

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

***ESTUDIO DINÁMICO DEL GRUPO DE
EMERGENCIA A DIESEL DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA***

***Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero
Eléctrico en la especialización de Sistemas
Eléctricos de Potencia***

María de Lourdes Farinango Cisneros

Agosto 1996

CERTIFICACION:

Certifico que el presente trabajo de
Tesis fue desarrollado en su totalidad
por la señorita María de Lourdes
Farinango Cisneros.

JESUS JATIVA

Dr. Jesús Játiva

AGRADECIMIENTO:

Al Dr. Jesús Játiva por saberme guiar al cumplimiento de uno de mis mayores ideales.

A todos los Profesores del Departamento de Potencia y en especial a los Profesores del Area de Máquinas Eléctricas que nunca me negaron su ayuda.

A mi hermana Nancy que siempre me apoyó en la realización de mi Tesis de Grado.

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se realiza el análisis del comportamiento dinámico del Grupo de Emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. Después de una descripción de los componentes más importantes del Grupo Electrógeno en estudio se exponen las pruebas realizadas para obtener los parámetros eléctricos, tales como, reactancias sincrónicas, transitorias y subtransitorias, reactancia de secuencia negativa y reactancia de secuencia cero; constantes de tiempo transitorias y subtransitorias, de cortocircuito y de circuito abierto y constantes de tiempo del circuito de armadura. Además se determinan los parámetros mecánicos tales como la constante de inercia H , para poder estudiar este sistema dinámicamente. Esto se consigue representando cada parte del grupo como un modelo de simulación, el cual sea aceptado por el programa de estabilidad a utilizar. Así por ejemplo, el sistema del motor a diesel se aproxima a un sistema a vapor que es un modelo reconocido por el programa y el sistema de excitación se modela como tipo DC1.

El programa de estabilidad utilizado permite estudiar varias perturbaciones tales como, cortocircuitos, variaciones y rechazos de carga. Los resultados de frecuencia se contrastan con valores obtenidos experimentalmente para pruebas de variaciones y rechazos de carga principalmente. Pruebas de cortocircuito no se realizan por limitaciones del equipo de protección del grupo de emergencia. Se observa que los resultados obtenidos experimentalmente son muy semejantes a los obtenidos en la simulación.

INDICE

| CONTENIDO | Pág No |
|--------------------------|--|
| CAPITULO I: INTRODUCCION | |
| 1.1 | Objetivo.....1 |
| 1.2 | Alcance.....1 |
| 1.3 | Justificación.....2 |
| 1.4 | Descripción del Grupo Electrónico.....3 |
| 1.5 | Máquina Motriz.....6 |
| 1.5.1 | El Motor de Dos Tiempos.....9 |
| 1.5.2 | Proceso de Combustión.....14 |
| 1.5.3 | Tipos de Motores.....15 |
| 1.6 | Descripción del Motor.....18 |
| 1.7 | Sistemas del Motor.....20 |
| 1.7.1 | Sistemas de Alimentación de Combustible.....20 |
| 1.7.1.1 | Sistemas de Inyección.....23 |
| 1.7.2 | Sistema de Aire.....25 |
| 1.7.3 | Sistema de Lubricación.....29 |
| 1.7.4 | Sistema de Refrigeración.....31 |
| 1.7.5 | Sistema de Regulación de velocidad.....33 |
| 1.7.6 | Sistema de Arranque.....34 |
| 1.8 | El Combustible Diesel.....35 |
| 1.9 | Descripción del Generador.....37 |
| 1.10 | Sistemas del Generador.....39 |
| 1.10.1 | Máquina Sincrónica.....39 |
| 1.10.2 | Sistema de Excitación.....41 |
| 1.10.3 | Sistema de Regulación de Voltaje.....43 |
| 1.11 | Descripción del Trabajo de Tesis.....46 |

CAPITULO II: DETERMINACION DE PARAMETROS ELECTRICOS Y MECANICOS

| | | |
|-----------|---|----|
| 2.1 | Parámetros Eléctricos..... | 48 |
| 2.1.1 | Conceptos Fundamentales..... | 48 |
| 2.1.2 | Bases Fundamentales para Análisis de Condiciones Transitorias..... | 50 |
| 2.1.3 | Circuitos Equivalentes para Diferentes Condiciones de Operación..... | 53 |
| 2.1.3.1 | En el Eje Directo..... | 53 |
| 2.1.3.2 | En el Eje en Cuadratura..... | 56 |
| 2.1.4 | Determinación de Parámetros Eléctricos..... | 58 |
| 2.1.4.1 | Determinación de la Impedancia Base..... | 58 |
| 2.1.4.2 | Resistencia de los Devanados..... | 59 |
| 2.1.4.2.1 | Medición de Resistencias..... | 60 |
| 2.1.4.3 | Reactancia Sincrónica X_d | 62 |
| 2.1.4.3.1 | Determinación de la Característica en Vacío a la Velocidad Nominal..... | 64 |
| 2.1.4.3.2 | Determinación de la Característica de Cortocircuito a la Velocidad Nominal..... | 67 |
| 2.1.4.3.3 | Determinación de la Reactancia Sincrónica de Eje Directo X_d | 72 |
| 2.1.4.4 | Relacion de Cortocircuito..... | 74 |
| 2.1.4.5 | Reactancias Transitorias y Subtransitorias de Eje Directo..... | 75 |
| 2.1.4.5.1 | Determinación de Cantidades con Prueba de Cortocircuito Súbito..... | 78 |
| 2.1.4.5.2 | Cálculo de la Reactancia Transitoria de Eje Directo X_d' | 82 |
| 2.1.4.5.3 | Cálculo de la Reactancia Subtransitoria de Eje Directo X_d'' | 84 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 2.1.4.6 | Reactancias de Eje en Cuadratura..... | 84 |
| 2.1.4.6.1 | Reactancia Sincrónica X_q | 84 |
| 2.1.4.6.2 | Reactancia Transitoria X_q' | 86 |
| 2.1.4.6.3 | Reactancia Subtransitoria X_q'' | 86 |
| 2.1.4.7 | Reactancia de Secuencia Negativa X_2 | 87 |
| 2.1.4.7.1 | Prueba de Cortocircuito Sostenido Línea a Línea | 87 |
| 2.1.4.7.2 | Determinación de la Reactancia de Secuencia Negativa X_2 | 88 |
| 2.1.4.8 | Reactancia de Secuencia Cero..... | 90 |
| 2.1.4.8.1 | Prueba de Cortocircuito Sostenido Línea-Línea- Neutro..... | 90 |
| 2.1.4.8.2 | Determinación de la Reactancia Homopolar X_0 | 92 |
| 2.1.5 | Constantes de Tiempo. | 93 |
| 2.1.5.1 | Constantes de Tiempo de Eje Directo..... | 94 |
| 2.1.5.1.1 | Constante de Tiempo Transitoria de Cortocircuito T_d' | 94 |
| 2.1.5.1.2 | Constante de Tiempo Subtransitoria de Cortocir - cuito T_d'' | 95 |
| 2.1.5.1.3 | Constante de Tiempo del Circuito de Armadura T_a | 96 |
| 2.1.5.1.4 | Constante de Tiempo Transitoria de Circuito Abierto T_{d0}' | 96 |
| 2.1.5.1.5 | Constante de Tiempo Subtransitoria del Circuito Abierto T_{d0}'' | 100 |
| 2.1.5.2 | Constantes de tiempo del eje en cuadratura.... | 100 |
| 2.1.5.2.1 | Constante de Tiempo Transitoria de Cortocircuito T_q' | 101 |
| 2.1.5.2.2 | Constante de tiempo Subtransitoria de Cortocir - cuito T_q'' | 101 |
| 2.1.5.2.3 | Constante de Tiempo Transitoria de Circuito Abierto T_{q0}' | 101 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 2.1.5.2.4 | Constante de Tiempo Subtransitoria de Circuito Abierto Tqo"..... | 102 |
| 2.2 | Determinación de Pérdidas de la Máquina Sincrónica..... | 102 |
| 2.2.1 | Pérdidas en el Núcleo..... | 103 |
| 2.2.2 | Pérdidas de Fricción y Ventilación..... | 104 |
| 2.3 | Potencia Mecánica y Rendimiento..... | 104 |
| 2.3.1 | Potencia de Fricción..... | 105 |
| 2.3.2 | Potencia de Freno..... | 105 |
| 2.3.3 | Potencia Nominal..... | 106 |
| 2.3.4 | Rendimiento Mecánico..... | 106 |
| 2.3.5 | Rendimiento Térmico..... | 107 |
| 2.4 | Parámetros Mecánicos..... | 108 |
| 2.4.1 | Cálculo de la potencia Mecánica del Grupo de Emergencia..... | 109 |
| 2.4.2 | Constante de Inercia H | 111 |
| 2.4.2.1 | Determinación de H y D | 115 |

CAPITULO III: FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL GRUPO DE EMERGENCIA

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1 | Máquina Motriz..... | 118 |
| 3.2 | Sistema de Regulación de Velocidad..... | 123 |
| 3.3 | Sistema de Excitación de la Máquina Sincrónica..... | 128 |
| 3.3.1 | Sistema de Regulación de Voltaje..... | 131 |
| 3.3.2 | Modelo Matemático de la Excitatriz | 133 |
| 3.3.3 | Función de Saturación..... | 136 |
| 3.3.4 | Determinación de Valores Típicos del Sistema de Excitación..... | 138 |
| 3.4 | Modelación de la Carga Alimentada..... | 141 |
| 3.4.1 | Determinación del Estatismo del Generador..... | 145 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 3.5 | Modelación del Sistema de Emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica..... | 146 |
|-----|--|-----|

CAPITULO IV: SIMULACION DINAMICA Y CONTRASTACION DE RESULTADOS DEL GRUPO DE EMERGENCIA

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.1 | Rechazo de Carga..... | 149 |
| 4.1.1 | Rechazo de Carga en Condiciones de Demanda Alta. | 151 |
| 4.1.2 | Rechazo de Carga en Condiciones de Demanda Media | 153 |
| 4.1.3 | Rechazo de Carga en Condiciones de Demanda Baja. | 154 |
| 4.2 | Variaciones de Carga Eléctrica..... | 158 |
| 4.2.1 | Variación de Carga desde Condición de Demanda Alta a Media..... | 158 |
| 4.2.2 | Variación de Carga desde Condición de Demanda Alta a Baja..... | 159 |
| 4.2.3 | Variación de Carga desde Condición de Demanda Media a Baja..... | 160 |
| 4.2.4 | Variación de Carga desde Condición de Demanda Baja a Media..... | 161 |
| 4.2.5 | Variación de Carga desde Condición de Demanda Baja a Alta..... | 162 |
| 4.2.6 | Variación de Carga desde Condición de Demanda Media a Alta..... | 163 |
| 4.3 | Cortocircuitos..... | 167 |
| 4.3.1 | Cortocircuito Trifásico en Condición de Demanda Alta..... | 168 |
| 4.3.1.1 | Cortocircuito Trifásico en la Mitad de la Línea con despeje de Falla..... | 168 |
| 4.3.1.2 | Cortocircuito Trifásico en la Mitad de la Línea con despeje de falla y Reconexión de la Línea... | 171 |
| 4.3.1.3 | Cortocircuito Trifásico en la Mitad de la Línea | |

| | |
|--|-----|
| sin Despeje de la Falla..... | 173 |
| 4.3.1.4 Cortocircuito Trifásico en la Barra de Carga con Despeje de Falla..... | 175 |
| 4.3.2 Cortocircuito Trifásico en Condición de Demanda Media..... | 176 |
| 4.3.2.1 Cortocircuito Trifásico en la Línea con Despeje de Falla..... | 176 |
| 4.3.2.2 Cortocircuito Trifásico en la Mitad de la Línea con Despeje de Falla y Reconexión..... | 178 |
| 4.3.2.3 Cortocircuito Trifásico en la Mitad de la Línea sin Despeje de Falla..... | 179 |
| 4.3.2.4 Cortocircuito Trifásico en la Barra de Carga con Despeje de Falla..... | 181 |

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | |
|----------------------|-----|
| Conclusiones..... | 184 |
| Recomendaciones..... | 191 |

| | |
|-------------------|-----|
| BIBLIOGRAFIA..... | 193 |
|-------------------|-----|

Apéndice A

Apéndice B

Apéndice C

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 OBJETIVO

El objetivo de esta tesis es realizar el estudio dinámico del grupo de emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica utilizando un programa de estabilidad transitoria. Los parámetros eléctricos y mecánicos para los regímenes de estado estable y transitorio del grupo se determinan mediante el uso de protocolos de pruebas establecidos en normas internacionales.

