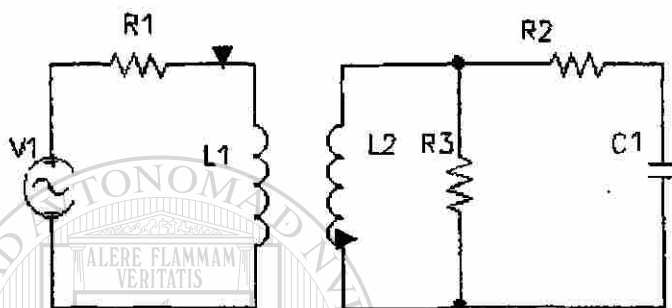


Fig. 2.17. Circuito con acoplamiento magnético.

**** 10/22/98 03:30:44 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

CALCULO DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE UN TRANSFORMADOR.

**** CIRCUIT DESCRIPTION

V1 1 0 AC 100 0

R1 1 2 1

LPRIM 2 0 4

LSEC 0 3 2

K LPRIM LSEC 0.9995

R2 3 0 1

R3 3 4 2

C1 4 0 0.5

.AC LIN 1 60 60

.PRINT AC V(LPRIM) V(LSEC) V(3,4) V(4) I(R1) I(R2) I(R3)

.END

**** 10/22/98 03:30:44 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

CALCULO DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE UN TRANSFORMADOR.

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
(1)	0.0000	(2)	0.0000	(3)	0.0000	(4)	0.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME	CURRENT
------	---------

V1	0.000E+00
----	-----------

TOTAL POWER DISSIPATION 0.00E+00 WATTS

**** 10/22/98 03:30:44 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

CALCULO DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE UN TRANSFORMADOR.

**** AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

FREQ	V(LPRIM)	V(LSEC)	V(3,4)	V(4)	I(R1)
6.000E+01	7.245E+01	3.394E+01	3.394E+01	9.002E-02	3.601E+01

I(R2)	I(R3)
3.394E+01	1.697E+01

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .11

Con Spice se pueden simular también circuitos activos tal como filtros, funciones de transferencias, gráficas de ganancia y de Bode, etc., simularemos un diseño de filtro activo y un circuito por medio de la gráfica de Bode y de la ganancia para comprobar si este dispositivo da paso a las altas frecuencias.

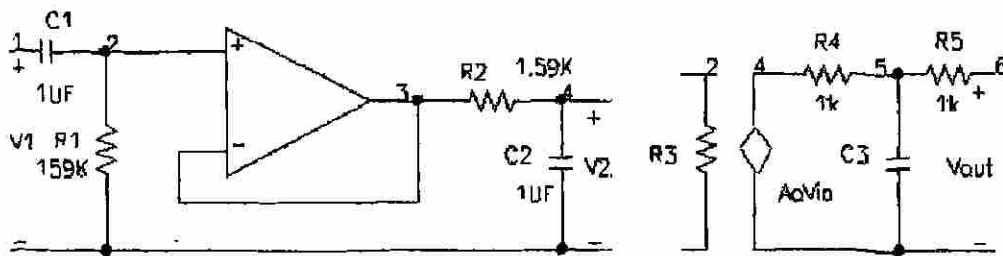


Fig. 2.18. Filtro pasabanda con su modelo de op amp dependiente de la frecuencia.

**** 10/22/98 04:07:34 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

DIAGRAMA DE BODE DE UN FILTRO ACTIVO PASABAJA.

**** CIRCUIT DESCRIPTION

V1 1 0 AC 1

C1 1 2 1UF

R1 2 0 159K

R1 2 3 100K

E 4 0 2 3 100K

RB 4 5 1

CB 5 0 0.1

R2 3 6 1.59K

C2 6 0 1UF

.AC DEC 10 .1 1K

.PLOT AC VDB(6)

.END

**** 10/22/98 04:07:34 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

DIAGRAMA DE BODE DE UN FILTRO ACTIVO PASABAJA.

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
(1)	0.0000	(2)	0.0000	(3)	0.0000	(4)	0.0000
(5)	0.0000	(6)	0.0000				

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME	CURRENT
V1	0.000E+00

TOTAL POWER DISSIPATION 0.00E+00 WATTS

**** 10/22/98 04:07:34 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

DIAGRAMA DE BODE DE UN FILTRO ACTIVO PASABAJA.

**** AC ANALYSIS

TEMPERATURE = 27.000 DEG C

FREQ	VDB(6)
(*)-----	-6.0000E+01 -4.0000E+01 -2.0000E+01 -3.5527E-15 2.0000E+01

1.000E-01 -2.025E+01 . . . *

1.259E-01 -1.838E+01 . . . *

1.585E-01 -1.659E+01 . . . *

1.995E-01 -1.490E+01 . . . *

2.512E-01 -1.334E+01 . . . *

3.162E-01 -1.197E+01 . . . *

3.981E-01 -1.082E+01 . . . *

5.012E-01 -9.902E+00 . . . *

6.310E-01 -9.225E+00 . . . *

7.943E-01 -8.769E+00 . . . *

1.000E+00 -8.510E+00 . . . *

1.259E+00 -8.429E+00 . . . *

1.585E+00 -8.518E+00 . . . *

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

1.995E+00 -8.785E+00 .	.	.	*	.	.
2.512E+00 -9.251E+00 .	.	.	*	.	.
3.162E+00 -9.939E+00 .	.	.	*	.	.
3.981E+00 -1.087E+01 .	.	.	*	.	.
5.012E+00 -1.203E+01 .	.	.	*	.	.
6.310E+00 -1.341E+01 .	.	.	*	.	.
7.943E+00 -1.497E+01 .	.	.	*	.	.
1.000E+01 -1.667E+01 .	.	.	*	.	.
1.259E+01 -1.847E+01 .	.	.	*	.	.
1.585E+01 -2.034E+01 .	.	.	*	.	.
1.995E+01 -2.225E+01 .	.	.	*	.	.
2.512E+01 -2.420E+01 .	.	.	*	.	.
3.162E+01 -2.616E+01 .	.	.	*	.	.
3.981E+01 -2.814E+01 .	.	.	*	.	.
5.012E+01 -3.012E+01 .	.	.	*	.	.
6.310E+01 -3.212E+01 .	.	.	*	.	.
7.943E+01 -3.411E+01 .	.	.	*	.	.
1.000E+02 -3.611E+01 .	.	.	*	.	.
<hr/>					
1.259E+02 -3.810E+01 .	.	.	*	.	.
1.585E+02 -4.010E+01 .	.	.	*	.	.
1.995E+02 -4.210E+01 .	.	.	*	.	.
2.512E+02 -4.410E+01 .	.	.	*	.	.
3.162E+02 -4.610E+01 .	.	.	*	.	.
3.981E+02 -4.810E+01 .	.	.	*	.	.
5.012E+02 -5.010E+01 .	.	.	*	.	.
6.310E+02 -5.210E+01 .	.	.	*	.	.
7.943E+02 -5.410E+01 .	.	.	*	.	.
1.000E+03 -5.610E+01 .	.	.	*	.	.

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .49

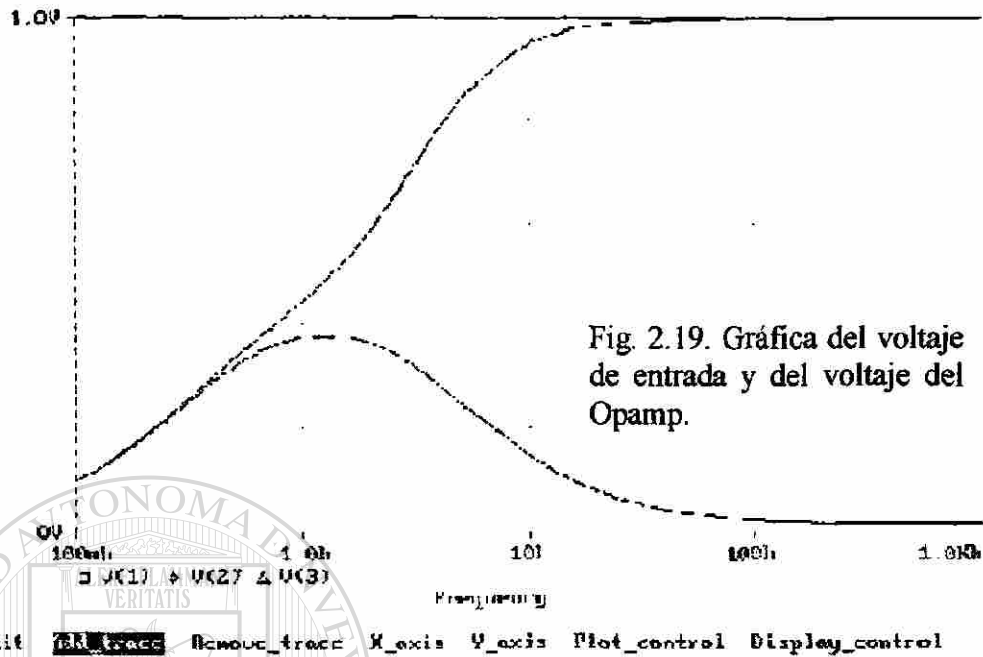


Fig. 2.19. Gráfica del voltaje de entrada y del voltaje del Opamp.

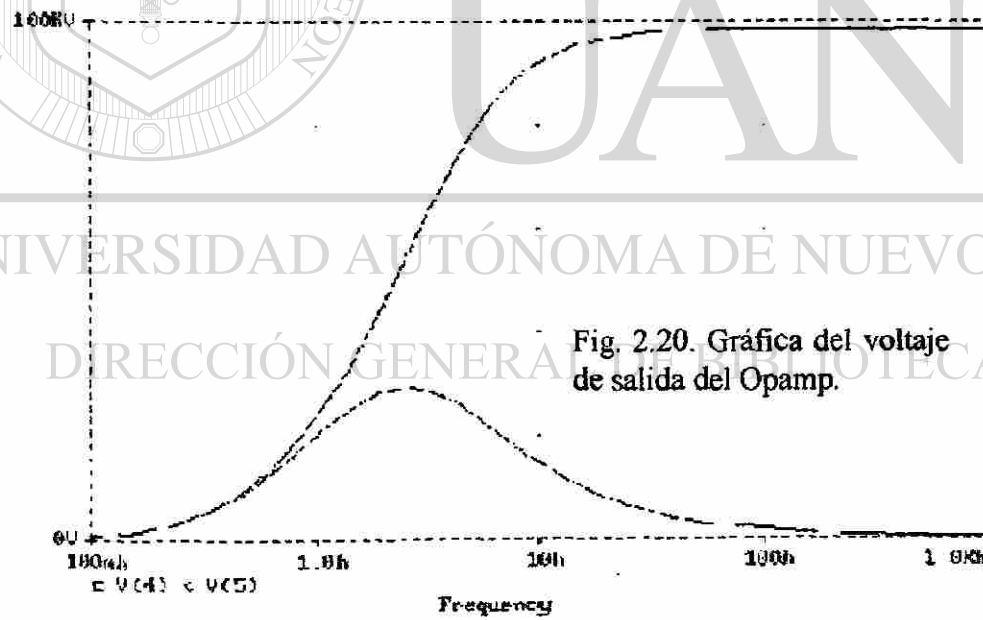
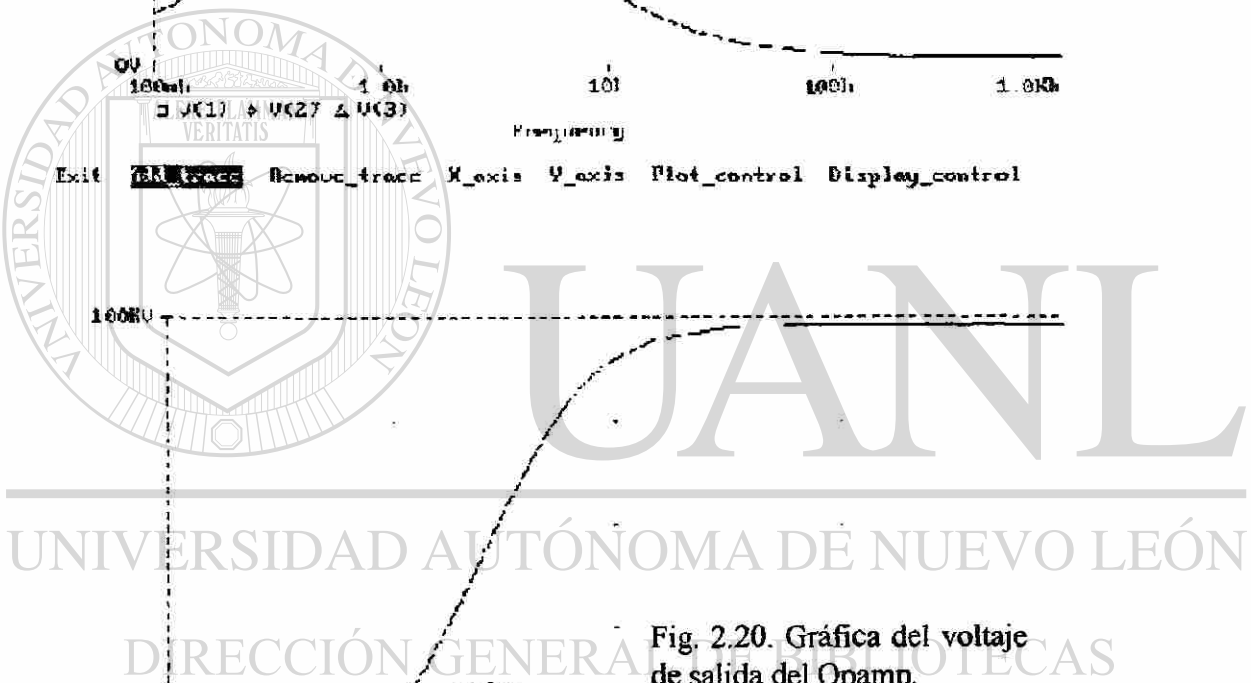


Fig. 2.20. Gráfica del voltaje de salida del Opamp.



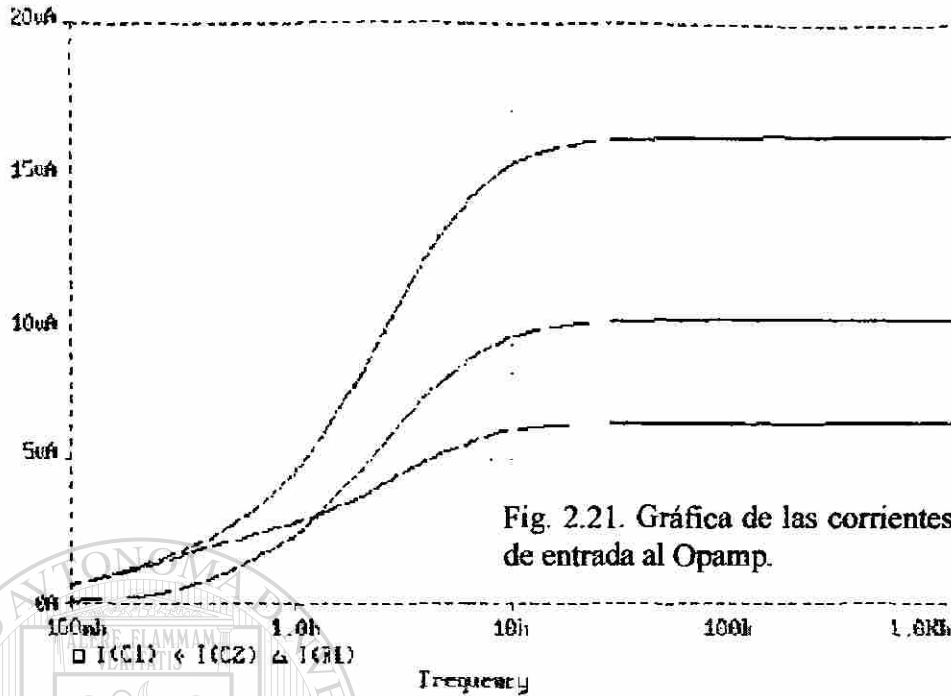


Fig. 2.21. Gráfica de las corrientes de entrada al Opamp.

Exit 200 Hz/sec Remove_trace X_axis Y_axis Plot_control Display_control
 tacros Hard copy Cursor Zoom Label config colors

Con este problema finalizamos nuestra sección de estado estable utilizando el programa Pspice.

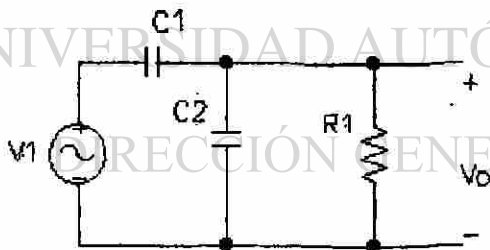


Fig. 2.22. Circuito para graficar el diagrama de Bode.

**** 10/28/98 23:52:17 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

GRAFICA DE BODE.

*** CIRCUIT DESCRIPTION

C1 1 2 0.5U

C2 2 0 0.5U

```

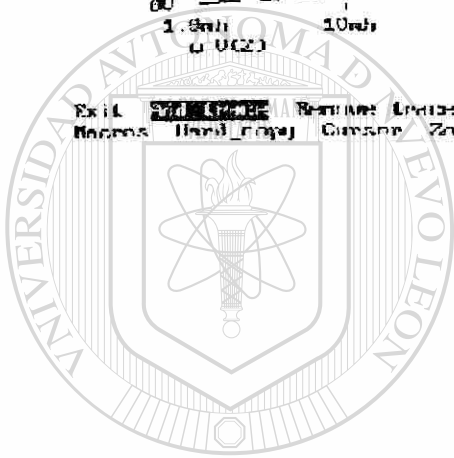
R1 2 0 10K
Vin 1 0 AC 1
.PROBE
.AC DEC 1000 1.0m 1.000k ; *ipsp*
.PLOT AC VDB(2)
.END
**** 10/28/98 23:52:17 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****
GRAFICA DE BODE.
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
*****
NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE
( 1) 0.0000 ( 2) 0.0000
VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME CURRENT
Vin 0.000E+00
TOTAL POWER DISSIPATION 0.00E+00 WATTS
**** 10/28/98 23:52:17 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****
GRAFICA DE BODE.
**** AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
*****
FREQ VDB(2)
(*)----- -1.5000E+02 -1.0000E+02 -5.0000E+01 -7.1054E-15 5.0000E+01

```

En la gráfica se verifica que a frecuencias altas deja pasar la mayor cantidad de señal, por lo tanto se puede decir que es un circuito pasa alta.



Fig. 2.23. Gráfica de un filtro
pasa alta.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE CIRCUITOS TRANSITORIOS.

3.1. - EL CIRCUITO RLC COMO DE SEGUNDO ORDEN.

El análisis de un circuito RLC nos proporciona una ecuación integro diferencial que, al derivar uno de los componentes de voltaje o corriente nos proporciona un circuito de segundo orden. En éste tipo de circuito se tiene dos tipos de componentes que son las respuestas del circuito, estas componentes son: la respuesta natural y la respuesta forzada, que en el aspecto matemático se conocen como la parte homogénea (la respuesta natural) y la parte no homogénea (la respuesta forzada). Por ejemplo, consideremos el circuito serie de la Fig. 3.1, cuya onda de estado estable se observa en la Fig.3.2d, y supongamos que no tenemos condiciones iniciales en el circuito, por LVK tenemos [1], [2], [3], [12]:

$$Ri + Ldi/dt + (1/C)\int i(t)dt = \text{sen}(\omega t) \quad (3.1)$$

Al diferenciar la ecuación descriptiva para $i(t)$ tenemos:

$$Ld^2i/dt^2 + Rdi/dt + (1/C)i = \omega \cos(\omega t) \quad (3.2)$$

en la cual podemos hacer que:

$$d^2i/dt^2 + (R/L)di/dt + (1/LC)i = (\omega/L)\cos(\omega t) \quad (3.2A)$$

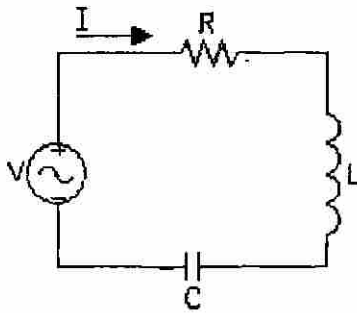


Fig. 3.1. - Circuito RLC de segundo orden.

cuya ecuación característica es:

$$S^2 + (R/L)S + (1/LC) = 0 \quad (3.3)$$

que nos lleva a una solución cuadrática de la ecuación, ésta solución es:

$$S_{1,2} = [-(R/L) \pm \sqrt{(R/L)^2 - 4(1/LC)}]/2 \quad (3.4)$$

en donde $S_{1,2}$ son los exponentes característicos, podemos simplificar si hacemos de la

Ec. 3.3:

$$S^2 + 2\zeta\omega_0 S + \omega_0^2 = 0 \quad (3.5)$$

en donde ω_0 se conoce como frecuencia natural no amortiguada y ζ se conoce como proporción de amortiguación. Si sustituimos $\omega_0^2 = a_0$ y $2\zeta\omega_0 = a_1$, la ecuación característica se transforma en: $S^2 + a_1 S + a_0 = 0$, en la cual $a_1 = R/L$ y $a_0 = 1/LC$, por lo que al simplificar estas expresiones tenemos: $\omega_0 = \sqrt{a_0} = 1/\sqrt{LC}$ y $\zeta = a_1/2\omega_0 = R/2L\sqrt{LC}$, sustituyendo estas expresiones tenemos la ecuación general:

$$S_{1,2} = (-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_0 \quad (3.6)$$

dependiendo de los valores de los elementos, dados por ζ podemos tener tres casos en la solución de éste tipo de circuito, estos casos son: sobreamortiguado, subamortiguado y críticamente amortiguado.

3.1.1. - CASO SOBREAMORTIGUADO ($\zeta > 1$).

Para este caso, las raíces S_1 y S_2 son reales y distintas puesto que el discriminante ζ^2-1 es mayor que cero y cada S tienen una parte real dada por $S_1 = \sigma_1$ y $S_2 = \sigma_2$ y la respuesta natural está dada por la suma de dos exponenciales reales dadas por [1]:

$$i(t) = K_1 \exp(\sigma_1 t) + K_2 \exp(\sigma_2 t) \quad (3.7)$$

no es posible que ninguno de los exponentes característicos σ_1 y σ_2 sean positivos porque esto implica que crecerían en magnitud conforme t se hace mayor. Por lo tanto en el caso sobreamortiguado hay suficiente amortiguación para que cada término en la respuesta natural pierda constantemente amplitud, ya que la amortiguación es la pérdida gradual de la energía almacenada y por consiguiente la respuesta natural decae a cero, este caso se representa en la Fig. 3.2a.

3.1.2. - CASO SUBAMORTIGUADO ($\zeta < 1$).

En éste caso, las raíces S_1 y S_2 complejas puesto que el discriminante ζ^2-1 es menor que cero y deben de ser raíces conjugadas complejas en donde las partes reales son iguales, y las partes imaginarias también lo son pero con los signos opuestos, entonces los exponenciales característicos están dados por $S_1 = \sigma + j\omega$ y $S_2 = \sigma - j\omega$ y la respuesta natural esta dada por [1]:

$$i(t) = \exp(\sigma t)[K_1 \sin(\omega t) + K_2 \cos(\omega t)] \quad (3.8)$$

en este caso consiste de dos términos que decaen constantemente, pero el decaimiento está modulado por oscilaciones sinusoidales de frecuencia ω rad/seg, la amplitud de

estas oscilaciones decaen como $\exp(\sigma t)$, de forma que la proporción de amortiguación varía inversamente respecto a. Este caso lo representamos en la Fig. 3.2b

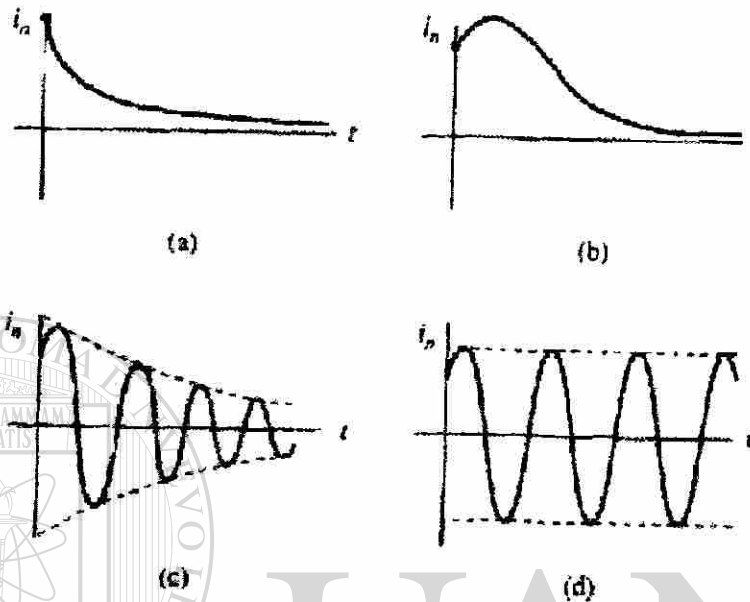


Fig. 3.2.- Gráficas de las respuestas de un circuito de segundo orden: (a) Sobreamortiguado; (b) Criticamente amortiguado; (c) Subamortiguado; (d) no amortiguado.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

3.1.3. - CASO CRITICAMENTE AMORTIGUADO ($\zeta = 1$).

El último caso que tenemos es en donde los exponentes característicos son reales e iguales, o sea, $S_1 = S_2 = \sigma$, y es la línea divisora entre los casos sobreamortiguado y subamortiguado, en este caso la forma general para la solución natural esta dada por [1]:

$$i(t) = K_1 \exp(\sigma t) + K_2 t \exp(\sigma t) \quad (3.9)$$

la solución natural consiste de la suma de un término exponencial y su forma t multiplicada asociada, tal como lo representa la Fig. 3.2c.

TABLA 3.1. Soluciones para funciones forzadas comunes.

Término forzado.	Solución forzada.
k	A
t	$At + B$
t^2	$At^2 + Bt + C$
t^n	$At^n + Bt^{(n-1)} + \dots + Ft + G$
$\exp(\sigma t)$	$A \exp(\sigma t)$
$\exp(st)$	$A \exp(st)$
$\text{sen}\omega t, \text{cos}\omega t$	$A \text{sen}\omega t + B \text{cos}\omega t$
$\exp(\sigma t) \text{sen}\omega t, \exp(\sigma t) \text{cos}\omega t$	$\text{Exp}(\sigma t)(A \text{sen}\omega t + B \text{cos}\omega t)$
$t \exp(\sigma t) \text{sen}\omega t, t \exp(\sigma t) \text{cos}\omega t$	$t \exp(\sigma t)(A \text{sen}\omega t + B \text{cos}\omega t) + \exp(\sigma t)(C \text{sen}\omega t + D \text{cos}\omega t)$

3.1.4.- RESPUESTA FORZADA.

La respuesta forzada de un circuito de segundo orden debe de satisfacer la ecuación diferencial del tipo $d^2x/dt^2 + a_1 dx/dt + a_0 x = f(t)$, en la cual se requiere de una combinación lineal de $f(t)$ y sus derivadas, en otras palabras, se requiere de que las diferenciaciones de la combinación lineal de $f(t)$ y sus derivadas en el lado izquierdo puedan producir en las cancelaciones requeridas para dejar únicamente $f(t)$, que es lo que se requiere para satisfacer la ecuación. En la Tabla 1, [1] aparece una lista de las funciones forzadas $f(t)$ más comunes, la forma general de las correspondientes respuestas forzadas está dada en la segunda columna.

Por último, la respuesta total de un circuito es la suma de sus respuestas natural y forzada, los voltajes capacitivos y/o corrientes inductivas iniciales para determinar las

condiciones iniciales requeridas pueden estar dadas, o puede ser necesario determinarlas, con el fin de encontrar los valores de las constantes.

3.2. - TRANSITORIO EN EL GENERADOR.

Cuando una máquina genera un voltaje senoidal, se conoce el hecho de que el valor de la corriente de corto circuito en el periodo transitorio dependerá parcialmente sobre el instante del ciclo a la cual ocurre el corto. El análisis matemáticos realiza cortocircuitando las terminales del generador, asumiendo que la falla es balanceada, tal como se observa en la Fig. 3.3, en el instante cero, con el generador inicialmente a circuito abierto. La ecuación de voltaje instantáneo para el circuito es [4], [5], [12]:

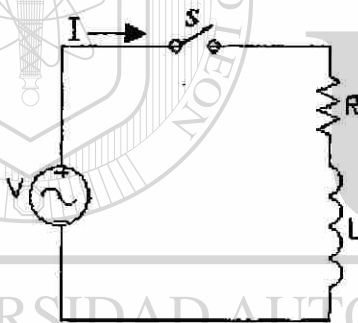


Fig. 3.3. Circuito RL para obtener la ecuación de la corriente instantánea.

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E_{\max} \sin(\omega t + \alpha) \quad (3.10)$$

$$= E_{\max} (\sin \omega t \cos \alpha + \sin \alpha \cos \omega t)$$

utilizando la transformación de Laplace (Tabla 2) [1] de ésta ecuación resulta:

$$(LS + R)I(s) = E_{\max} [\cos \alpha (\omega / (S^2 + \omega^2)) + \sin \alpha (S / (S^2 + \omega^2))] \quad (3.11)$$

despejando $I(s)$ y sacando un factor común del denominador resulta:

$$I(s) = E_{\max} [(\omega \cos \alpha + S \sin \alpha) / ((LS + R)(S^2 + \omega^2))]]$$

TABLA 3.2. Propiedades de la transformada de Laplace.

	F(t)	F(s)
1. Linealidad	$c_1f_1(t) + c_2f_2(t)$	$c_1F_1(s) + c_2F_2(s)$
2. Diferenciación	$(d/dt)f(t)$	$sF(s) - f(0^-)$
3. Diferenciación enésima	$(d^n/dt^n)f(t)$	$s^nF(s) - s^{n-1}f(0^-) - s^{n-2}f'(0^-) - \dots - sf^{(n-2)}(0^-) - f^{(n-1)}(0^-)$
4. Integración	$\int_0^t f(t)dt$	$F(s)/s$
5. Desplazamiento de tiempo	$f(t - t_0)u(t - t_0)$	$e^{-st_0}F(s)$
6. Desplazamiento de la frecuencia	$e^{-st_0}f(t)$	$F(s + s_0)$
7. T multiplicación	$tf(t)$	$(-d/ds)F(s)$
8. T multiplicación enésima	$t^n f(t)$	$(-1)^n (d^n/ds^n)F(s)$

TABLA 3.3. Transformada de Laplace.

	F(t)	F(s)
Funciones ordinarias.		
1. Constante	1	$1/s$
2. t	t	$1/s^2$
3. Potencia de t	$t^{n-1}/(n-1)!$	$1/s^n$
4. Exponencial	$\exp(-at)$	$1/(s + a)$
5. Exponencial multiplicada	$t \exp(-at)$	$1/(s + a)^2$
6. Exponencial con t multiplicación repetida	$(1/(n-1)!) t^{n-1} \exp(-at)$	$1/(s + a)^n$
7. Seno	$\sin \omega t$	$\omega/(s^2 + \omega^2)$
8. Coseno	$\cos \omega t$	$s/(s^2 + \omega^2)$
9. Sinusoide	$(c^2 + d^2)^{1/2} \cos(\omega t - \text{Atan}(d/c))$	$(cs + d\omega)/(s^2 + \omega^2)$
10. Seno amortiguado	$\exp(-at) \sin \omega t$	$\omega/([s+a]^2 + \omega^2)$
11. Coseno amortiguado	$\exp(-at) \cos \omega t$	$(s+a)/([s+a]^2 + \omega^2)$
12. Sinusoide amortiguada	$(c^2 + d^2)^{1/2} \exp(-at) \cos(\omega t - \text{Atan}(d/c))$	$(c(s+a) + d\omega)/\omega/([s+a]^2 + \omega^2)$
13. Seno t multiplicado		

14. Coseno t multiplicado	t sen ωt	$2\omega s/(s^2 + \omega^2)^2$
	t cos ωt	$(s^2 - \omega^2)/(s^2 + \omega^2)^2$

multiplicando por la unidad (L/L) y simplificando términos por medio de fracciones parciales [12]

$$I(s) = (E_{max}/L)[(AS + B)/(S^2 + \omega^2) + C/(S + R/L)] \quad (3.12)$$

La fracción parcial de la transformada de Laplace que se muestra en la Ec. 3.12, nos es conveniente para obtener el tiempo de solución de la tabla 3. Las constantes A; B y, C se obtienen fácilmente verificando el hecho de que $(S^2 + \omega^2) = (S + j\omega)(S - j\omega)$, el cual nos manda al plano complejo, por lo tanto si hacemos que:

$$F(S) = (\omega \cos\alpha + S \sin\alpha)/((LS + R)(S^2 + \omega^2)) = (AS + B)/(S^2 + \omega^2) + C/(S + R/L) = (AS + B)/(S + j\omega) + (AS + B)^*/(S - j\omega) + C/(S + R/L)$$

$$(S + j\omega)F(S) = (AS + B) + (S + j\omega)(AS + B)^*/(S - j\omega) + C(S + j\omega)/(S + R/L) = (S + j\omega)(\omega \cos\alpha + S \sin\alpha)/((S + R/L)(S + j\omega)(S - j\omega))$$

Si $S = -j\omega$, tenemos que:

$$-j\omega A + B = (\omega \cos\alpha - j\omega \sin\alpha)/((-j\omega + R/L)(-2j\omega)) \quad (3.13)$$

$$(S - j\omega)F(S) = (S - j\omega)(AS + B)/(S + j\omega) + (AS + B)^* + C(S - j\omega)/(S + R/L) = (S - j\omega)(\omega \cos\alpha + S \sin\alpha)/((S + R/L)(S + j\omega)(S - j\omega))$$

Si $S = j\omega$, tenemos que:

$$j\omega A + B = (\omega \cos\alpha + j\omega \sin\alpha)/((j\omega + R/L)(2j\omega)) \quad (3.14)$$

$$(S + R/L)F(S) = (S + R/L)(AS + B)/(S + j\omega) + (S + R/L)(AS + B)^*/(S - j\omega) + C = (S + R/L)(\omega \cos\alpha + S \sin\alpha)/((S + R/L)(S + j\omega)(S - j\omega))$$

Si $S = -R/L$, tenemos que:

$$C = (\omega \cos \alpha + (-R/L) \operatorname{sen} \alpha) / ((-R/L + j\omega)(-R/L - j\omega)) \quad (3.15)$$

sumando las Ec's. 3.13 y 3.14, obtenemos el valor de B, al simplificar los términos:

$$\begin{aligned} 2B &= (\omega \cos \alpha - j\omega \operatorname{sen} \alpha) / ((-j\omega + R/L)(-2j\omega)) + (\omega \cos \alpha + j\omega \operatorname{sen} \alpha) / ((j\omega + R/L)(2j\omega)) \\ 2B &= [(j\omega + R/L)(\omega \cos \alpha - j\omega \operatorname{sen} \alpha) + (j\omega - R/L)(\omega \cos \alpha + j\omega \operatorname{sen} \alpha)] / [(2j\omega)(j\omega + R/L)(j\omega - R/L)] \\ 2B &= j2[\omega L \cos \alpha - R \operatorname{sen} \alpha] / [-2j(R^2 + \omega^2 L^2)] = L(R \operatorname{sen} \alpha - \omega L \cos \alpha) / (R^2 + \omega^2 L^2) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Los valores de resistencia y de inductancia se pueden obtener de la siguiente relación:

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \\ R &= \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \cos \theta \\ \omega L &= \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \operatorname{sen} \theta \\ \theta &= \operatorname{Arc tan} (\omega L / R) \end{aligned}$$

Por lo que al sustituir en la Ec. 3.16 resulta:

$$\begin{aligned} B &= [L / 2(R^2 + \omega^2 L^2)] (\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \operatorname{sen} \alpha \cos \theta - \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \cos \alpha \operatorname{sen} \theta) \\ B &= L \operatorname{sen}(\alpha - \theta) / Z \end{aligned} \quad (3.17)$$

De manera similar se encuentra la constante A, multiplicando por (-1) la Ec. 3.13 y sumándole la 3.14

$$\begin{aligned} j2\omega A &= (-\omega \cos \alpha + j\omega \operatorname{sen} \alpha) / ((-j\omega + R/L)(-2j\omega)) + (\omega \cos \alpha + j\omega \operatorname{sen} \alpha) / ((j\omega + R/L)(2j\omega)) \\ j2\omega A &= [(j\omega + R/L)(-\omega \cos \alpha + j\omega \operatorname{sen} \alpha) + (j\omega - R/L)(\omega \cos \alpha + j\omega \operatorname{sen} \alpha)] / [2j\omega(j\omega + R/L)(j\omega - R/L)] \\ j2\omega A &= (\omega L / j\omega) [(R \cos \alpha + \omega L \operatorname{sen} \alpha)] / [- (R^2 + \omega^2 L^2)] \end{aligned}$$

sustituyendo los valores del plano complejo tenemos:

$$A = (\omega L / j^2 \omega^2) [\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \cos \alpha \cos \theta + \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \theta] / [-(R^2 + \omega^2 L^2)]$$

$$A = \omega L \cos(\alpha - \theta) / Z \quad (3.18)$$

Y para el valor de la constante C, la obtenemos simplificando los términos:

$$C = [L / (R^2 + \omega^2 L^2)] [- (R \operatorname{sen} \alpha - \omega L \cos \alpha)]$$

$$C = [L / (R^2 + \omega^2 L^2)] [- (\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \operatorname{sen} \alpha \cos \theta - \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \cos \alpha \operatorname{sen} \theta)]$$

$$C = -L \operatorname{sen}(\alpha - \theta) / Z \quad (3.19)$$

(Tomando en cuenta que la transformada es la suma de un número complejo y su conjugado, tenemos para $f(t) = 2\operatorname{Re}[AS + B] \exp(\beta t) \exp[j(\alpha - \theta)]$). Sustituyendo A, B y C en la Ec. 3.12

$$I(s) = (E_{\max} / L) [(SL \operatorname{sen}(\alpha - \theta) / Z) / (S^2 + \omega^2) + (\omega L \cos(\alpha - \theta) / Z) / (S^2 + \omega^2) - L \operatorname{sen}(\alpha - \theta) / Z / (S + R/L)]$$

$$I(s) = (E_{\max} / Z) [\operatorname{sen}(\alpha - \theta) (S / (S^2 + \omega^2) + \cos(\alpha - \theta) (\omega / (S^2 + \omega^2)) - \operatorname{sen}(\alpha - \theta) / (S + R/L)]$$

Por medio de la tabla 2, obtenemos la transformada inversa de la solución, la cual es:

$$i(t) = (E_{\max} / Z) [\operatorname{sen}(\alpha - \theta) \cos \omega t + \cos(\alpha - \theta) \operatorname{sen} \omega t - \operatorname{sen}(\alpha - \theta) \exp(-Rt/L)]$$

en la que tenemos la forma simplificada

$$I(t) = (E_{\max} / Z) [\operatorname{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - \operatorname{sen}(\alpha - \theta) \exp(-Rt/L)] \quad (3.20)$$

El primer término de la Ec. 3.20 varía senoidalmente con el tiempo, el segundo término es aperiódico y decae exponencialmente con una constante de tiempo L/R , a éste término se le llama componente de CD de la corriente. El estado de la corriente

transitoria dependerá algo sobre el ángulo α de la onda del voltaje en el instante $t = 0$ del corto circuito. Supongamos que en $t = 0$, el ángulo $(\alpha - \theta) = -90^\circ$, la onda de corriente tendrá una componente CD inicial máxima que es igual al máximo valor senoidal. Si, sin embargo, $\alpha = \theta$ en $t = 0$, entonces la componente CD de la corriente no existe. Esto se observa en la Fig. 3.4. Sin embargo, la componente CD puede tener cualquier valor y depende del instante en que el interruptor se cierra. El factor a la cual varia está entre 1.0 y 1.6, dependiendo del tipo de interruptor y su velocidad de operación [4], [5].

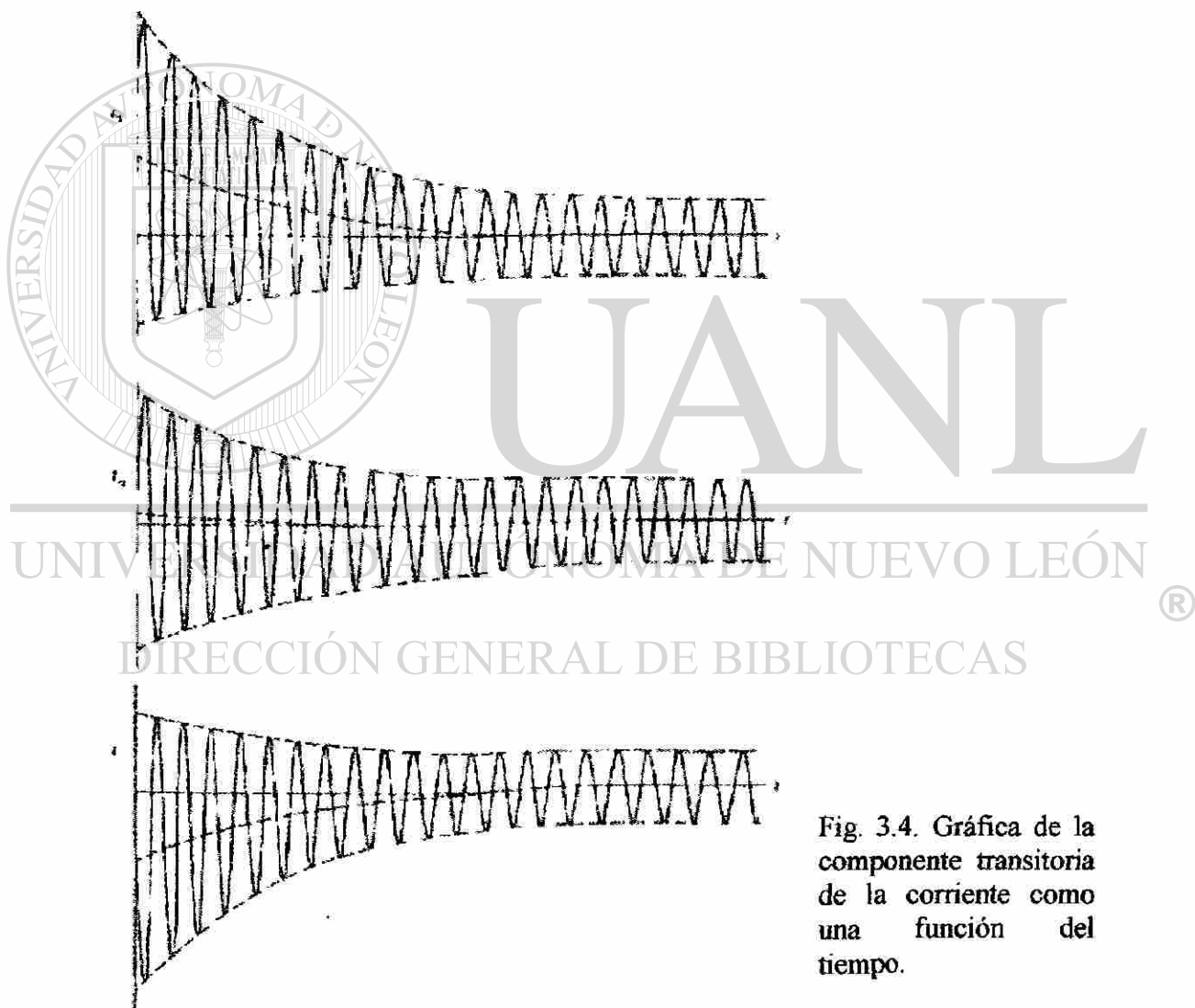


Fig. 3.4. Gráfica de la componente transitoria de la corriente como una función del tiempo.

3.3. SIMULACIÓN DE ESTADO TRANSITORIO DE UN CIRCUITO RLC.

A continuación analizaremos un circuito RL para un análisis transitorio, dado el circuito de la Fig. 3.5. Para este tipo de análisis efectuaremos dos corridas del circuito, en la primera corrida pondremos una fuente de corriente inactiva en el lugar de la inductancia (Fig. 3.5b), que se coloca en corto circuito para que podamos imprimir la corriente que se almacena $I_L = I(VD)$, y en la segunda corrida calcularemos el transitorio $I(L1)$ (Fig. 3.5a) [1].

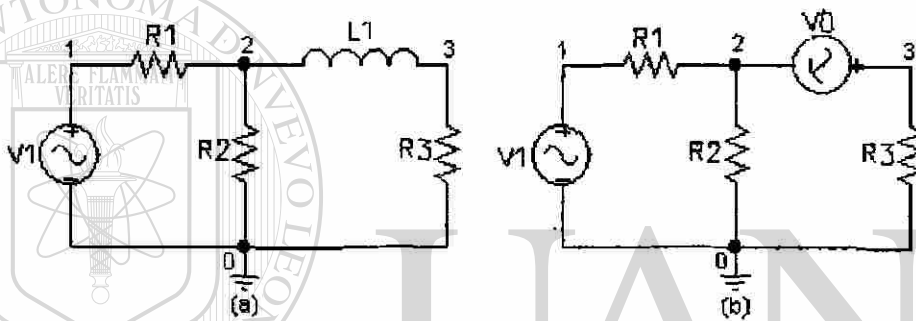


Fig. 3.5. (a) Circuito para el análisis transitorio; (b) Circuito auxiliar.

**** 10/20/98 02:02:18 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****
 DETERMINACION DE IC, DEL CIRCUITO AUXILIAR.

**** CIRCUIT DESCRIPTION

V1 1 0 DC 120

R1 1 2 8

R2 2 0 5

VD 2 3 DC 0

R3 3 0 6

.PRINT DC I(VD)

.END

**** 10/20/98 02:02:18 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

DETERMINACION DE IC, DEL CIRCUITO AUXILIAR.

```
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C
```

```
*****
*****
```

```
NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE
( 1) 120.0000 ( 2) 30.5080 ( 3) 30.5080
```

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

```
NAME CURRENT
```

```
VI -1.119E+01
```

```
VD 5.085E+00
```

```
TOTAL POWER DISSIPATION 1.34E+03 WATTS
```

```
JOB CONCLUDED
```

```
TOTAL JOB TIME .33
```

Por lo tanto, la corriente inicial es $IL(0^-) = IL(0^+) = 5.085$ Amp. Para $t > 0$ el circuito está libre de fuentes (suponemos que $V1 = 0$), y el archivo para la entrada Spice para graficar $IL(t)$ para $t \geq 0$ se pueden dar los resultados en dos gráficas diferentes, una que se proporciona con el comando BROWSE OUTPUT, y la otra por el comando PLOT de Spice (Fig. 3.6), se proporcionan ambas gráficas para que su análisis sea más conciso, a la salida del archivo BROWSE OUTPUT, observamos que la corriente IL decae exponencialmente de su valor inicial de 5.085 Ampere en $t = 0$ hasta aproximadamente cero a los 14 mili segundos. Si queremos determinar la constante de tiempo τ , la respuesta decae en $(1/e) \cdot 5.085$, examinando la figura esto ocurre a los 1.8706 ms.

```
**** 10/20/98 03:04:01 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****
```

CALCULO DEL TRANSITORIO DEL CIRCUITO RL.

```
**** CIRCUIT DESCRIPTION
```

```
*****
*****
```

*LA DECLARACION DE V1 PUEDE OMITIRSE

V1 1 0 DC 0

R1 1 2 8

R2 2 0 5

R3 3 0 6

L1 2 3 30M IC=5.085

.TRAN 0.001 0.020 UIC

.PLOT TRAN I(L1)

.END

**** 10/20/98 03:04:01 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

CALCULO DEL TRANSITORIO DEL CIRCUITO RL.

**** TRANSIENT ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

TIME	I(L1)
(*)----- 0.0000E+00	2.0000E+00
	4.0000E+00
	6.0000E+00
	8.0000E+00

0.000E+00 5.085E+00 . *

1.000E-03 3.761E+00 . *

2.000E-03 2.779E+00 . *

3.000E-03 2.052E+00 . *

4.000E-03 1.516E+00 . *

5.000E-03 1.120E+00 . *

6.000E-03 8.272E-01 . *

7.000E-03 6.109E-01 . *

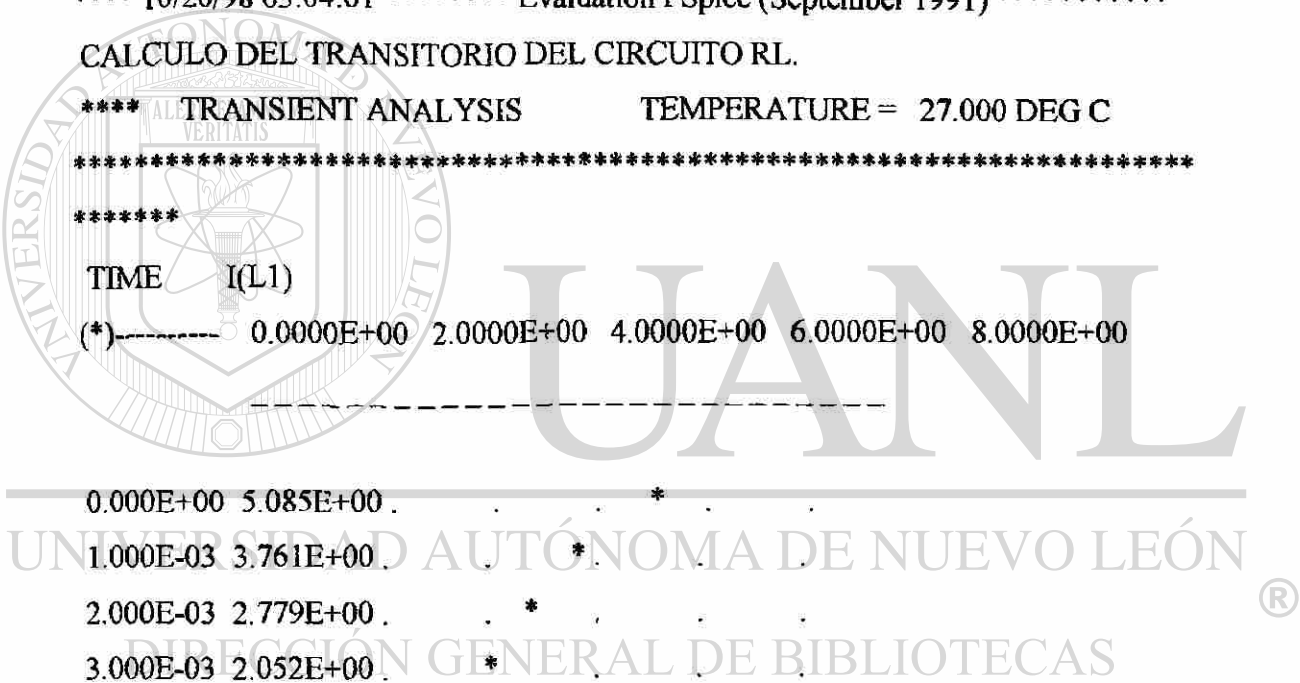
8.000E-03 4.513E-01 . *

9.000E-03 3.333E-01 . *

1.000E-02 2.463E-01 . *

1.100E-02 1.818E-01 . *

1.200E-02 1.344E-01 . *



1.300E-02	9.921E-02	*	.	.	.	.
1.400E-02	7.330E-02	*	.	.	.	.
1.500E-02	5.413E-02	*	.	.	.	.
1.600E-02	4.000E-02	*	.	.	.	.
1.700E-02	2.953E-02	*	.	.	.	.
1.800E-02	2.182E-02	*	.	.	.	.
1.900E-02	1.611E-02	*	.	.	.	.
2.000E-02	1.189E-02	*	.	.	.	.

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .28

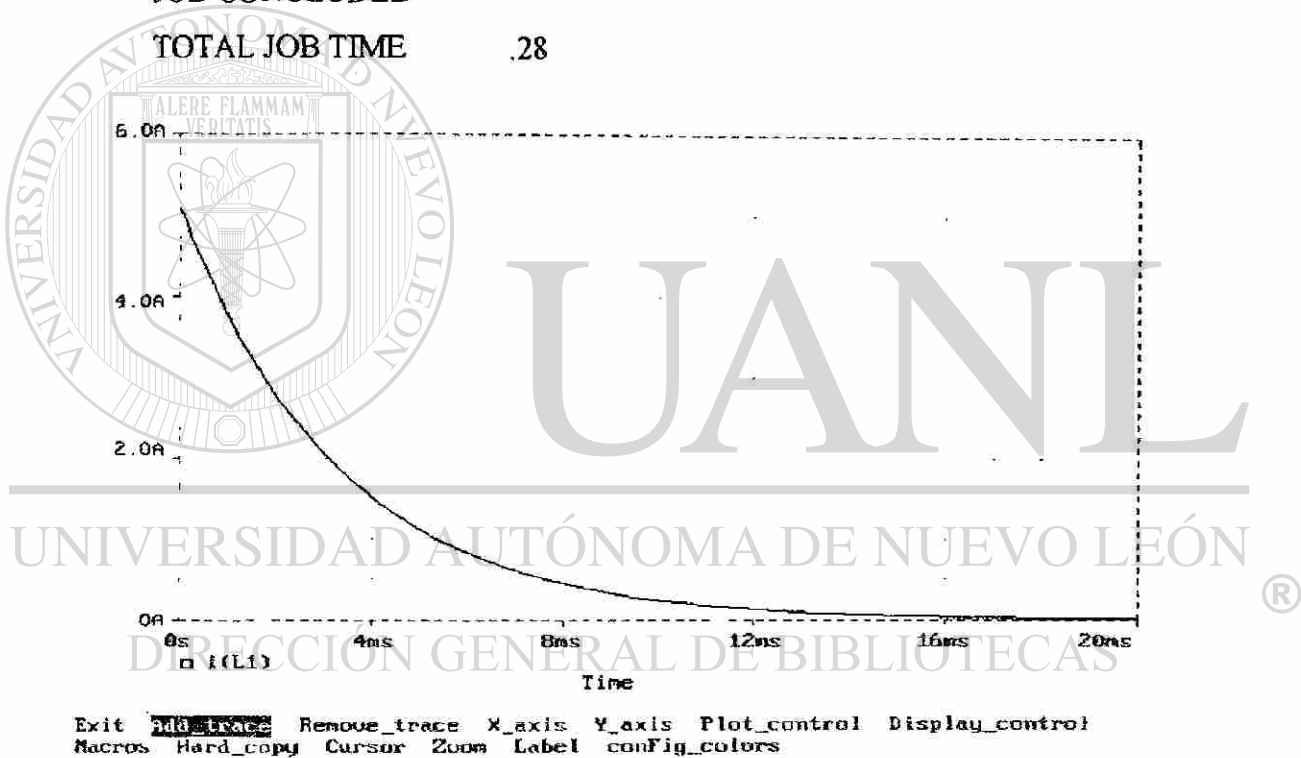


Fig. 3.6 Gráfica de $I(L)$ para $t > 0$, de la Fig. 3.5.

Para un circuito RC se sigue un procedimiento semejante al anterior, pero con la diferencia de que el valor de $V(0^-) = V(0^+)$, y es el valor que se pondrá en la declaración de .IC.

Ahora analizaremos un circuito RLC dado por la Fig. 3.7, queremos encontrar el efecto de variación de R sobre una respuesta natural de un circuito RLC [5], el archivo Spice y su respectiva solución, así como la gráfica se dan a continuación:

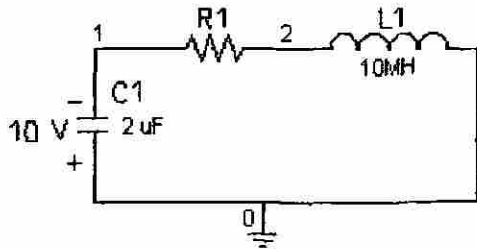


Fig. 3.7. Circuito serie RLC para el análisis de la variación de la resistencia.

**** 10/21/98 04:35:09 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

EFFECTO DE LA VARIACION DE R SOBRE UNA RESPUESTA NATURAL RLC

**** CIRCUIT DESCRIPTION

C1 1 0 2E-6

L1 2 0 10E-3 IC=-90E-3

R1 1 2 RMOD 1

.IC V(1)=-10

.MODEL RMOD RES(R=1)

.STEP LIN RES RMOD(R) 20,100,20

.TRAN 20E-6 2000E-6 UIC

.PROBE

.END

**** 10/21/98 04:35:09 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

EFFECTO DE LA VARIACION DE R SOBRE UNA RESPUESTA NATURAL RLC

**** Resistor MODEL PARAMETERS

RMOD

R 1

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 1.15

En este ejemplo, definimos a la resistencia utilizando la declaración .MODEL, esta declaración incluye al parámetro RES el cual es fijado por medio de valores de interés utilizando la declaración de control .STEP. De esta manera Spice analiza al circuito serie RLC en varios tiempos para cada valor de resistencia, tal como se observa en el circuito de la Fig. 3.9. En esta figura se muestra el dibujo del voltaje del capacitor [1] contra el tiempo. También se puede analizar los demás parámetros del circuito si se hubiesen pedido en el análisis.

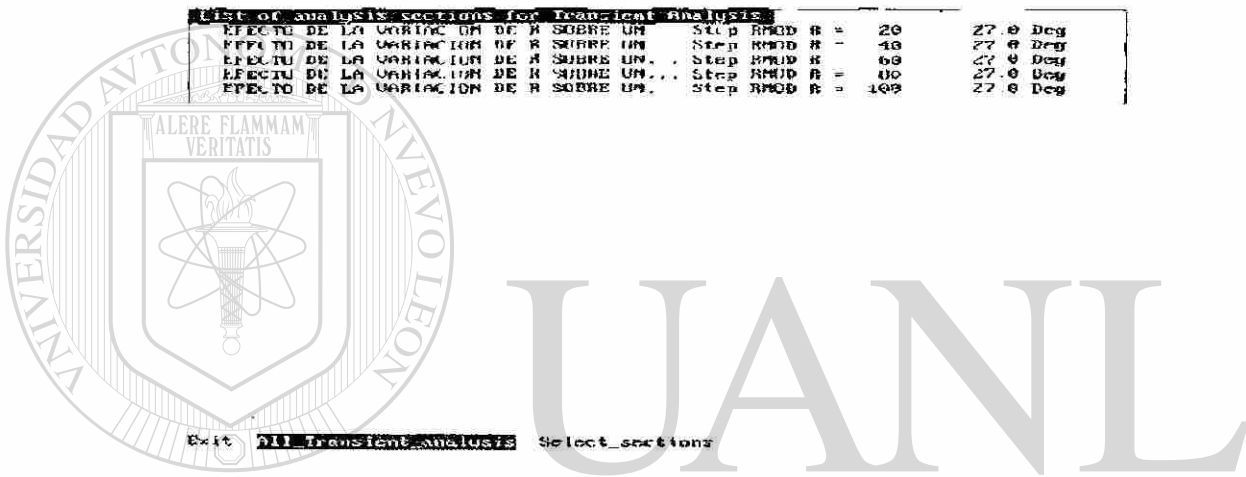


Fig. 3.8. Pantalla en donde se nos presenta una lista de la variación de R para el análisis transitorio.

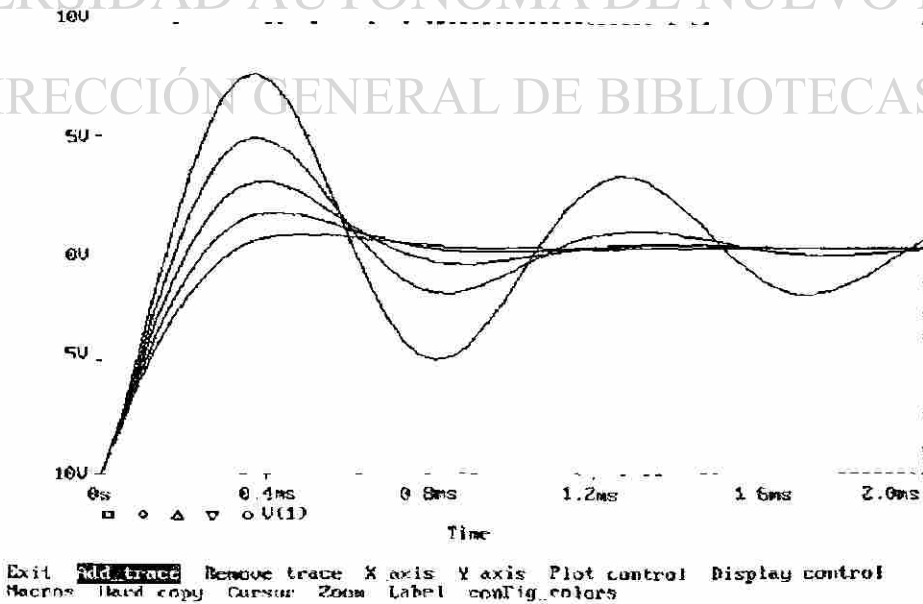


Fig. 3.9. Gráfica de la variación de R en un circuito RLC.

Continuando con nuestro análisis transitorio, del circuito de la Fig. 3.1 analizaremos los tres casos cambiando el valor de la resistencia [1], para efecto del ejemplo se utilizaron grandes valores de inductancia y capacitancia, los valores son los siguientes: $L = 1\text{H}$, $C = 0.25\text{F}$ y $R = 5, 2$ y 4 Ohms, para los tres casos $\omega_0 = 2$ rad/seg, para la proporción amortiguación tenemos que en el caso sobreamortiguado $\xi = 5/4 > 1$, cuyas raíces son $s_1 = -4$ y $s_2 = -1$, con respuesta de $i(t) = K_1 e^{-t} + K_2 e^{-4t}$; para el caso subamortiguado tenemos que $\xi < 1$, cuyas raíces son $s_1 = -1 + j\sqrt{3}$ y $s_2 = -1 - j\sqrt{3}$, con respuesta de $i(t) = e^{-t}(K_1 \cos\sqrt{3} t + K_2 \text{sen}\sqrt{3} t)$; y para el caso críticamente amortiguado $\xi = 1$, cuyas raíces son $s_1 = -2$ y $s_2 = -2$, con respuesta de $i(t) = K_1 e^{-2t} + K_2 t e^{-2t}$; las gráficas por medio de Spice para el voltaje y la corriente en el punto 3 en el punto 3 nos da:

**** CIRCUIT DESCRIPTION

**** 10/26/98 04:59:13 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

CASO SOBREAMORTIGUADO

Vg 1 0 DC 120

*Rs = 5 OHMS (SOBREAMORTIGUADO), 2 OHMS (SUBAMORTIGUADO),

*4 OHMS (CRITICAMENTE AMORTIGUADO)

Rs 1 2 5

Ls 2 3 1 IC=0

Cs 3 0 0.25 IC=0

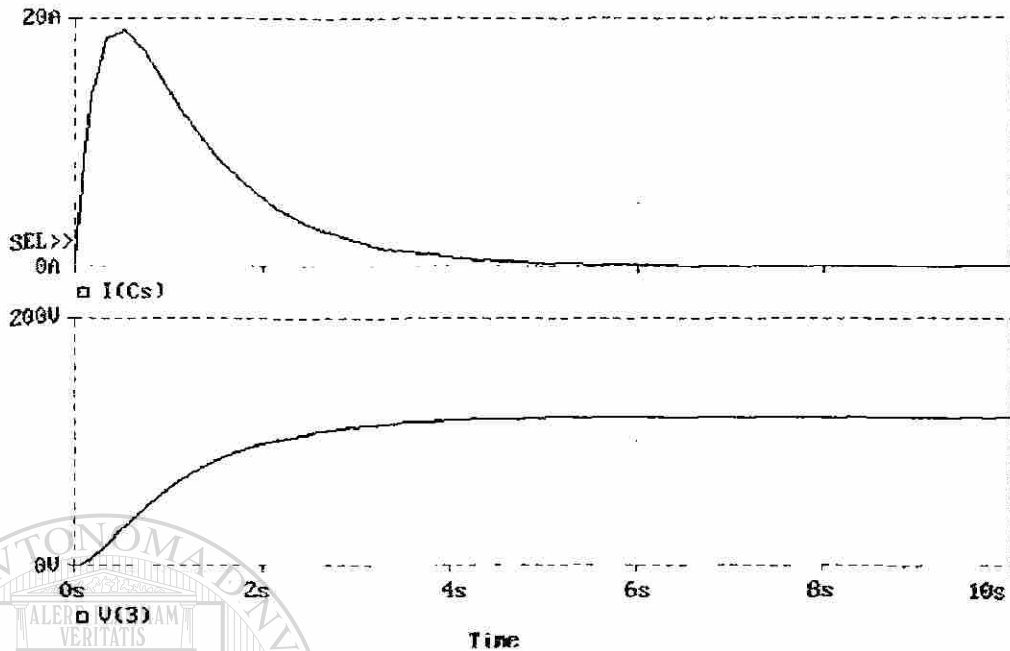
.TRAN 1 10 UIC

.PROBE

.END

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .55



Exit Add_trace Remove_trace X_axis Y_axis Plot_control Display_control
 Macros Hard_copy Cursor Zoom Label config_colors

Fig. 3.10. Gráfica del voltaje y la corriente en el capacitor para el caso sobreamortiguado.

**** 10/26/98 04:59:13 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

CASO SUBAMORTIGUADO

**** CIRCUIT DESCRIPTION

Vg 1 0 DC 120

*Rs = 5 OHMS (SOBREAMORTIGUADO), 2 OHMS (SUBAMORTIGUADO),

*4 OHMS (CRITICAMENTE AMORTIGUADO)

Rs 1 2 2

Ls 2 3 1 IC=0

Cs 3 0 0.25 IC=0

.TRAN 1 10 UIC

.PROBE

.END

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .55

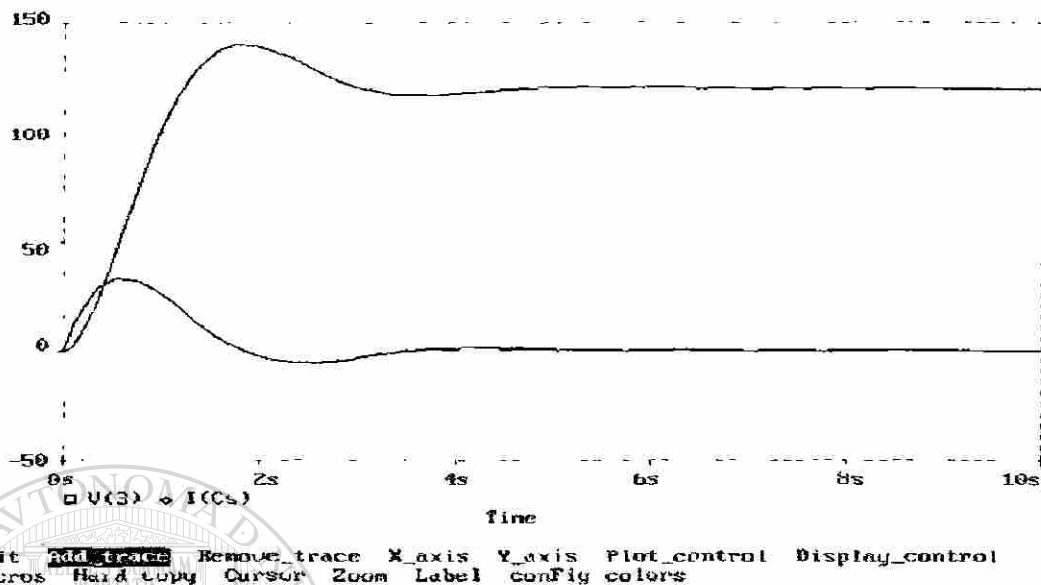


Fig. 3.11. Gráfica del voltaje y la corriente en el capacitor para el caso subamortiguado.

Si variamos el valor de la resistencia a 0.25Ω , en la gráfica se aprecia más el amortiguamiento de la onda, tal como se observa en la Fig. 3.12.