1.2 ALCANCE

El trabajo realizado se enmarca en los tópicos siguientes:

- Determinación de los parámetros eléctricos y mecánicos necesarios para la simulación dinámica del grupo de emergencia a diesel de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.
- Determinación de las funciones de transferencia que mejor representen a los componentes dinámicos del grupo de emergencia.
- Estudio dinámico del grupo de emergencia simulando condiciones de falla de cortocircuito, variaciones de carga

y rechazo de carga mediante un programa de estabilidad transitoria.

1.3 JUSTIFICACION

A pesar de las medidas adoptadas para la seguridad de servicio en las redes de alimentación de energía eléctrica, no siempre se pueden evitar completamente las suspensiones de servicio eléctrico desde las redes de distribución. Estas suspensiones en la alimentación de energía eléctrica significan en la mayoría de los casos una considerable pérdida económica, por lo que en los edificios tanto públicos como privados se prevén cada vez con más frecuencia grupos eléctricos de emergencia, los cuales obviamente deben estar en óptimas condiciones para entrar en funcionamiento en el momento que sea necesario y en el menor tiempo posible.

Una manera de determinar las condiciones normales y anormales de funcionamiento de un grupo de emergencia a diesel es mediante su análisis dinámico, estudiando su comportamiento ante fallas de cortocircuito o variaciones de carga. Esto se logra eficientemente a través de la simulación dinámica, utilizando los parámetros eléctricos y mecánicos del grupo de emergencia en estudio. Basados en este análisis se pueden determinar los requerimientos del sistema de protecciones en los rangos de tiempo correspondientes a los fenómenos transitorios mencionados. Con esto se pueden desarrollar las medidas preventivas o correctivas necesarias ante un evento similar en

condiciones reales, de manera que el grupo de emergencia cumpla con su cometido de la manera que se espera.

Además, se debe considerar que los estudios realizados hasta ahora están dedicados a analizar el comportamiento de estado estable de la máquina motriz, del generador, del sistema de excitación o del sistema de regulación de velocidad, en forma aislada. Por lo que es necesario realizar un análisis del grupo de emergencia en su conjunto, en estado estable y principalmente en estado dinámico.

Este primer estudio del funcionamiento de grupos de emergencia servirá como referencia para otros generadores a diesel, que de acuerdo a la realidad energética del país se espera se instalen en un número considerable, en especial para las épocas de restricción de energía eléctrica.

1.4 DESCRIPCION DEL GRUPO ELECTROGENO

El equipo generador de electricidad instalado es un grupo electrógeno a diesel marca KATOLIGHT de 150 KW de potencia recibido por la Facultad de Ingeniería Eléctrica como donación del Banco Central en el año de 1982 y puesto en servicio en el año de 1985. Los datos generales de placa son los siguientes:

| | | | |
|--------|----------------|-----------|-------|
| Modelo | D 150 M P X 8V | Serie No. | 55397 |
| Tipo | 11038 | | |
| 150 kw | | 187 KVA | |

Máquina Motriz

Motor Diesel General Motors modelo 6045-C, 8V-71

Regulador de Velocidad tipo hidráulico marca WOODWARD

Combustible Diesel

Capacidad de almacenamiento de combustible 55 galones

Generador

Marca KATO

187 KVA

Voltaje nominal 120/208 V

Corriente nominal 519 A/fases

Tres fases

Velocidad nominal 1800 RPM

Frecuencia 60 Hz

Factor de Potencia 0.8

Campo del Alternador 11.95 A

Sistema de excitación autoexcitado

Modelo 150502E Tipo 11038

Motor de Arranque de 24 V marca Delco Remy

Estas especificaciones de los sistemas del grupo de emergencia son generales, en el desarrollo de este capítulo se detallará las particularidades.

En la figura 1.1 se presenta un detalle del grupo de emergencia en estudio.

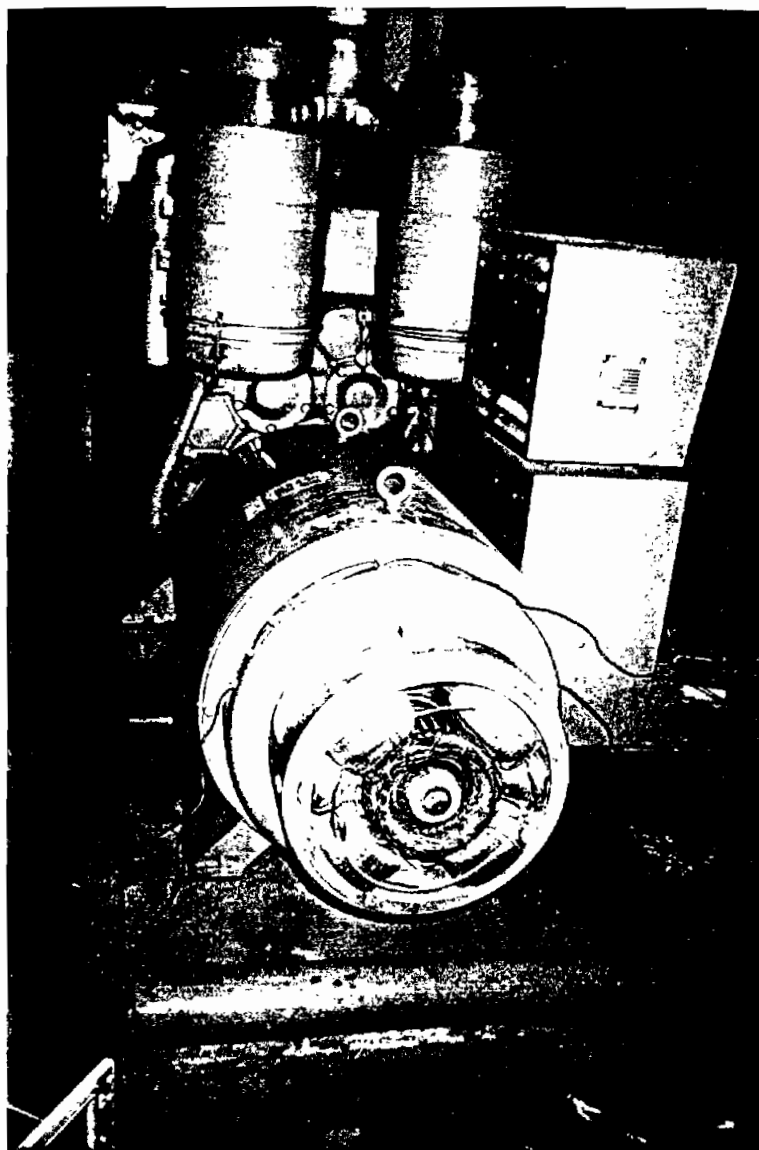


Figura 1.1.a Vista Frontal del Grupo de Emergencia

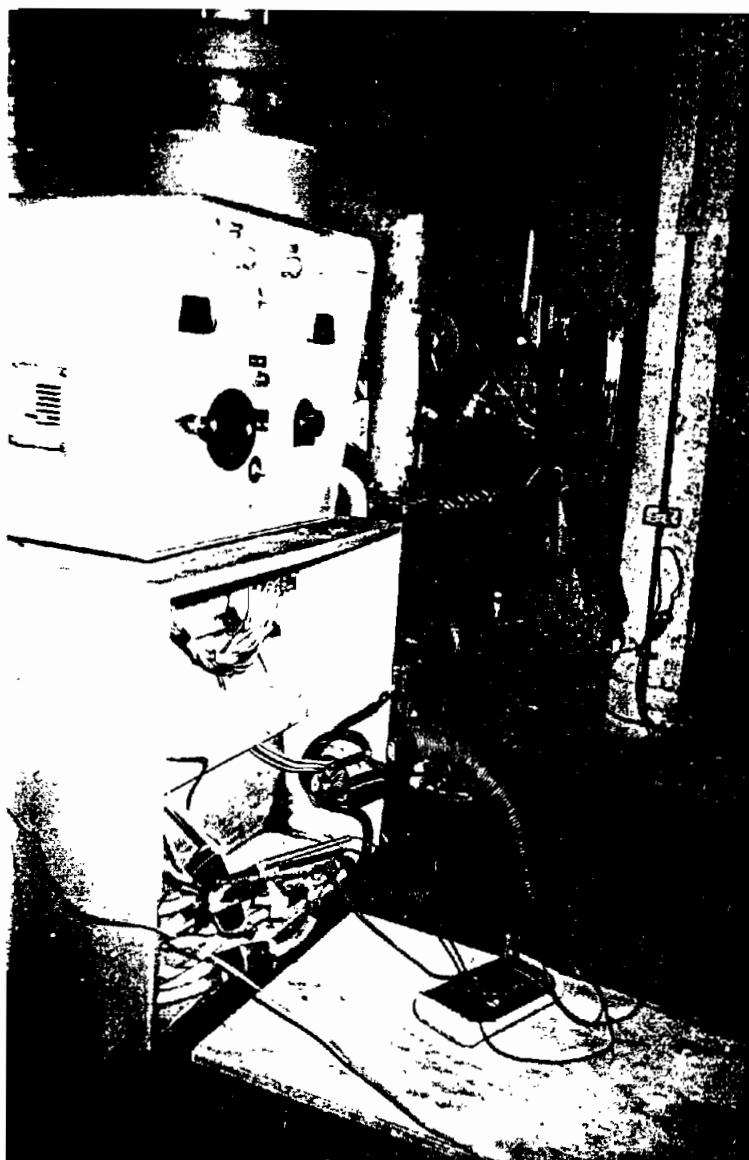


Figura 1.1.b Vista Lateral del Grupo de Emergencia

1.5 MAQUINA MOTRIZ

Los grupos electrógenos a diesel usan como impulsor el motor de ignición por compresión, comúnmente conocido como MOTOR DIESEL, el cual en sus aspectos básicos, es similar en diseño y construcción a un motor de gasolina.