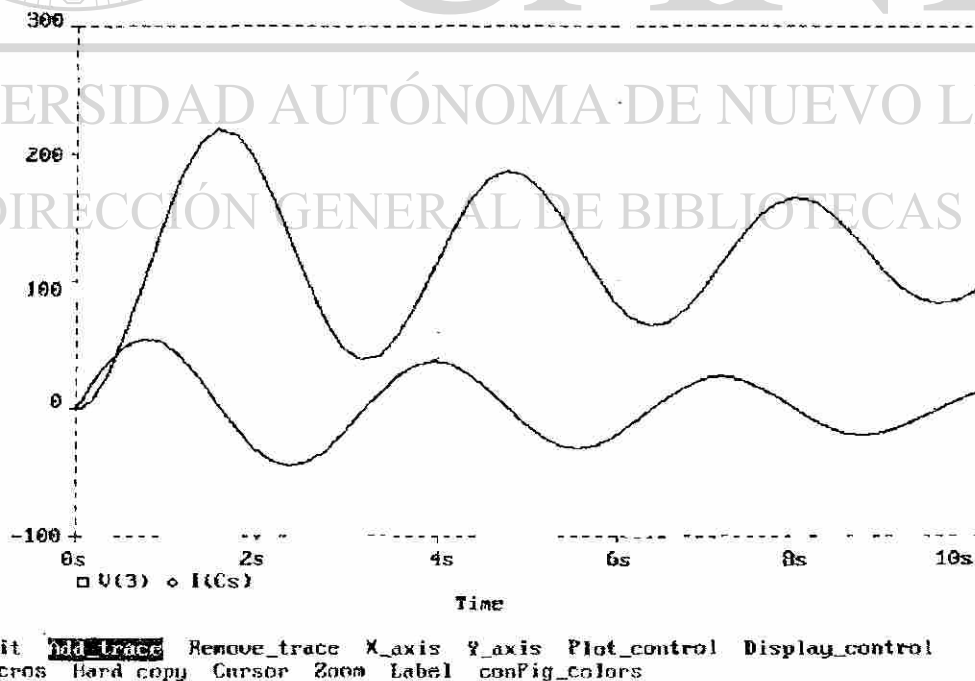


Fig. 3.12. Gráfica del voltaje y de la corriente en el capacitor para el caso subamortiguado con $R=0.25\Omega$.

**** 10/26/98 04:59:13 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

CASO CRITICAMENTE AMORTIGUADO

**** CIRCUIT DESCRIPTION

Vg 1 0 DC 120

*Rs = 5 OHMS (SOBREAMORTIGUADO), 2 OHMS (SUBAMORTIGUADO),

*4 OHMS (CRITICAMENTE AMORTIGUADO)

Rs 1 2 4

Ls 2 3 1 IC=0

Cs 3 0 0.25 IC=0

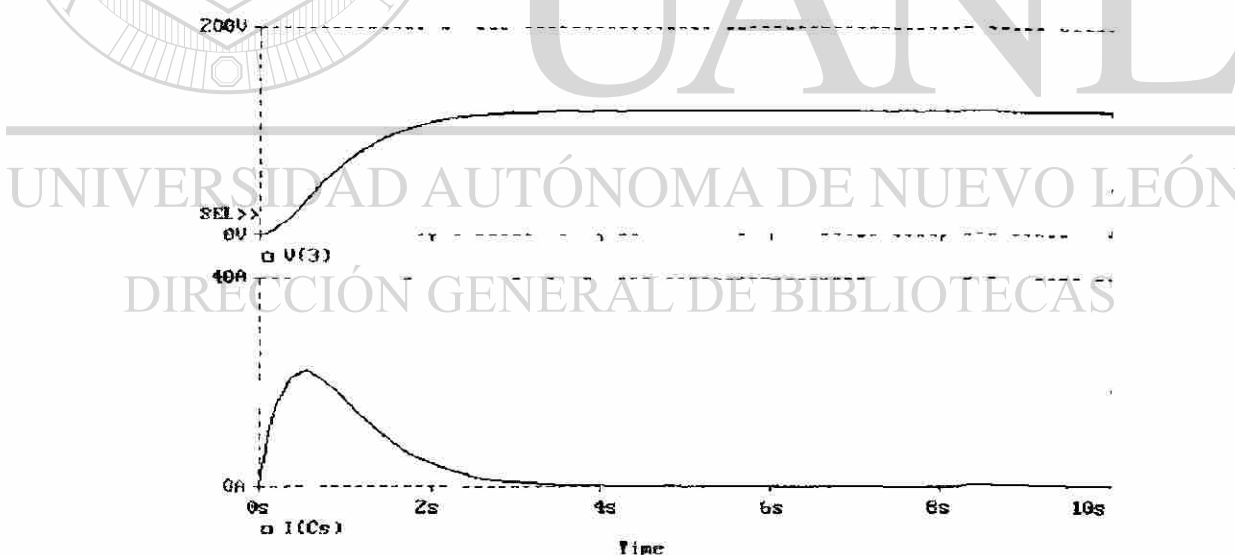
.TRAN 1 10 UIC

.PROBE

.END

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .55



Exit Add_trace Remove_trace X_axis Y_axis Plot_control Display_control
 Maues Hard_Copy Cursor Zoom Label config_colors

Fig. 3.13. Gráfica del voltaje y la corriente en el capacitor para el caso críticamente amortiguado.

Continuando con nuestro análisis transitorio en Spice, codificaremos un circuito con la función .FOUR, la cual nos hará un análisis de Fourier, el circuito electrónico que simularemos se representa en la gráfica de la Fig. 3.14 [8], con los siguientes datos: considerar un arreglo mosfet de canal inducido, usar $V_{to} = 1V$ y $K = 100\mu A/vé2$, con una entrada senoidal de 5v pico y a una frecuencia de 10KHz, nos piden encontrar el valor pico de salida esperado, para que fracción del periodo de la onda senoidal sobrepasa la salida, y, para que valor de la resistencia R1 la salida será la mitad de la entrada. Los resultados nos conducen a:

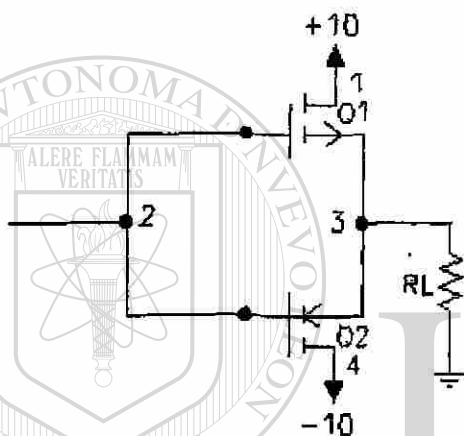


Fig. 3.14. Diagrama de un mosfet de canal inducido.

**** 10/27/98 04:36:28 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****

ARREGLO DE MOSFET DE CANAL INDUCIDO.

**** CIRCUIT DESCRIPTION

M1 1 2 3 3 JUL

M2 4 2 3 3 JUL1

.MODEL JUL NMOS(Vto=1 Kp=200U)

.MODEL JUL1 PMOS(Vto=-1 Kp=200U)

V1 1 0 10

V2 4 0 -10

RL 3 0 1000MEG

Vin 2 0 SIN(0,5,10KHz)

.OP

```
.PROBE
.TRAN 10U 8M 0 1U
.FOUR 10KHz V(3)
.OPT NOPAGE
.END
```

```
**** MOSFET MODEL PARAMETERS
      JUL      JUL1
      NMOS     PMOS
      LEVEL 1      1
      L 100.000000E-06 100.000000E-06
      W 100.000000E-06 100.000000E-06
      VTO      1      -1
      KP 200.000000E-06 200.000000E-06
      GAMMA    0      0
      PHI      .6     .6
      PBSW     .8     .8
      TOX      0      0
```

```
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE
( 1) 10.0000 ( 2) 0.0000 ( 3) -403.1E-21 ( 4) -10.0000
```

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME	CURRENT
V1	-1.001E-11
V2	1.001E-11
Vin	0.000E+00

TOTAL POWER DISSIPATION 2.00E-10 WATTS

```
**** OPERATING POINT INFORMATION TEMPERATURE = 27.000 DEG C
**** MOSFETS
```

NAME	M1	M2
MODEL	JUL	JUL1
ID	1.00E-11	-1.00E-11
VGS	4.03E-19	4.03E-19
VDS	1.00E+01	-1.00E+01
VBS	0.00E+00	0.00E+00
VTH	1.00E+00	-1.00E+00
VDS	0.00E+00	0.00E+00
GM	0.00E+00	0.00E+00
GDS	0.00E+00	0.00E+00
GMB	0.00E+00	0.00E+00
CBD	0.00E+00	0.00E+00
CBS	0.00E+00	0.00E+00
CGSOV	0.00E+00	0.00E+00
CGDOV	0.00E+00	0.00E+00
CGBOV	0.00E+00	0.00E+00
CGS	0.00E+00	0.00E+00
CGD	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	0.00E+00

**** INITIAL TRANSIENT SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
(1)	10.0000	(2)	0.0000	(3)	-403.1E-21	(4)	-10.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME	CURRENT
V1	-1.001E-11
V2	1.001E-11
Vin	0.000E+00

TOTAL POWER DISSIPATION 2.00E-10 WATTS

**** FOURIER ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C
 FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(3)

DC COMPONENT = -1.899772E-04

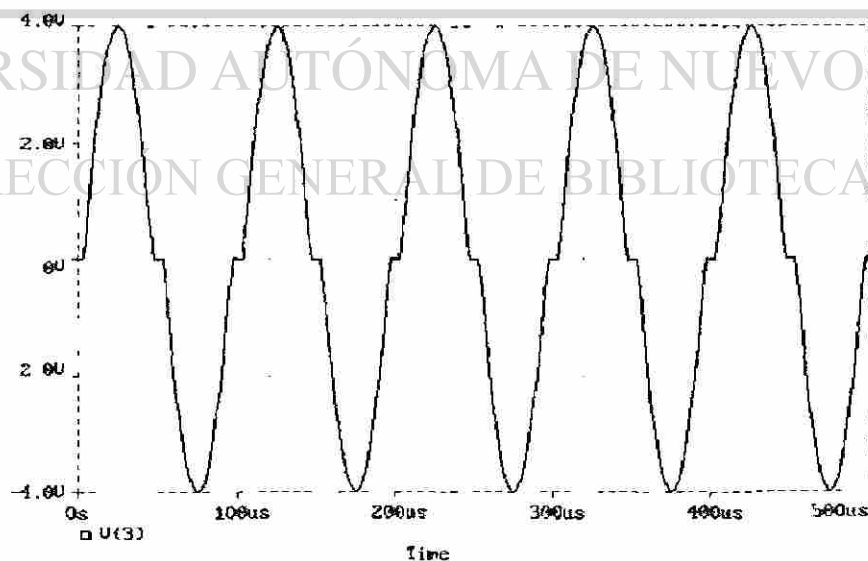
HARMONIC FREQUENCY FOURIER NORMALIZED PHASE
 NORMALIZED

NO	(HZ)	COMPONENT	COMPONENT (DEG)	PHASE (DEG)
1	1.000E+04	3.727E+00	1.000E+00	-3.794E-03
2	2.000E+04	6.398E-04	1.717E-04	-7.878E+01
3	3.000E+04	3.982E-01	1.068E-01	-1.800E+02
4	4.000E+04	6.926E-04	1.858E-04	-1.482E+02
5	5.000E+04	2.120E-01	5.687E-02	-1.800E+02
6	6.000E+04	8.498E-04	2.280E-04	-1.741E+02
7	7.000E+04	1.253E-01	3.363E-02	1.800E+02
8	8.000E+04	1.006E-03	2.699E-04	1.683E+02
9	9.000E+04	7.403E-02	1.986E-02	1.798E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.271601E+01 PERCENT

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 33.



Log Auto-range Set_range Restrict_data X_variable Fourier
 Performance_analysis

Fig. 3.14A. Gráfica de Vout con RL=1000MEG

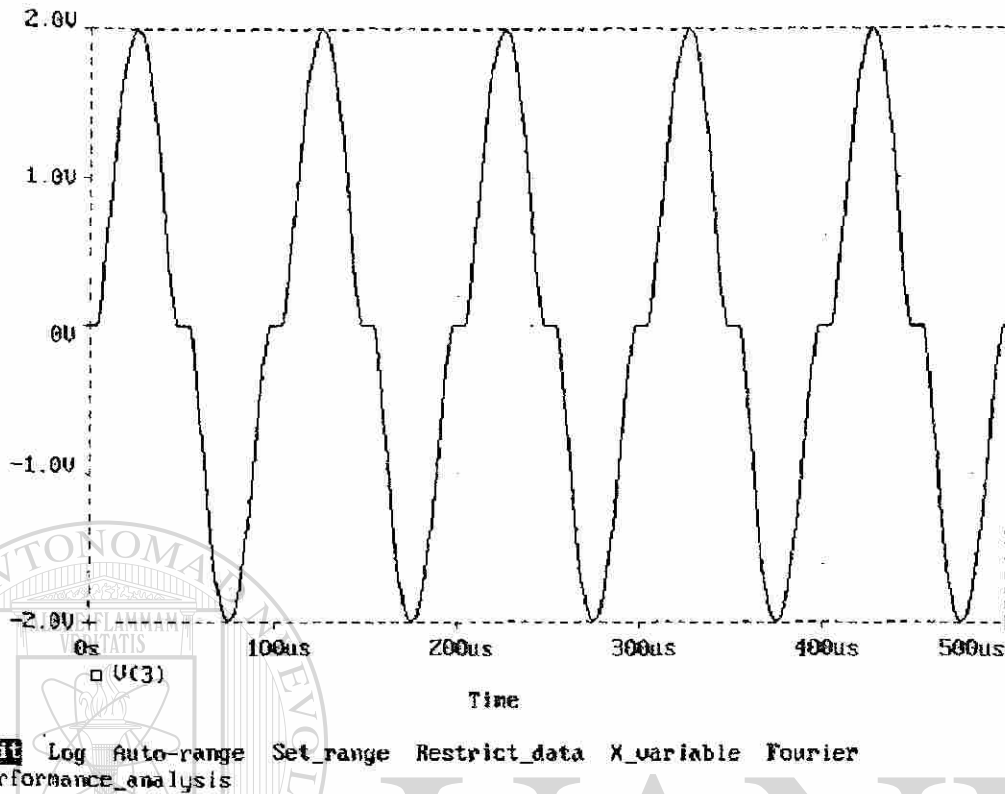


Fig. 3.14B. Gráfica de V_{out} con $R_L=5K$

En las gráficas anteriores en (a) se muestra el valor de V_{out} cuando R_{load} es muy grande (1000Meg), siendo este de 4 volts, y en la gráfica (b) se muestra el mismo valor de V_{out} pero con R_{load} mucho más pequeña (5K), aquí se observa que el voltaje de salida es la mitad que el voltaje de entrada, cabe hacer mención que la solución de este problema se toma como aceptable el valor de R_{load} de 11.1K. Mediante el análisis de Fourier se puede saber que el porcentaje de distorsión que ocurre en la gráfica de salida usando Spice es de 12.71%.

Además se adjuntan las gráficas de dren con lo que podemos darnos cuenta como actúan en complemento estos dos transistores, también se alcanza apreciar el tiempo que generan la distorsión, la cual ocurre cuando ambos están inactivos.

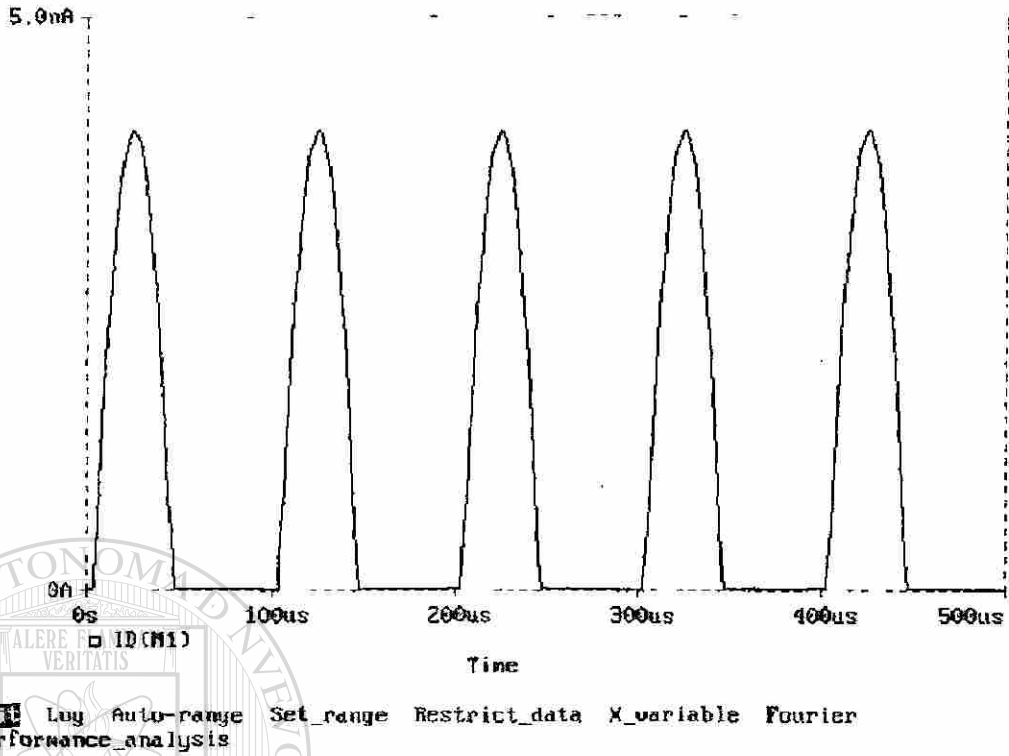


Fig. 3.15A. Gráfica de las corrientes de dren +

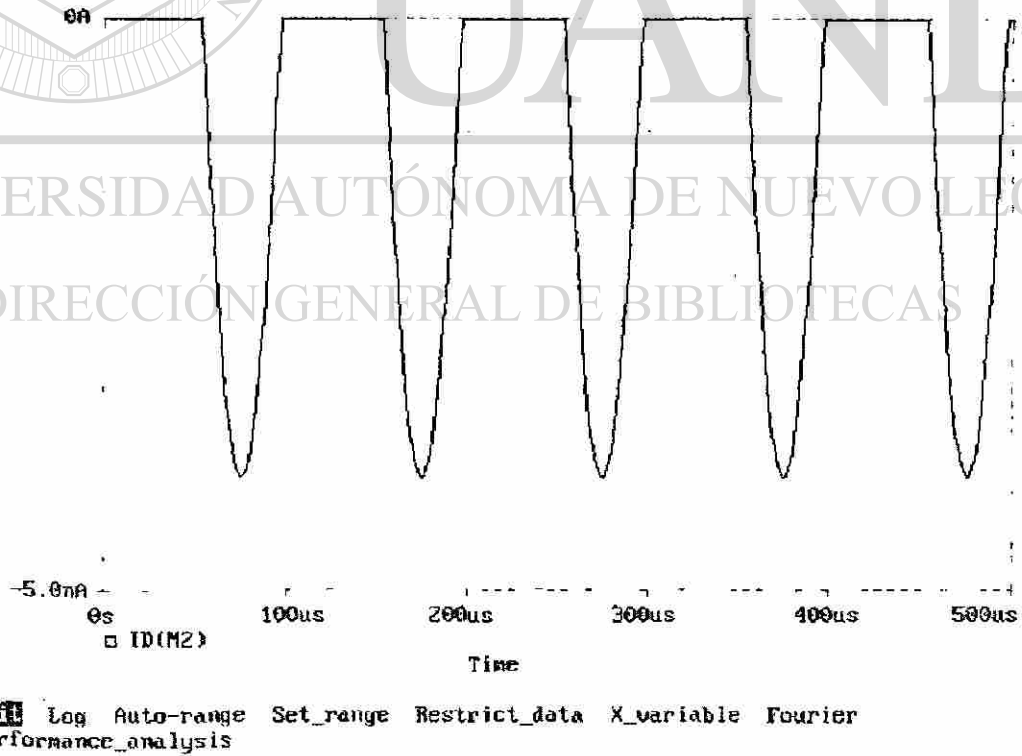


Fig. 3.15B. Gráfica de las corrientes de dren -

3.4. - GUIA DE REFERNCIA DEL EMTP.

El paquete EMTP (Electromagnetic Transients Program) [13], es un programa computacional usado para simular transitorios en sistemas electromagnéticos, electromecánicos y control, sobre sistemas eléctricos de potencia. En esta sección presentaremos los comandos necesarios para correr el EMTP y obtener las gráficas de los sistemas computarizados. Esta sección esta tomada de las notas del M.C. Enrique Betancourt Ramirez, de la materia Transitorios Electromagnéticos.

Para cargar este paquete en la computadora, se debe de contar con una memoria caché de 560Kb, y se crea el directorio en de la siguiente manera:

C:\>EMTP ↵

C:\> copydisk a:*.* ↵

Pkxarc-e emtp arc ↵ (descarga los archivos y queda grabado en C).

TP1.exe ejecuta la simulación.

Plot21e.com es la salida de las gráficas.

Startup es el parámetro de control.

El programa corre creando el archivo "caso", Edit "caso.dat", en el cual se especificaran los datos del circuito y parámetros de control. Se recomienda tomar el caso ya probado y reeditar.

Para correr la simulación, tomamos TP1.exe

>>disk (envia a la salida del disco).

>>caso. (lee el caso.dat)

>>caso.lis

>>nombre. (nombre.lis)

>>nombre

>>stop (sale a dos).

En el editor caso.lis, se pueden comprobar parámetros, investigar y corregir errores, tomar lista de las variables de salida.

En el plot21.exe, se lee el caso PL4, y nos presenta las variables en pantalla, para imprimir o para evaluar.

La estructura básica de un archivo de entrada del EMTP [13],[14], con algunos formatos para las instrucciones se presentaran según el problema que se especifique, los dibujos que se obtienen se incluyen en el archivo. La estructura del archivo de entrada se muestra en la Tabla 3.4. Muchas secciones se encuentran separadas por una carta blanca. Por conveniencia, se puede entrar una carta imagen con una carta blanca empezando en la columna 1, el cual será interpretado por el EMTP como una carta blanca. Las líneas de comentario también pueden adherirse al archivo de entrada por medio de "c-blank" en las columnas 1 y 2. Los comentarios adicionales también pueden sumarse al texto después de la carta blanca.

TABLA 3.4

ESTRUCTURA DEL ARCHIVO DE ENTRADA DEL EMTP.

Empiezan los datos nuevos del caso (una línea).	
Tarjetas especiales.	
Tarjeta de datos misceláneos de puntos fijos.	
Tarjeta de datos misceláneos entero.	
TACS Tarjeta de función.	
Carta blanca.	
TACS Tarjeta de fuentes.	
Carta blanca.	
TACS Tarjeta de dispositivos y variables suplementarias.	
Carta blanca.	
TACS Tarjeta de respuesta de salida.	
Carta blanca.	
TACS Tarjeta de condición inicial.	
Carta blanca.	
Tarjeta para Ramas, Transformadores, Cables y Líneas de Transmisión.	
Carta blanca.	
Tarjeta de Interruptores.	

Carta blanca.	
Tarjeta de fuentes.	
Carta blanca.	
Tarjeta de condición inicial.	
Tarjeta de repuesta de salida de voltaje de nodo.	
Carta blanca.	
Tarjeta de respuesta del plot calcomp.	
Carta blanca.	
Carta blanca (Fin del caso).	

Note que los TACS de entrada empiezan antes de la entrada de la red eléctrica. Los formatos de entrada de aquellas tarjetas las cuales son necesarias para simular un transitorio en un circuito RLC se describirán en el orden que aparece en la tabla 3.4. Los formatos de entrada se describen de acuerdo a la notación Fortran.

Empiezan los datos nuevos del caso. Esta tarjeta siempre precede a los datos de entrada. Tarjeta de datos misceláneos de puntos fijos. Esta carta contiene siete parámetros de número real para ser fijados en el campo de ocho columnas. Solo cuatro parámetros se muestran a continuación que se usarán:

DELTAT	TMAX	XOPT	COPT
E8.0	E8.0	E8.0	E8.0

DELTAT es el tiempo utilizado en la simulación. Necesita siempre ser mayor que cero.

TMAX es la longitud de tiempo en segundos a ser simulado. Puede ser igual o menor que cero, en tal caso el EMTP ejecuta una solución de estado estable de las condiciones iniciales únicamente, y no ejecuta una simulación transitoria.

XOPT es la frecuencia de la potencia para propósitos de especificación inductiva. Si es cero o blanco, todas las inductancias estarán en milihenrys. Si es 60.0, por ejemplo, todas las inductancias estarán totalmente como Ohms reactivos a 60 Hz.

COPT es la frecuencia de la potencia para propósitos de especificación capacitiva. Si es cero o blanco, todas las capacitancias estarán en microfarads. Si es 60.0, por ejemplo, todas las capacitancias estarán totalmente en microohms a 60 Hz.

Tarjeta de datos misceláneos entero. Esta tarjeta contiene diez parámetros enteros, los cuales son fijados en un campo de ocho columnas. Solo siete parámetros se muestran a continuación:

IOUT	IPLLOT	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT		ICAT	NENERG
18	18	18	18	18	8X	18	18

IOUT este parámetro especifica la razón a la cual la variable de salida es impresa durante la simulación. Si IOU**T** es cero o uno, cada etapa de tiempo es impresa durante la simulación. Si IOU**T**=k, entonces cada kesimo de tiempo será impreso. IOU**T** puede siempre ser cualquiera de las dos blanca o igual a un número impar. Los números par permiten oscilaciones numéricas que existen los cuales los usuarios no pueden detectar en la salida. Como una alternativa el usuario puede especificar un número muy grande en IOU**T** para evitar el tiempo de espera de la impresión de salida.

IPLLOT este parámetro especifica la razón a la cual la variable de salida es dibujada durante la simulación exactamente de la misma forma que IOU**T** controla la salida impresa. IPLLOT puede también ser cualquiera de las dos, blanca o igual a un numero impar.

IDOUBL, si es igual a uno nos producirá una topología de la red enlistando la salida impresa. Usualmente nos checa la conexión de la rama y el interruptor en conjunto con el caso.

KSSOUT, si es igual a uno nos producirá una solución completa de estado estable de voltje y corriente a ser impresa para cada rama en la red. Si es igual a dos nos producirá únicamente soluciones de estado estable de fuentes e interruptores a ser impresas. Si es

igual a tres nos producirá soluciones de estado estable de las variables de salida de fuentes, interruptores y elementos para ser impresos.

MAXOUT, si es igual a uno nos producirá que el EMTP imprima el máximo valor lograda por cada variable de salida durante la simulación transitoria.

ICAT, si es igual a uno nos producirá que todos los dibujos generados por el EMTP sean salvados sobre el disco para futuras configuraciones por un programa separado.

NENERG, el conjunto nenerg nos ilustra que el cero causará una simulación de interrupción probabilística a ser ejecutada.

Tarjeta para ramas. Los parámetros se fijan en seis columnas. Ya que la precisión está limitada por el número de columnas en los campos de entrada, las inductancias especificadas en ohms o milihenrys, y los capacitores especificados en micromhos o microfarads son usualmente la escala optima de unidad. La resistencia tienen entrada en Ohms. Las variables de corriente de rama y voltaje de salida se especifican en estas tarjetas, donde la salida de voltajes de nodo son especificados cerca del final de la entrada EMTP como se muestra en la tabla 3.5. El formato de la tarjeta de ramas de entrada se muestra a continuación.

	BUS K	BUS M		R	L	C		RAMA DE SALIDA
2X	A6	A6	12X	E6.0	E6.0	E6.0	35X	11

Este formato es para ramas monofásicas las cuales no usan la facción de rama de referencia. El Bus K y M son los seis caracteres de los nombres de los nodos del diagrama esquemático del sistema. Se debe de tener cuidado para asignar un único nombre al nodo. Los parámetros R, L y C son la resistencia, inductancia y capacitancia (en serie) de la rama. Uno de estos parámetros necesita ser distinto de cero. Si cualquiera de los dos Bus K o Bus Mes blanco, la rama se asume como conectada al nodo de tierra. La salida de la rama es un entero único el cual requiere la salida de la variable de la

rama. Utilizaremos el uno para contestar la salida de corriente del inductor. Otras opciones incluye el dos para tener la salida de voltaje diferencial de la rama, un tres para tener ambas salida de voltaje y corriente, y un cuatro para tener la salida de potencia y energía de la rama.

TABLA 3.5

PROGRAMA AUXILIAR DEL EMTP.

Constante de Líneas – Calcula los datos de entrada del EMTP para cabezales de líneas.
Constante de cables – Calcula los datos de entrada del EMTP para cables, o para cabezales de líneas de transmisión.
Jmarti, Setup, Semlyen Setup, Haver Setup, Weight – Estos programas calculan datos para varios modelos de líneas dependientes de la frecuencia en el EMTP.
Xformer, Treleg, Bctran – Estos programas calculan modelos de matriz de impedancias para transformadores desde datos de prueba de corto circuito.
Saturación – Acceso de ganancia para los siguientes tres programas: Convert – Calcula datos para saturación de núcleos de transformadores. Hysdat – Calcula datos para modelos de histéresis en núcleos de acero. Arrdat – Calcula datos para modelos de apartarrays no lineales.

Tarjeta para interruptores. El formato de estas tarjetas es similar al de las tarjetas de ramas, excepto que el interruptor puede abrir o cerrar. El modelo de interruptor del EMTP permite una operación de apertura-cierre durante la simulación. El formato de entrada del interruptor se muestra a continuación:

	BUS K	BUS M	T-CIERRE	T-APERTURA		RAMA DE SALIDA
2X	A6	A6	E10.0	E10.0	45X	II

El interruptor esta conectado entre los nodos Bus K y Bus M, uno de los cuales puede ser carta blanca para indicar un interruptor a tierra. T-cierre y T-apertura estan especificados en segundos. Un T-cierre negativo puede usarse para indicar si un interruptor esta cerrado en estado estable. Si T-apertura es blanco o es asignado con un valor mayor que Tmax, el interruptor nunca abrirá durante la simulación. Las salidas de

las corrientes y voltajes de rama pueden también ser una respuesta para los interruptores en la misma forma como para las ramas.

Tarjetas de fuentes. Una variedad de tipos de fuentes se aprovechan en el EMTP. Funciones de etapa y funciones senoidales son usadas. Las fuentes pueden ser cualquier voltaje de nodo a tierra o corrientes inyectadas en el nodo. El formato de entrada se muestra a continuación:

TIPO	BUS	V o I	AMPLITUD	FRECUENCIA	ANGULO DE FASE
I2	A6	I2	E10.0	E10.0	E10.0

Tipo es un entero de dos dígitos, I1 = Función de etapa; I4 = Función coseno.

Bus es el nombre del nodo donde la fuente es conectada.

V o I es un entero de dos dígitos, blanca = Fuente de voltaje; -1 = Fuente de corriente.

Amplitud es el nivel de la etapa del voltaje o corriente, o la amplitud en pico unitario de línea a tierra de la onda coseno.

Frecuencia es la frecuencia en Hertz de la función coseno (blanca para la función etapa).

Angulo de fase es el ángulo de la fase en grados de la función coseno (blanca para la función etapa). Estas fuentes del EMTP empiezan activas en los primeros instantes de la etapa de la simulación transitoria.

Tarjeta de condiciones iniciales. Estas son comúnmente usadas para especificar cargas súbitas en el capacitor. Para cada capacitor, una tarjeta es utilizada para nombrar el voltaje del nodo inicial en cada terminal y otra tarjeta es usada para especificar el corriente y el voltaje propio del capacitor. Los formatos para esta tarjeta se muestran a continuación:

IDENT	BUS K	V
I2	A6	E15.8

IDENT	BUS K	BUS M	I	VE15.8
I2	A6	A6	E15.8	

Ident = 2 para la tarjeta de voltaje de nodo.

Ident = 3 para la tarjeta de voltaje y corriente de rama.

Bus = nodo nombre de una terminal del capacitor.

Bus K y Bus M son los nombres de los nodos de las terminales de rama del capacitor.

V = cambio de voltaje en el capacitor.

I = 0 para un cambio con carga DC.

Tarjeta de voltaje de salida de nodo. Estas tarjetas siguen inmediatamente de las tarjetas de condición inicial. Como opuesta a las corrientes y voltajes de rama, estas tarjetas especifican las salidas de los voltajes de nodo a tierra. Una única tarjeta puede ser usada con un "1" en la columna 2 para contestar todos los voltajes de nodo a su salida. En este caso, no se usa la tarjeta blanca en la cual normalmente termina la tarjeta de salida de voltaje de nodo. Para seleccionar el voltaje de nodo individual a su salida, se usa el siguiente formato, en donde cada tarjeta contiene nombre de nodos de los voltajes de salida. Mas que una tarjeta de voltaje de salida de nodo puede usarse si hay a lo más 13 voltajes de salida. En cada tarjeta, el Bus 1 necesita ser distinto de blanca.

	BUS 1	BUS 2	.....	BUS 13
2X	A6	A6		A6

Tarjeta de respuesta de dibujo. Las tarjetas de cantidad de dibujo caen en dos grupos generales. El primer grupo especifica la línea de impresión o dibujos Calcomp, junto con el título del dibujo. Esta tarjeta se muestra a continuación:

Tarjeta de respuesta de dibujo.

2X	CALCOMP PLOT o PRINTER PLOT
----	-----------------------------

Tarjeta de título del caso.

I2	Formato alfabético (superior a 78 caracteres)
----	---

Calcomp plot puede no ser operacional en cada instalación, pero Printer Plot siempre producirá gráficas en el impresor de salida del EMTP usando caracteres alfanuméricos.

Por esta razón, estos gráficos son difíciles de usar en Calcomp Plots. Para especificar cada dibujo individual se usa el formato que se muestra a continuación.

FLAG	TYPE	UNITS	UPI	ORIG	FIN		BUS 1	BUS 2	BUS 3	BUS 4
I2	I1	I1	E3.0	E4.0	E4.0	9X	A6	A6	A6	A6

Flag es siempre igual a uno en la columna dos.

Type = 4 para un dibujo de voltaje de nodo.

= 8 para un dibujo de voltaje de rama.

= 9 para un dibujo de corriente de rama.

Units = 3 para una escala de tiempo en segundos.

= 4 para una escala de tiempo en milisegundos.

= 5 para una escala de tiempo en microsegundos.

Upi es el número de Units por pulgada.

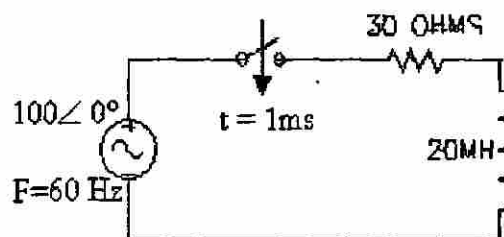
Orig es el comienzo del tiempo (en Units) de el dibujo.

End es el final del tiempo (en Units) de el dibujo.

En muchos caso, Upi, Orig, y End pueden seleccionarse para obtener una longitud total de escala de tiempo de 10 a 12 pulgadas. Upi puede ser una división de escala conveniente, ya que las líneas de la malla pueden dibujarse de uno por pulgada.