El motor diesel es un motor de combustión interna, en el cual el calor del combustible se convierte en energía de trabajo. El motor es un recipiente en el que se introduce una mezcla de aire y combustible para hacer que se quemara dentro de él. Es necesario vaporizar el combustible para que cada partícula se ponga en contacto con suficiente cantidad de oxígeno para quemarse totalmente.

La mezcla se expande con rapidez al quemarse y ejerce una presión hacia afuera. Esta presión puede aprovecharse para mover una parte del motor transformando en movimiento la energía liberada por la combustión.

Un motor diesel utiliza el calor producido al comprimir aire en la cámara de combustión hasta una presión muy elevada. Al final de la compresión, cuando la temperatura es máxima, se introduce combustible a presión en la cámara de combustión, donde se enciende al contacto con el aire sobrecalentado.

Dos de las Leyes de la Termodinámica tienen aplicación en los motores de combustión interna. La primera que dice que la energía se conserva y la segunda que dice que el proceso de transformación de la energía es irreversible. Así el motor quema combustible y produce calor que se convierte en energía mecánica para realizar trabajo. Sin embargo parte importante del calor producido en la cámara de combustión es absorbido por las paredes del cilindro o expulsada al exterior por el escape. Esta energía calórica es energía perdida durante la producción de potencia útil. Por esto, el rendimiento global de un motor viene limitado por el margen de temperaturas de trabajo del motor.

La Ley de Boyle Mariotte que dice que toda masa gaseosa se puede comprimir y que su volumen es inversamente proporcional a su presión, mientras permanece constante su temperatura. Esta Ley es importante en un motor, ya que en él se combinan cilindrada y relación de compresión.

La Ley de Gay Lussac dice que los cambios de temperatura de una masa gaseosa se traducen en cambios directos de volumen y presión, pues si se aumenta la temperatura de un gas manteniendo constante su volumen, aumentará su presión; o si se aumenta la temperatura y se mantiene constante la presión, aumenta el volumen del gas. Esta ley tiene aplicación directa en el funcionamiento del motor. Así, la energía calórica liberada en la cámara de combustión de un motor, provoca la expansión de la mezcla de aire y combustible. La cámara de combustión es de volumen reducido (relación de compresión), produciéndose un cambio de volumen relativamente grande durante el tiempo de explosión. Sin embargo, este aumento de volumen no se desarrolla totalmente, pues todo el volumen que necesitaría la expansión completa del gas al quemarse es lo que hace que aumente la presión considerablemente.

Por lo tanto el motor diesel está basado en las dos leyes anteriormente descritas. Así el aire (un gas) es aspirado en la cámara de combustión. La reducción de volumen durante la carrera de compresión, eleva la presión y la temperatura del aire. El combustible inyectado en este aire comprimido se inflama por la elevada temperatura de la compresión. La combustión eleva aún más esta temperatura y al expandirse los gases empujan con

fuerza el pistón en la carrera de explosión. La presión aplicada depende de la velocidad de la combustión y del calor retenido por los gases y que no se pierde en calentar las paredes de los cilindros, ni por el escape.

Como se observa las leyes de la termodinámica no se pueden ignorar si se desea comprender y lograr un buen funcionamiento del motor.

Para que el motor funcione se tiene que llenar el cilindro con la mezcla de combustible, la mezcla tiene que ser comprimida. La mezcla comprimida tiene que inflamarse desarrollando potencia por su expansión y los gases quemados tienen que ser evacuados del interior del cilindro. Esto es admisión, compresión, explosión y escape. Para obtener potencia del motor esta sucesión de tiempos se debe repetir incesantemente.

La serie completa de tiempos se llama ciclo del motor. Los ciclos de los motores pueden ser de dos o cuatro tiempos.

1.5.1 El Motor de Dos Tiempos

En el motor de dos tiempos el pistón completa el ciclo de trabajo con una carrera de subida y otra de bajada. El ciclo completo se traduce en una revolución de cigüeñal y la admisión de aire y el escape de los gases tienen lugar durante una parte de las carreras de compresión y explosión. (Ver figura 1.2)

En un motor diesel de dos tiempos de cada dos carreras del pistón una es de trabajo pues cada vez que baja el pistón lo hace por la combustión de la mezcla. En este motor solo se comprime el aire en el cilindro. El combustible se inyecta en el aire comprimido y se inflama por el calor de la combustión. Algunas veces se emplea un compresor para forzar la entrada de aire en el cilindro y el escape de los gases quemados. En la pared del cilindro hay unas lumbreras que quedan por encima del pistón cuando éste se encuentra en el punto más bajo de su carrera. Por estas lumbreras entra el aire en el cilindro cuando se abren al bajar el pistón (durante la admisión). La corriente de aire hacia las válvulas de escape hace salir por ellas los gases quemados al propio tiempo que llena el cilindro de aire fresco. Al subir el pistón cierra todas las válvulas (durante la compresión). Al estar cerradas todas las válvulas el aire es comprimido por el pistón. Cuando el pistón ha llegado casi al punto superior de su carrera de compresión, el combustible es inyectado en la cámara de combustión. El calor de la compresión inflama la mezcla y la combustión hace bajar el pistón. Al acercarse el pistón al punto muerto inferior de su carrera se abren las válvulas de escape, dejando de salir los gases quemados. Entonces el pistón destapa las lumbreras de admisión y el ciclo comienza de nuevo. El ciclo se completa con una sola revolución del cigüeñal o dos carreras del pistón, una de subida y otra de bajada.

El motor del grupo electrógeno en estudio está equipado con un soplador para forzar aire dentro de los cilindros que expulsan los gases de escape y suministran a

los cilindros aire fresco para la combustión. La pared del cilindro contiene una hilera de lumbreras que están por encima del pistón cuando éste está en la parte más baja de su carrera. Estas lumbreras admiten el aire del soplador en el cilindro tan pronto como el borde del pistón deja al descubierto las lumbreras, como lo ilustra la figura 1.2 (barrido).

El flujo unidireccional del aire hacia las válvulas de escape produce un efecto de barrido, dejando los cilindros llenos de aire limpio cuando el pistón vuelve a tapar las lumbreras de admisión.

A medida que el pistón sigue su carrera ascendente, las válvulas de escape se cierran y la carga de aire fresco es sujeta a compresión, como lo muestra la figura 1.2 (compresión).

Poco antes de que el pistón alcance su posición más alta, la cantidad de combustible requerida es inyectada a la cámara de combustión por el inyector de combustible, como lo ilustra la figura 1.2 (explosión). El intenso calor generado durante la alta compresión del aire enciende inmediatamente el combustible inyectado. La combustión continúa hasta que se queme todo el combustible inyectado.

La presión resultante fuerza al pistón hacia abajo en su carrera de explosión. Las válvulas de escape se abren nuevamente cuando el pistón está aproximadamente a la mitad de su carrera descendente, permitiendo que los gases quemados pasen al múltiple de escape, como lo muestra la

figura 1.2 (escape). Después, el pistón en su carrera descendente deja al descubierto las lumbreras de admisión y el cilindro vuelve a llenarse con aire limpio. Todo este ciclo de combustión se completa en cada cilindro por cada revolución del cigüeñal o, en otras palabras, en dos tiempos; por eso se llama un "ciclo de dos tiempos".

En los motores de cuatro tiempos se necesitan cuatro carreras de pistón, dos de subida y dos de bajada, para completar el ciclo. Por lo tanto el cigüeñal tiene que dar dos revoluciones para completar un solo ciclo.

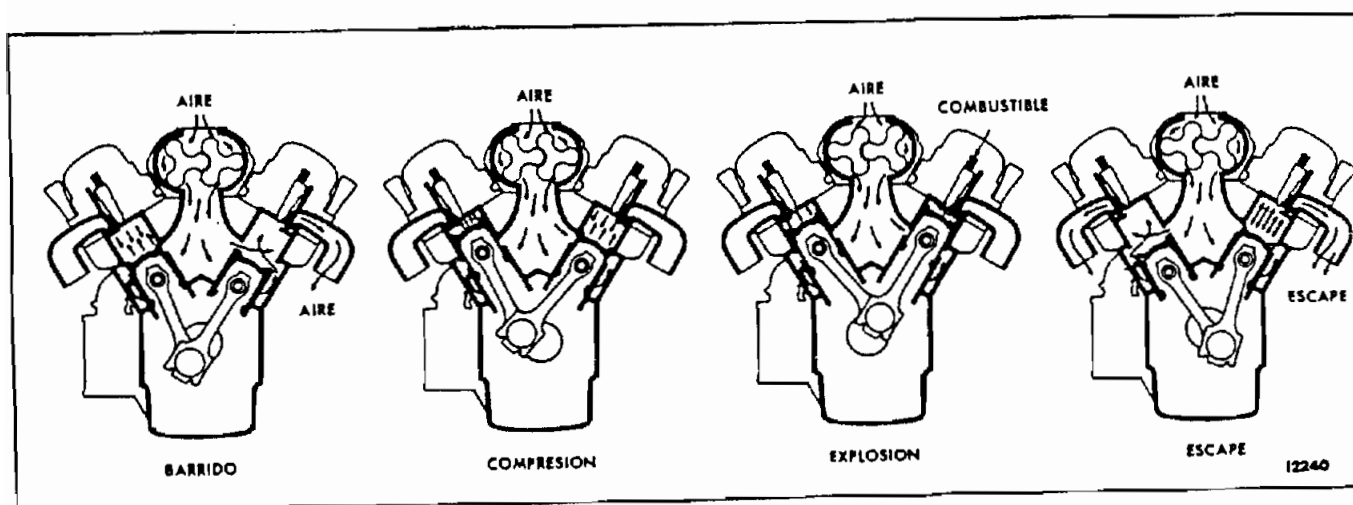


Figura 1.2 El Ciclo de Dos Tiempos

Al parecer el motor de dos tiempos tendría que producir el doble de la potencia producida por el de cuatro tiempos, pero no es así. En el motor de dos tiempos una parte de la potencia la absorbe el ventilador que fuerza la mezcla de aire y combustible para que entre a presión en el cilindro, además los gases quemados no se evacúan de una manera completa con lo que también se pierde algo de potencia. Entonces la potencia de un motor de dos tiempos comparada con la de un motor de 4 tiempos de la misma cilindrada solo es un 75 % mayor.

Para transmitir la fuerza el motor desarrolla dos tipos de movimientos, movimiento alternativo o de vaivén y movimiento rotatorio o circular (alrededor de un punto). El motor convierte el movimiento alternativo en rotatorio con la ayuda de cilindros, pistones, bielas y cigüeñales.