En los siguientes casos efectuaremos varias corridas de diferentes circuitos utilizando el paquete computacional EMTP.

CASO 1. Energización de una carga RL monofásica. Simular 5 ciclos de la energización graficar corriente y voltaje en la carga. Medir constante de decaimiento de I. Graficar 5 ciclos de estado estacionario y medir ángulo de voltaje y corriente.



```

BEGIN NEW DATA CASE
$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE
$OPEN, UNIT=4 FILE=EX1.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN
RECL=8000
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C  CALCULO DE TRANSITORIO EN UN CIRCUITO R-L
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C  TARJETAS DE DATOS MISCELANEOS
C  DeltaT<---TMax<---XOpt<---COpt<-Epsiln<-TolMat<-TStart
      .6E-6      .1      60
C  --IOut<--IPlot<-IDoubl<-KSSOut<-MaxOut<---IPun<-MemSav<--
      20000      1      1      1
-Icat<-NEnerg<-IPrSup
      1
C  ---ISw<--ITest<--IDist<---IMAX<--IDICE<-KSTOUT<-----
C      1      0      0
-----<--NSeed
      0
C
C  RAMAS R-L-C
C
C  Bus1->Bus2->Bus3->Bus4-><---R<---L<---C
      N1      N2      20
      0
      N2      30
      3
C      3
BLANK CARD ENDING BRANCHES
C
C  SWITCHES  :
C
C  PARA SWITCHES ESTADISTICOS: TCLOSE = MEAN CLOSING TIME

```

C TOPEN = STAND. DEVIATION MEAN CONT.

C

C BUS 1 BUS 2 T. CLOSE T. OPEN

C *****//*****//*****//*****//

SRC N1 1.0E-3 100

(STATISTICS) SALIDA

***** /

C 3

BLANK CARD ENDING SWITCHES

C

C FUENTES (TIPO EN /12/ !) :

C

C GENERADORES CONECTADOS DENTRO DE LA RED

C

C BUS 1 T AMPLITUD FREC. ANG. FASE

C *****//*****//*****//*****//

14SRC 100 60. 0

T START T STOP

*****//*****//

-100.

C

BLANK CARD ENDING SOURCES

C VOLTAJES DE NODO DE SALIDA:

C

C (TODOS LOS VOLTAJES DE NODO, SI UNA SOLA TARJETA CON
"1" EN /2/

C Y SE ENMASCARA "BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE")

C

C BUS 1 BUS 2 BUS 3 ...

C*****//*****//*****//*****//*****//*****//

N1 SRC N2

/*****//*****//

```

BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE
$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BLANK CARD TERMINATING STATISTICS OUTPUT
BLANK CARD TERMINATING THE CASE
BLANK CARD EXTRA

```

Al correr el programa se obtienen las siguientes gráficas:



Fig. 3.16. Gráfica de la fuente de voltaje y de las caídas de tensión en R y L.

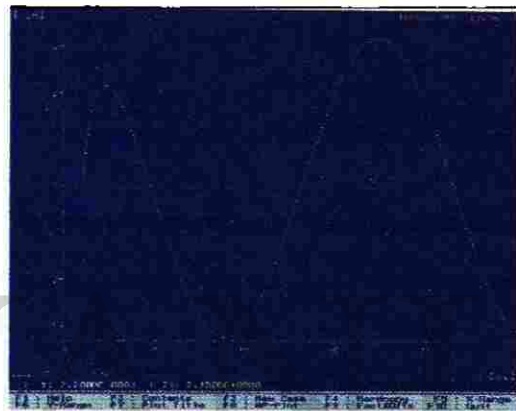


Fig. 3.17. Gráfica de la corriente transitoria I. $I=1.225A$.

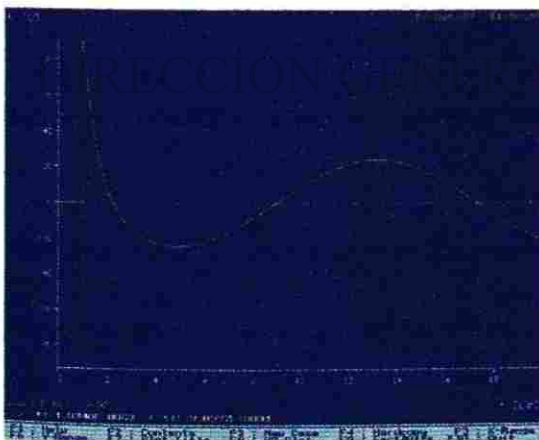


Fig. 3.18. Gráfica del voltaje transitorio en L.

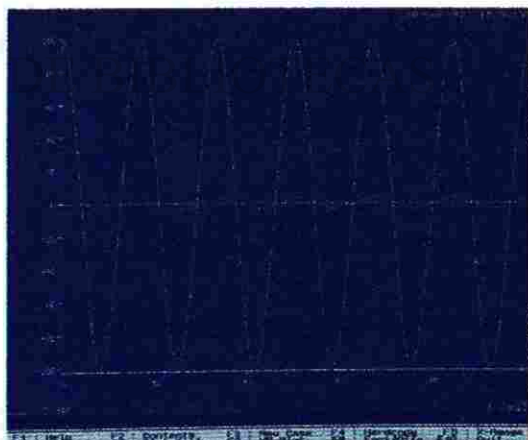
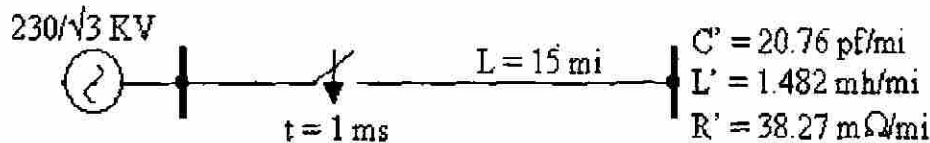


Fig. 3.19. Gráfica de estado estable del voltaje y la corriente (5 ciclos). El ángulo = 14.11°

CASO 2. Energizar una línea de transmisión monofásica (tipo 1).

a). Modelo EMTP simulando como línea tipo-1, graficar $V(t)$ al final de la línea e $I(t)$ al principio para 5 ciclos, medir frecuencia de oscilación.



```

BEGIN NEW DATA CASE
$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE
$OPEN, UNIT=4 FILE=EX2.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN
RECL=8000
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C  EJEMPLO DE PRUEBA PARA MODELO DE LINEAS DE TRANSMISION
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C  TARJETAS DE DATOS MISCELANEOS
-----
C DeltaT<---TMax<---XOpt<---COpt<-Epsiln<-TolMat<-TStart
  2.61E-6  86.3E-3  60
C --IOut<--IPlot<-IDoubl<-KSSOut<-MaxOut<--IPun<-MemSav<---ICat<-NEnerg<-
  20000    3        1        1        1                1
IPrSup
C ---ISw<--ITest<--IDist<--IMAX<--IDICE<-KSTOUT<-----<--NSeed
C   1      0      0                                0
C  RAMAS R-L-C
C
C Bus1->Bus2->Bus3->Bus4->---R<---L<---C
  SRC1   B1           .0001                       3
  N2     N2           10.E9                        3
C

```

C LINEAS DE TRANSMISION ("-1" EN /12/, SI NO ACOPLADAS!):

C PARA LINEAS ACOPLADAS: -1 = SECUENCIA CERO

C -2 = SECUENCIA POSITIVA

C -3 = (EN BLANCO)

C

C BUS 1 BUS 2 R L C LONG COD.

C OHM/MI MH/MI UF/MI MI (0,1,2)

C *****// // ***** // // ***** // // *

-1N1 N2 .038271 .482 .02076 15. 0

C

BLANK CARD ENDING BRANCHES

C

C SWITCHES :

C

C PARA SWITCHES ESTADISTICOS: TCLOSE = MEAN CLOSING TIME

C

TOPEN = STAND. DEVIATION MEAN CONT.

C

C BUS 1 BUS 2 T. CLOSE T. OPEN (STATISTICS) SALIDA

C ***** // // ***** // // ***** // // /

B1 N1 .001 100. 3

C

BLANK CARD ENDING SWITCHES

C

C FUENTES (TIPO EN /12/!):

C GENERADORES CONECTADOS DENTRO DE LA RED

C

C BUS 1 T AMPLITUD FREC. ANG.FASE T START T STOP

C ***** // // ***** // // ***** // //

14SRC1 187794.56 60. 0.0 -100.

BLANK CARD ENDING SOURCES

C

C CONDICIONES INICIALES DE VOLTAJE EN CAPACITORES :

C

C SE USAN DOS O TRES RENGLONES PARA CADA CAPACITOR:

C

C TARJETAS 1 Y 2 ("2" EN /12/):

C

C BUS 1,2 VOLTAJE INICIAL

C /////*****

C TARJETA 3 ("3" EN /12/):

C BUS 1 BUS 2 CORRIENTE (Y) VOLTAJE (INICIALES EN EL CAPACITOR)

C /////*****

C

C VOLTAJES DE NODO DE SALIDA:

C

C (TODOS LOS VOLTAJES DE NODO, SI UNA SOLA TARJETA CON "1" EN /2/

C Y SE ENMASCARA "BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE")

C

C BUS 1 BUS 2 BUS 3 ...

C *****

SRC1 B1 N1 N2

BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE

\$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP

BLANK CARD ENDING PLOT CARD

C SALIDAS PARA EL CASO ESTADISTICO

C

C VOLTAJES DE NODO = 0 EN /2/ (MAX. 3 SALIDAS)

C VOLTAJES DE RAMA = -1 EN /1,2/ (MAX. 3 SALIDAS)

C VOLTAJE BASE BUS 1 BUS 2 BUS 3 BUS 4 BUS 5 BUS 6

C *****

C 0 230940. FRO4L1

BLANK CARD TERMINATING STATISTICS OUTPUT

BLANK CARD TERMINATING THE CASE
BLANK CARD EXTRA

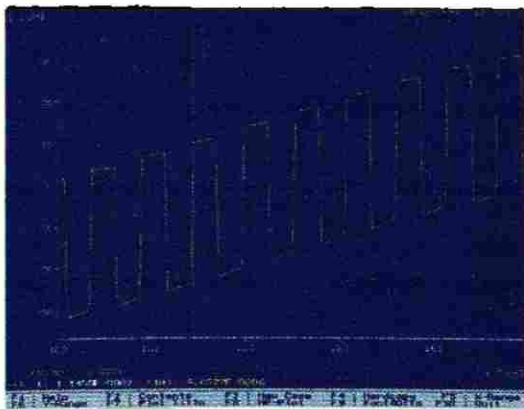


Fig. 3.20. Grafica de la corriente en una línea de transmisión tipo-1 la medición de la frecuencia es $F=1824$ Hz.

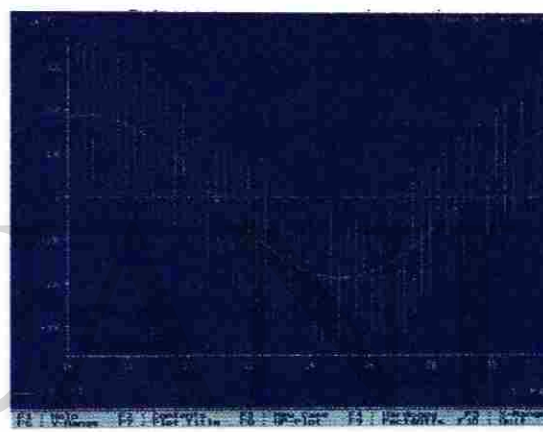
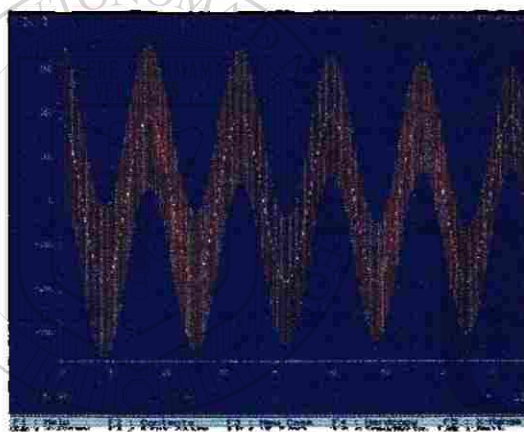


Fig. 3.21. (a) Grafica del voltaje de la fuente y del voltaje al final de la línea de transmisión. (b) Zomm de la grafica.

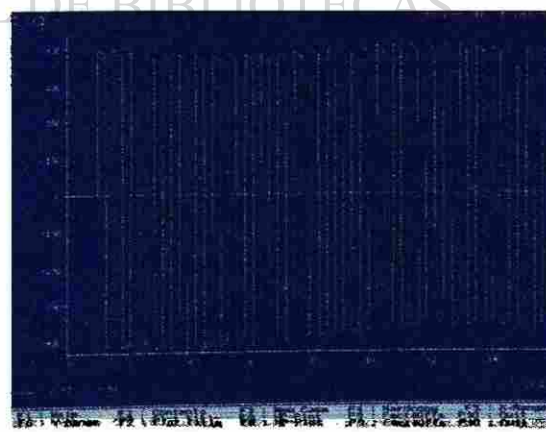
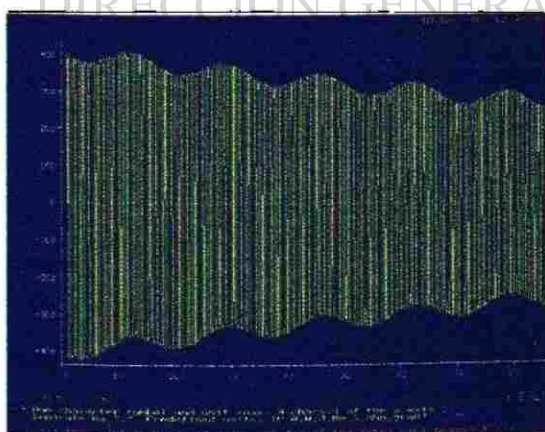


Fig. 3.22. (a) Corriente al principio de la línea de transmisión. (b) Zomm de la grafica.

b) Modelo EMTP como línea II.

```
BEGIN NEW DATA CASE
```

```
□
```

```
$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE
```

```
□
```

```
$OPEN, UNIT=4 FILE=EX2.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN
```

```
RECL=8000
```

```
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
```

```
C  MODELO DE LINEA DE TRANSMISION II.
```

```
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
```

```
C  TARJETAS DE DATOS MISCELANEOS
```

```
C DeltaT<---TMax<---XOpt<---COpt<-Epsiln<-TolMat<-TStart
```

```
55.E-9 84.E-3 0
```

```
C --IOut<-IPlot<-IDoubl<-KSSOut<-MaxOut<---IPun<-MemSav<---ICat<-NEnerg<-
```

```
20000 3 1 1 1
```

```
IPrSup
```

```
□
```

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

```
□
```

```
C ---ISw<---ITest<---IDist<---IMAX<---IDICE<-KSTOUT<-----<---NSeed
```

```
□
```

```
C 1 0 0 0
```

```
C
```

```
□
```

```
C RAMAS R-L-C
```

```
□
```

```
C
```

```
□
```

C Bus1->Bus2->Bus3->Bus4-<-R<-L<-C O

□

SRC1 B1 5 3

N2 5.E3 3

C

C LINEAS DE TRANSMISION ("-1" EN /12/ , SI NO ACOPLADAS!) :

C PARA LINEAS ACOPLADAS: -1 = SECUENCIA CERO

C -2 = SECUENCIA POSITIVA

C -3 = (EN BLANCO)

C

C BUS 1 BUS 2 R L C LONG COD.

C OHM/MI MI/MI UF/MI MI (0,1,2)

C ***** // // ***** // // ***** // // *

-1N1 N2 .038271 .482 .02076 15 0

BLANK CARD ENDING BRANCHES

C

C SWITCHES :

C

C PARA SWITCHES ESTADISTICOS: TCLOSE = MEAN CLOSING TIME

C TOPEN = STAND. DEVIATION MEAN CONT.

C

C BUS 1 BUS 2 T. CLOSE T. OPEN (STATISTICS) SALIDA

C ***** // // ***** // // ***** //

B1 N1 .001 100. 3

C

BLANK CARD ENDING SWITCHES

C

C FUENTES (TIPO EN /12/ !) :

C GENERADORES CONECTADOS DENTRO DE LA RED

C BUS 1 T AMPLITUD FREC. ANG.FASE T START T STOP

C ***** // // ***** // // ***** //

14SRC1 132790.56 60. 0.0 -100.

BLANK CARD ENDING SOURCES

C

C CONDICIONES INICIALES DE VOLTAJE EN CAPACITORES :

C

C SE USAN DOS O TRES RENGLONES PARA CADA CAPACITOR:

C

C TARJETAS 1 Y 2 ("2" EN /12/):

C

C BUS 1,2 VOLTAJE INICIAL

C // // // // // *****

C TARJETA 3 ("3" EN /12/):

C BUS 1 BUS 2 CORRIENTE (Y) VOLTAJE (INICIALES EN EL CAPACITOR)

C // // // // // ***** // // // // // *****

C

C VOLTAJES DE NODO DE SALIDA:

C

C (TODOS LOS VOLTAJES DE NODO, SI UNA SOLA TARJETA CON "1" EN /2/

C Y SE ENMASCARA "BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE")

C

C BUS 1 BUS 2 BUS 3 ...

C ***** // // // // // ***** // // // // // ***** // // // // // ***** // // // // // *****

SRC1 B1 N1 N2

BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE

\$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP

BLANK CARD ENDING PLOT CARDS

C

C SALIDAS PARA EL CASO ESTADISTICO

C

C VOLTAJES DE NODO \equiv 0 EN /2/ (MAX. 3 SALIDAS)

C VOLTAJES DE RAMA \equiv -1 EN /1,2/ (MAX. 3 SALIDAS)

C
 C VOLTAGE BASE BUS 1 BUS 2 BUS 3 BUS 4 BUS 5 BUS 6
 C *****//*****//*****//*****
 C 0 230940. FRO4L1
 BLANK CARD TERMINATING STATISTICS OUTPUT
 BLANK CARD TERMINATING THE CASE
 BLANK CARD EXTRA

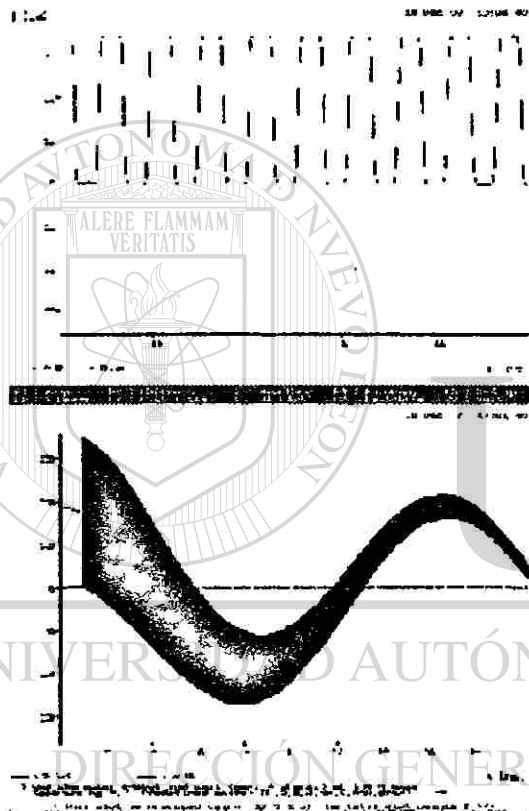


Fig. 3.23. Grafica de la corriente en una línea de transmisión Π , la medición de la frecuencia es de 93458 Hz.

Fig. 3.24. (a) Grafica del voltaje de la fuente y del voltaje al final de la línea de transmisión. (b) Zoom de la grafica.

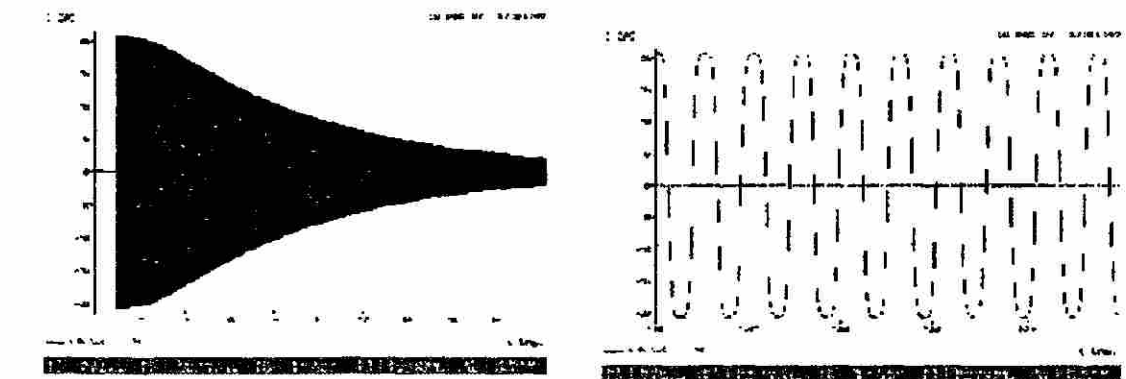


Fig. 3.25. Grafica de la corriente al final de la línea de transmisión. (b) Zoom de la grafica.

CASO 3. Característica V(I) de un apartarrayo de oxido de zinc en el rango -10 - +10
 KA. Tiene los parámetros: Vref=206600, Vflash=0, Vzero=0, Coeff=1500, Exp=26 y
 Vmin=0.5

BEGIN NEW DATA CASE

C

\$/CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE

C

\$/OPEN, UNIT=4 FILE=EX3.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN
 RECL=8000

CC

C PROBLEMA 3 EXAMEN APARTARRAYOS DE ZNO C

CC

C TARJETAS DE DATOS MISCELANEOS

C DeltaT<---TMax<---XOpt<---COpt<-Epsiln<-TolMat<-TStart

3.33E-6 0.070 60. 0

C --IOut<--IPlot<-IDoubl<-KSSOut<-MaxOut<---IPun<-MemSav<---ICat<-NEnerg<-

10000 9 1 1 1 1 1

IPrSup

C ---ISw<--ITest<--IDist<---IMAX<--IDICE<-KSTOUT<-----<--NSeed

C 1 0 0 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS 0

C APARTARRAYOS

C BUS1 BUS2 BUS3 BUS4 CLAVE O

C ***** //////////////// ***** *

92EQUA 5555 3

C VREF VFLASH VZERO COL

C *****////////////////*****//

206600 0 0

C COEFF EXPON VMIN

C *****////////////////*****

1500. 26.0 0.5

9999

BLANK CARD ENDING BRANCHES

C

BLANK CARD ENDING SWITCHES

C

C FUENTES (TIPO EN /12/ !) :

C

C GENERADORES CONECTADOS DENTRO DE LA RED

C

C BUS I T AMPLITUD FREC. ANG.FASE T START T STOP

C ***** //***** //***** //*****
 14EQUA 222500. 60. 0. -100. 100.

C

BLANK CARD ENDING SOURCES

C

C

C VOLTAJES DE NODO DE SALIDA:

C

C (TODOS LOS VOLTAJES DE NODO, SI UNA SOLA TARJETA CON "1" EN /2/

C Y SE ENMASCARA "BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE")

C DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

C BUS 1 BUS 2 BUS 3 ...

C *****//*****//*****//*****//*****//*****//*****//*****

RECA

BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE

\$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP

BLANK CARD ENDING PLOT CARDS

BLANK CARD TERMINATING STATISTICS OUTPUT

BLANK CARD TERMINATING THE CASE

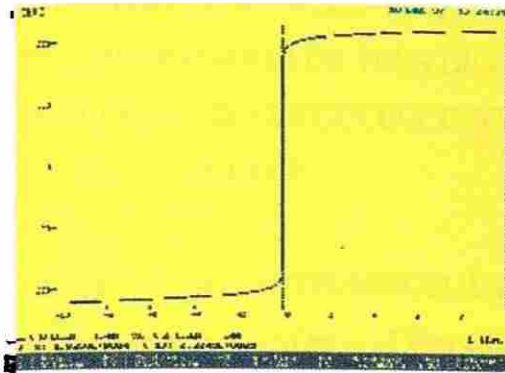


Fig. 3.26. Gráfica V-I (± 10 KA).

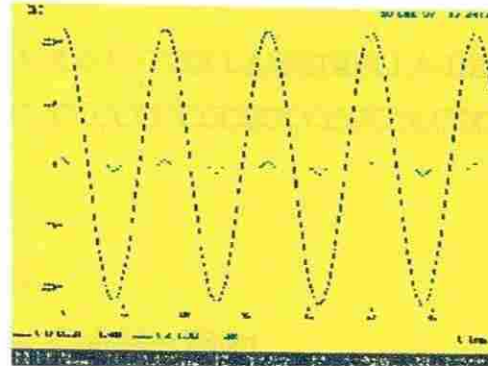


Fig. 3.27. Gráfica del voltaje y corriente respecto al tiempo.

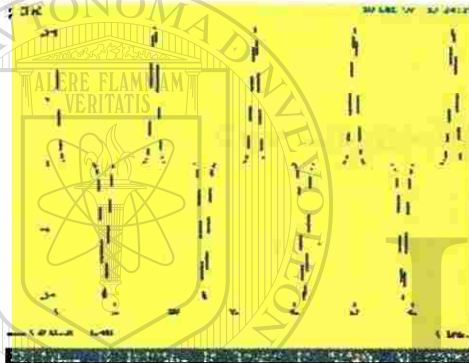


Fig. 3.28. Gráfica de la corriente de disparo del apartarrayos.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

CASO 4. Energizar un transformador Y-Y- Δ , con los siguientes datos: $S_n=100$ MVA (H-X), $Z_{HX}=10\%$, $Z_{HY}=20\%$, $Z_{XY}=15\%$ a 100 MVA, $V_{HLL}=400$ KV Y; $V_{XLL}=230$ KV Y $V_{YLL}=13.8$ KV Δ . Para cada devanado $X/R=5$. La curva de magnetización por fase está dado por la tabla 3.6. a) Comprobar la validez del modelo, midiendo la corriente de excitación, y medir las impedancias de corto circuito. b) Efectuar corridas cerrando la fase A a intervalos de 15° eléctricos desde 0° a 90° (las fases B y C defasadas 120°). Graficar la corriente I_{AH} , I_{ABY} , $V_{A,B,C|X}$ y $V_{A,B,C|Y}$. Se anexan las corridas a 0° y a 15° .

BEGIN NEW DATA CASE

\$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE

C\$OPEN, UNIT=4 FILE=EX43L.PL4 FORM=UNFORMATTED

STATUS UNKNOWN RECL-8000

C TRANSFORMADOR DE TRES DEVANADOS ESTRELLA-ESTRELLA-DELTA

CC
 CCCCCCCCCCCCCCCCCC

C

C TARJETAS DE DATOS MISCELANEOS

C DeltaT<---TMax<---XOpt<---COpt<-Epsiln<-TolMat -TStart

.83E-6 20 E-3 60

C --IOut<--IPlot<-IDoubl<-KSSOut<-MaxOut<---IPun<-MemSav<---ICat<-NEnerg<-

20000 5 1 1 1 0 0 1

IprSup

C --ISw<--ITest<--IDist<---IMAX<--IDICE<-KSTOUT<-----<--NSeed

C 1 0 0

C

C RAMAS R-L-C

C

C Bus1->Bus2->Bus3->Bus4->R<---L<---C 0

NX1 1.E9 1

NX2 1.E9 1

NX3 1.E9 1

C

C TRANSFORMADORES.

C

C TRAFO A

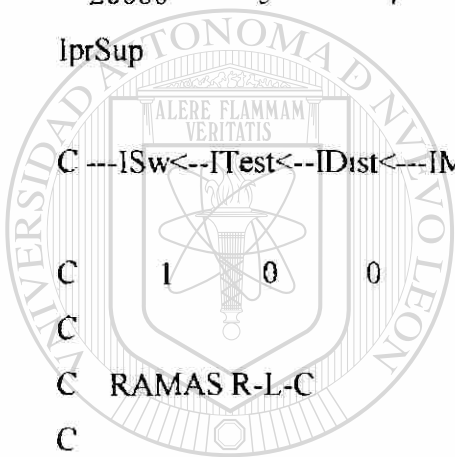
C

C REQUESTWORD REF BUS IEXC-N PSI-N BUS R-EXC

C A V-S OHM

C ***** / / / / ***** / / / ***** / / /

TRANSFORMER 1.020 773. INTA



U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



C ----RAMA DE EXCITACION:

C CORRIENTE ENLACES DE FLUJO

C A V-S

C *****//

1.020	773.
1.54	864.72
3.061	952.41
10.2	1039.54
30.61	1082.86

9999

C

C ----DEVANADOS:

C /12/--> NUMERO DEL DEVANADO.

C

C BUS 1 BUS 2 R-CC L-CC VUELTAS

C OHM

C //*****//

1NH1	.3183	400.
------	-------	------

2NX1	0.035	230.
------	-------	------

3NY1	6.3E-5	13.8
------	--------	------

C

C TRAF0 B

C

C REQUESTWORD REF BUS IEXC-N PSI-N BUS R-EXC

C A V-S OHM

C ***** //*****//

TRANSFORMER	1.020	773.	INTB
-------------	-------	------	------

C ----RAMA DE EXCITACION:

C CORRIENTE ENLACES DE FLUJO

C A V-S

C *****//

1.020	773.
1.54	864.72
3.061	952.41
10.2	1039.54
30.61	1082.86

9999

C

C ----DEVANADOS:

C /12/--> NUMERO DEL DEVANADO.

C

C BUS 1	BUS 2	R-CC	L-CC	VUELTAS
---------	-------	------	------	---------

C				OHM
---	--	--	--	-----

C	//////	*****	//////	*****	//////
---	--------	-------	--------	-------	--------

1NH2			.3183	400.
2NX2			0.035	230.
3NY2	NY1		6.3E-5	13.8

C

C TRAFOC

C

C	REQUESTWORD	REF	BUS	IEXC-N	PSI-N	BUS	R-EXC
---	-------------	-----	-----	--------	-------	-----	-------

C				A	V-S		OHM
---	--	--	--	---	-----	--	-----

C	*****	//////	*****	//////	*****	//////
---	-------	--------	-------	--------	-------	--------

TRANSFORMER			1.02	773.	INTC
-------------	--	--	------	------	------

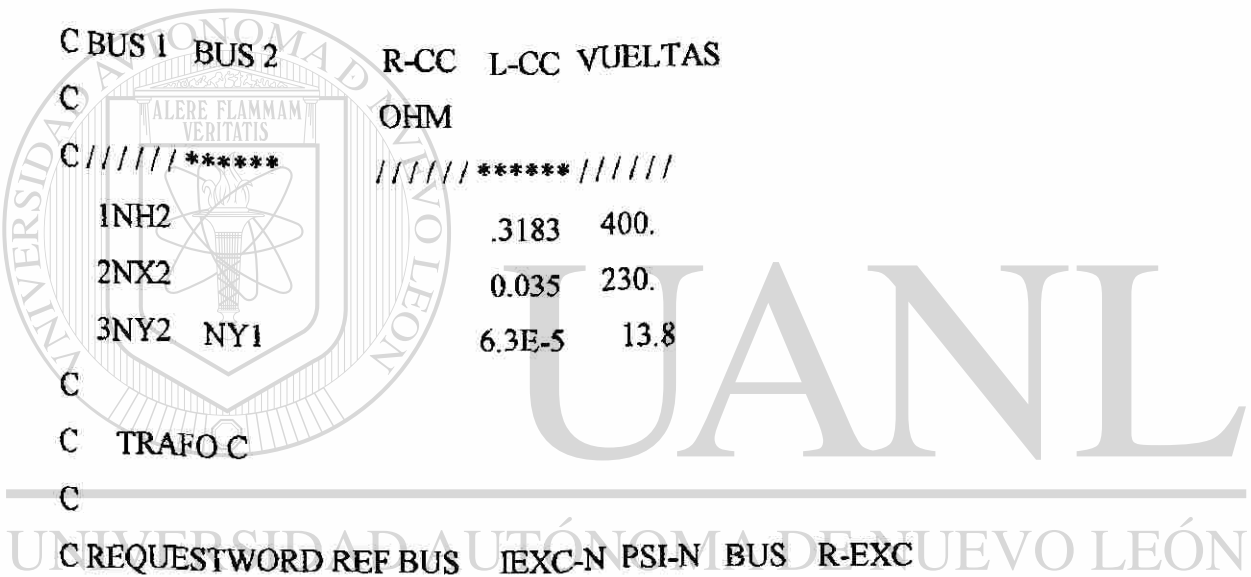
C ----RAMA DE EXCITACION:

C CORRIENTE ENLACES DE FLUJO

C	A	V-S
---	---	-----

C	*****	////////////////
---	-------	------------------

1.020	773.
1.54	864.72
3.061	952.41
10.2	1039.54



30.61 1082.86

9999

C ----DEVANADOS:

C /12/--> NUMERO DEL DEVANADO.

C

C BUS 1 BUS 2 R-CC L-CC VUELTAS

C OHM

C////////***** //////////////

INH3 .3183 400.

2NX3 0.035 230.

3 NY2 6.3E-5 13.8

C

BLANK CARD ENDING BRANCHES

C SWITCHES :

C PARA SWITCHES ESTADISTICOS: TCLOSE = MEAN CLOSING TIME

C TOPEN = STAND. DEVIATION MEAN CONT.

C

C BUS 1 BUS 2 T. CLOSE T. OPEN (STATISTICS) SALIDA

C

C*****////////***** //////////////

SRC1 NH1 -.0167 100. 3

SRC2 NH2 -.0167 100. 3

SRC3 NH3 -.0167 100. 3

C BLANK CARD ENDING SWITCHES

C FUENTES (TIPO EN /12/!);

C GENERADORES CONECTADOS DENTRO DE LA RED

C BUS 1 T AMPLITUD FREC. ANG.FASE T START T STOP

C***** ////////////// ***** //////////////

14SRC1 326598. 60. 0. -100. 100.

14SRC2 326598. 60. -120. -100. 100.

14SRC3 326598. 60. 120. -100. 100.

BLANK CARD ENDING SOURCES

C VOLTAJES DE NODO DE SALIDA:

C (TODOS LOS VOLTAJES DE NODO, SI UNA SOLA TARJETA CON "1" EN /2/

C Y SE ENMASCARA "BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE")

C BUS 1 BUS 2 BUS 3 ...

C ***** // // // ***** // // // ***** // // // ***** // // // ***** // // // *****

SRC1 NX1 NY1 NH1

SRC2 NX2 NY2 NH2

SRC3 NX3 NNH

BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE

\$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP

BLANK CARD ENDING PLOT CARDS

BLANK CARD TERMINATING STATISTICS OUTPUT

BLANK CARD TERMINATING THE CASE

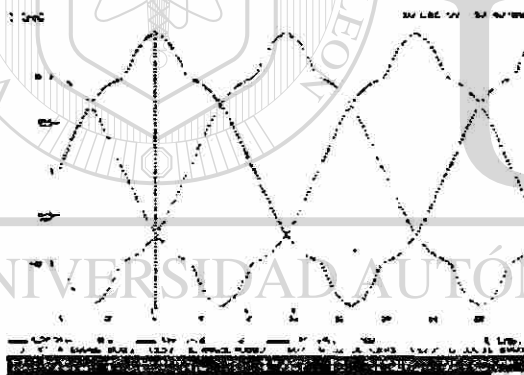


Fig. 3.29. Gráfica de la corriente de excitación. $I_{exc}=1.4465$ mA.

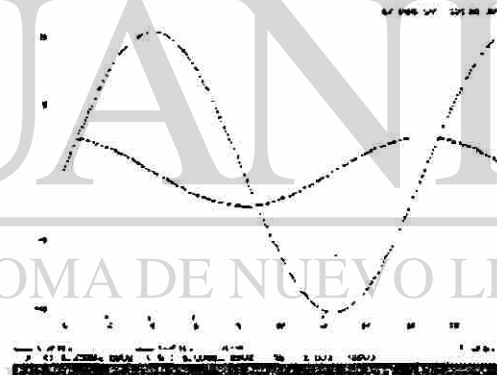


Fig. 3.30. Medición de $Z_{HX}=V_H/I_X$, $V_H=252$ V, $I_X=1033.2$ A, $Z_{HX}=0.243$

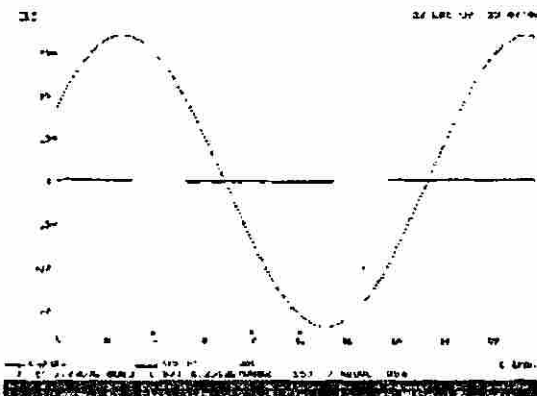


Fig. 3.30. Medición de $Z_{HY}=V_H/I_Y$, $V_H=252$ V, $I_Y=34,080$ A, $Z_{HY}=0.00739$

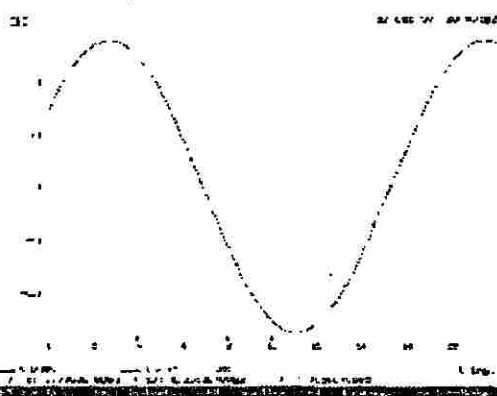


Fig. 3.31. Medición de $Z_{XY}=V_X/I_Y$, $V_X=252$ V, $I_Y=138.56$ KA, $Z_{XY}=0.001818$

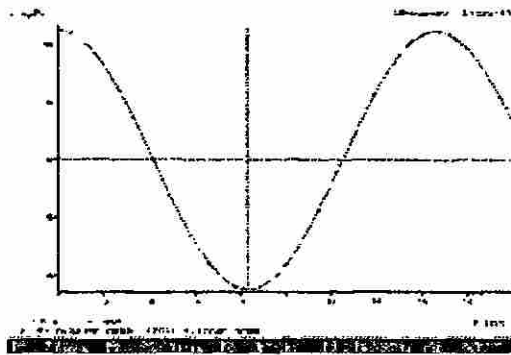


Fig. 3.32. Corrida a 0° de I_{AB}.

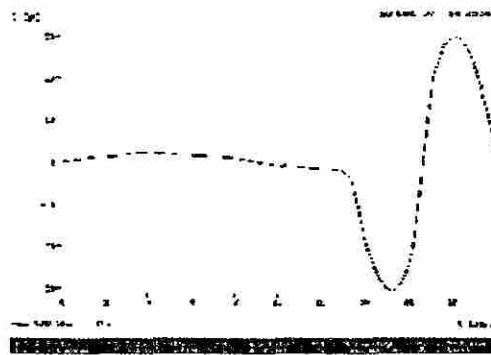


Fig. 3.33. Corrida de 0° de I_{AH}.

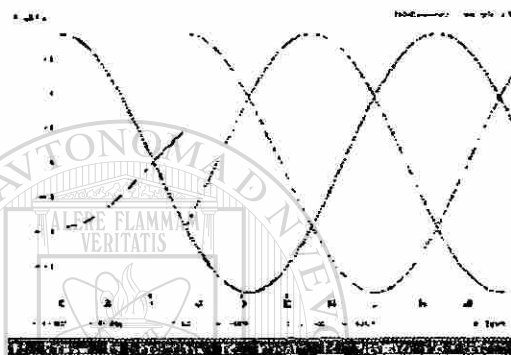


Fig. 3.34. Voltajes A, B y C en X.

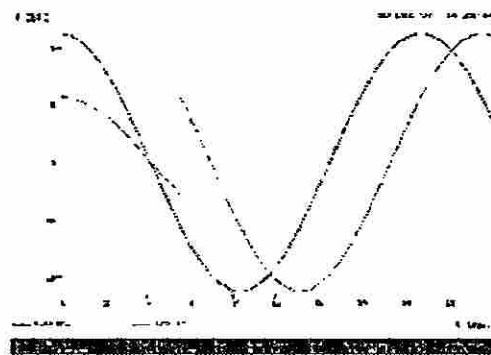


Fig. 3.35. Voltajes A, B en Y, V_c esta aterrizado.



Fig. 3.36. Corrida a 15° de I_{ABC}. en H

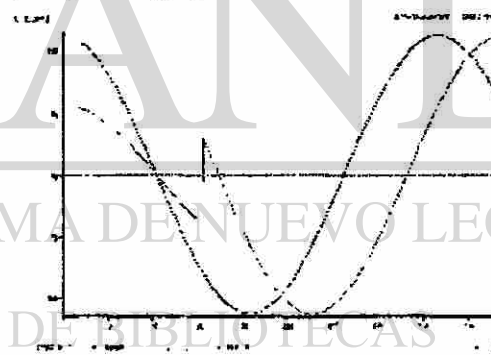


Fig. 3.37. Corrientes A y B a 15° en Y, C esta aterrizado.

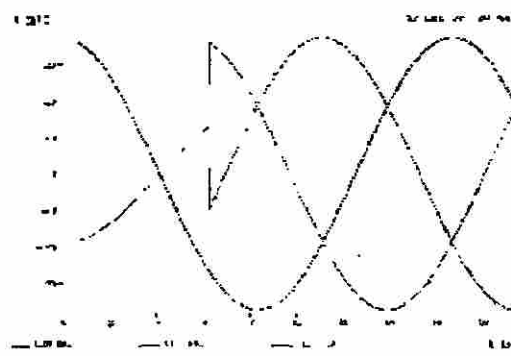


Fig. 3.38. Voltajes A, B y C en X, a 15°.

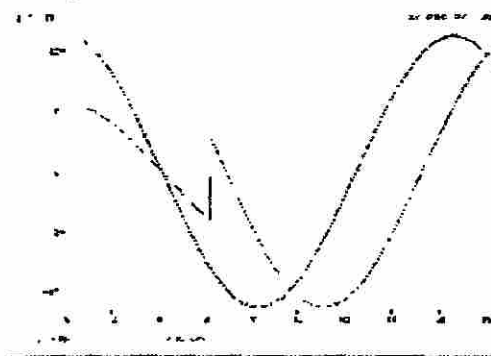


Fig. 3.39. Voltajes A y B en Y a 15°, C esta aterrizado.

CAPÍTULO 4

FORMULACIÓN DE MATRICES PARA EL CÁLCULO UTILIZANDO EL MATLAB.



INTRODUCCIÓN.

El paquete computacional MatLab (MATrix LABoratory) es un programa que nos proporciona un acceso iterativo a las librerías Linpack y Eispack los cuales se incluyen en el paquete, es un paquete de alta calidad para resolver ecuaciones lineales y otros tipos de problemas que envuelvan soluciones con base en técnicas matriciales sin tener que escribir programas en lenguajes tradicionales como el Fortran, Basic C++, etc.

Las declaraciones del MATLAB pueden prepararse desde cualquier editor y almacenarse en un archivo para un uso posterior. Este archivo se refiere a un documento, o un “m-file”, en donde se pueden ejecutar una serie de secuencias de ordenes almacenadas en el disco. En este documento se dan los datos en una matriz, si se detecta algún error en los datos, estos pueden ser fácilmente corregidos. Un M-file nos puede referenciar con otros M-file, incluyendo referencias propias recursivas.

4.1. FORMACIÓN DE ALGORITMO PARA CIRCUITOS ELÉCTRICOS.

En MatLab se puede crear una matriz ordenando los números en forma rectangular separados por un espacio entre ellos o por una coma, y, por punto y coma cuando se le indique al paquete que es cambio el final de una fila, contenido entre corchetes. Estas matrices pueden ser de cualquier tipo de expresión, y las matrices de igual dimensión pueden sumarse, sustraerse o multiplicarse. En adición a la construcción de funciones, numerosas funciones matemáticas se aprovechan en la forma de M-files que están contenidas dentro del paquete [13].

Empezaremos con la aplicación de este paquete para encontrar corrientes, voltajes y potencia en los circuitos eléctricos. Por ejemplo en el circuito de la Fig. 4.1 determinemos los voltajes de nodos V1 y V2, las corrientes que circulan por cada resistencia y la potencia entregada por las fuentes. [1]

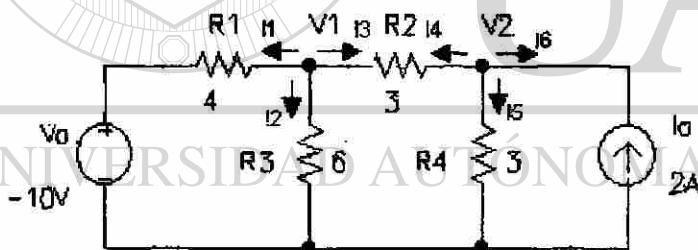


Fig. 4.1. Diagrama de un circuito DC.

Por LCK nos resulta la siguiente ecuación de nodo:

$$\begin{bmatrix} \frac{3}{4} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{5}{2} \\ 2 \end{bmatrix}$$

El siguiente programa está escrito para encontrar la solución pedida:

Va= -10;

Ia= 2;

R1=1/4; R2=1/6; R3=1/3; R4=1/3;

$$Y = \begin{bmatrix} 3/4 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 \end{bmatrix};$$

$$I = \begin{bmatrix} -5/2 \\ 2 \end{bmatrix};$$

s1='LA SOLUCIÓN ES'

$$V = \text{inv}(Y) * I$$

$$P = V * \text{conj}(I)$$

$$I1 = V(1, :) / R1$$

$$I2 = V(1, :) / R2$$

$$I3 = (V(1, :) - V(2, :)) / R3$$

$$I4 = (V(2, :) - V(1, :)) / R3$$

$$I5 = V(2, :) / R4$$

$$I6 = -Ia$$

$$s1 =$$

LA SOLUCIÓN ES

$$V =$$

-2.5714

1.7143

$$P =$$

6.4286

3.4286

$$I1 =$$

-10.2857

$$I2 =$$

-15.4286

$$I3 =$$

-12.8571

$$I4 =$$

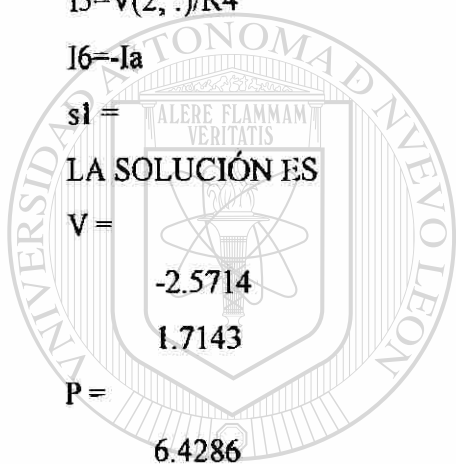
12.8571

$$I5 =$$

5.1429

$$I6 =$$

-2



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



$$I2 =$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En nuestro siguiente ejemplo codificaremos un circuito de corriente alterna con números complejos, siguiendo una forma similar al del ejemplo anterior. Sea el circuito de la Fig. 4.2. obtendremos las corrientes de los elementos y el voltaje de cada nodo, así como la potencia que nos entregan las fuentes [1].

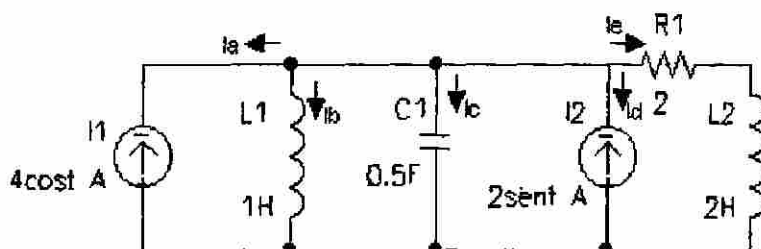


Fig. 4.2. Diagrama para el ejemplo 2 con MatLab

Antes de codificar el circuito, debemos de pasar los valores de los inductores y del capacitor a Ohms para que sea compatible con el valor de la resistencia, por lo tanto, las reactancias de L1 y L2 están dadas por: $XL1 = j\omega L1 = j*1*2 = j2\Omega$ y $XL2 = j*1*2 = j2\Omega$, para el capacitor tenemos: $XC1 = 1/(j\omega C1) = 1/(j*1*0.5) = -j2\Omega$. Para las fuentes de corriente en forma polar tenemos: $I1 = 4\angle 0^\circ$ Amp. E $I2 = 2\angle -90^\circ$ Amp

Por LCK la ecuación nodal está dada por:

$$\begin{bmatrix} 0.25 & -j0.75 \end{bmatrix} [V1] = \begin{bmatrix} 4 & -j2 \end{bmatrix}$$

Y el programa en MatLab es:

```
j=sqrt(-1);
I1=4;
I2=-j*2;
XL1=j*1;
XC1=-j*2;
R1=2;
XL2=j*2;
Z1=R1+XL2
I=[4-j*2];
Y=[0.25-j*0.75];
```

D='LA SOLUCIÓN ES'

V=I/Y

S=V*I

Ia=-I1

Ib=V/XL1

Ic=V/XC1

Id=-I2

Ie=V/Z1

S1=V*Ib

S2=V*Ic

S3=V*Z1

Z1 =

$$2.0000 + 2.0000i$$

D =

LA SOLUCIÓN ES

V =

$$4.0000 + 4.0000i$$

S =

$$24.0000 + 8.0000i$$

Ia =

$$-4$$

Ib =

$$4.0000 - 4.0000i$$

Ic =

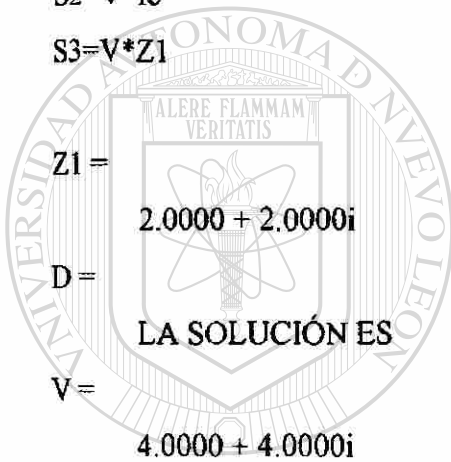
$$-2.0000 + 2.0000i$$

Id =

$$0 + 2.0000i$$

Ie =

$$2$$



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



$$S1 =$$

$$32$$

$$S2 =$$

$$-16$$

$$S3 =$$

$$0 + 16.0000i$$

Otras de las aplicaciones que tiene MatLab es que puede producir gráficas de salidas con el comando plot y la gráfica se define fácilmente en función del tiempo, contra corriente, voltaje, potencia, o de la expresión que uno quiera. Por ejemplo, en el circuito de la Fig. 4.3, dibujaremos las cantidades fasoriales de I_1 , I_2 e I_3 , [1].

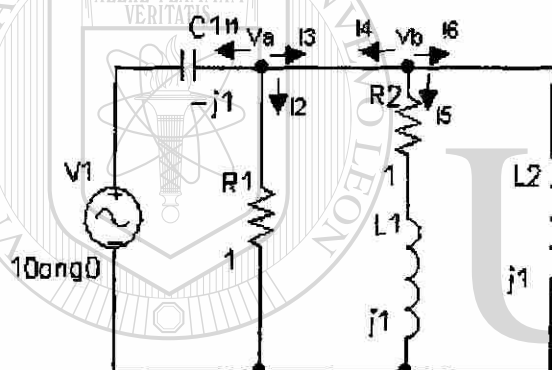


Fig. 4.3. Digrama para encontrar los fasores de las corrientes I_1 , I_2 , I_5 e I_6

La ecuación nodal esta dada por:

$$[1.707 - j*0.707][V_a] = [j*10]$$

El programa en MatLab es:

```
format short
```

```
j=sqrt(-1);
```

```
V1=10;
```

```
C1=-j*1;
```

```
R1=1;
```

```
R2=1;
```

```
L1=j*1;
```

```
L2=j*1;
```

$$Z=R2+L1$$

$$Y=[1.707-j*0.707];$$

$$I=[j*10];$$

$$D='LA SOLUCIÓN ES'$$

$$Va=l*Y$$

$$I1=(Va-V1)/C1$$

$$I2=Va/R1$$

$$I5=Va/Z$$

$$I6=Va/L2$$

$$I3=I5+I6$$

$$I4=-I3$$

$$S=V1*I1$$

$$S1=C1*I1^2$$

$$S2=R1*I2^2$$

$$S3=Z*I5^2$$

$$S4=L2*I6^2$$

$$Z =$$

$$1.0000 + 1.0000i$$

$$D =$$

LA SOLUCIÓN ES

$$Va =$$

$$7.0700 + 17.0700i$$

$$I1 =$$

$$-17.0700 - 2.9300i$$

$$I2 =$$

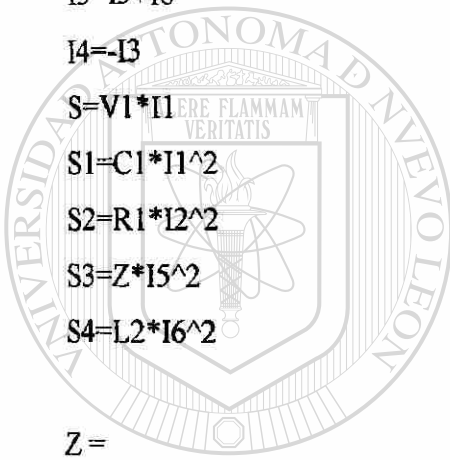
$$7.0700 + 17.0700i$$

$$I5 =$$

$$12.0700 + 5.0000i$$

$$I6 =$$

$$17.0700 - 7.0700i$$



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

I3 =

$$29.1400 - 2.0700i$$

I4 =

$$-29.1400 + 2.0700i$$

S =

$$-1.7070e+002 - 2.9300e+001i$$

S1 =

$$1.0003e+002 - 2.8280e+002i$$

S2 =

$$-2.4140e+002 + 2.4137e+002i$$

S3 =

$$-1.5100e-002 + 2.4138e+002i$$

S4 =

$$2.4137e+002 + 2.4140e-002i$$

de los resultados anteriores codificaremos los valores que nos interesan para graficar, siendo el programa MatLab el siguiente:

clg

wt=0:0.05:3*pi;

V1=10*cos(wt);

Va=18.48*cos(wt-67.5*pi/180);

I1=17.32*cos(wt-197.32*pi/180);

I2=18.48*cos(wt-67.5*pi/180);

I5=13.06*cos(wt-22.5*pi/180);

I6=18.48*cos(wt-337.5*pi/180);

P=V1.*I1;

P1=Va.*I5;

subplot(221),plot(wt,V1,wt,I1,wt,I6,wt,I5)

title('Voltaje y Corriente')

text(5,10,'V1'), text(4,17.5,'I1'), text(5,18.5,'I6')

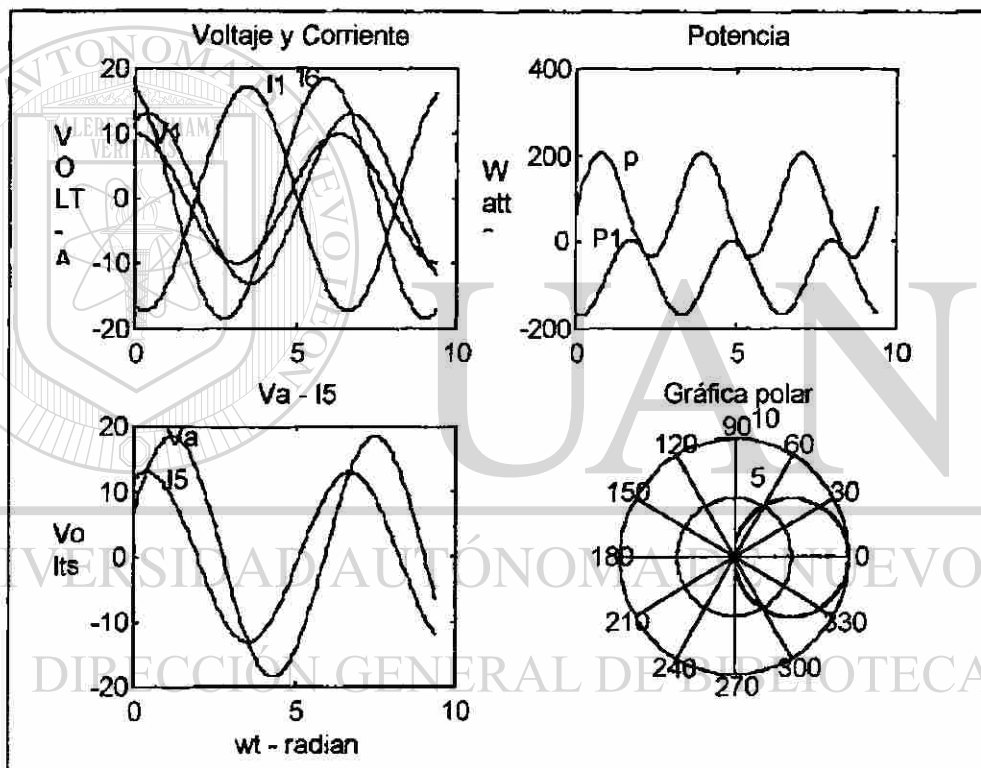
subplot(222),plot(wt,P,wt,P1)

title('Potencia')

```

ylabel('Watts')
text(1.5,200,'p'), text(0.5,4.5,'P1')
subplot(223),plot(wt,Va,wt,I5)
title('Va - I5')
xlabel('wt - radian');
text(1,18.5,'Va'), text(1,12,'I5')
subplot(224),polar(wt,V1)
title('Gráfica polar')

```



4.2. - FORMACIÓN DEL ALGORITMO DE YBUS.

Para formular este algoritmo se utilizará el método de Newton-Raphson en forma polar para el análisis de flujo de carga en base al desarrollo de la serie de Taylor de las ecuaciones de desajuste de la potencia real y reactiva para cada nodo.

La ecuación de corriente nodal esta dada por [4], [5]:

$$I_k = \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \quad \text{Ec. 4.1}$$

Siendo Y_{ki} la admitancia elemental de Ybus.

La potencia compleja en el nodo k esta dada por [4], [5]:

$$S_k = (P_k + jQ_k) = V_k \sum_{i=1}^n Y_{ki} V_i \quad \text{Ec. 4.2}$$

Siendo P_k y Q_k las potencias activa y reactiva inyectada en el nodo. K y n , representan el número total de nodos que tiene la red. Si se usan coordenadas polares las ecuaciones anteriores se modifican al expresar los voltajes de nodo en términos de sus magnitudes E_k y ángulos de fase δ_k así como las admitancias Y_{ki} en términos de su magnitud y ángulo Θ_{ki} , de manera que las potencias real e imaginaria se pueden escribir como:

$$P_k = \sum_{i=1}^n E_k E_i Y_{ki} \cos(\delta_k - \delta_i - \Theta_{ki}) \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$Q_k = \sum_{i=1}^n E_k E_i Y_{ki} \sin(\delta_k - \delta_i - \Theta_{ki}) \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde:

$$Y_{ki} = |Y_{ki}| \quad \& \quad \Theta_{ki} = \text{Atan}(K_{ki}/G_{ki})$$

Como se recordará, el problema de flujos de carga consiste básicamente en resolver para los voltajes y sus ángulos las ecuaciones de potencia activa y reactiva de P_k y Q_k aplicándose el método iterativo de Newton debido a su característica de no

linealidad. Para formar el Jacobiano de solución para este método, se debe llegar a una matriz de la forma:

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Siendo H, N, J y L submatrices que integran al jacobiano, y el sistema de ecuaciones por resolver toma la forma general:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta S \\ \Delta E \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 4.6}$$

Donde los elementos del jacobiano se obtienen de las ecuaciones de potencia 4.3 y 4.4.

Derivando P_k se obtienen los elementos de fuera de la diagonal principal y los de la diagonal principal de la submatriz H del jacobiano. Los elementos de fuera de la diagonal de H son [4], [5]:

$$H_{ki} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_i} = E_k E_i Y_{ki} \sin(\delta_k - \delta_i - \Theta_{ki}) \quad \text{Ec. 4.7}$$

Los elementos de la diagonal principal de H son:

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = -\sum_{i=1, i \neq k}^n E_k E_i Y_{ki} \sin(\delta_k - \delta_i - \Theta_{ki}) \quad \text{Ec. 4.8}$$

Para encontrar los elementos de la submatriz N se procede en la misma forma.

Los elementos de fuera de la diagonal principal de N son [4], [5]:

$$N_{ki} = \frac{\partial P_k}{\partial E_i} = E_k Y_{ki} \cos(\delta_k - \delta_i - \Theta_{ki}) \quad \text{Ec. 4.9}$$

Y los elementos de la diagonal principal de N son:

$$N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial E_k} = 2E_k Y_{kk} \cos \Theta_{kk} + \sum_{i=1, i \neq k}^n E_i Y_{ki} \cos(\delta_k - \delta_i - \Theta_{ki}) \quad \text{Ec. 4.10}$$

Los elementos fuera de la diagonal principal de la submatriz J son:

$$J_{ki} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_i} = -E_k E_i Y_{ki} \cos(\delta_k - \delta_i - \Theta_{ki}) \quad \text{Ec. 4.11}$$

Los elementos de la diagonal principal de J son:

$$J_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n E_k E_i Y_{ki} \cos(\delta_k - \delta_i - \Theta_{ki}) \quad \text{Ec. 4.12}$$

Finalmente si se procede de la misma forma se obtienen los elementos de la submatriz L del jacobiano. Los elementos fuera de la diagonal principal son:

$$L_{ki} = \frac{\partial Q_k}{\partial E_i} = E_k Y_{ki} \sin(\delta_k - \delta_i - \Theta_{ki}) \quad \text{Ec. 4.13}$$

Y los elementos de la diagonal principal de L son:

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial E_k} = 2E_k Y_{kk} \sin(-\Theta_{kk}) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n E_i Y_{ki} \sin(\delta_k - \delta_i - \Theta_{ki}) \quad \text{Ec. 4.14}$$

Por ejemplo para un sistema de cuatro nodos como el mostrado en la Fig. 4.5, en donde el nodo 1 se toma como nodo compensador al sistema de ecuaciones por resolver se plantea como se indica a continuación:

Los nodos son:

Nodo 1 compensador.

Nodos 2 y 3 de carga.

Nodo 4 de voltaje controlado.

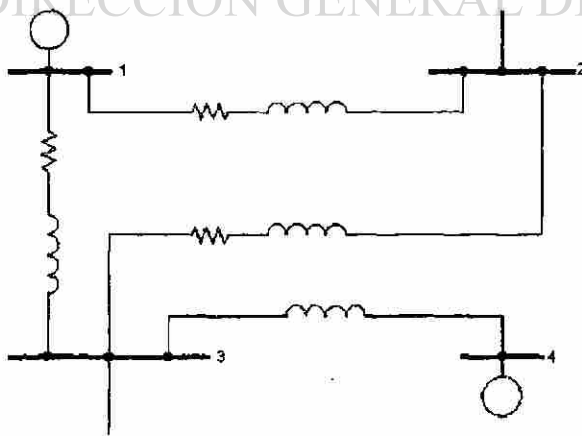


Fig. 4.5. Diagrama unifilar para formar la matriz del jacobiano.

El conjunto de ecuaciones en la forma matricial del jacobiano es:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_1}{\partial E_2} & \frac{\partial P_1}{\partial E_3} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_2}{\partial E_2} & \frac{\partial P_2}{\partial E_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_3}{\partial E_2} & \frac{\partial P_3}{\partial E_3} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_2}{\partial E_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial E_3} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial E_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial E_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta \delta_4 \\ \Delta E_2 \\ \Delta E_3 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 4.15}$$

El sistema de ecuaciones se debe de resolver para $\Delta\delta$ y ΔE en términos de ΔP y ΔQ , de donde:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta E \end{bmatrix} = \left[\text{JACOBI} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 4.16}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta \delta_4 \\ \Delta E_2 \\ \Delta E_3 \end{bmatrix} = \left[\text{JACOBIANO} \right]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 4.17}$$

El objetivo principal de este algoritmo es llevar a cero los desbalances nodales de manera interactiva, o sea lograr que los $\Delta P_i = 0$ y $\Delta Q_i = 0$, por lo cual al utilizar la serie de Taylor en ambas expresiones, incluyendo el valor constante y la primera derivada (términos de primer orden), se obtiene la forma linealizada (Ec. 4.15) que se resuelve por un procedimiento directo.

A continuación presentaremos una simulación de un SEP por el método anteriormente descrito, para el SEP que se da en la Fig. 4.6 con tres iteraciones para la solución del problema de flujo de carga, considerando el nodo 1 como compensador, los datos del problema se dan a continuación:

DATOS DE LÍNEAS

Línea	Entrnodos	R(p.u.)	X(p.u.)
1	1-2	0.08	j0.40
2	1-3	0.12	j0.50
3	2-3	0.10	j0.40
4	3-4	0.0	j0.30

DATOS DE LOS NODOS

Bus No.	Tipo	V	P	Q
1	Compensador	1.05	-	-
2	De carga	1.0	-0.55	-0.13
3	De carga	1.0	-0.30	-0.18
4	De generación	1.10	0.5	-

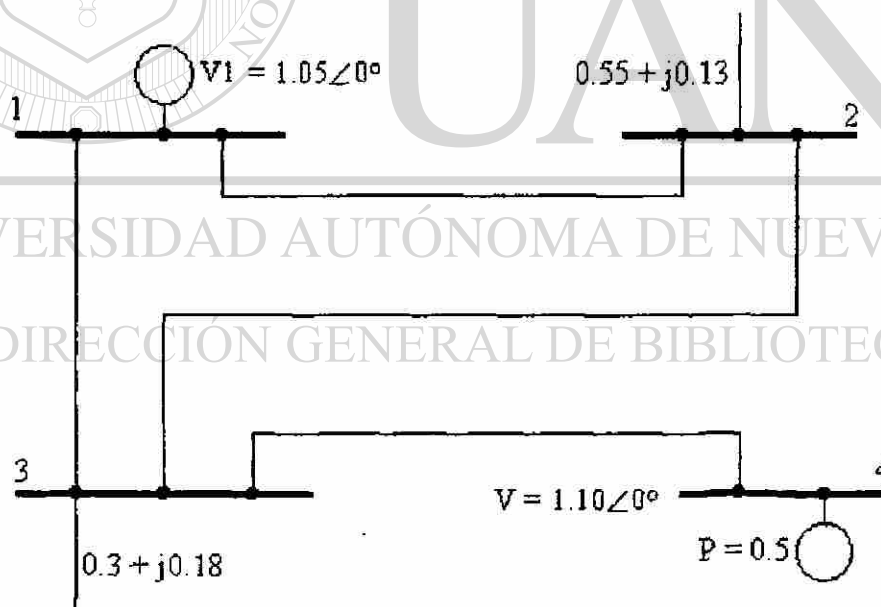


Fig. 4.6. Diagrama esquemático del problema para el estudio del flujo de carga.

Solución:

Se inicia el problema con la formación de la matriz de admitancia nodal, los elementos de esta matriz se obtienen a partir de los datos de las líneas para lo cual es necesario calcular las admitancias.