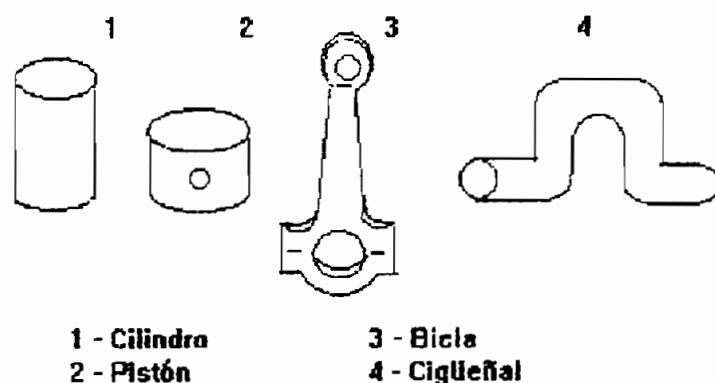


Figura 1.3 Componentes Básicos del Motor

El pistón y el cilindro se ajustan mutuamente para que el primero se deslice bien dejando muy poca holgura con la pared del cilindro. El cilindro está cerrado por arriba dejando espacio para la cámara de combustión. Los cilindros suelen cerrarse en el motor por medio de la culata. La biela es el eslabón que transmite al cigüeñal el movimiento del pistón. El cigüeñal tiene forma de asa simple o múltiple alineada sobre su eje de giro, que trabaja como una manivela. La carrera del pistón (recorrido lineal dentro del cilindro) depende del radio del "asa" del cigüeñal .

Para producir potencia de una manera continua los motores modernos constan de 4, 6, 8 o más cilindros. En cada cilindro se desarrolla la misma serie de tiempos. El volante acoplado al extremo posterior del cigüeñal acumula la energía cinética de los golpes del pistón sucesivos, siendo su inercia la que hace que el pistón vuelva a subir después de cada carrera.

1.5.2 Proceso de Combustión

No es posible un estudio completo del proceso de la combustión en un motor diesel, pero sí resulta interesante una breve descripción del mismo.

Se distinguen tres fases. Inmediatamente después de iniciada la inyección de combustible en la carga de aire del cilindro, se produce un período de retardo, similar al que se produce en el encendido de la chispa en un motor de gasolina. A este período le sigue otro de propagación

rápida de la llama por todo el cilindro, al que se le da el nombre de " periodo de combustión incontrolada". Una vez extendida la llama, la combustión de aceite que sigue entrando se realiza de manera controlada, pues la velocidad de combustión se ajusta regulando la velocidad de inyección del combustible.

El primer período es algo similar al del motor de gasolina, con la diferencia de que ahora se requiere que el aceite inyectado se vaporice a su entrada en el cilindro. Por tanto, parte del período de retardo está formado por el muy corto intervalo de tiempo requerido para la vaporización de las gotitas de aceite. En términos generales, se puede decir que la duración de este período de retardo depende de la naturaleza del combustible, presión y temperatura del aire en el cilindro en el momento de realizarse la inyección, y también, en parte, del grado de división del aceite atomizado. La segunda fase de la combustión depende de la turbulencia en el cilindro, limitándose la propagación de las llamas a las zonas en que la mezcla de vapor y aire es más o menos correcta. La tercera fase, puede controlarse, el factor esencial que regula la combustión en esta tercera fase es el movimiento relativo entre el aire y las gotitas de aceite introducidas. Por consiguiente, tiene una grandísima influencia el diseño de la cámara de combustión.

1.5.3 Tipos de Motores

Se clasifican de acuerdo a:

- La disposición de los cilindros

- La disposición de las válvulas
- Al tipo de combustible.

Por la disposición de los cilindros los motores pueden ser:

- De cilindros en línea (con todos los cilindros en línea sobre el cigüeñal).
- De cilindros en V , dispuestos en dos filas que forman una V sobre el cigüeñal.
- De cilindros opuestos, a uno y otro lado del cigüeñal.

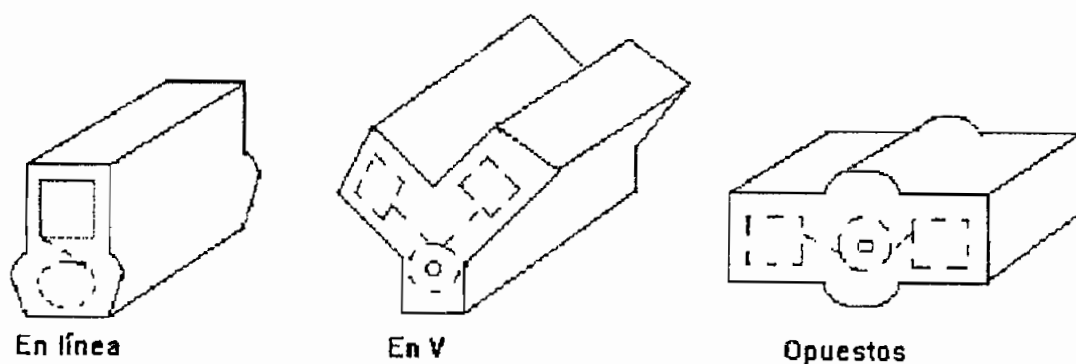


Figura 1.4 Tres formas en que pueden disponerse los cilindros

Por la disposición de las válvulas de admisión y escape, las cuales pueden estar en el bloque de cilindros o en la culata, los motores pueden ser tipo I, H, F, L y T.

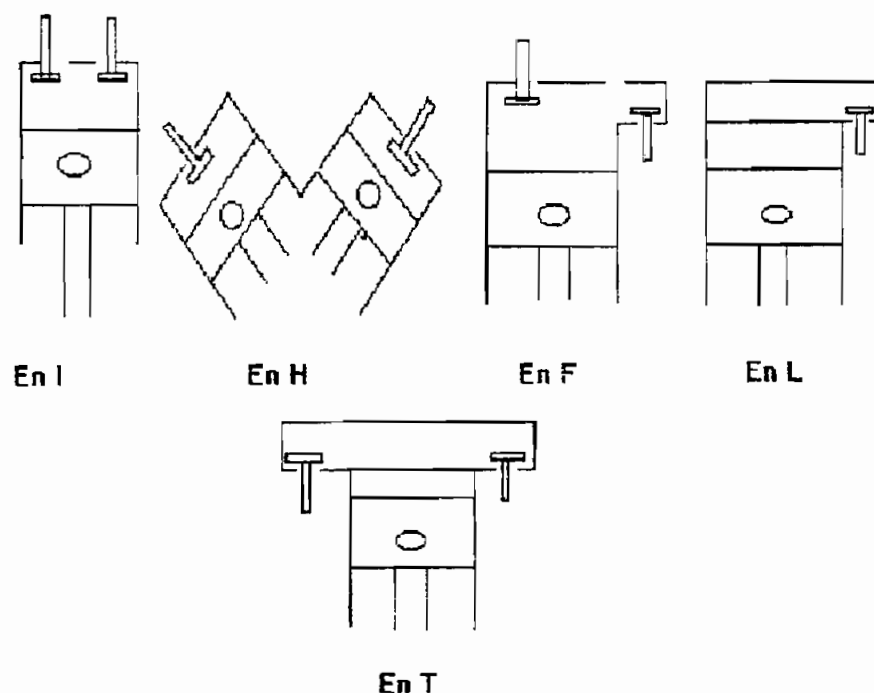


Figura 1.5 Cinco Maneras de disponer las válvulas

La relación volumétrica o relación de compresión, que es dato importante del motor, indica el número de veces que se reduce el volumen de aire por compresión.

La utilización de los motores puede ser estacionaria o móvil. El motor estacionario que es el que se aplica en generadores a diesel, tiene un emplazamiento fijo, suele descansar sobre una base y transmitir la fuerza a la carga por medio de un acoplamiento o transmisión. El mecanismo de transmisión es más simple que cuando se trata de máquinas auto-propulsadas.

1.6 DESCRIPCION DEL MOTOR

El motor a diesel marca General Motors, modelo 6045-C, 8V-71 con ocho cilindros en V, con ciclo de dos tiempos, de aspiración natural (no tiene turbo), con una velocidad de régimen de 1800 RPM y sus especificaciones generales son:

Diámetro del cilindro.....4.25 pulgadas
 Carrera.....5.00 pulgadas
 Relación de compresión..... 18.7 a 1
 Desplazamiento total.....568 pulgadas cúbicas
 Ciclo.....2 tiempos
 Número de cilindros.....8
 Disposición de los cilindros.....en V

En la figura 1.6 aparece un detalle del motor citado del cual se presenta una descripción de sus partes más importantes.

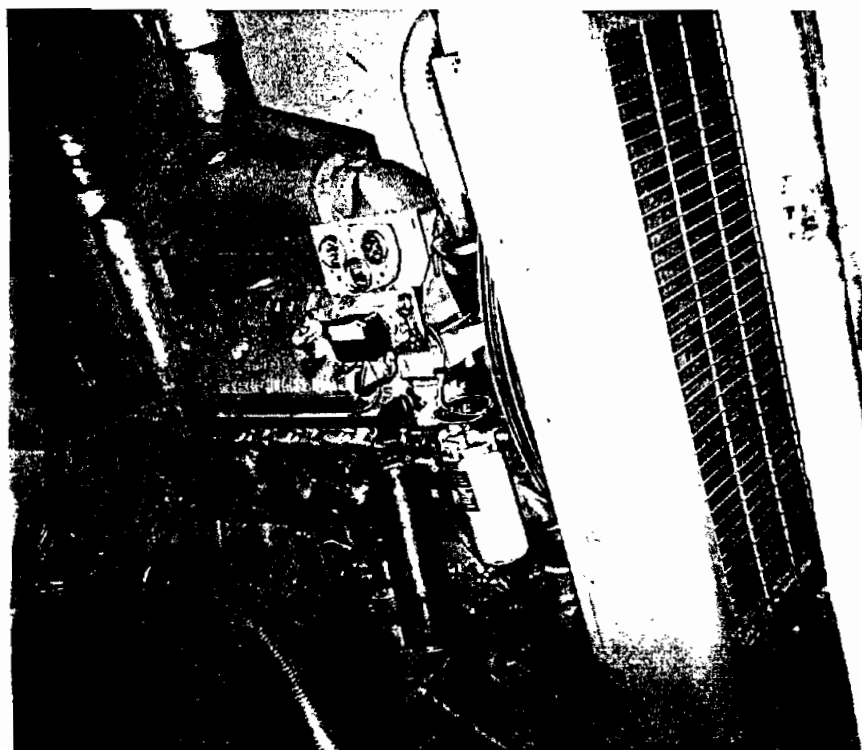


Figura 1.6 Motor General Motors

El motor está equipado con un enfriador de aceite, filtros de aceite lubricante, colador de aceite combustible, filtro de aceite combustible, depuradores de aire o silenciador, regulador de velocidad, ventilador, radiador, y motor de arranque.

Todos los cojinetes de bancada, de las bielas y del árbol de levas, así como otras piezas móviles dentro del motor reciben lubricación plena a presión. Una bomba del tipo de engranajes bombea el aceite desde el cárter a través de un tamiz de admisión por el filtro de aceite y de ahí al enfriador de aceite. Del enfriador, el aceite pasa por canalizaciones que se conectan con las tuberías de aceite en el bloque de cilindros y las culatas para distribución de los cojinetes, mecanismo de balancines y otras piezas funcionales.

El aire para el barrido y la combustión es suministrado por un soplador que bombea aire dentro de los cilindros de motor a través de la cámara de aire y las lumbreras de las camisas de los cilindros. Todo el aire que entra al soplador pasa primero por un depurador de aire o silenciador.

El arranque del motor es proporcionado, por un sistema de arranque eléctrico. El motor de arranque eléctrico es activado por una batería. Un generador con un regulador de voltaje apropiado, sirve para mantener la batería cargada.

La velocidad del motor se regula mediante un gobernador de tipo hidráulico.

1.7 SISTEMAS DEL MOTOR

Los sistemas más importantes del motor son los que se consideran a continuación:

- Sistema de Alimentación de Combustible
- Sistemas de Admisión y Escape o Sistema de Aire
- Sistema de Lubricación
- Sistema de Refrigeración
- Sistema de Regulación de Velocidad
- Sistema de Arranque

1.7.1 Sistema de Alimentación de Combustible

Este sistema tiene que suministrar el combustible al motor limpio y bien dosificado, debe poder almacenarlo y debe estar dotado de dispositivos que aseguren la alimentación del combustible al motor para su normal funcionamiento.

En el sistema de alimentación de diesel, el combustible se inyecta directamente en la cámara de combustión del motor donde se mezcla con el aire caliente comprimido, inflamándose en este momento. Por ello no se necesita ninguna chispa para inflamar la mezcla como ocurre en los motores de gasolina o gas natural. Así en lugar de carburador estos motores llevan bombas de inyección e inyectores.

Los componentes principales son depósitos de combustible para almacenarlo, bomba de alimentación para

mandar el combustible a la bomba de inyección, filtros para el combustible para mantenerlo limpio, la bomba de inyección dosifica e inyecta el combustible en el momento preciso. Los inyectores pulverizan el combustible dentro del cilindro. Durante el funcionamiento la bomba de alimentación de combustible toma éste del depósito y lo forza a través de los filtros.

El sistema de inyección lleva piezas mecanizadas de alta precisión para las que es muy importante que el combustible no contenga agua ni impurezas. Por ello se emplean filtros adicionales para el combustible aunque esto no resta importancia a la adquisición de un combustible muy limpio y una técnica de almacenado que lo proteja de contaminación. Desde el filtro, el combustible es empujado hacia la bomba de inyección que lo dosifica, lo somete a gran presión y lo manda en el instante preciso al inyector correspondiente. Cada cilindro lleva un inyector. Estos atomizan el combustible y lo pulverizan a alta presión, en el instante preciso, dentro de la cámara de combustión. El combustible tiene que llegar al inyector a gran presión para que éste lo pueda pulverizar finamente. Solo así se mezclará bien con el aire comprimido y se quemará totalmente.

El sistema de combustible del motor diesel en estudio, está compuesto por un filtro primario, una bomba, un filtro secundario, los inyectores, las cañerías de los inyectores, el distribuidor de alimentación y el colector de retorno integrados en el motor y la red de tuberías que interconectan a estos componentes.

En la figura 1.7 se muestra un diagrama esquemático de este sistema con sus partes mencionadas.

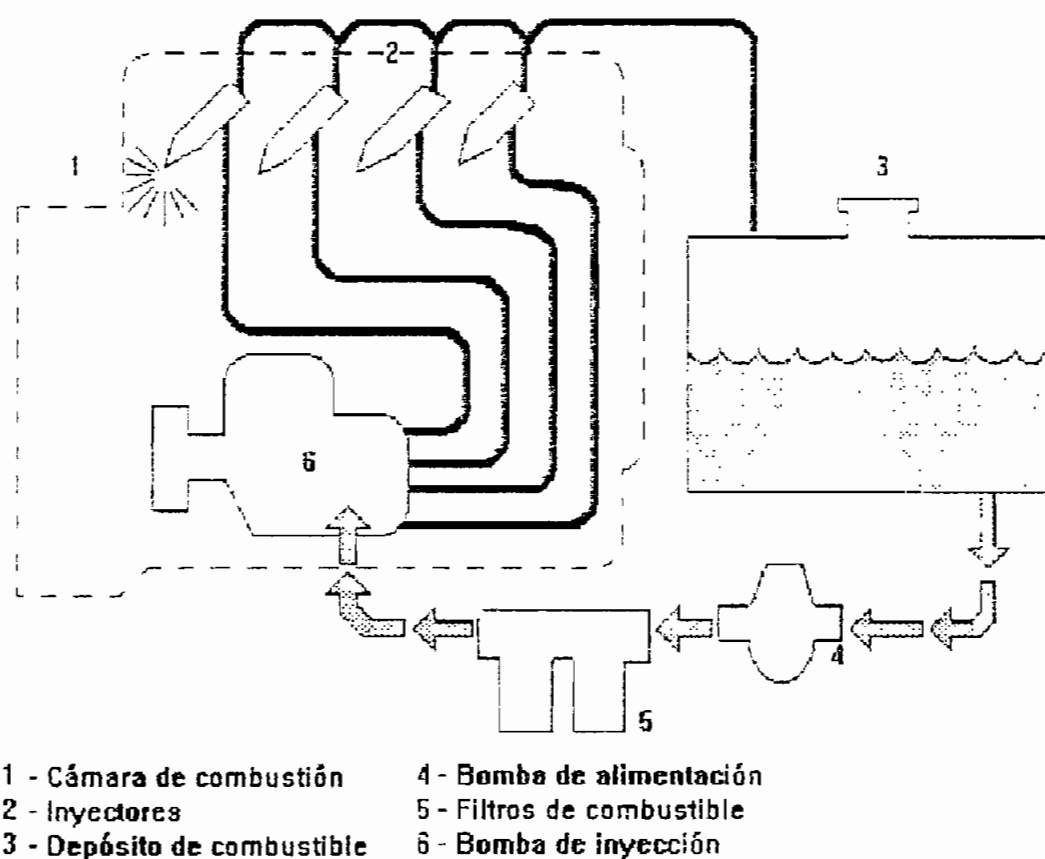


Figura 1.7 Sistema de Combustible

En el filtro primario se retienen las impurezas formadas por partículas gruesas (alrededor de 30 micrones de espesor), mientras que en el filtro secundario se retienen las partículas más finas (alrededor de 10 micrones).

1.7.1.1 El Sistema de Inyección

La inyección en los motores diesel tiene la importante función de suministrar, en el instante preciso, la cantidad correcta de combustible que debe atomizarse e introducirse en la cámara de combustión, de forma que ésta se realice en condiciones eficaces.

El sistema completo de inyección comprende el depósito de combustible, el filtro del mismo, la bomba para su alimentación, la bomba de inyección y el inyector.

El filtro de aceite es un elemento esencial del sistema de inyección, ya que deben protegerse los mecanismos internos de las bombas de cualquier partícula abrasiva que pudiera contener el combustible. La bomba de alimentación de combustible tiene por objeto transportarlo desde el depósito, pasando por el filtro, a la bomba de inyección, y puede ser de tipo alternativo o de membrana. En ambos casos se acciona mediante una leva, y se acopla a la bomba de inyección. La bomba de inyección de combustible lo suministra a presión muy elevada a los inyectores de los cilindros, de forma que la presión real de inyección (es decir, la presión a la salida del inyector) es del orden de 120 a 175 atmósferas. Cuando la bomba de inyección comienza su impulsión del combustible, la presión de este va aumentando hasta que logra levantar la válvula de su asiento, y la carrera ascendente de impulsión del émbolo obliga al combustible a pasar por los pequeños agujeros del inyector y entrar en la cámara de combustión del motor.

Todo inyector debe ser de "acción instantánea". En los sistemas modernos de inyección, el diseño cuidadoso de las válvulas, tanto del inyector como de la bomba de inyección, asegura la acción instantánea.

El sistema de inyección de este equipo en particular es por inyectores independientes los cuales son accionados por una leva propia, las cámaras de combustión son tipo abierto.

La bomba de transferencia es de desplazamiento positivo y de engranajes. Es accionada directamente por el motor y succiona el combustible desde un tanque diario a través del filtro primario.

El diesel que sale a presión de la bomba es forzado a cruzar el filtro secundario y luego pasa a los inyectores a través de un distribuidor de alimentación integrado en el motor y de las cañerías. En el interior de cada inyector hay un filtro pequeño por el cual pasa el combustible que luego sale por la boquilla pulverizadora.

En la figura 1.8 se muestra el corte de un inyector.

El exceso de combustible que ingresa a los inyectores sale de éstos por las cañerías de donde pasa al colector de retorno integrado en el motor para luego dirigirse al tanque diario. Las funciones de la línea de retorno son:

- Lubricar los inyectores,
- Enfriar los inyectores, y
- Eliminar el aire del sistema de combustible.

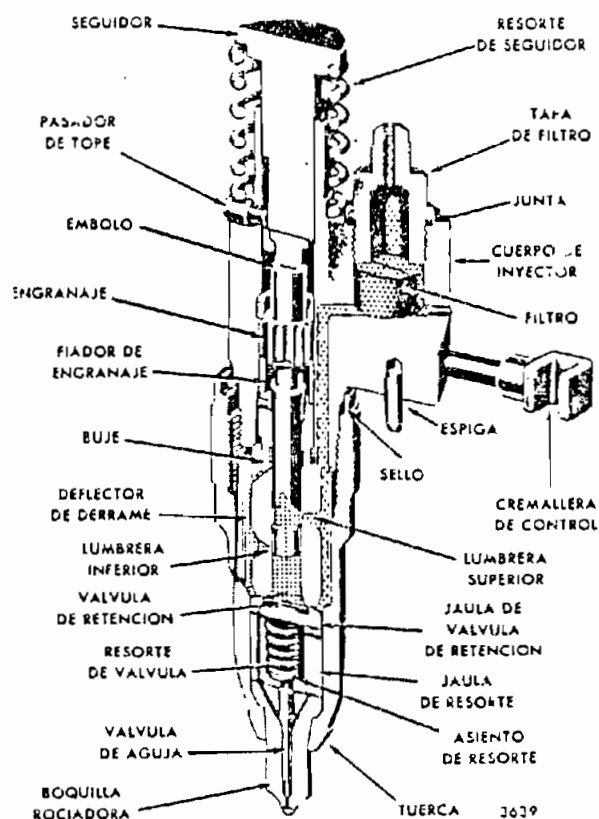


Figura 1.8 Vista recortada de un Inyector de Combustible

1.7.2 Sistema de Aire

Los sistemas de admisión y escape llevan la mezcla de aire y combustible hasta el motor y dan salida a los gases quemados.

El sistema de admisión suministra al motor aire limpio en la cantidad y a la temperatura apropiada para una buena combustión. Y consta de 5 componentes: purificador para el aire, sobrealimentador (opcional), colector de admisión, válvulas de admisión. Los purificadores de aire retienen

el polvo y la suciedad al ser atravesados por el aire aspirado por el motor. Se emplea también pre-purificadores para separar las partículas más gruesas que podrían obstruir el purificador.

Los sobrealimentadores o compresores se emplean en motores de dos tiempos para forzar la entrada de aire en el cilindro y expulsar más eficazmente los gases quemados. El sobrealimentador trabaja como una bomba que aumenta la presión del aire. Con un sobrealimentador de turbina se puede aumentar la potencia del motor al llenar el cilindro con mayor cantidad de aire que la que el motor puede aspirar en forma natural. El colector de admisión lleva el aire puro a todos los cilindros del motor. Las válvulas de admisión dejan que entre el aire en el cilindro correspondiente del motor diesel. Estas válvulas se abren y cierran por un dispositivo mecánico mandado por el árbol de levas.