Calculando las impedancias en forma polar tenemos:

$$\text{Entre 1-2} \quad 0.08 + j0.40 = 0.4079 \angle 78.69^\circ$$

$$\text{Entre 1-3} \quad 0.12 + j0.50 = 0.5142 \angle 76.5^\circ$$

$$\text{Entre 2-3} \quad 0.10 + j0.40 = 0.4123 \angle 75.96^\circ$$

$$\text{Entre 3-4} \quad 0.0 + j0.30 = 0.30 \angle 90^\circ$$

Las admitancias por inversión de las impedancias son:

Entre nodos	Admitancia polar (r)	Conductancia (C)	Susceptancia (B)
1-2	$2.45 \angle -78.69^\circ$	0.4804	-j2.4024
1-3	$1.95 \angle -76.5^\circ$	0.4552	-j1.8961
2-3	$2.4254 \angle -75.96^\circ$	0.5884	-j2.3529
3-4	$3.33 \angle -90^\circ$	0.0	-j3.33

Los elementos de la matriz de admitancias nodal Y_{bus} son los siguientes:

$$Y_{11} = Y_{12} + Y_{13} = 0.4804 - j2.4024 + 0.4552 - j1.8961 = 0.9356 - j4.2985 = 4.3991 \angle -77.7^\circ$$

$$Y_{22} = Y_{12} + Y_{23} = 0.4804 - j2.4024 + 0.5884 - j2.3529 = 1.0688 - j4.7553 = 4.8739 \angle -77.32^\circ$$

$$Y_{33} = Y_{13} + Y_{23} + Y_{34} = 0.4552 - j1.8961 + 0.0 - j2.3529 = 0.4552 - j4.249 = 4.2703 \angle -83.88^\circ$$

$$Y_{44} = Y_{34} = 0.0 - j3.33 = 3.33 \angle -90^\circ$$

$$Y_{12} = Y_{21} = 0.4804 - j2.4024 = 2.45 \angle -78.69^\circ$$

$$Y_{13} = Y_{31} = 0.4552 - j1.8961 = 1.95 \angle -76.5^\circ$$

$$Y_{14} = Y_{41} = 0$$

$$Y_{23} = Y_{32} = 0.5884 - j2.3529 = 2.4254 \angle -75.96^\circ$$

$$Y_{24} = Y_{42} = 0$$

$$Y_{34} = Y_{43} = 0.0 - j3.33 = 3.33 \angle -90^\circ$$

De donde la matriz de admitancia nodal esta dada por:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 4.399\angle-77.7^\circ & 2.45\angle-78.69^\circ & 1.95\angle-76.5^\circ & 0 \\ 2.45\angle-78.69^\circ & 4.8739\angle-77.32^\circ & 2.4254\angle-75.96^\circ & 0 \\ 1.95\angle-76.5^\circ & 2.4254\angle-75.96^\circ & 4.2703\angle-83.88^\circ & 3.33\angle-90^\circ \\ 0 & 0 & \square & 3.33\angle-90^\circ \end{bmatrix}$$

Estos fueron unos cálculos analíticos de cómo calcular la matriz de admitancia nodal para la red de la Fig. 4.6. A continuación se presentará el algoritmo para calcular el estudio de flujo de carga por medio de MatLab.

% ALGORITMO PARA LA FORMACION DE YBUS

j=sqrt(-1)

format short

% DATOS PARA LA FORMACION DE LAS YBUS Y LA YBUS DE CD

MA = 4; % NUMERO DE NODOS DE SECUENCIA (+);

NLBUS = 4; % NUMERO DE LINEAS;

JI=[1; 1; 2; 3];

JB=[2; 3; 3; 4];

ZBUS1 = [0.0800; 0.1200; 0.1000; 0.0000];

ZBUS2 = j*[0.4000; 0.5000; 0.4000; 0.3000];

ZBUS=ZBUS1+ZBUS2;

% SECCION FORMADORA DE LA MATRIZ DE ADMITANCIAS

B(MA, MA) = 0.;

BP(MA, MA) = 0.;

for i=1:NLBUS

ZP1(i)=0 + j*imag (ZBUS(i));

end

% FORMACION DE LA MATRIZ DE ADMITANCIA

for i =1:NLBUS

BL = 1.0 / ZBUS(i);

BPL = 1.0 / ZP1(i);

```

L = JI (i);
M = JB(i);
B(L, L) = B(L,L) + BL;
BP(L, L) = BP(L, L) + BPL;
B(M, M) = B(M, M) + BL;
BP(M, M) = BP(M, M) + BPL;
B(L, M) = B(L, M) - BL;
BP(L, M) = BP(L, M) - BPL;
B(M, L) = B(L, M);
BP(M, L) = BP(L, M);
end
% SE QUEDARA SOLAMENTE CON LA PARTE IMAGINARIA DE LA YBUS SIN
RESISTENCIA
for i =1: M A
for ij =1:M A
BP(i , i j) = imag (BP ( i , i j ) );
E n d
E n d
% 'MATRIZ YBUS CON RESISTENCIA'
B;
% 'MATRIZ YBUS SIN RESISTENCIA'
BP;
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
% DATOS BASE PARA CALCULAR LOS INCREMENTOS
del = [ 0, 0, 0, 0];
V = [ 1.05, 1.0, 1.0, 1.10];
p1 = [ 0.0; -0.55; -0.30; 0.5];
q1 = [ 0.0; -0.13; -0.18; 0.0];
pq = [ 0.001; 0.001; 0.001; 0.001; 0.001; 0.001];
itera = 0;
while min(abs(pq)) < 0.01
itera=itera+1

```

% CALCULO DEL JACOBIANO

% PARA CONSTRUIR MATRIZ JACOBIANA

% PARA LA SUBMATRIZ H

% PARA EL NODO 2

$H(2,1) = V(2) * V(1) * \text{abs}(B(2,1)) * \sin(\text{del}(2) - \text{del}(1) - \text{angle}(B(2,1)));$

$H(2,3) = V(2) * V(3) * \text{abs}(B(2,3)) * \sin(\text{del}(2) - \text{del}(3) - \text{angle}(B(2,3)));$

$H(2,4) = V(2) * V(4) * \text{abs}(B(2,4)) * \sin(\text{del}(2) - \text{del}(4) - \text{angle}(B(2,4)));$ % este da=0

% PARA LA DIAGONAL PRINCIPAL

$H(2,2) = -V(2) * (V(1) * \text{abs}(B(2,1)) * \sin(\text{del}(2) - \text{del}(1) - \text{angle}(B(2,1)))) + V(3) * \text{abs}(B(2,3)) * \sin(\text{del}(2) - \text{del}(3) - \text{angle}(B(2,3)));$

$H(3,3) = -V(3) * (V(1) * \text{abs}(B(3,1)) * \sin(\text{del}(3) - \text{del}(1) - \text{angle}(B(3,1)))) + V(2) * \text{abs}(B(3,2)) * \sin(\text{del}(3) - \text{del}(2) - \text{angle}(B(3,2))) + V(4) * \text{abs}(B(3,4)) * \sin(\text{del}(3) - \text{del}(4) - \text{angle}(B(3,4)));$

$H(4,4) = -V(4) * V(3) * \text{abs}(B(4,3)) * \sin(\text{del}(4) - \text{del}(3) - \text{angle}(B(4,3)));$

% PARA EL NODO 3

$H(3,1) = V(3) * V(1) * \text{abs}(B(3,1)) * \sin(\text{del}(3) - \text{del}(1) - \text{angle}(B(3,1)));$

$H(3,2) = V(3) * V(2) * \text{abs}(B(3,2)) * \sin(\text{del}(3) - \text{del}(2) - \text{angle}(B(3,2)));$

$H(3,4) = V(3) * V(4) * \text{abs}(B(3,4)) * \sin(\text{del}(3) - \text{del}(4) - \text{angle}(B(3,4)));$

% PARA EL NODO 4

$H(4,3) = V(4) * V(3) * \text{abs}(B(4,3)) * \sin(\text{del}(4) - \text{del}(3) - \text{angle}(B(4,3)));$

$H(4,2) = V(4) * V(2) * \text{abs}(B(4,2)) * \sin(\text{del}(4) - \text{del}(2) - \text{angle}(B(4,2)));$ % este da=0

% PARA LA SUMATRIZ N

% PARA EL NODO 2

$N(2,1) = V(2) * \text{abs}(B(2,1)) * \cos(\text{del}(2) - \text{del}(1) - \text{angle}(B(2,1)));$

$N(2,3) = V(2) * \text{abs}(B(2,3)) * \cos(\text{del}(2) - \text{del}(3) - \text{angle}(B(2,3)));$

$N(2,4) = V(2) * \text{abs}(B(2,4)) * \cos(\text{del}(2) - \text{del}(4) - \text{angle}(B(2,4)));$

% PARA LA DIAGONAL PRINCIPAL

$N(2,2) = 2 * V(2) * \text{abs}(B(2,2)) * \cos(\text{angle}(B(2,2))) + V(1) * \text{abs}(B(2,1)) * \cos(\text{del}(2) - \text{del}(1) - \text{angle}(B(2,1))) + V(3) * \text{abs}(B(2,3)) * \cos(\text{del}(2) - \text{del}(3) - \text{angle}(B(2,3)));$

$N(3,3)=2*V(3)*abs(B(3,3))*cos(angle(B(3,3)))+V(1)*abs(B(3,1))*cos(del(3)-del(1)-angle(B(3,1)))+V(2)*abs(B(3,2))*cos(angle(B(3,2)))+V(4)*abs(B(3,4))*cos(del(3)-del(4)-angle(B(3,4)))$;

$N(4,4)=2*V(4)*abs(B(4,4))*cos(angle(B(4,4)))+V(3)*abs(B(4,3))*cos(del(4)-del(3)-angle(B(4,3)))$;

% PARA NODO 3

$N(3,1)=V(3)*abs(B(3,1))*cos(del(3)-del(1)-angle(B(3,1)))$;

$N(3,2)=V(3)*abs(B(3,2))*cos(del(3)-del(2)-angle(B(3,2)))$;

$N(3,4)=V(3)*abs(B(3,4))*cos(del(3)-del(4)-angle(B(3,4)))$;

% PARA EL NODO 4

$N(4,3)=V(4)*abs(B(4,3))*cos(del(4)-del(3)-angle(B(4,3)))$;

$N(4,2)=V(4)*abs(B(4,2))*cos(del(4)-del(2)-angle(B(4,2)))$; % esta da=0

% PARA LA SUBMATRIZ J

% PARA EL NODO 2

$J(2,1)=-V(2)*V(1)*abs(B(2,1))*cos(del(2)-del(1)-angle(B(2,1)))$;

$J(2,3)=-V(2)*V(3)*abs(B(2,3))*cos(del(2)-del(3)-angle(B(2,3)))$;

$J(2,4)=-V(2)*V(4)*abs(B(2,4))*cos(del(2)-del(4)-angle(B(2,4)))$; % esta da=0

% PARA LA DIAGONAL PRINCIPAL

$J(2,2)=V(2)*(V(1)*abs(B(2,1))*cos(del(2)-del(1)-angle(B(2,1)))+V(3)*abs(B(2,3))*cos(del(2)-del(3)-angle(B(2,3)))$;

$J(3,3)=V(3)*(V(1)*abs(B(3,1))*cos(del(3)-del(1)-angle(B(3,1)))+V(2)*abs(B(3,2))*cos(del(3)-del(2)-angle(B(3,2)))+V(4)*abs(B(3,4))*cos(del(3)-del(4)-angle(B(3,4)))$;

$J(4,4)=V(4)*(V(1)*abs(B(4,1))*cos(del(4)-del(1)-angle(B(4,1)))+V(2)*abs(B(4,2))*cos(del(4)-del(2)-angle(B(4,2)))+V(3)*abs(B(4,3))*cos(del(4)-del(3)-angle(B(4,3)))$;

% PARA EL NODO 3

$J(3,1)=-V(3)*V(1)*abs(B(3,1))*cos(del(3)-del(1)-angle(B(3,1)))$;

$J(3,2)=-V(3)*V(2)*abs(B(3,2))*cos(del(3)-del(2)-angle(B(3,2)))$;

$J(3,4)=-V(3)*V(4)*abs(B(3,4))*cos(del(3)-del(4)-angle(B(3,4)))$;

% PARA EL NODO 4

$J(4,2)=-V(4)*V(2)*\text{abs}(B(4,2))*\cos(\text{del}(4)-\text{del}(2)-\text{angle}(B(4,2)));$

$J(4,3)=-V(4)*V(3)*\text{abs}(B(4,3))*\cos(\text{del}(4)-\text{del}(3)-\text{angle}(B(4,3)));$

% PARA LA SUBMATRIZ L

% PARA EL NODO 2

$L(2,3)=V(2)*\text{abs}(B(2,3))*\sin(\text{del}(2)-\text{del}(3)-\text{angle}(B(2,3)));$

$L(2,4)=V(2)*\text{abs}(B(2,4))*\sin(\text{del}(2)-\text{del}(4)-\text{angle}(B(2,4)));$

% PARA EL NODO 3

$L(3,2)=V(3)*\text{abs}(B(3,2))*\sin(\text{del}(3)-\text{del}(2)-\text{angle}(B(3,2)));$

$L(3,4)=V(3)*\text{abs}(B(3,4))*\sin(\text{del}(3)-\text{del}(4)-\text{angle}(B(3,4)));$

% PARA EL NODO 4

$L(4,2)=V(4)*\text{abs}(B(4,2))*\sin(\text{del}(4)-\text{del}(2)-\text{angle}(B(4,2)));$

$L(4,3)=V(4)*\text{abs}(B(4,3))*\sin(\text{del}(4)-\text{del}(3)-\text{angle}(B(4,3)));$

% PARA LA DIAGONAL PRINCIPAL

$L(2,2)=2*V(2)*\text{abs}(B(2,2))*\sin(-\text{angle}(B(2,2)))+V(1)*\text{abs}(B(2,1))*\sin(\text{del}(2)-\text{del}(1)-\text{angle}(B(2,1)))+V(3)*\text{abs}(B(2,3))*\sin(\text{del}(2)-\text{del}(3)-\text{angle}(B(2,3)));$

$L(3,3)=2*V(3)*\text{abs}(B(3,3))*\sin(-\text{angle}(B(3,3)))+V(1)*\text{abs}(B(1,3))*\sin(\text{del}(1)-\text{del}(3)-\text{angle}(B(1,3)))+V(2)*\text{abs}(B(2,3))*\sin(-\text{angle}(B(2,3)))+V(4)*\text{abs}(B(3,4))*\sin(\text{del}(3)-\text{del}(4)-\text{angle}(B(3,4)));$

$L(4,4)=2*V(4)*\text{abs}(B(4,4))*\sin(-\text{angle}(B(4,4)))+V(3)*\text{abs}(B(4,3))*\sin(\text{del}(4)-\text{del}(3)-\text{angle}(B(4,3)));$

$\text{jac}=[H(2,2) H(2,3) H(2,4) N(2,2) N(2,3) N(2,4);$

$H(3,2) H(3,3) H(3,4) N(3,2) N(3,3) N(3,4);$

$H(4,2) H(4,3) H(4,4) N(4,2) N(4,3) N(4,4);$

$J(2,2) J(2,3) J(2,4) L(2,2) L(2,3) L(2,4);$

$J(3,2) J(3,3) J(3,4) L(3,2) L(3,3) L(3,4);$

$J(4,2) J(4,3) J(4,4) L(4,2) L(4,3) L(4,4)];$

$\text{jaci}=\text{inv}(\text{jac});$

% CALCULA LA POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA

$p(2)=V(2)*(V(1)*\text{abs}(B(2,1))*\cos(\text{del}(2)-\text{del}(1)-\text{angle}(B(2,1)))+V(2)*\text{abs}(B(2,2))*\cos(-\text{angle}(B(2,2)))+V(3)*\text{abs}(B(2,3))*\cos(-\text{del}(2)-\text{del}(3)-\text{angle}(B(2,3))));$

$$p(3)=V(3)*(V(1)*\text{abs}(B(3,1))*\cos(\text{del}(3)-\text{del}(1)-\text{angle}(B(3,1)))+V(2)*\text{abs}(B(3,2))*\cos(-\text{del}(3)-\text{del}(2)-\text{angle}(B(3,2))))+V(3)*\text{abs}(B(3,3))*\cos(-\text{angle}(B(3,3)))+V(4)*\text{abs}(B(3,4))*\cos(-\text{del}(3)-\text{del}(4)-\text{angle}(B(3,4))));$$

$$p(4)=V(4)*(V(3)*\text{abs}(B(4,3))*\cos(\text{del}(4)-\text{del}(3)-\text{angle}(B(4,3)))+V(4)*\text{abs}(B(4,4))*\cos(-\text{angle}(B(4,4))));$$

$$q(2)=V(2)*(V(1)*\text{abs}(B(2,1))*\sin(\text{del}(2)-\text{del}(1)-\text{angle}(B(2,1)))+V(2)*\text{abs}(B(2,2))*\sin(-\text{angle}(B(2,2)))+V(3)*\text{abs}(B(2,3))*\sin(-\text{del}(2)-\text{del}(3)-\text{angle}(B(2,3))));$$

$$q(3)=V(3)*(V(1)*\text{abs}(B(3,1))*\sin(\text{del}(3)-\text{del}(1)-\text{angle}(B(3,1)))+V(2)*\text{abs}(B(3,2))*\sin(-\text{del}(3)-\text{del}(2)-\text{angle}(B(3,2))))+V(3)*\text{abs}(B(3,3))*\sin(-\text{angle}(B(3,3)))+V(4)*\text{abs}(B(3,4))*\cos(-\text{del}(3)-\text{del}(4)-\text{angle}(B(3,4))));$$

$$q(4)=V(4)*(V(3)*\text{abs}(B(4,3))*\sin(\text{del}(4)-\text{del}(3)-\text{angle}(B(4,3)))+V(4)*\text{abs}(B(4,4))*\sin(-\text{angle}(B(4,4))));$$

% INCREMENTO DE POTENCIAS

for i=1:MA

 p(i)=p1(i)-p(i);

end

for i=1:MA

 q(i)=q1(i)-q(i);

end

p1=[p(2); p(3); p(4)];

q1=[q(2); q(3); q(4)];

pq=[p1; q1];

devo=jaci*pq;

del1=[0.0; devo(1); devo(2); devo(3)];

V1=[0.0; devo(4); devo(5); devo(6)];

% INCREMENTO DE ANGULOS Y VOLTAJE

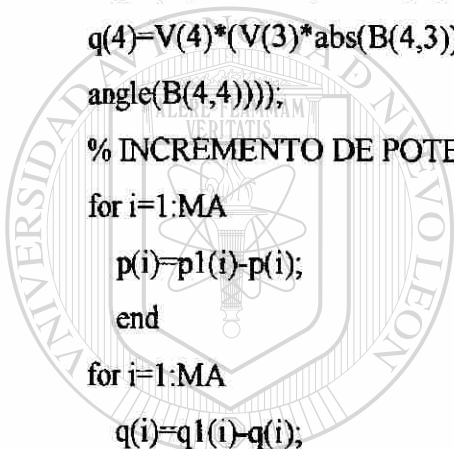
for i=1:MA

 del(i)=del(i)+del1(i);

end

for i=1:MA

 V(i)=V(i)+V1(i);



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



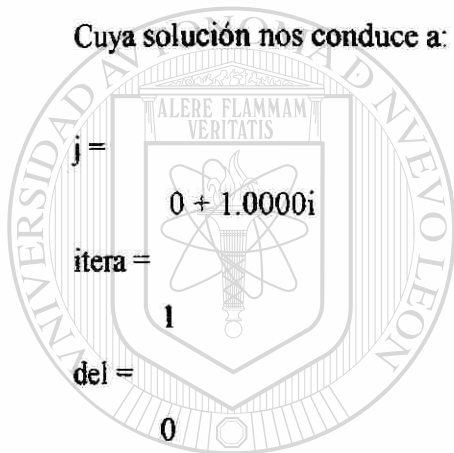
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

```

end
del=[del(1); del(2); del(3); del(4)]
V=[V(1); V(2); V(3); V(4)]
p1=[p(1); p(2); p(3); p(4)]
q1=[q(1); q(2); q(3); q(4)]
pause
end
keyboard
quit
end

```

Cuya solución nos conduce a:



UANL

-0.7821

0.1085

0.2448

V = DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

1.0500

0.1663

-0.2483

-0.1360

p1 =

0

-0.5260

-0.2773

0.5000

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

q1 =

0

-0.0098

-3.4188

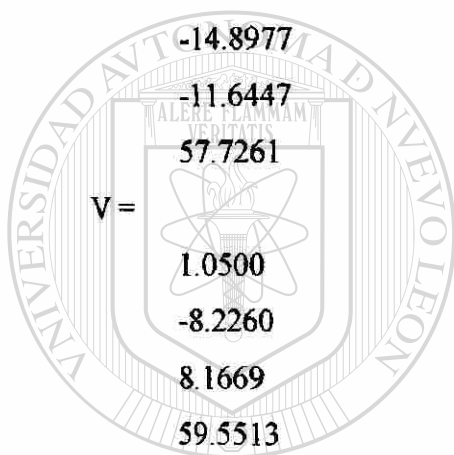
-0.3667

itera =

2

del =

0



UANL

p1 =

0

-0.1586

-0.1980

0.4847

q1 =

0

0.0062

-2.2880

-0.3168

itera =

3

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



del =

0
 -11.5967
 -11.7673
 57.1558

v =

1.0500
 -7.3966
 17.0844
 37.0060

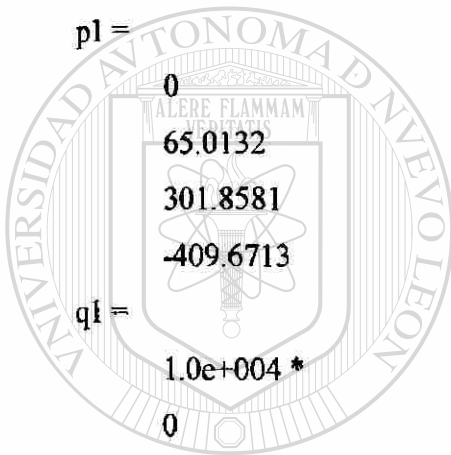
p1 =

0
 65.0132
 301.8581
 -409.6713

q1 =

1.0e+004 *
 0
 -0.0369

0.0056
 -1.0253



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



4.2. FORMACIÓN DE ALGORITMO PARA SISTEMAS LINEALES.

Otras de las utilizaciones de MatLab es la de graficar sistemas lineales en el tiempo, y por medio de las gráficas saber como se comportará el sistema, si es estable o no lo es. Ya que por contrario a los circuitos eléctricos y a sistemas de comunicación, las entradas de muchos sistemas de control prácticos no se conocen con anticipación, ya que pueden variar en forma aleatoria con respecto al tiempo.

Sea el polinomio característico dado por:

$$p(s) = c_0 + c_1 s + c_2 s^2 + \dots + c_n s^n \quad \text{Ec. 4.18}$$

Cuyos parámetros son:

$$\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$$

$$q_1 \in [q_{1\min}, q_{1\max}]$$

$$q_2 \in [q_{2\min}, q_{2\max}] \implies Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_n \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 4.19}$$

$$q_n \in [q_{n\min}, q_{n\max}]$$

Donde q está contenido en Q ; y Q es la caja que contiene al conjunto de vectores. Estos vectores forman una incertidumbre y están contenido dentro de la caja. Ahora tenemos una familia polinomial, por lo tanto, $P(S) = \{p(s,q) \mid q \in Q\}$. Gráficamente se puede representar como en la Fig. 4.7 en donde q es un elemento de la caja.

Fig. 4.7. Representación de una familia polinomial.

Mikhailov nos dice que si un polinomio de la forma de la Ec. 4.19 es estable si y solo si el argumento se incrementa en $\Pi/2$. Y en el plano complejo el polinomio es estable si su gráfica rodea al origen en "n" cuadrantes.

El teorema de Hermite-Biehler, propone que un polinomio de la forma (4.19) se puede descomponer en su parte real e imaginaria de la forma: $P(S) = P_R(s) + P_I(s)$, de donde, manejado en la forma $(j\omega)$, tenemos:

$$P_R(j\omega) = C_0 - C_2\omega^2 + C_4\omega^4 - \dots$$

$$P_I(j\omega) = C_1 - C_3\omega^3 + C_5\omega^5 - \dots$$

Ec. 4.20

Donde las raíces son: $P_R(j\omega) = \{\omega_{R1}, \omega_{R2}, \omega_{R3}, \dots\}$ & $P_I(j\omega) = \{0, \omega_{I1}, \omega_{I2}, \omega_{I3}, \dots\}$, este teorema no dice que el polinomio es estable si y solo si $0 < \omega_{R1} < \omega_{I1} < \omega_{R2} < \omega_{I2} < \dots$, si cumple entrelazamientos es estable. La condición que debe de satisfacer es que todos los coeficientes sean del mismo signo, esta es una condición necesaria pero no suficiente.

Los polinomios se clasifican de acuerdo a su incertidumbre y pueden ser: polinomio Intervalo, Afin, multilineal y polinómico. En el polinomio de Intervalo, el parámetro que entra en un coeficiente no entra en los otros; en el Afin, puede haber relación de coeficientes; en el Multilineal, también los parámetros entran en cualquier coeficiente pero no se admiten potencias; y, finalmente, en el Polinómico pueden haber potencias y productos.

A continuación analizaremos con MatLab algunos de estos casos en la cual uno será para un sistema inestable.

EJERCICIO [14]: (UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA CON UNA CARGA RESONANTE): La meta en este ejercicio es aplicar la teoría del conjunto de valores polinomiales usando el modelo de un motor de corriente directa. Considera la incertidumbre de los parámetros siguientes $0.5 \cdot 10^{-2} \leq J \leq 1.5 \cdot 10^{-2}$ y $2 \cdot 10^{-3} \leq B \leq 4 \cdot 10^{-1}$. El resto de los parámetros son fijos en $L = 5 \cdot 10^{-3}$, $R = 1$, $J_m = 2 \cdot 10^{-3}$, $B_m = 2 \cdot 10^{-3}$, $K = 0.5$ y $K_s = 2 \cdot 10^3$. En otros estudios la localización de los polos como una función de los parámetros de incertidumbre, se toma $q_1 = J$ y $q_2 = B$ y se concentra la función de transferencia del voltaje de armadura a la velocidad del contacto de eje. Esta función de transferencia es obtenida por

$$P(s) = \frac{kJ s^2 + KBs + KKs}{\Delta(s)}$$

Donde

$$\Delta(s) = J_m J L s^4 + (B_m J L + B J_m L + J_m J R) s^3 + (B_m B L + J_m K_s L + k_s J L)$$

$$\begin{aligned}
 &+BmJIR + BIJmR + K^2Jl)s^2 \\
 &+(BmKsL + BKsL + BmBLR \\
 &+ JmKsR + KsJlR + K^2BL)s \\
 &+ (BmKsR + BlksR + K^2Ks).
 \end{aligned}$$

(a) verificar que la incertidumbre del denominador del polinomio es obtenida por:

$$\begin{aligned}
 p(s,q) = &10^{-5}q_1s^4 + (2 * 10^{-3}q_1 + 10^{-5}q_2)s^3 \\
 &+ (10.252q_1 + 2 * 10^{-3}q_2 + 2 * 10^{-2})s^2 \\
 &+ (4.02 + 2 * 10^3q_1 + 10.252q_2)s \\
 &+ 5.04 * 10^2 + 2 * 10^3q_2.
 \end{aligned}$$

(b) Limitando el conjunto de incertidumbre:

$$Q = \{q \in R^2 : 0.005 \leq q_1 \leq 0.015; 0.002 \leq q_2 \leq 0.4\}$$

Obteniendo de los datos de arriba, tomar los polos deseados en la región D a ser un cono con el ángulo $\emptyset = 45^\circ$, generando un valor apropiado de conjuntos $p(z,Q)$ y usar la condición exclusiva cero para determinar si P es robustamente Estable. Determinar si la especificación de amortiguamiento es robustamente satisfecha.

SOLUCIÓN:

(a) Verificamos que:

$$\begin{aligned}
 \Delta(s,q) = &2*10^{-3}*q_1*5*10^{-3}s^4 + \left[\frac{2*10^{-3}*q_1*5*10^{-3}+q_2*2*10^{-3}*5*10^{-3}+}{2*10^{-3}*q_1*1} \right] s^3 \\
 &+ \left[\frac{2*10^{-3}*q_2*5*10^{-3}+2*10^{-3}*2*10^3*5*10^{-3}+2*10^3*q_1*5*10^{-3}+}{2*10^{-3}*q_1*1+q_2*2*10^{-3}*1+0.5^2*q_1} \right] s^2 \\
 &+ \left[\frac{2*10^{-3}*2*10^3*5*10^{-3}+q_2*2*10^3*5*10^{-3}+2*10^3*q_2*1+2*10^{-3}*}{2*10^{-3}*1+2*10^3*q_1*1+0.5^2*q_2} \right] s \\
 &+ \left[2*10^{-3}*2*10^3*1+q_2*2*10^3*1+0.5^2*2*10^3 \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \therefore \Delta(s,q) = &10^{-5}q_1s^4 + (2 * 10^{-3}q_1 + 10^{-5}q_2)s^3 \\
 &+ (10.252q_1 + 2 * 10^{-3}q_2 + 2 * 10^{-2})s^2 \\
 &+ (4.02 + 2 * 10^3q_1 + 10.252q_2)s \\
 &+ 5.04 * 10^2 + 2 * 10^3q_2.
 \end{aligned}$$

Y por lo tanto $P(s,q) \approx \Delta(s,q)$, $\Rightarrow Q = \{q \in \mathbb{R}^2 \mid 0.005 \leq q_1 \leq 0.015; 0.002 \leq q_2 \leq 0.4\}$

(b) para encontrar la estabilidad tenemos que al sustituir los valores de q_1 y q_2 :

$$P(s, q_{00}) = 508 + 14.0405s + 0.0713s^2 + 1.007s^3 + 5 \cdot 10^{-8}s^4$$

$$P(s, q_{01}) = 1304 + 18.12085s + 0.07206s^2 + 1.405 \cdot 10^{-5}s^3 + 5 \cdot 10^{-8}s^4$$

$$P(s, q_{10}) = 508 + 34.0405s + 0.1738s^2 + 3.017 \cdot 10^{-5}s^3 + 1.5 \cdot 10^{-7}s^4$$

$$P(s, q_{11}) = 1304 + 38.1208s + 0.1746s^2 + 3.415 \cdot 10^{-5}s^3 + 1.5 \cdot 10^{-7}s^4$$

Deduciendo que:

$$P(j\omega, q_{00}) = (508 - 0.0713\omega^2 + 5 \cdot 10^{-8}\omega^4) + j(14.0405\omega - 1.007 \cdot 10^{-5}\omega^3)$$

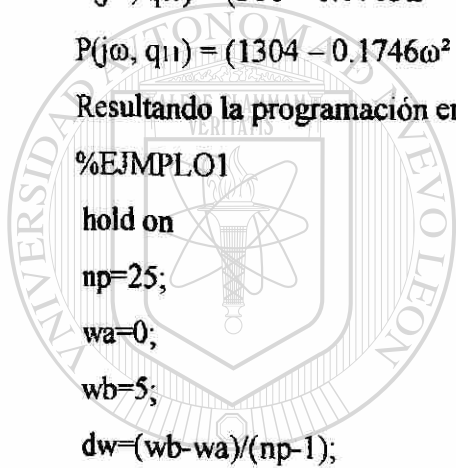
$$P(j\omega, q_{01}) = (1304 - 0.07206\omega^2 + 5 \cdot 10^{-8}\omega^4) + j(18.1208\omega - 1.007 \cdot 10^{-5}\omega^3)$$

$$P(j\omega, q_{10}) = (508 - 0.0713\omega^2 + 1.05 \cdot 10^{-7}\omega^4) + j(34.0405\omega - 3.017 \cdot 10^{-5}\omega^3)$$

$$P(j\omega, q_{11}) = (1304 - 0.1746\omega^2 + 1.5 \cdot 10^{-7}\omega^4) + j(38.1208\omega - 3.415 \cdot 10^{-5}\omega^3)$$

Resultando la programación en MatLab:

```
%EJMPLO1
hold on
np=25;
wa=0;
wb=5;
dw=(wb-wa)/(np-1);
Xmin=99e99;
Xmax=-99e99;
Ymin=99e99;
Ymax=-99e99;
for n=1:np
    w=wa+(n-1)*dw;
    x1=508-0.0713*w^2+5e-8*w^4;
    y1=14.0405*w-1.007e-5*w^3;
    x2=1304-0.0726*w^2+5e-8*w^4;
    y2=18.1208*w-1.405e-5*w^3;
    x3=508-0.1738*w^2+5e-7*w^4;
    y3=34.0405*w-3.017e-5*w^3;
    x4=1304-0.1746*w^2+1.5e-7*w^4;
```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

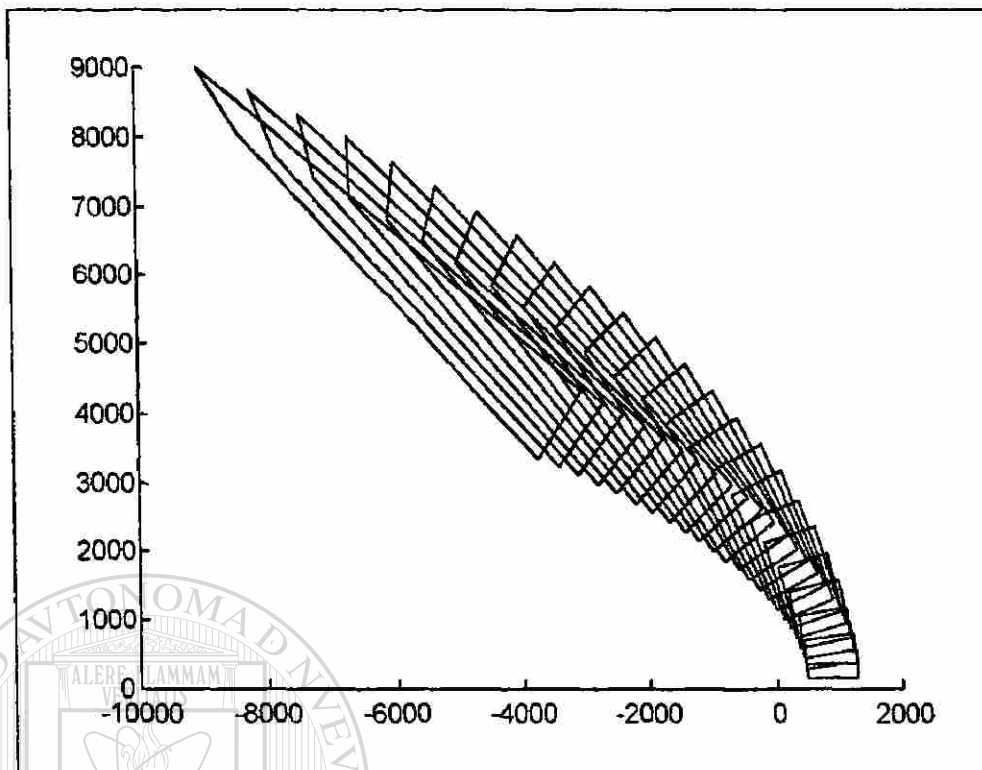


```

y4=38.1208*w-3.415e-5*w^3;
if x1>(x2|x3|x4);x=x1;end
if x2>(x3|x4|x1);x=x2;end
if x3>(x4|x1|x2);x=x3;end
if x4>(x1|x2|x3);x=x4;end
if x>Xmax;Xmax=x;end
if x1<(x2|x3|x4);x=x1;end
if x2<(x3|x4|x1);x=x2;end
if x3<(x4|x1|x2);x=x3;end
if x4<(x1|x2|x3);x=x4;end
if x<Xmin;Xmin=x;end
if y1>(y2|y3|y4);y=y1;end
if y2>(y3|y4|y1);y=y2;end
if y3>(y4|y1|y2);y=y3;end
if y4>(y1|y2|y3);y=y4;end
if y>Ymax;Ymax=y;end
if y1<(y2|y3|y4);y=y1;end
if y2<(y3|y4|y1);y=y2;end
if y3<(y4|y1|y2);y=y3;end
if y4<(y1|y2|y3);y=y4;end
if y<Ymin;Ymin=y;end
plot([x1 x2],[y1 y2],'R')
plot([x2 x4],[y2 y4],'R')
plot([x4 x3],[y4 y3],'R')
plot([x3 x1],[y3 y1],'R')
end
» plot([Xmin Xmax],[0 0],'B')
» plot([0 0],[Ymin Ymax],'B')