El sistema de escape recoge los gases quemados y los manda a la atmósfera. Cumple tres funciones: disipa el calor de los gases, amortigua el ruido de las explosiones, conduce al exterior los gases quemados y sin quemar. Consta de tres componentes: las válvulas de escape, el colector de escape y el silenciador de escape. Las válvulas de escape se abren para dejar salir los gases quemados y normalmente funcionan por medio del árbol de levas. El colector de escape recibe los gases quemados de todos los cilindros para llevarlos al silenciador. El silenciador de escape amortigua el ruido producido por las explosiones de la mezcla.

Al ser el motor en estudio, de dos tiempos, en su ciclo no hay las carreras de admisión y expulsión, por lo que para producir estas etapas se utiliza un sistema llamado de barrido que es llevado a cabo por un soplador.

En la figura 1.9 se muestra un corte del motor en el que aparece un soplador.

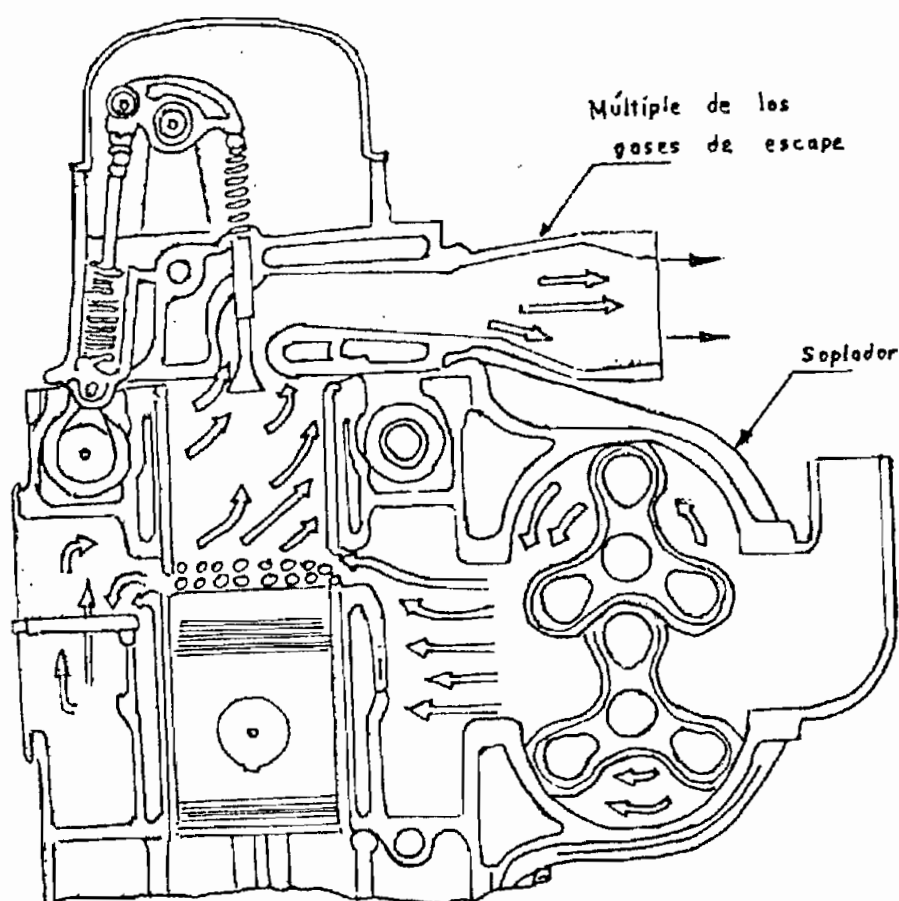


Figura 1.9 Corte del Motor

En este sistema el motor impulsa directamente al soplador, el cual está integrado por dos rotores de tres lóbulos helicoidales cóncavos, al girar crean una corriente de aire que es introducida en el colector o

cámara de baja presión, desde esta cámara el aire ingresa a los cilindros a través de unos orificios laterales llamados lumbreras produciendo el efecto de barrido de los gases de escape producto de la combustión, los cuales son expulsados al exterior por las válvulas de escape ubicadas en la culata y dejando al cilindro lleno de aire fresco para una nueva combustión, este aire contribuye en alguna medida a enfriar las partes internas del motor. Este sistema de barrido se llama unidireccional porque tanto los gases de escape como el aire fresco se mueven en una misma dirección que en este caso es hacia la parte superior de los cilindros. La limpieza del aire inyectado para la combustión se hace en dos depuradores con baño de aceite de tipo Servicio Ligero ubicados sobre el soplador similares a los de la figura 1.10.

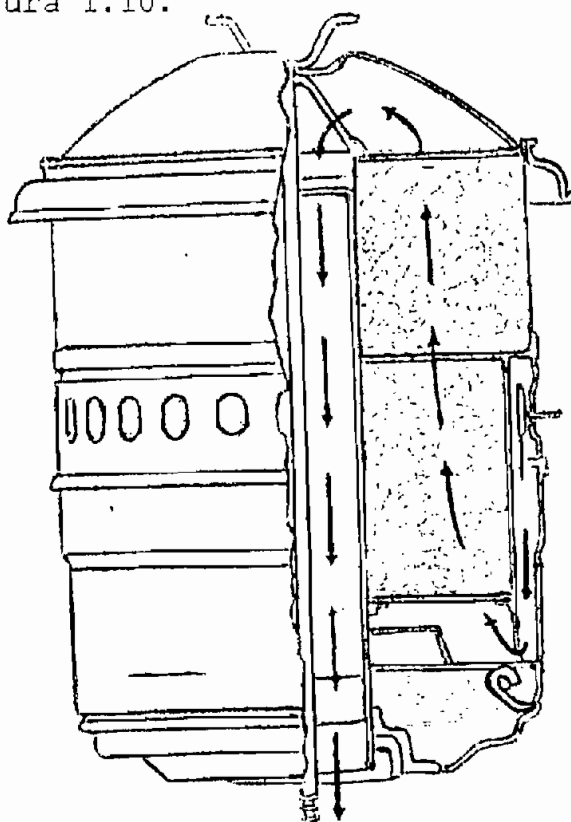


Figura 1.10 Depurador de Aire

1.7.3 Sistema de Lubricación

Sus funciones son:

- Reducir la fricción entre las piezas en movimiento
- Absorber y disipar el calor
- Hacer más hermético el cierre de los segmentos contra la pared del cilindro.
- Lavar las piezas en movimiento
- Hacer menos ruidoso el funcionamiento del motor

El aceite del sistema de lubricación realiza estas funciones a la vez. Sin aceite el motor no tardaría en desgastarse, sobrecalentarse y agarrotarse. Pues además de reducir la fricción al formar una película entre las piezas en movimiento el aceite absorbe y disipa el calor de esas mismas piezas. Este sistema puede funcionar por salpicado de aceite sobre las piezas en movimiento o forzando el paso de éste a presión por unas canalizaciones practicadas en el interior de las piezas. En algunos motores se emplean ambos métodos a la vez.

El cárter del motor es el depósito donde se almacena y enfría el aceite de lubricación. El cárter debe tener orificios de ventilación para que no aumente la presión dentro de él por los gases que consiguen escaparse entre cilindro y pistón. En los motores modernos la tubería de ventilación del cárter reconduce estos gases al sistema de admisión para reducir la contaminación del aire.

En el motor de estudio, este sistema está compuesto por una bomba, un enfriador de aceite lubricante, un filtro

tipo flujo total, la red de conductos y las válvulas integradas en el motor. En la figura 1.11 se presenta un detalle esquemático de este sistema.

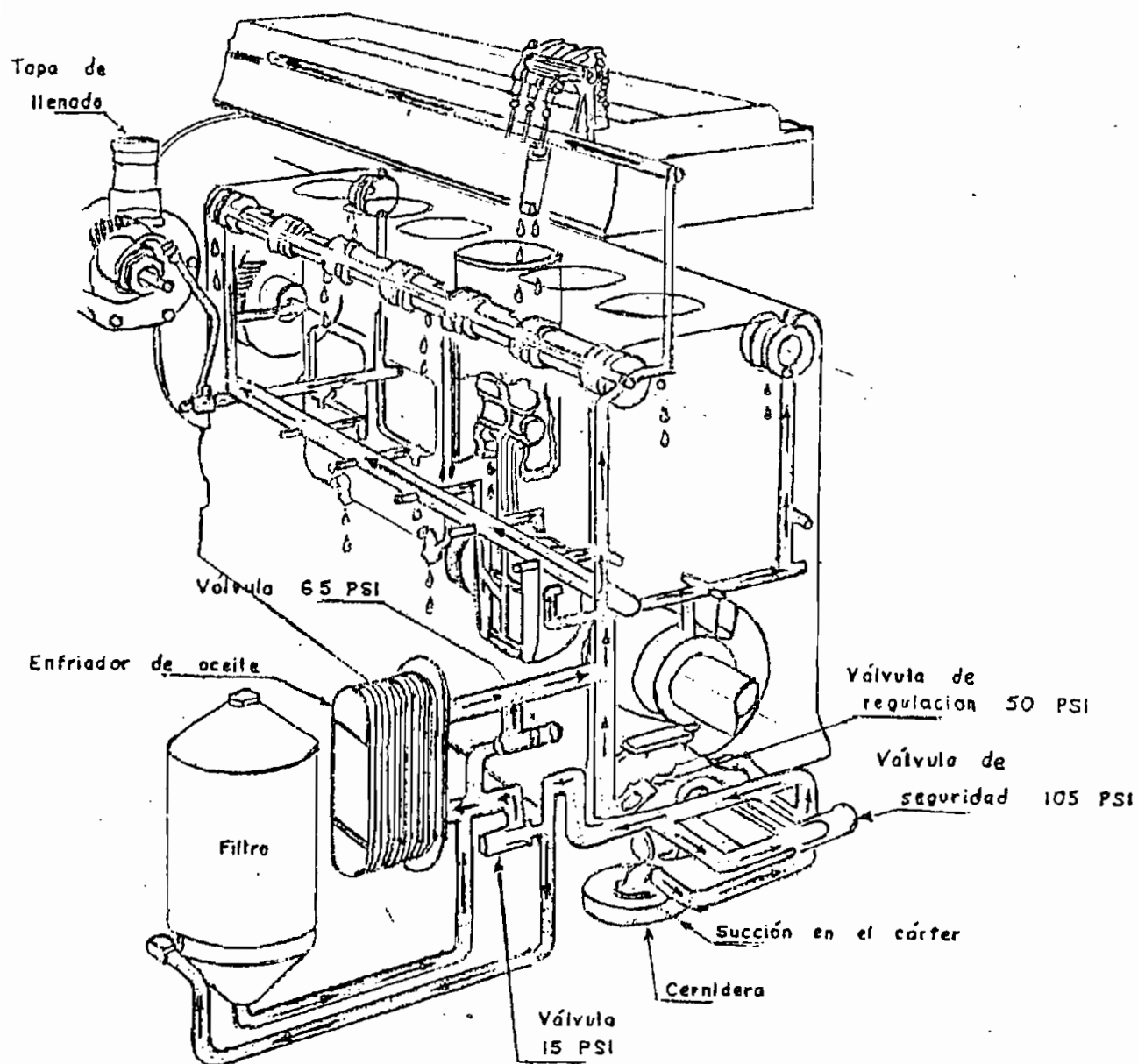


Figura 1.11 Sistema de Lubricación

La bomba de aceite es de engranajes y está accionada por una rueda dentada ubicada en el extremo frontal del cigueñal, en la base del filtro hay una válvula de derivación o interconexión que se abre a presiones superiores a 15 psi en caso de que el filtro se encuentre obstruido, todo el lubricante suministrado para el motor atraviesa el filtro librándose de las impurezas sin restringir su flujo normal.