```

En la figura podemos observar que el motor se comportará en forma estable a cualquier frecuencia



PROBLEMA DE MULTILINEAL INESTABLE

$$P(S, q) = 50q_1 + 5q_2 S + (10q_1 + 5q_1q_2) S^2 + 20q_1q_2 S^3$$

$$P(jw; q) = 50q_1 - (10q_1 + 5q_1q_2) w^2 + J(5q_2 w - 20q_1q_2 w^3)$$

$$q_1 \in [0.1, 0.2] \text{ \& } q_2 \in [0.01, 0.02]$$

$$P(S; q) = (5 - 1.005 w^2) + J(0.05 w - 0.02 w^3)$$

$$P(S; q) = (5 - 1.01 w^2) + J(0.1 w - 0.04 w^3)$$

$$P(S; q) = (10 - 2.01 w^2) + J(0.1 w - 0.04 w^3)$$

$$P(S; q) = (10 - 2.02 w^2) + J(0.1 w - 0.08 w^3)$$

PROGRAMACION

```
%multilineal 2
```

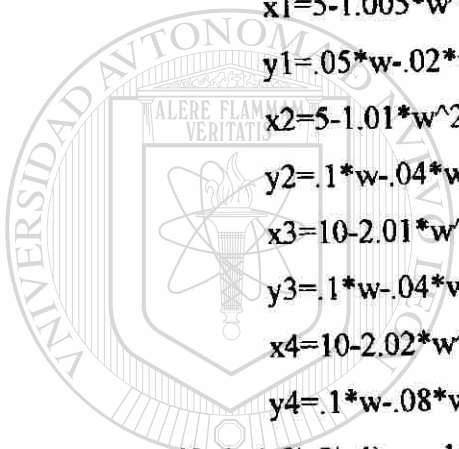
```
hold on
```

```
np=30;
```

```

wa=0;
wb=2.5;
dw=(wb-wa)/(np-1);
Xmin=99e99;
Xmax=-99e99;
Ymin=99e99;
Ymax=-99e99;
for n=1:np
    w=wa+(n-1)*dw;
    x1=5-1.005*w^2;
    y1=.05*w-.02*w^3;
    x2=5-1.01*w^2;
    y2=.1*w-.04*w^3;
    x3=10-2.01*w^2;
    y3=.1*w-.04*w^3;
    x4=10-2.02*w^2;
    y4=.1*w-.08*w^3;
    if x1>(x2|x3|x4);x=x1;end
    if x2>(x1|x3|x4);x=x2;end
    if x3>(x1|x2|x4);x=x3;end
    if x4>(x1|x2|x3);x=x4;end
    if x>Xmax;Xmax=x;end
    if x1<(x2|x3|x4);x=x1;end
    if x2<(x1|x3|x4);x=x2;end
    if x3<(x1|x2|x4);x=x3;end
    if x4<(x1|x2|x3);x=x4;end
    if x<Xmin;Xmin=x;end
    if y1>(y2|y3|y4);y=y1;end
    if y2>(y1|y3|y4);y=y2;end
    if y3>(y1|y2|y4);y=y3;end
    if y4>(y1|y2|y3);y=y4;end

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

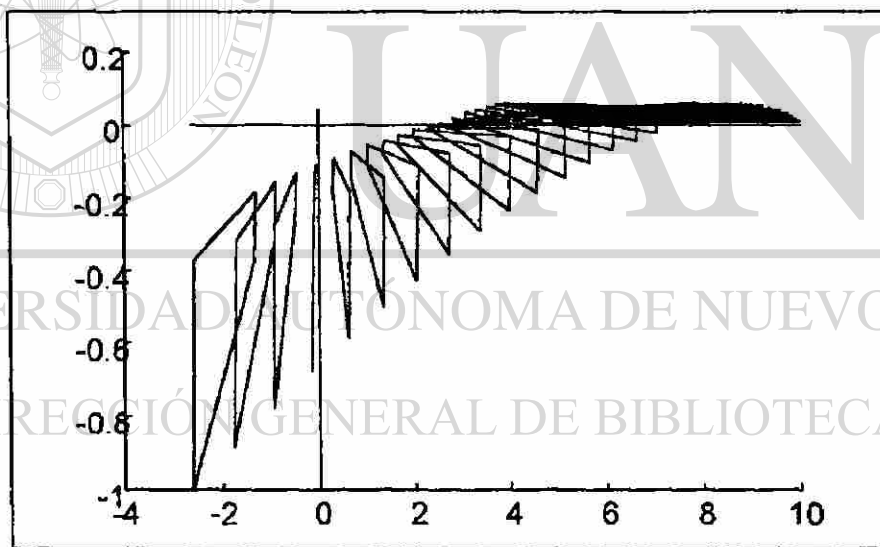
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



```

if y>Ymax; Ymax=y;end
if y1<(y2|y3|y4);y=y1;end
if y2<(y1|y3|y4);y=y2;end
if y3<(y1|y2|y4);y=y3;end
if y4<(y1|y2|y3);y=y4;end
if y<Ymin; Ymin=y;end
plot([x1 x2],[y1 y2],'R')
plot([x2 x4],[y2 y4],'R')
plot([x3 x1],[y3 y1],'R')
plot([x4 x3],[y4 y3],'R')
end
plot([Xmin Xmax],[0 0],'B')
plot([0 0],[Ymin Ymax],'B')

```



PROGRAMACIÓN PARA UN PROBLEMA CON POLIMIO AFIN ESTABLE.

```

%poli2
hold on
np=25;
wa=0;
wb=5;

```

```

dw=(wb-wa)/(np-1);
Xmin=99e99;
Xmax=-99e99;
Ymin=99e99;
Ymax=-99e99;
for n=1:np
    w=wa+(n-1)*dw;
    x1=4-1.05*w^2+24e-5*w^4;
    y1=3.5*w-16e-4*w^3;
    x2=6-6*w^2+48e-5*w^4;
    y2=4.4*w-8e-4*w^3;
    x3=6-6*w^2+48e-5*w^4;
    y3=3.5*w-16e-4*w^3;
    x4=4-1.05*w^2+24e-5*w^4;
    y4=4.4*w-8e-4*w^3;
    if x1>(x2|x3|x4),x=x1;end
    if x2>(x1|x3|x4),x=x2;end
    if x3>(x1|x2|x4),x=x3;end
    if x4>(x1|x2|x3),x=x4;end
    if x>Xmax,Xmax=x;end
    if x1<(x2|x3|x4),x=x1;end
    if x2<(x1|x3|x4),x=x2;end
    if x3<(x1|x2|x4),x=x3;end
    if x4<(x1|x2|x3),x=x4;end
    if x<Xmin,Xmin=x;end
    if y1>(y2|y3|y4),y=y1;end
    if y2>(y1|y3|y4),y=y2;end
    if y3>(y1|y2|y4),y=y3;end
    if y4>(y1|y2|y3),y=y4;end
    if y>Ymax,Ymax=y;end
    if y1<(y2|y3|y4),y=y1;end

```



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



```

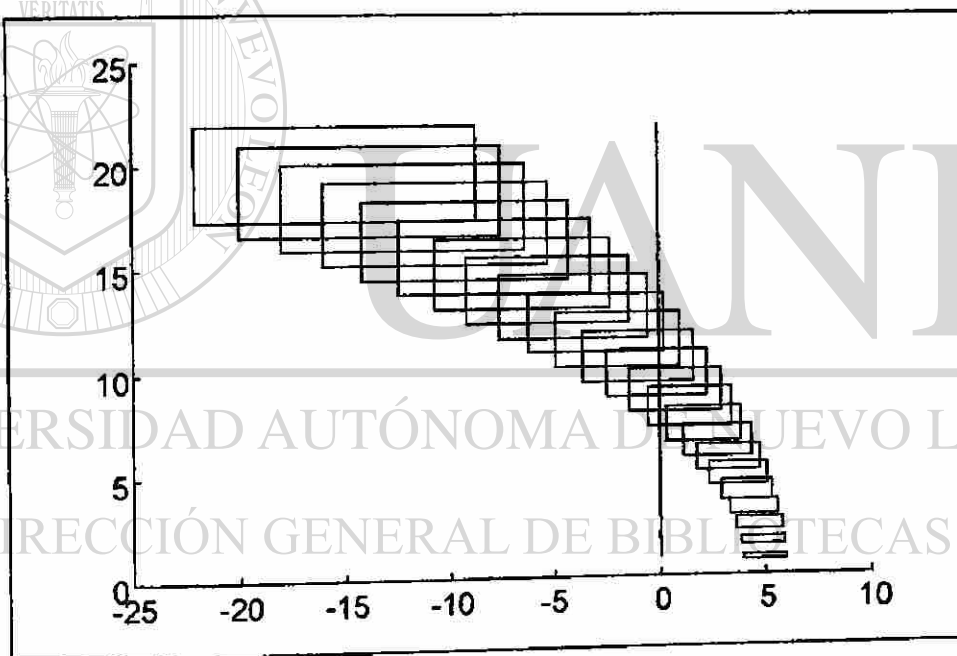
if y2<(y1|y3|y4);y=y2;end
if y3<(y1|y2|y4);y=y3;end
if y4<(y1|y2|y3);y=y4;end
if y<Ymin;Ymin=y;end
plot([x1 x4],[y1 y4],'R')
plot([x2 x3],[y2 y3],'R')
plot([x3 x1],[y3 y1],'R')
plot([x2 x4],[y2 y4],'R')

```

end