1.7.4 Sistema de Refrigeración

El sistema de refrigeración impide que el motor se sobrecaliente y mantiene la temperatura óptima para el funcionamiento del motor .

Durante el funcionamiento del motor éste produce mucho más calor del necesario por lo que el sistema de refrigeración elimina el exceso de calor para evitar la avería de piezas vitales por sobrecalentamiento. La regulación de temperatura la mantiene en el punto necesario para una buena combustión de la mezcla durante el funcionamiento del motor. Después de arrancar el motor frío éste debe calentarse lo más rápido posible y durante las operaciones máximas el motor debe enfriarse normalmente.

Existen dos tipos de refrigeración: por aire y por líquido que se hace pasar alrededor del motor. La refrigeración por aire se emplea principalmente en motores pequeños y en los de aviación. Para canalizar y distribuir el aire se emplean pantallas, túneles y

ventiladores. La refrigeración por líquido emplea agua como refrigerante. El agua forma un manto alrededor de los cilindros y de la culata. El calor de las paredes lo absorbe el agua que se hace circular hacia el radiador. El aire que atraviesa el panel del radiador disipa el calor del agua. El agua enfriada vuelve a entrar en el bloque de cilindros para continuar disipando calor.

Para el caso de estudio, el motor es enfriado por agua para lo que cuenta con un sistema de refrigeración de circuito cerrado, cuyos componentes son: un radiador, un ventilador y una bomba. En la figura 1.12 se presenta un esquema del sistema en el que se indican los flujos del refrigerante.

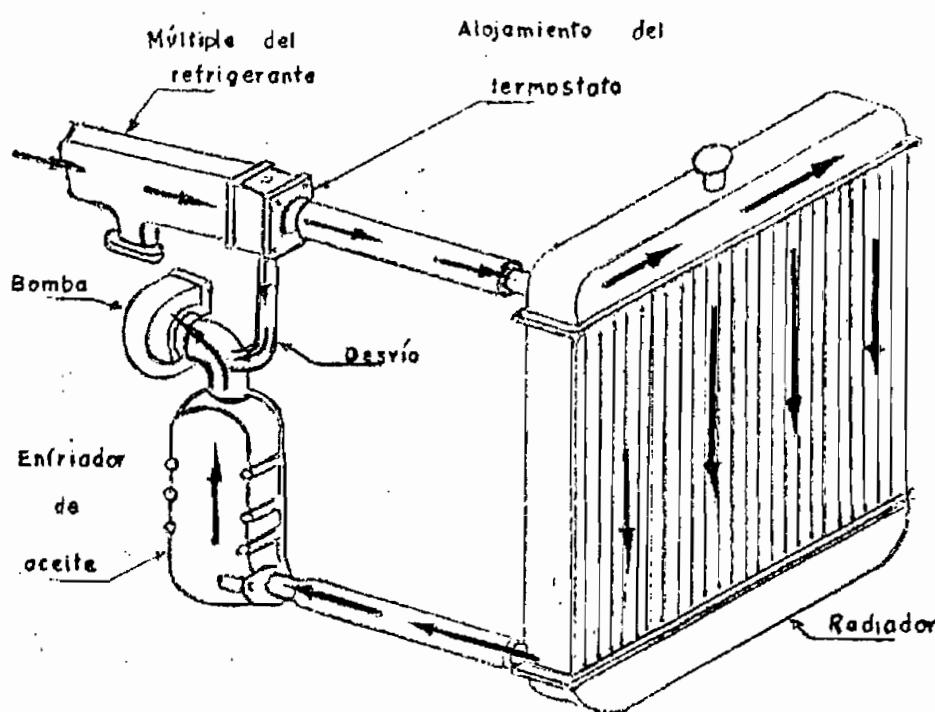


Figura 1.12 Sistema de Refrigeración

El radiador es de tipo tubular y está montado en el motor, el ventilador es de tipo soplante y es accionado por el motor por medio de una transmisión con una polea de doble correa trapezoidal que hay en el extremo del cigüeñal. El aire es aspirado desde la parte posterior del grupo y es impulsado a través del radiador desde el lado del motor. La bomba es centrífuga con un impulso de álabes radiales y es impulsada directamente por el motor por medio de engranajes acoplados en el soplador. A la salida del múltiple que recoge el agua de las camisas hay un termostato que mantiene la temperatura de operación entre 160 y 185 F, cuando el motor arranca o el refrigerante está bajo la temperatura normal de operación el termostato restringe el paso del agua hacia el radiador, con lo que ella debe circular por una derivación retornando directamente al motor.

1.7.5 Regulación de Velocidad

El sistema de regulación mantiene el motor funcionando a un número de revoluciones constante. El regulador varía la cantidad de mezcla suministrada al motor según la carga. El objeto de este dispositivo es hacer que el motor entregue en todo momento la potencia exigida por la carga, sin que varíen sus revoluciones. Los reguladores pueden ser de tipo mecánico, hidráulico o eléctrico.

Para el control de su velocidad el motor en estudio cuenta con un regulador hidráulico marca WOODWARD, cuyos datos de placa son:

Parte No. 041817
ENG. MFG NO. 5108295

Serie No. 693166

El regulador está montado en la parte lateral del motor siendo accionado directamente por el eje del rotor superior del soplador, mantiene uniforme la velocidad del motor bajo condiciones de carga variable con una caída mínima de velocidad actuando directamente sobre las cremalleras de los inyectores de combustible. En el proceso de arranque el gobernador permite el paso total de diesel hacia las cámaras de combustión y luego que el motor se ha prendido regresan las cremalleras de los inyectores a la posición requerida para funcionamiento en vacío.

El regulador recibe del motor aceite lubricante a presión el cual luego de lubricar todas las partes móviles internas del regulador retorna al cárter, en las tuberías de entrada y salida están instaladas sendas válvulas eléctricas de paso tipo solenoide las que son comandadas automáticamente por un dispositivo de control del grupo de emergencia.

1.7.6 Sistema de Arranque

El arranque del motor diesel es eléctrico y dispone de un motor de arranque de 24 voltios de corriente continua marca Delco Remy, una batería de 24 V-200 A/hora, un dínamo y un regulador para mantener la carga de la batería y un contactor eléctrico tipo solenoide. El motor tiene un embrague de sobremarcha con un disparador tipo solenoide montado en el motor.

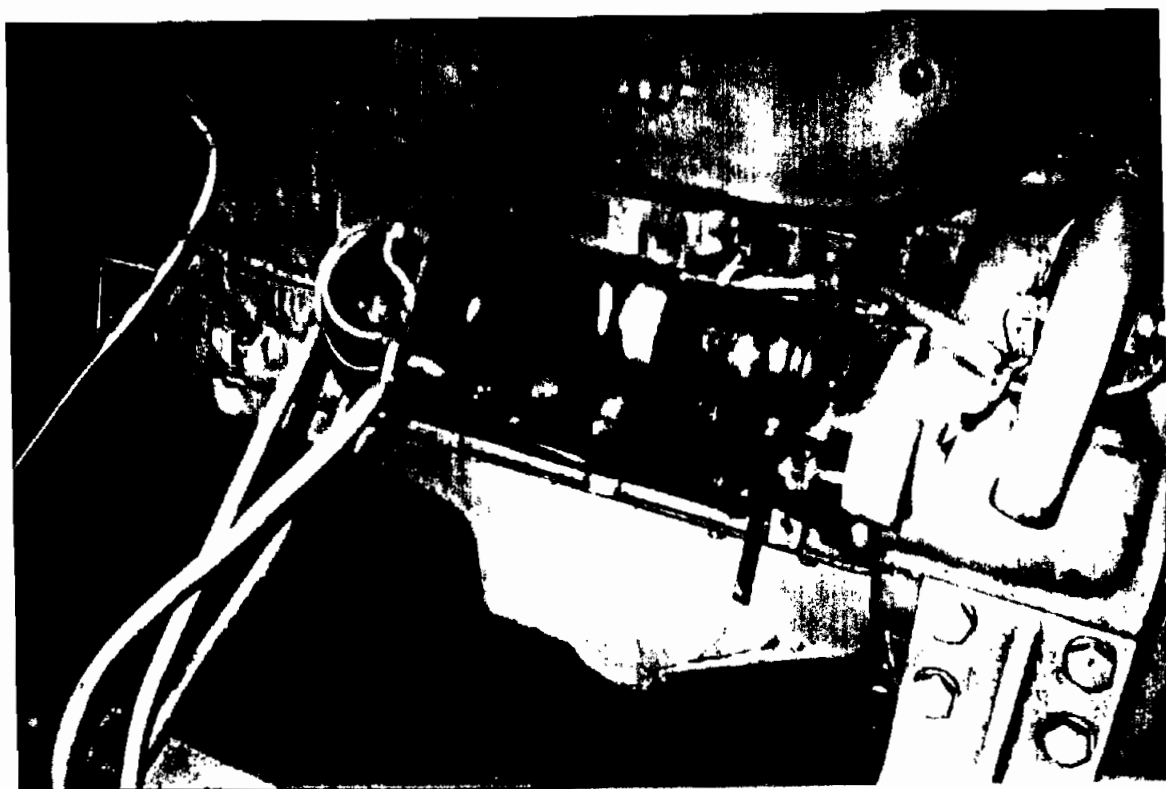


Figura 1.13 Motor de Arranque

1.8 EL COMBUSTIBLE DIESEL.

Es un derivado de grado comparativamente ligero, del petróleo crudo. Debe tener baja viscosidad (resistencia al escurrimiento) de manera que fluya fácilmente a través del sistema de bombeo e inyección y se atomice o vaporice al ser inyectado en la cámara de combustión. Si fuera demasiado viscoso, no se fraccionaría en partículas lo bastante finas y en consecuencia, la combustión sería incompleta e irregular el funcionamiento del motor. Por otra parte debe tener la suficiente viscosidad para lubricar satisfactoriamente las partes móviles del sistema

de combustible y ayudar al sellado de dichas partes para evitar fugas.

El aceite Diesel se gradúa por el índice o número de cetano que es una medida de sus cualidades de ignición. Un bajo número de cetano significa que el combustible debe ser sometido a una temperatura relativamente alta antes de que se encienda. Un número elevado significa que se encenderá a temperaturas relativamente bajas. Aproximadamente se requiere para un motor Diesel un combustible con un índice de cetano de 45 (clase A2) o de 50 (clase A1) grados.

El aceite debe ser tan puro como sea posible, con un contenido muy bajo de azufre. Debe estar bien filtrado, pues pequeñas cantidades de polvo o material extraño pueden obstruir rápidamente los pequeños conductos del combustible y las aberturas de las toberas.

Así pues, en combustibles (Diesel) para motores de compresión-inyección son importantes las siguientes variables: punto de inflamación, contenido de agua, impurezas y cenizas, punto de fluidez, corrosión, viscosidad, número cetano y poder calórico.