```
plot([Xmin Xmax],[0 0],'B')
```

```
plot([0 0],[Ymin Ymax],'B')
```



CAPÍTULO 5.

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA.

Este paquete se compone de nueve programas compatible para windos o DOS, propio para profesionales o estudiantes para resolver problemas relacionados con el texto [15], para el análisis de conducta de los SEP y para el estudio de diseño. Estos nueve programas cubren los siguientes tópicos: Componentes Simétricas; Constantes de Líneas; Líneas de Transmisión; Operación de Estado Estable; Cortos Circuitos Simétricos; Cortos Circuitos Asimétricos; Transitorios en Líneas de Transmisión; y Estabilidad Transitoria (todos en formato DOS); Operaciones Matriciales; y Flujo de Potencia (en Windows).

En esta Tesis se analizaran exclusivamente los chaps de fallas, flujo de potencia y estabilidad, realizando varias simulaciones para una mejor comprensión del paquete. Y se cargan en forma convencional en la PC. En todos ellos, los datos de entrada se incluyen las máquinas, líneas de transmisión y transformadores.

5.1. PROGRAMA DE CORTO CIRCUITO.

Para calcular la corriente de falla subtransitoria para un corto circuito trifásico en un SEP. Asumiremos lo siguiente [21]:

- Los transformadores están representados por sus reactancias de enlace. La resistencia del devanado, la admitancia shunt, y la inversión de fase Δ -Y se desprecian.
- Las líneas de transmisión están representadas por su reactancia serie equivalente de secuencia positiva. La resistencia serie y la admitancia shunt se desprecian.
- Las máquinas síncronas están representadas por una fuente de voltaje constante atrasada con respecto a la reactancia subtransitoria. La resistencia de la armadura, del núcleo saliente, y, la saturación se desprecian.
- Todas las impedancias de carga no rotatorias se desprecian.
- Los motores de inducción se desprecian (especialmente los motores pequeños con razón menor a 50 HP) o se representan en la misma forma como para las máquinas síncronas.

Esto se hace para simplificar al SEP, pero en la práctica puede no hacerse para todos los casos. Por ejemplo, en sistemas de distribución, las resistencias de las líneas de distribución primarias y secundarias pueden en algunos casos reducir significativamente las magnitudes de las corrientes de falla.

Iniciaremos nuestro cálculo con el programa Chap8 el cual ya trae un programa típico en su memoria para correrlo, efectuando dos simulaciones, la primera simulación con un voltaje de prefalla de 1.05 PU y la segunda con un valor de 1.25 PU, y posteriormente realizaremos algunos cambios en el arreglo del SEP, como abrir o adherir una línea de transmisión, adherir otra máquina síncrona y un transformador.

Consideremos el sistema de potencia [21] representado en la Fig. 5.1. Los datos de las máquinas, transformadores y líneas de transmisión se dan en la tabla 5.1, 5.2 y 5.3. Los neutros de ambos transformadores y del generador 1 están sólidamente aterrizados,

y el generador 2 por medio de una reactancia de 0.001 pu. El voltaje de prefalla es de 1.05 pu. Todos los valores estan en PU.

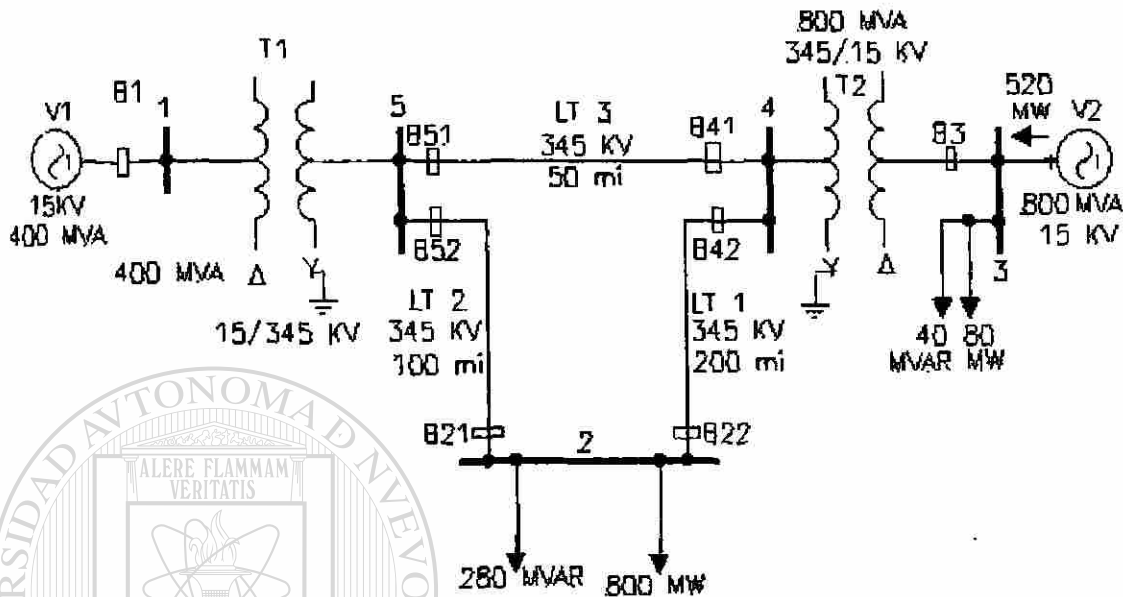


Fig. 5.1. Diagrama del sistema de potencia para el cálculo de falla.

TABLA 5.1

DATOS DE LAS MÁQUINAS SINCRONAS.

BUS	X_0	$X_1 = X_d''$	X_2	X_n
1	0.05	0.18	0.18	0
2	0.02	0.09	0.09	0.01

TABLA 5.2

DATOS DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN.

BUS A BUS	X_0	X_1
2-4	1.2	0.4
2-5	0.6	0.2
4-5	0.3	0.1

TABLA 5.3
DATOS DEL TRANSFORMADOR.

BAJO VOLTAJE CONEXIÓN AL BUS	ALTO VOLTAJE CONEXIÓN AL BUS	REACTANCIA DE ENLACE	REACTANCIA DEL NEUTRO
1(Δ)	5(Y)	0.08	0
3(Δ)	4(Y)	0.04	0

Sbase = 400 MVA; Vbase = 15 KV en el bus 1 y 3, y, 345 Kv en el bus 2, 4 y5.

Los resultados de la corrida del programa se anexan a continuación, seleccionando el caso 1 ↵, después le damos el nombre de fallas ↵ y efectuamos la corrida del programa en 2 ↵, y con ctrl + printscreen mandamos a imprimir los resultados, los cuales resultaron ser:

YOU CAN SAVE THE INPUT DATA FOR UP TO FIVE CASES

ENTER YOUR CASE NUMBER (1, 2, 3, 4 OR 5) 1

ENTER YOUR CASE NAME (ANY ALPHANUMERIC SEQUENCE) FALLAS

SELECTIONS :

1. UPDATE THE INPUT DATA
2. RUN THE PROGRAM
3. STOP

ENTER YOUR SELECTION (1, 2 OR 3) 3

THE NUMBER OF MACHINES IS NG = 2

SYNCHRONOUS MACHINE DATA

1	1	.18
2	3	.09

THE NUMBER OF LINES IS NL = 6

TRANSMISSION LINE DATA

1	2	4	.4
2	2	4	.4
3	2	5	.2
4	2	5	.2
5	4	5	.1
6	4	5	.1

THE NUMBER OF TRANSFORMERS IS NT = 2

TRANSFORMER DATA

1	1	5	.08
2	3	4	.04

THE LARGEST BUS NUMBER IS 5

NOW CALCULATING THE Z BUS MATRIX

Add generator on bus	1			
1	TYPE1	1		.18
add transformer on bus	5			
1	type2	1	5	.08
add generator on bus	3			
2	TYPE1	3		.09
add line on bus	2			
3	type2	2	2	.2
add line on buses	2		5	
4	TYPE4	4	2	.2
add line on bus	4			
4	type2	2	4	.1

add lines on buses	4	5	
5 TYPE4	5	2	.1
add transformer on buses	3	4	
5 TYPE4	3	5	.04
add line on buses	2	4	
5 TYPE4	4	5	.4
add line on buses	2	4	
5 TYPE4	4	5	.4

WHAT IS THE PREFault VOLTAGE (per unit)? 1
 DISPLAY THE FAULT CURRENT (Y OR N)? Y
 DISPLAY THE BUS VOLTAGES DURING THE FAULT (Y OR N)? Y
 DISPLAY THE BUS IMPEDANCE MATRICES (Y OR N)? Y
 DO YOU WANT THE OUTPUTS PRINTED IN EXPONENTIAL FORMAT (Y OR N)? Y
 DO YOU WANT TO CONTINUE (Y) OR RESET THE DATA (N)? Y
 USE THE ctrl PRINT SCREEN OPTION NOW IF YOU WANT TO PRINT RESULTS
 PRESS RETURN TO CONTINUE

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FAULT CURRENT FOR FALLAS

FAULT BUS	THREE-PHASE FAULT CURRENT	GEN	BUS TO BUS	CONTRIBUTIONS TO FAULT CURRENT
--------------	------------------------------	-----	------------	-----------------------------------

LINE
OR
TRSF

	Per unit		per unit
1	9.99E+00		
		G 1 GRND - 1	5.83E+00
		T 1 5 - 1	4.15E+00

2 6.66E+00

L 1	4 - 2	1.25E+00
L 2	4 - 2	1.25E+00
L 3	5 - 2	2.08E+00
L 4	5 - 2	2.08E+00

3 1.47E+01

G 2	GRND - 3	1.17E+01
T 2	4 - 3	3.06E+00

4 1.15E+01

L 1	2 - 4	2.48E-01
L 2	2 - 4	2.48E-01
L 5	5 - 4	1.49E+00
L 6	5 - 4	1.49E+00
T 2	3 - 4	8.08E+00

5 1.01E+01

L 3	2 - 5	4.34E-01
L 4	2 - 5	4.34E-01
L 5	4 - 5	2.60E+00
L 6	4 - 5	2.60E+00
T 1	1 - 5	4.04E+00

VF = 1.05 PER -UNT BUS VOLTAGES DURING FAULTS

FALLAS

FAULT

BUS	BUS1(6..)	BUS2(7..)	BUS3(8..)	BUS4(9..)	BUS5(10..)
1	0.00E+00	3.29E-01	6.76E-01	5.10E-01	3.32E-01
2	6.11E-01	0.00E+00	6.70E-01	5.01E-01	4.16E-01

3	4.99E-01	2.10E-01	0.00E+00	1.23E-01	2.54E-01
4	4.26E-01	9.91E-02	3.23E-01	0.00E+00	1.49E-01
5	3.23E-01	8.68E-02	5.03E-01	2.60E-01	0.00E+00

PER-UNIT ZBUS FOR FALLAS

ROW 1	1.051E-01	6.594E-02	3.743E-02	5.406E-02	7.188E-02
ROW 2	6.594E-02	1.576E-01	5.703E-02	8.238E-02	9.525E-02
ROW 3	3.743E-02	5.703E-02	7.129E-02	6.297E-02	5.406E-02
ROW 4	5.406E-02	8.238E-02	6.297E-02	9.096E-02	7.809E-02
ROW 5	7.188E-02	9.525E-02	5.406E-02	7.809E-02	1.038E-01

REMOVE THE ctrl PRINT SCREEN OPTION AND PRESS RETURN TO
CONTINUE

SELECTIONS :

1. UPDATE THE INPUT DATA
2. RUN THE PROGRAM
3. STOP

ENTER YOUR SELECTION (1, 2 OR 3) 1

FAULT CURRENT FOR FALLAS

FAULT	THREE-PHASE	CONTRIBUTIONS TO	
BUS	FAULT CURRENT	GEN	BUS TO BUS
		FAULT CURRENT	
		LINE	
		OR	
		TRSF	
	Per unit		per unit

1 1.19E+01

G 1 GRND - 1 6.49E+00

T 1 5 - 1 4.94E+00

2 7.93E+00

L 1 4 - 2 1.49E+00

L 2 4 - 2 1.49E+00

L 3 5 - 2 2.47E+00

L 4 5 - 2 2.47E+00

3 1.75E+01

G 2 GRND - 3 1.39E+01

T 2 4 - 3 3.65E+00

4 1.37E+01

L 1 2 - 4 2.95E-01

L 2 2 - 4 2.95E-01

L 5 5 - 4 1.77E+00

L 6 5 - 4 1.77E+00

T 2 3 - 4 9.62E+00

5 1.20E+01

L 3 2 - 5 5.17E-01

L 4 2 - 5 5.17E-01

L 5 4 - 5 3.10E+00

L 6 4 - 5 3.10E+00

T 1 1 - 5 4.81E+00

VF = 1.25 PER -UNIT BUS VOLTAGES DURING FAULTS

FALLAS

FAULT

BUS	BUS1(6..)	BUS2(7..)	BUS3(8..)	BUS4(9..)	BUS5(10..)
1	0.00E+00	4.66E-01	8.05E-01	6.07E-01	3.95E-01
2	7.27E-01	0.00E+00	7.98E-01	5.97E-01	4.95E-01
3	5.94E-01	2.50E-01	0.00E+00	1.46E-01	3.02E-01
4	5.07E-01	1.18E-01	3.85E-01	0.00E+00	1.77E-01
5	3.85E-01	1.03E-01	5.99E-01	3.10E-01	0.00E+00

PER-UNIT ZBUS FOR FALLAS

ROW 1	1.051E-01	6.594E-02	3.743E-02	5.406E-02	7.188E-02
ROW 2	6.594E-02	1.576E-01	5.703E-02	8.238E-02	9.525E-02
ROW 3	3.743E-02	5.703E-02	7.129E-02	6.297E-02	5.406E-02
ROW 4	5.406E-02	8.238E-02	6.297E-02	9.096E-02	7.809E-02
ROW 5	7.188E-02	9.525E-02	5.406E-02	7.809E-02	1.038E-01

REMOVE THE ctrl PRINT SCREEN OPTION AND PRESS RETURN TO
CONTINUE

SELECTIONS :

1. UPDATE THE INPUT DATA
2. RUN THE PROGRAM
3. STOP

ENTER YOUR SELECTION (1, 2 OR 3) 3

Observamos con estas corridas que el voltaje influye mucho en la corriente de falla, se puede decir que con el valor de voltaje de prefalla de 1.05 PU, el sistema es más robusto que con un voltaje de prefalla de 1.25 PU. A continuación eliminaremos una

línea de transmisión a las ya existentes y observaremos como se comporta nuestro SEP, pasaremos por alto varios comando del programa, ya que las instrucciones se van dando según se corra el programa.

CHOICES:

1. INITIALIZE FILE
2. ADD A NEW LINE OR CHANGE AN EXISTING LINE
3. REMOVE A LINE
4. DISPLAY ONE LINE
5. DISPLAY ALL LINES AFTER A GIVEN LINE
6. DONE WHIT TRANSMISSION LINE DATA

ENTER YOUR CHOICE (1, 2, 3, 4, 5 OR 6) : 2

WHAT IS THE LINE NUMBER (ENTER AN INTEGER) ? 6

WHAT BUS NUMBERS IS THIS LINE CONNECTED TO
(ENTER TWO INTEGERS SEPARATED BY A COMMA) ? 2,4

ENTER THE LINE POSITIVE-SEQUENCE REACTANCE (per unit) 0.3

CHOICES:

1. INITIALIZE FILE
2. ADD A NEW LINE OR CHANGE AN EXISTING LINE
3. REMOVE A LINE
4. DISPLAY ONE LINE
5. DISPLAY ALL LINES AFTER A GIVEN LINE
6. DONE WHIT TRANSMISSION LINE DATA

ENTER YOUR CHOICE (1, 2, 3, 4, 5 OR 6) : 6

THESE ARE YOUR INPUT DATA SELECTIONS:

1. UPDATE THE SYNCHRONOUS MACHINE INPUT DATA
2. UPDATE THE TANSMISSION LINE DATA
3. UPDATE THE TRANSFORMER INPUT DATA

4. DONE WITH INPUT DATA

ENTER YOUR SELECTION (1, 2, 3 OR 4) 4

1. UPDATE THE INPUT DATA
2. RUN THE PROGRAM
3. STOP

ENTER YOUR SELECTION (1, 2 OR 3) 2

THE NUMBER OF MACHINES IS NG = 2

SYNCHRONOUS MACHINE DATA

1	1	.18
2	3	.09

THE NUMBER OF LINES IS NL = 1

TRANSMISSION LINE DATA

6	2	4	.3
---	---	---	----

THE NUMBER OF TRANSFORMERS IS NT = 2

TRANSFORMER DATA

1	1	5	.08
2	3	4	.04

THE LARGEST BUS NUMBER IS 5

NOW CALCULATING THE Z BUS MATRIX

Add generator on bus	1			
1	TYPE1	1	.18	
add transformer on bus	5			
1	type2	1	5	.08

3 1.17E+01

G 2	GRND - 3	1.17E+01
T 2	4 - 3	0.00E+00

4 8.08E+01

L 6	2 - 4	0.00E+00
T 2	3 - 4	8.08E+00

5 4.04E+01

T 1	1 - 5	4.04E+00
-----	-------	----------

VF = 1.05 PER-UNIT BUS VOLTAGES DURING FAULTS

FALLAS

FAULT

BUS	BUS1(6..)	BUS2(7..)	BUS3(8..)	BUS4(9..)	BUS5(10..)
1	0.00E+00	1.05E+00	1.05E+00	1.05E+00	0.00E+00
2	1.05E+00	0.00E+00	8.30E-01	7.33E-01	1.05E+00
3	1.05E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.05E+00
4	1.05E+00	0.00E+00	3.23E-01	0.00E+00	1.05E+00
5	3.23E-01	1.05E+00	1.05E+00	1.05E+00	0.00E+00

PER-UNIT ZBUS FOR FALLAS

ROW 1	1.800E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.800E-01
ROW 2	0.000E+00	4.300E-01	9.000E-02	1.300E-01	0.000E+00
ROW 3	0.000E+00	9.000E-02	9.000E-02	9.000E-02	0.000E+00

ROW 4	0.000E+00	1.300E-01	9.000E-02	1.300E-01	0.000E+00
ROW 5	1.800E-01	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.600E-01

REMOVE THE ctrl PRINT SCREEN OPTION AND PRESS RETURN TO CONTINUE

SELECTIONS :

4. UPDATE THE INPUT DATA
5. RUN THE PROGRAM
6. STOP

ENTER YOUR SELECTION (1, 2 OR 3) 3

5.2. PROGRAMA DE FLUJO DE POTENCIA.

Al igual que el programa anterior el Chap 8, el programa de flujo de potencia Chap 7, se requiere de correr previamente para poder caceras el programa de estabilidad Chap 12. Los siguientes medios son utilizados para el sistema de control de flujo de potencia:

- Control del primomotor y excitador del generador.
- Interrupción del banco de capacitores en paralelo, reactores en paralelo y sistemas de var estáticos.
- Control del cambio de tap y regulación de transformadores.

Consideraremos la misma figura del caso anterior para correr este programa con los datos modificados, pero el análisis que se pide es el de calcular la magnitud y ángulo de fase de las máquinas, siendo los datos de salida los siguientes:

THE NUMBER OF LINE IS : 6

1	2	4	0.36	.4	0	.43	3
2	2	4	0.36	.4	0	.43	3
3	2	5	.018	.2	0	.22	3
4	2	5	.018	.2	0	.22	3
5	4	5	.009	.1	0	.11	3
6	4	5	.009	.1	0	.11	3

THE LARGEST BUS IS: 5

1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	2	.2	0	0
3	2	1.04	0	1.3	0	.2	.1	1	-.7
4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	3	1.02	0	0	0	0	0	0	0

THE NUMBER OF TRANSFORMERS IS 2

1	1	5	.006	.08	1.5	1.2
2	3	4	.003	.04	2.5	1.2

DO ANY OF THE TRANSFORMERS HAVE TAP-CHANGERS WITH FIXED TAP
SETTING (Y OR N)? N

THE TOLERANCE LEVEL IS .0001

DO YOU WANT TO CHANGE THE TOLERANCE LEVEL (Y OR N)? N

THE MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS IS 20

DO YOU WANT TO CHANGE THE NUMBER OF ITERATIONS (Y OR N)? N

SELECTION OF INITIAL BUS VOLTAGE MAGNITUDES AND ANGLES :

1. FLAT START
2. OUTPUT VALUES FROM THE PREVIOUS RUN

ENTER YOUR SELECTION (1 OR 2) 1

STARTING VALUES

1 0

1 0

1.04 0

1 0

1.02 0

AT(1) = 1

AT(1) = 1

****THE PROGRAM IS RUNNING****

BUS ADMITTANCES MATRIX, REAL PARTS

0.932	0.000	0.000	0.000	-0.932
0.000	1.339	0.000	-0.446	-0.893
0.000	0.000	1.865	-1.865	0.000
0.000	-0.446	-1.865	4.096	-1.786
-0.932	-0.893	0.000	-1.786	3.611

BUS ADMITTANCES MATRIX, IMAGINARY PARTS

-12.430	0.000	0.000	0.000	12.430
0.000	-14.229	0.000	4.960	9.920
0.000	0.000	-24.860	24.860	0.000
0.000	4.960	24.860	-49.119	19.839
12.430	9.920	0.000	19.839	-41.859

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

ITERATION # 1

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 1

MISMATCH = 3.84E+00

ITERATION # 2

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 2

MISMATCH = 1.30E+00

ITERATION # 3

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 3

MISMATCH = 1.29E-01

ITERATION # 4

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 4

MISMATCH = 2.39E-03

QG = -.3637394 AT 1 = .98

RESET ONE OR MORE TRANSFORMER TAPS.

BUS ADMITTANCES MATRIX, REAL PARTS

0.932	0.000	0.000	0.000	-0.951
0.000	1.339	0.000	-0.446	-0.893

0.000	0.000	1.865	-1.865	0.000
0.000	-0.446	-1.865	4.096	-1.786
-0.951	-0.893	0.000	-1.786	3.649

BUS ADMITTANCES MATRIX, IMAGINARY PARTS

-12.430	0.000	0.000	0.000	12.684
0.000	-14.229	0.000	4.960	9.920
0.000	0.000	-24.860	24.860	0.000
0.000	4.960	24.860	-49.119	19.839
12.684	9.920	0.000	19.839	-41.859

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

ITERATION # 5

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 5

MISMATCH = 3.48E+00

ITERATION # 6

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 6

MISMATCH = 3.47E-01

ITERATION # 7

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 7

MISMATCH = 1.13E-01

ITERATION # 8

***** PLEASE WAIT . . . PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 8

MISMATCH = 1.15E-03

QG 3 = -2066158 AT 1 = .96

RESET ONE OR MORE TRANSFORMER TAPS.

BUS ADMITTANCES MATRIX, REAL PARTS

0.932	0.000	0.000	0.000	-0.971
0.000	1.339	0.000	-0.446	-0.893
0.000	0.000	1.865	-1.865	0.000
0.000	-0.446	-1.865	4.096	-1.786
-0.971	-0.893	0.000	-1.786	3.649

BUS ADMITTANCES MATRIX, IMAGINARY PARTS

-12.430	0.000	0.000	0.000	12.948
0.000	-14.229	0.000	4.960	9.920
0.000	0.000	-24.860	24.860	0.000
0.000	4.960	24.860	-49.119	19.839
12.948	9.920	0.000	19.839	-41.859

***** PLEASE WAIT . . . PROGRAM IS RUNING *****

ITERATION # 9

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 9

MISMATCH = 3.47E+00

ITERATION # 10

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 10

MISMATCH = 3.62E-01

ITERATION # 11

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 11

MISMATCH = 1.15E-01

ITERATION # 12

***** PLEASE WAIT ... PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 12

MISMATCH = 1.18E-03

QG 3 = -4.375496E-0.2

ITERATION # 13

***** PLEASE WAIT . . . PROGRAM IS RUNING *****

THE NUMBER OF ROWS IN THE JACOBIAN MATRIX = 7

ITERATION # 13

MISMATCH = 7.59E-06

QG 3 = -4.375877E-02

TOTAL NUMBER OF ITERATIONS = 13

MISMATCH = 7.59E-06

PRESS RETURN TO CONTINUE

THE RESULTS ARE NOW BEING SENT TO OUTPUT DATA FILE.

WOULD YOU LIKE TO :

1. UPDATE THE INPUT DATA FILES
2. RUN THE PROGRAM
3. DISPLAY THE OUTPUT DATA
4. STOP

ENTER YOUR SELECTION (1, 2, 3 OR 4) 3

DO YOU WANT TO DISPLAY THE BUS OUTPUT DATA (Y OR N)? Y

DO YOU WANT TO DISPLAY THE LINE OUTPUT DATA (Y OR N)? Y

DO YOU WANT TO DISPLAY THE TRANSFORMER OUTPUT DATA (Y OR N)

? Y

DO YOU WANT TO DISPLAY THE OUTPUT DATA IN EXPONENTIAL FORMAT
(Y OR N)? Y

USE THE `ctrl` PRINT SCREEN OPTION NOW IF YOU WANT TO PRINT THE
RESULTS.

PRESS RETURN TO CONTINUE.

POWER FLOW BUS OUTPUT DATA FOR FLUJODEPOT

BUS#	VOLTAGE		GENERATION		LOAD	
	MAG.	PHASE ANGLE	PG	QG	PL	QL
	pu	degrees	pu	pu	pu	pu
1	1.00E+00	0.00E+00	9.38E-01	-8.44E-01	0.00E+00	0.00E+00
2	1.04E+00	-1.13E+01	0.00E+00	0.00E+00	2.00E+00	2.00E-01
3	1.04E+00	-1.12E+00	1.30E+00	-4.38E-02	2.00E-01	1.00E-01
4	1.04E+00	-3.46E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5	1.02E+00	-4.31E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
TOTAL			2.24E+00	-8.88E-01	2.20E+00	3.00E-01

MISMATCH = 7.59E-06

POWER FLOW LINE OUTPUT DATA FOR FLUJODEPOT

LINE#	BUS TO BUS		P	Q	S RATING EXCED.
1	2	4	-3.67E-01	-1.79E-01	4.08E-01
	4	2	3.72E-01	-2.38E-01	4.41E-01
2	2	4	-3.67E-01	-1.79E-01	4.08E-01
	4	2	3.72E-01	-2.38E-01	4.41E-01
3	2	5	-6.33E-01	7.86E-02	6.38E-01
	5	2	6.40E-01	-2.32E-01	6.81E-01

4	2	5	-6.33E-01	7.86E-02	6.38E-01
	5	2	6.40E-01	-2.32E-01	6.81E-01
5	4	5	1.77E-01	1.43E-01	2.27E-01
	5	4	-1.76E-01	-2.54E-01	3.09E-01
6	4	5	1.77E-01	1.43E-01	2.27E-01
	5	4	-1.76E-01	-2.54E-01	3.09E-01

POWER FLOW TRANSFORMER OUTPUT DATA FOR FLUJODEPOT

 TRAN.# BUS TO BUS P Q S TAP SETTING RATING
 EXCEEDED

 1 1 5 9.38E-01 -8.44E-01 1.26E+00 9.6E-01
 5 1 -9.28E-01 9.72E-01 1.34E+00

2 3 4 1.10E00 -1.44E-01 1.11E+00 1.00E+00
 4 3 -1.10E-01 1.89E-01 1.11E+00

REMOVE Ctrl PRINT SCREEN AND THEN PRESS RETURN TO CONTINUE.

WOULD YOUR LIKE TO :

1. UPDATE THE INPUT DATA FILES
2. RUN THE PROGRAM
3. DISPLAY THE OUTPUT DATA
4. STOP

ENTER YOUR SELECTION (1, 2, 3 OR 4) 4

5.3. PROGRAMA DE ESTABILIDAD.

Consideraremos la corrida del programa anterior para efectuar la simulación del Chap12, el paquete de estabilidad, pero el análisis que se pide es el de calcular el ángulo de salida de cada máquina, la frecuencia de salida, la potencia y el voltaje en cada bus.

WOULD YOU LIKE TO:

1. UPDATE THE SYNCHRONOUS MACHINE INPUT DATA
2. SET DISTURBANCES AND RUN THE PROGRAM
3. STOP

ENTER YOUR SELECTION (1, 2 OR 3) 2

THERE ARE 3 SYNCHRONOUS MACHINES

SYNCHRONOUS MACHINE DATA :

1	2	.8	5	1
3	5	5	5	1
5	4	.1	3	1

NUMBER OF LINES = 0

LINE DATA :

THERE ARE 2 TRANSFORMERS.

TRANSFORMER DATA :

1	1	5	.006	.08
2	3	4	.003	.04

THERE ARE 5 BUSES

POWER FLOW BUS OUTPUT DATA :

1	0	.9379407	-.8443785	0	0
1.041746	-11.33282	0	0	2	.2
1.04	-1.115999	1.3	-4.375877E-02	.2	.1
1.043231	-3.46302	0	0	0	0
1.022342	-4.31367	0	0	0	0

TRANSFORMER TAP SETTINGS :

AT (1) = .96

AT (2) = 1

ENTER THE INTEGRATION TIME INTERVAL (SECONDS) .01

ENTER THE FINAL TIME (SECONDS) .1

ENTER THE NUMBER OF DISTURBANCE TIMES (1, 2, 3 OR 4) 2

FIRST DISTURBANCE

ENTER THE FIRST DISTURBANCE TIME (SECONDS) .01

IS THERE A SHORT CIRCUIT AT THE FIRST DISTURBANCE TIME (Y OR N) Y

ENTER THE SHORT CIRCUIT BUS NUMBER 1

DO GENERATOR BREAKERS OPEN AT THE FIRST DISTURBANCE (Y OR N) Y

HOW MANY GENERATOR BREAKERS OPEN? 2

GENERATOR OPENING CIRCUIT BREAKER 2

ENTER THE GENERATOR NUMBER 1

DO LINE BREAKERS OPEN AT THE FIRST DISTURBANCE (Y OR N)? N

DO TRANSFORMER BREAKERS OPEN AT THE FIRST DISTURBANCE (Y OR N)? Y

HOW MANY TRANSFORMER BREAKERS OPEN? 2

TRANSFORMER OPENING CIRCUIT BREAKER 2

ENTER THE TRANSFORMER NUMBER 2

ENTER THE BUS NUMBER 5

SECOND DISTURBANCE

ENTER THE FIRST DISTURBANCE TIME (SECONDS) .03

IS THERE A SHORT CIRCUIT AT THE FIRST DISTURBANCE TIME (Y OR N) N

IS THE SHORT CIRCUIT AT THE FIRST DISTURBANCE EXTINGUISHED (Y OR N)? Y

DO GENERATOR BREAKERS OPEN AT THE SECOND DISTURBANCE (Y OR N)? N

DO GENERATOR BREAKERS RECLOSE AT THE SECOND DISTURBANCE (Y OR N)? N

DO LINE BREAKERS OPEN AT THE SECOND DISTURBANCE (Y OR N)? N

DO TRANSFORMER BREAKERS OPEN AT THE SECOND DISTURBANCE (Y OR N)? Y

HOW MANY TRANSFORMER BREAKERS OPEN 2

TRANSFORMER OPENING CIRCUIT BREAKER 2

ENTER THE TRANSFORMER NUMBER 2

ENTR THE BUS NUMBER 5

DO TRANSFORMER BREAKERS RECLOSE AT THE SECOND DISTURBANCE (Y OR N)? Y

HOW MANY TRANSFORMER BREAKERS CLOSE? 2

TRANSFORMER CLOSING CIRCUIT BREAKER 2

ENTER THE TRANSFORMER NUMBER 2

ENTER THE BUS NUMBER 5

FOR OUTPUT LABELLING

ENTER THE FIRST DISTURBANCE NAME (ANY ALPHANUMERIC SEQUENCE)

ALFREDO

ENTER THE SECOND DISTURBANCE NAME ALGOMEL

YOU MAY PRINT FROM 1 TO 5 OUTPUTS

ENTER THE NUMBER OF OUTPUTS (1 TO 5) 4

OUTPUT 1

SELECTIONS :

1. MACHINE POWER ANGLE
2. MACHINE FREQUENCY
3. MACHINE REAL POWER OUTPUT
4. BUS VOLTAGE

ENTER YOUR SELECTION (1, 2, 3 OR 4) 1

ENTER THE MACHINE NUMBER 1

OUTPUT 2

SELECTIONS :

1. MACHINE POWER ANGLE
2. MACHINE FREQUENCY
3. MACHINE REAL POWER OUTPUT
4. BUS VOLTAGE

ENTER YOUR SELECTION (1, 2, 3 OR 4) 2

ENTER THE MACHINE NUMBER 1

OUTPUT 3

SELECTIONS :

1. MACHINE POWER ANGLE
2. MACHINE FREQUENCY
3. MACHINE REAL POWER OUTPUT
4. BUS VOLTAGE

ENTER YOUR SELECTION (1, 2, 3 OR 4) 3

ENTER THE MACHINE NUMBER 1

OUTPUT 4

SELECTIONS :

1. MACHINE POWER ANGLE
2. MACHINE FREQUENCY
3. MACHINE REAL POWER OUTPUT
4. BUS VOLTAGE

ENTER YOUR SELECTION (1, 2, 3 OR 4) 4

ENTER THE BUS NUMBER 1

THE OUTPUT ARE PRINTED EVERY KTH TIME INTERVAL

ENTER THE PRINTOUT INTEGER K ($K \geq 1$) 1

DO YOU WANT THE OUTPUTS EXPONENTIAL FORMAT (Y OR N)? Y
 CONTINUE (Y) OR RESET THE DISTURBANCE (N)? Y
 USE Ctrl PRINT SCREEN OPTION NOW IF YOU WANT TO PRINT THE
 OUTPUTS
 PRESS RETURN TO CONTINUE

TRANSIENT STABILITY OUTPUT FOR 1

TIME	DELTA 1	OMEGA 1	PG 1	V 1
Seconds	degrees	rad/seg	per unit	per unit
0.000	-1.13E+01	3.77E+02	5.73E-01	1.06E+00
ALFREDO				
ALGOMEL				
0.050	-1.19E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00
0.100	-1.25E+01	3077E+02	0.00E+00	0.00E+00

REMOVE Ctrl PRINT SCREEN AND THEN PRESS RETURN TO CONTINUE

En otra corrida que se le hizo al Chap12, con H = 10 (la naterior se efectuo con H = 5), y seleccionando mayor cantidad de paso nos dio los siguientes resultados:

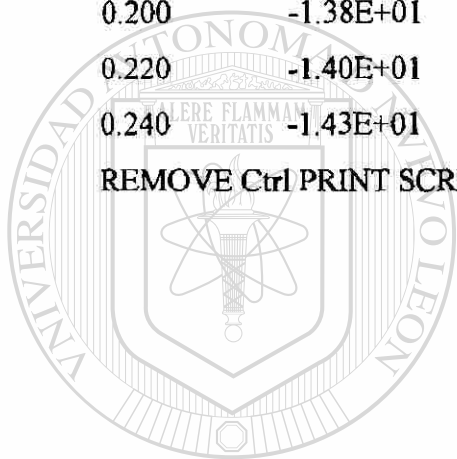
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
 TRANSIENT STABILITY OUTPUT FOR 1

TIME	DELTA 1	OMEGA 1	PG 1	V 1
Seconds	degrees	rad/seg	per unit	per unit
0.000	-1.13E+01	3.77E+02	5.90E-01	8.00E+00
ALFREDO				
0.020	-1.15E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00

ALGOMEL

0.040	-1.17E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00
0.060	-1.20E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00
0.080	-1.22E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00
0.100	-1.25E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00
0.120	-1.27E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00
0.140	-1.30E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00
0.160	-1.32E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00
0.180	-1.35E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00
0.200	-1.38E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00
0.220	-1.40E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00
0.240	-1.43E+01	3.77E+02	0.00E+00	0.00E+00

REMOVE Ctrl PRINT SCREEN AND THEN RETURN TO CONTINUE



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

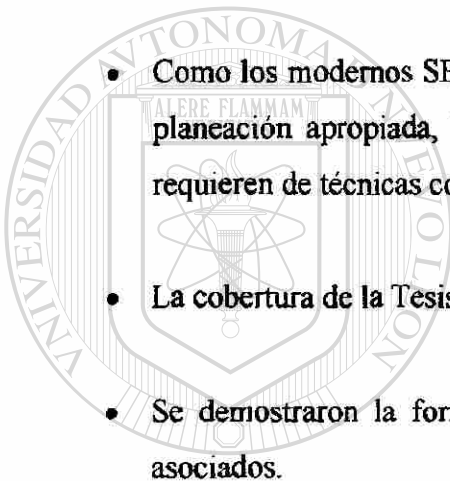
6.1. CONCLUSIONES.

En la presente Tesis se ha presentado el uso de los paquetes computacionales para el análisis de circuitos eléctricos, electrónicos, de control y de sistemas de potencia en estado estable y en estado transitorio. Por medio de estas herramientas es posible simular con gran flexibilidad y de fácil manejo sistemas lineales de potencia, seleccionando los diferentes paquetes que permita al usuario una forma de comprensión y ganar experiencia con circuitos demasiados grandes que a menudo al resolverlos en forma manual resultan ser catastróficos por el tiempo utilizado para su resolución. Se puso especial énfasis en la selección de los problemas por su grado de complejidad para que resultaran atractivos para su análisis, así como el empleo de entrada/salida de los algoritmos empleados.

En fin, la investigación realizada para la utilización de los simuladores comprendió la consideración de diversos aspectos relevantes que llevaron a las siguientes conclusiones:

- El empleo de los paquetes computacionales y la simulación realizada de las redes y circuitos, nos permiten una operación segura y de alta confiabilidad.

- La selección apropiada del paquete define las características de software a utilizar en su implementación.
- La implementación de PC's en los centros educativos y de trabajo representan un desarrollo con mayor accesibilidad, tanto por su costo como por su capacidad de velocidad de procesamiento de datos.
- La flexibilidad e interacción brindada por los simuladores digitales representan factores determinantes en la aplicación real.
- Como los modernos SEP han crecido enormemente y se están expandiendo más, la planeación apropiada, la operación y el control de estos sistemas a gran escala requieren de técnicas computacionales avanzadas.
- La cobertura de la Tesis incluye la carga de los paquetes computacionales a la PC.
- Se demostraron la formulación de las ecuaciones y se describen los diagramas asociados.



U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



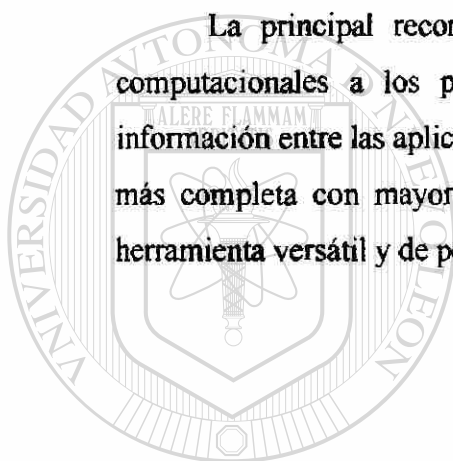
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
6.2. APORTACIONES.

Es importante establecer las bases necesarias para establecer la aplicación de los simuladores digitales sin importar el lenguaje de programación en que fueron desarrollados. De esta forma se aprovechan los algoritmos desarrollados con anterioridad, así como las aplicaciones que han tenido y de haber sido probados ampliamente. Esto nos permite crear nuevas aplicaciones que puedan interactuar con los ya existentes, integrando los paquetes para el análisis de los SEP, tanto en estado estable como en estado transitorio, aunque este último no sea deseado, y conocer la robustez del sistema analizado.

La aportación principal de este trabajo es la implementación de los simuladores, el cual nos brinda la interacción y permite realizar los análisis necesarios en forma directa y ajustar las componentes del SEP, así como sus parámetros, siendo lo más importante que todo se encuentra integrado en un mismo ambiente interactivo.

6.3. RECOMENDACIONES.

La principal recomendación que se tiene, es que se integren los paquetes computacionales a los programas de estudios para incrementar el manejo de la información entre las aplicaciones reales y de diseño, con el fin de lograr una interacción más completa con mayor diversidad de aplicaciones, la cual lo convertirán en una herramienta versátil y de poderoso análisis.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



APENDICES

A.1.

NÚMEROS COMPLEJOS.

Un número complejo “A”, es la suma de un número real “a”, y un número imaginario “b”, que lo podemos expresar como:

$$A = a + jb$$

donde a y b son reales, y definimos a la unidad imaginaria como “j”, denotada por: $j = \sqrt{-1}$.

El número complejo A puede representarse sobre un plano de coordenadas rectangulares, llamado plano complejo, interpretándolo como un punto (a,b), como se muestra en la Fig. A1.1. Este número puede ser situado en el plano complejo especificando la distancia “r” sobre una línea recta a partir del origen, formando un ángulo θ con respecto al eje real. A partir del triángulo rectángulo que se forma de este modo, podemos ver que:

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\theta = \text{Arc tan } (b/a)$$

$$\therefore a = r \cos \theta \quad \& \quad b = r \sin \theta$$

a esta última expresión se le designa como la forma rectangular del número complejo.

También podemos denotar la representación del número complejo por:

$$A = r \angle \theta$$

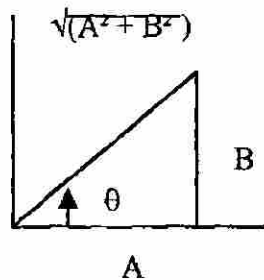


Fig. A1.1. Plano complejo.

que se conoce como la forma polar. El número r se conoce como magnitud y se le puede denotar por:

$$r = |A|$$

y, al ángulo θ como el argumento de A .

A.2.

TRANSFORMACIONES ESTRELLA – DELTA.

En muchos casos dentro de los sistemas de potencia es importante tener la posibilidad de convertir una carga conectada en Y a su equivalente en Δ y viceversa. Esto se debe a que en ciertos casos, es mucho más fácil reducir los circuitos, ya que en los casos cuando se tengan conexiones Y - Δ en paralelo, si la Y se reemplaza por su equivalente en Δ , ésta sería mucho más fácil de reducir, ya que las impedancias de la carga estarían en paralelo.

Para convertir la Y a Δ o Δ a Y , consideremos las conexiones de la Fig. A1.2. Para efectuar una transformación Y - Δ , necesitamos de una expresión para Y_{ab} , Y_{bc} y Y_{ca} de la delta en términos de Y_a , Y_b y Y_c de la estrella para que la conexión delta sea equivalente a la estrella en las terminales A , B y C [1]. Es decir, si la Y es reemplazada

por la Δ , aparecerán los mismos voltajes de nodo V_A , V_B y V_C si se hace que fluya las corrientes I_1 e I_2 . Inversamente, una transformación Δ - Y es la expresión de los parámetros Y en términos de los parámetros Δ .

Las ecuaciones de nodo para ambos circuitos, si se toma el nodo C como referencia, en el caso de la Y, tenemos:

$$Y_a V_A - Y_a V_D = I_1$$

$$Y_b V_B - Y_b V_D = I_2$$

$$-Y_a V_A - Y_b V_B + (Y_a + Y_b + Y_c) V_D = 0$$

resolviendo para V_D en la tercera ecuación y sustituyendo su valor en las dos primeras, obtenemos después de simplificar:

$$\frac{Y_a Y_b + Y_a Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} V_A - \frac{Y_a Y_b}{Y_a + Y_b + Y_c} V_B = I_1$$

$$\frac{Y_a Y_b}{Y_a + Y_b + Y_c} V_A + \frac{Y_a Y_b + Y_b Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} V_B = I_2$$

las ecuaciones de nodo para el circuito Δ son:

$$(Y_{ab} + Y_{ca}) V_A - Y_{ab} V_B = I_1$$

$$-Y_{ab} V_A + (Y_{ab} + Y_{ca}) V_B = I_2$$

igualando coeficientes de términos similares en estas ecuaciones y en las anteriores tenemos la transformación Y- Δ :

$$Y_{ab} = \frac{Y_a Y_b}{Y_a + Y_b + Y_c}$$

$$Y_{bc} = \frac{Y_b Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c}$$

$$Y_{ca} = \frac{Y_c Y_a}{Y_a + Y_b + Y_c}$$

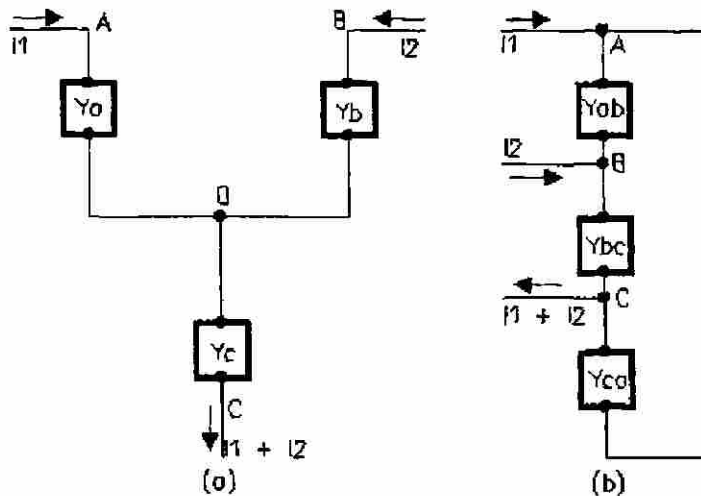


Fig. A1.2 (a) Conexión Y, (b) Conexión Δ

Si imaginamos los circuitos Y y Δ superpuestos sobre un diagrama único como el de la fig. A1.3, entonces Y_a y Y_b son adyacentes a Y_{ab} , sucediendo lo mismo con Y_{bc} y Y_{ca} . De este modo, podemos postular que[1]: La admitancia de un ramal de la Δ es igual al producto de las admitancias de los ramales adyacentes de la Y dividida por la suma de las admitancias de la Y.

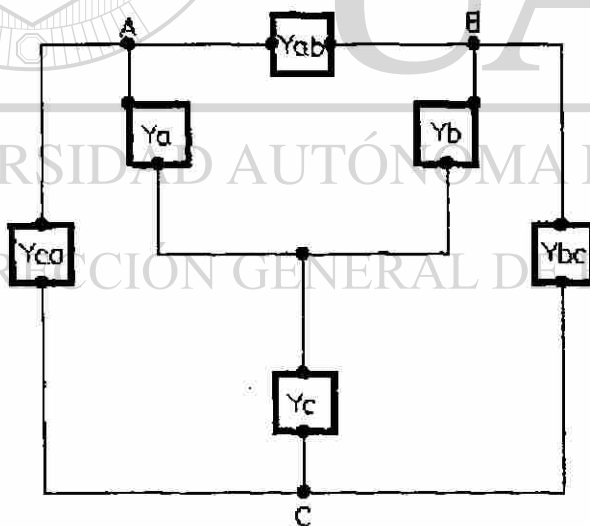


Fig. A1.3. Conexiones superpuestas para la transformación Y - Δ .

Para obtener la transformación Δ -Y, resolvemos para las admitancias Y escribiendo dos conjuntos de ecuaciones de trayectorias cerradas para los circuitos Y y Δ . En este caso tendremos el dual del procedimiento que nos llevo a las ecuaciones anteriores, en donde resulta la transformación Δ -Y:

$$Z_a = \frac{Z_b Z_c}{Z_a + Z_b + Z_c}$$

$$Z_b = \frac{Z_c Z_a}{Z_a + Z_b + Z_c}$$

$$Z_c = \frac{Z_a Z_b}{Z_a + Z_b + Z_c}$$

Donde las Z son los recíprocos de las Y en la Fig. A1.3. La regla es la siguiente [1]: La impedancia de un ramal de la Y es igual al producto de las impedancias de los ramales adyacentes de la Δ divididas por la suma de las impedancias de la Δ .

A.3. EL OPERADOR a .

En los números imaginarios utilizamos el operador j , que tiene el efecto de girar un fasor un ángulo de 90° sin afectar su magnitud, en forma similar definimos al operador a como un operador que hace girar un ángulo de 120° sin afectar su magnitud, por lo tanto:

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866$$

de manera similar: $a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j0.866$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ = 1 + j0$$

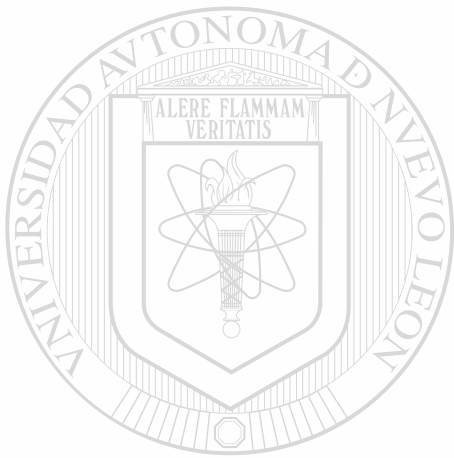
si efectuamos la sumatoria de $(1 + a + a^2)$ tenemos que:

$$1 + a + a^2 = 1 + (-0.5 + j0.866) + (-0.5 - j0.866) = 0$$

esta relación nos es muy útil en el análisis de la componentes simétricas. Cuando tomamos como base a las componentes del vector V_A , tenemos las siguientes relaciones con respecto a los vectores V_B , y V_C :

$$\begin{array}{lll} V_{b1} = a^2 V_{a1} & V_{b2} = a V_{a1} & V_{b0} = V_{a0} \\ V_{c1} = a V_{a1} & V_{c2} = a^2 V_{a1} & V_{c0} = V_{a0} \end{array}$$

Estas relaciones se utilizan cuando se quieren calcular todos los voltajes y corrientes de secuencias en un sistema de potencia, ya que, para las corrientes se tiene una relación similar a la expuesta para el voltaje.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

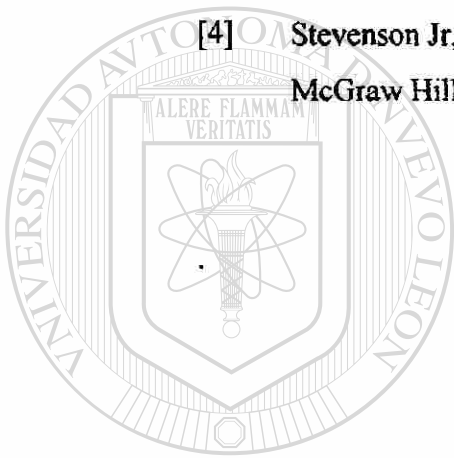


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

REFERENCIAS

- [9] Arrillaga, J; Arnold, C. P; y Harker, B. J. Computer Modelling of Electrical Power Systems, John Willey and Sons. 1983.
- [18] Betancourt Ramírez, Fernando Mnuel. Curso de Sistemas de Potencia Avanzado I, Universidad Autónoma de Nuevo León, Agosto de 1997.
- [19] Betancourt Ramírez, Enrique. Curso de Transitorios Electromagnéticos, Universidad Autónoma de Nuevo León, Agosto de 1997.
- [20] Elizondo González, Cesar. Curso de Control Robusto Paramétrico, Universidad Autónoma de Nuevo León, Agosto de 1997.
- [16] Electromagnetic Transients Program (EMTP) Primer, Westinghouse Electric Corporation. 1985.
- [17] Glover, J. Duncan y Sarma Mulukutla, Power System Analysis Design whit Personal Computer Aplicaciones, PWS Publishing Company. 1994.
- [5] Grainger, John J. y Stevenson Jr, William D, Análisis de Sistemas de Potencia, McGraw Hill. 1996.
- [10] Greenwood, Allan. Electrical Transients in Power Systems, John Willey and Sons. 1990.
- [7] Gross, Charles A. Análisis de Sistemas de Potencia, Interamericana. 1982.
- [2] Hyatt, William H. y Kimberley, Análisis Básico de Circuito en Ingeniería, McGraw Hill. 1995.
- [3] Irvin, J. David. Análisis Básico de Circuitos en Ingeniería, Prentice Hall. 1997.
- [1] Johnson, David E., Hilburn, John L., Johnson, Johnny R. y Scott, Peter D. Análisis Básico de Circuitos Eléctricos, Prentice Hall. 1996.
- [13] MatLab, Edition de Estudiante Versión 4ª, Prentice Hall. 1996
- [10] Merino Capellini, Manuel. Curso de sistemas de Potencia II, Universidad Veracruzana, 1982.
- [14] MicriSim DesignLab Evaluation Software. 1994.

- [6] Neuenswander, John R. Modern Power Systems, International Texbook. 1971.
- [12] Nilsson, James W. y Susan A. Riedel, Susan A. Using Tools for Electric Circuits, Addison-Wesley Publishing. 1996.
- [11] Rashid, Muhammad H. Spice for Electronics and Electric Power, Prentice Hall. 1993.
- [15] Saadat, Hadii. Computacional Aids in Control Systems Using Matlab, McGraw Hill. 1993.
- [8] Shipley, R. Bruce. Introduction to Matrices and Power Systems, John Willey and Sons. 1991.
- [4] Stevenson Jr, William D. Elementos de Análisis de Sistemas de Potencia, McGraw Hill. 1975.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO.

NOMBRE: ALFREDO GONZÁLEZ FUENTEVILLA

FECHA DE NACIMIENTO: JUNIO 1 DE 1960

EDAD: 38 AÑOS

LUGAR DE NACIMIENTO: COATZACOALCOS, VERACRUZ.

DIRECCIÓN: SAN SIMÓN # 1220

COLONIA: FRAC. BALCONES DE SANTO DOMINGO

CIUDAD: SAN NICOLAS DE LOS GARZAS, N.L.

TELÉFONO: 01 (8) 3 53 39 85

01 (921) 2-27-91

S.M.N.: 10872710

R.F.C.: GOFA 600601-7X9

**FECHA DE EXÁMEN
PROFESIONAL:** ENERO 27 DE 1989.

TÍTULO OBTENIDO: INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICISTA.

PROFESIONAL: UNIVERSIDAD VERACRUZANA
1977 - 1982. COATZACOALCOS, VER.

MAESTRÍA EN CIENCIAS: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
ÁREA CONTROL Y POTENCIA 1997 - ACTUAL, MONTERREY, NUEVO LEÓN.

CURSOS RECIBIDOS.

NOMBRE DEL CURSO	INSTITUCIÓN O COMPAÑÍA
CALIDAD INTEGRAL	CELANESE MEXICANA S.A. 1985
OBSTACULO A LA CREATIVIDAD	CELANESE MEXICANA S.A. 1985
ADMINISTRACIÓN POR OBJETIVOS	CELANESE MEXICANA S.A. 1984
ANÁLISIS DE PROBLEMAS Y TOMA DE DECISIONES.	CELANESE MEXICANA S.A. 1985
SEGURIDAD INDUSTRIAL	CELANESE MEXICANA S.A. 1982
ANÁLISIS DE PROBLEMAS POTENCIALES.	CELANESE MEXICANA S.A. 1986
AIRE ACONDICIONADO Y REF.	CELANESE MEXICANA S.A. 1987
PROTECCIONES ELÉCTRICAS	UNIVERSIDAD VERACRUZANA 1984
PRUEBAS A TRANSFORMADORES	UNIVERSIDAD VERACRUZANA 1985
COMPUTACIÓN	CENTRO DE COMPUTACIÓN DE ORIENTE 1982.
INGLES	UNIVERSIDAD VERACRUZANA 1995-1996.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
CURSOS Y CONFERENCIAS IMPARTIDAS.

NOMBRE	INSTITUCIÓN O COMPAÑÍA.
MATEMÁTICAS I Y III	UNIVERSIDAD VERACRUZANA 1984 - 1996
MÁQUINAS ELÉCTRICAS II	UNIVERSIDAD VERACRUZANA 1984 - 1996
CIRCUITOS ELÉCTRICOS I Y II	UNIVERSIDAD VERACRUZANA 1984 - 1996
SISTEMAS DE CONTROL I	UNIVERSIDAD VERACRUZANA 1993 - 1996

TERMODINÁMICA	UNIVERSIDAD VERACRUZANA 1986 - 1992
PRUEBAS A EQUIPOS ELECT. Y TRANSFORMADORES.	UNIVERSIDAD VERACRUZANA 1990 (CONFERENCIA).
MANTENIMIENTO A EQUIPOS ELÉCTRICOS.	CELANESE MEXICANA S.A. 1986 - 1988
DISTRIBUCIÓN DE ALUMBRADO	UNIVERSIDAD VERACRUZANA 1992 (CONFERENCIA)
MANEJO DEL PSPICE	UNIVERSIDAD VERACRUZANA 1994 - 1996 (6 CONFERENCIAS)
SERIES DE POTENCIA	UNIVERSIDAD VERACRUZANA 1997 (CURSO DE ACTUALIZACIÓN)

DATOS DE TRABAJOS

COMPañIA O INSTITUCIÓN

PUESTO

COMISIÓN FEDERAL DE ELÉCTRICIDAD
1981

ING. EN ENTRENAMIENTO

CELANESE MEXICANA S.A.
1982 - 1984

SUPERVISOR ÁREA ACETILOS

CELANESE MEXICANA S.A.
1984

SUPERVISOR ÁREA SERVICIOS

CELANESE MEXICANA S.A.
1984 - 1986

SUPERVISOR AREA EXTERIOR

CELANESE MEXICANA S.A.
1986 - 1988

JEFE DE DEPARTAMENTO

UNIVERSIDAD VERACRUZANA
1982 - 1996

CATEDRÁTICO

PROYECTOS Y MANTENIMIENTO DEL
GOLFO. 1988 - 1996

JEFE DE DEPARTAMENTO



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

TRABAJOS REALIZADOS.

PRUEBAS A TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE 750KVA, 5MVA Y 10MVA

CAMBIO DE RADIADOR A TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE 10MVA.

MANTENIMIENTO CORRECTIVO A EQUIPO DE AIRE ACONDICIONADO DE 20 Y 30 TONELADAS.

COLOCACION DE BANCO DE CAPACITORES DE 20 Y 30 KVA EN C.C.M.

AJUSTE DE RELEVADORES DE IMAGEN TERMICA A TRANSFORMADOR DE POTENCIA.

MANTENIMIENTO A MOTORES DE INDUCCION HASTA DE 500HP EN 4160V.

INSTALACION DE ALUMBRADO PERIMETRAL ENTRE OTROS.

OTROS:

PRESIDENTE DE JURADO DE EXÁMEN PROFESIONAL.

JURADO DE EXÁMENES DE OPOSICIÓN

CONSEJERO MAESTRO EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD VERACRUZANA CAMPUS COATZACOALCOS DE 1992 - 1996

PRESIDENTE DEL CLUB DE AJEDREZ "CARLOS TORRE REPETTO A. C." DE 1984 - 1996.

PRESIDENTE HONORARIO DEL CLUB DE AJEDREZ "CARLOS TORRE REPETTO A. C." DE 1996 - ACTUAL.