Como resultado de pruebas realizadas para determinar el valor calórico de combustibles diesel comercializados en el país [22], se han obtenido los siguientes valores:

| COMBUSTIBLE | VALOR CALORICO (Cal/g) |
|--------------|---------------------------|
| Diesel Anglo | 10855 |
| Diesel Gulf | 10876 |

1.9 DESCRIPCION DEL GENERADOR

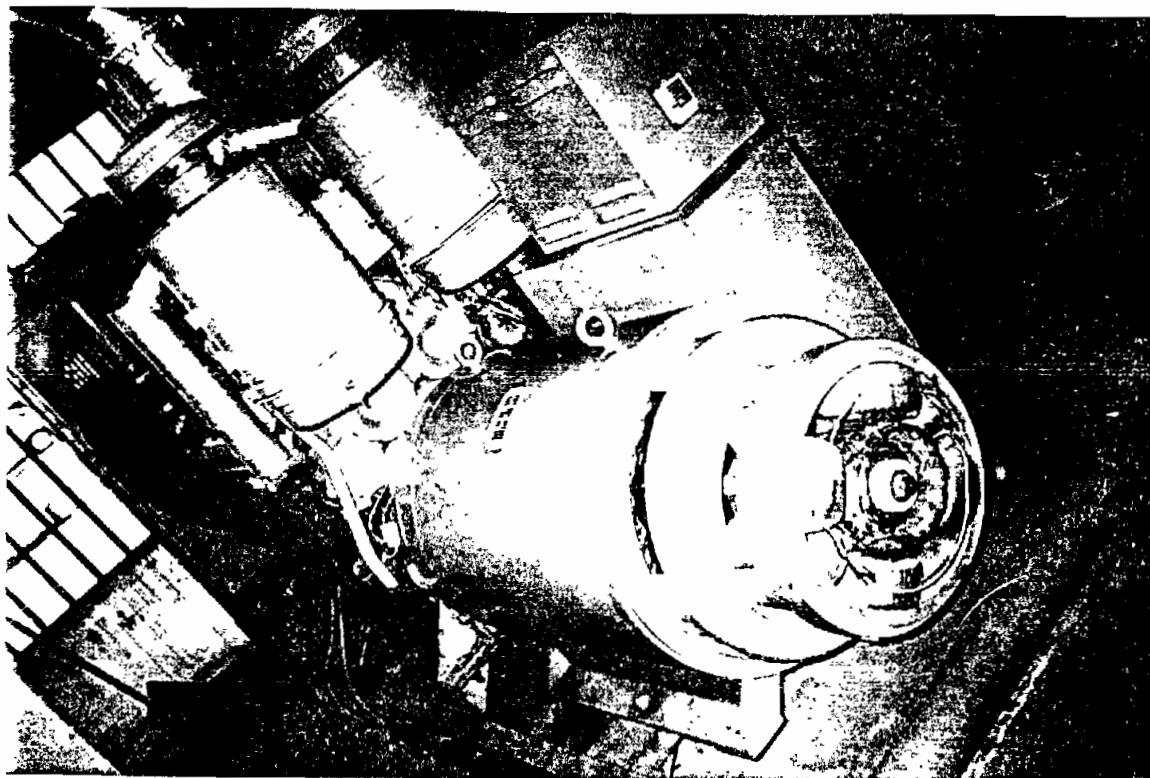


Figura 1.14 Generador KATO

El generador conectado al motor diesel es marca KATO, tiene cuatro polos, es autoexcitado y sus especificaciones generales son:

| | | |
|---|------------|------------------|
| 150 KW | 187 KVA | 120/208 voltios |
| 519 A/fases | 1.800 RPM | 60 ciclos |
| 3 fases | | calentamiento 50 |
| Factor de potencia 0.8 | | |
| Corriente de campo del alternador 11.95 A | | |
| modelo 150502E | tipo 11038 | |

Excitatriz de corriente continua

| | |
|--------------------------------------|---------|
| Potencia | 2.500 W |
| Corriente de campo de la excitatriz | 0.5 A |
| Voltaje | 125 V |
| Corriente de campo para el generador | 20 A |

Bobinas de campo shunt o en derivación

modelo 2.5JAGE

tipo 11024

Serie No. 55397-1

En la figura 1.15 se muestra un detalle del generador con sus circuitos más importantes.

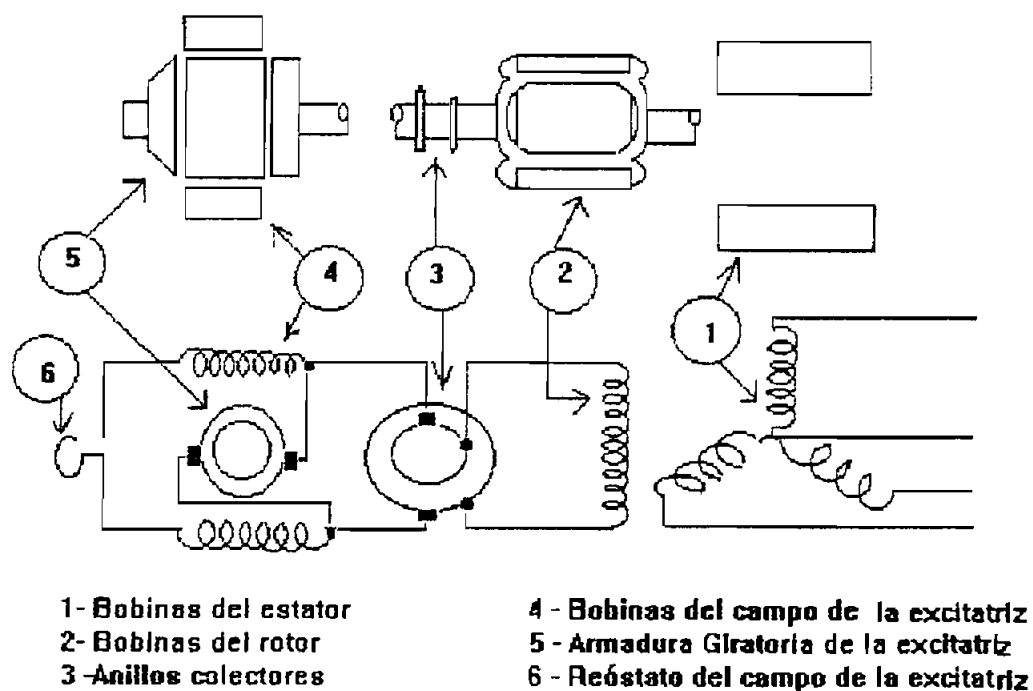


Figura 1.15 Esquema del Generador

1.10 SISTEMAS DEL GENERADOR

Los sistemas importantes de considerar en el generador son:

- Máquina Sincrónica
- Sistema de Excitación
- Sistema de Regulación de Voltaje

1.10.1 Máquina Sincrónica

La máquina sincrónica es la configuración más diversificada de la máquina. El término sincrónica o síncrona se refiere a la relación entre la velocidad y la frecuencia de esta máquina, que se expresa con la ecuación:

$$\text{rpm} = 120 f/p \quad (1.1)$$

Donde: rpm = Velocidad de la máquina en revoluciones por minuto.

f = Frecuencia de la fuente aplicada en Hz.

p = Número de polos de la máquina.

El generador sincrónico es el dispositivo mediante el cual se lleva a cabo exclusivamente la conversión de energía de forma mecánica a eléctrica. Existe generación solo cuando hay movimiento relativo entre el devanado de armadura, generalmente estacionario y un campo magnético, por lo general rotativo; debido a la acción de un motor primario, primotor o máquina impulsora.

El devanado inductivo está alimentado por una fuente de corriente continua y la velocidad de operación es constante.

La máquina sincrónica opera solo en velocidad sincrónica. Está constituida por 2 componentes básicos: Una parte estacionaria o ESTATOR y otra giratoria o ROTOR separados por un entrehierro. Por mayor practicidad y economía, generalmente, los polos excitados por corriente continua, están colocados en la parte giratoria de la máquina denominado rotor. El inducido o armadura de AC está colocado en la parte fija llamado estator.

En cuanto al diseño existen 2 tipos fundamentales de máquina sincrónica que son:

- a) El tipo de polos salientes
- b) El tipo cilíndrico

Generalmente, el tipo de polos salientes se usa cuando el número de polos es mayor o igual a 6; es decir, la velocidad del rotor no es tan grande ya que esto simplifica su construcción. Para máquinas de alta velocidad se acostumbra el tipo cilíndrico por razones de resistencia mecánica, comodidad y menor esfuerzo del devanado de excitación el cual se distribuye en toda la superficie del rotor.

Las máquinas de polos salientes están provistas ordinariamente de un devanado amortiguador en el rotor para amortiguar las oscilaciones del rotor durante las

condiciones transitorias y que facilite el funcionamiento en condiciones de carga desequilibrada.

Si una máquina de polos salientes de tipo general, tiene circuitos del rotor adicionales tales como collares polares de cortocircuito, remaches, etc. se debe considerar si el efecto de estos circuitos es significativo o no, para según ello clasificar la máquina como una con devanados de amortiguamiento o sin ellos. El devanado amortiguador consiste de conductores o barras de cobre colocados en las ranuras de expansiones polares y conectados entre sí por segmentos en cortocircuito. En las máquinas modernas, los segmentos de los polos individuales están generalmente conectados a anillos comunes constituyendo un devanado de jaula análogo al utilizado en las máquinas asincrónicas con rotor jaula.

Las máquinas sincrónicas se encuentran acopladas a turbinas hidráulicas, máquinas de vapor y motores de combustión interna tales como los motores diesel y también a máquinas accionadas por gas subproducto de las fábricas de acero. Las máquinas sincrónicas pequeñas de 4 polos se construyen con polos salientes, este es el caso en estudio.

1.10.2 Sistema de Excitación

El sistema de excitación es un componente importante del generador sincrónico, pues es la fuente que alimenta corriente continua al bobinado de campo del generador. Además de mantener la intensidad de corriente rotórica en

el valor necesario durante una perturbación o cambio de carga, el sistema de excitación debe restablecer tan rápidamente como sea posible el valor prescrito de voltaje en los bornes del generador desde que se produce una variación de voltaje. Esto lo debe hacer conjuntamente con el sistema de regulación de voltaje el cual se describirá a continuación.

El sistema de excitación del generador en estudio utiliza un generador de corriente continua (o dínamo) como excitatriz, el cual tiene sus bobinas de campo conectadas de tal forma que el generador de DC es autoexcitado.

Siendo la excitatriz una dinamo autoexcitada, ésta utiliza parte de su propia salida para suministrar parte de su corriente de campo. En este tipo de excitatriz su bobinado de campo se conecta mediante un reóstato denominado de campo, en paralelo con el circuito de armadura formando de esta manera un circuito paralelo o shunt. Por lo tanto se tiene que solo una pequeña parte del flujo de la corriente de armadura circula por las bobinas de campo de la dinamo, mientras que el resto de la corriente se dirige al campo del generador sincrónico mediante las escobillas. Por su configuración esta dinamo es excitada aunque no haya carga, es decir, aunque no se encuentre conectado su circuito de armadura al bobinado de campo del generador sincrónico.

Los datos de placa de la excitatriz del grupo de emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica son:

EXCITATRIZ DE CORRIENTE CONTINUA

2.500 wattios

20 amperios

125 voltios

0.5 A (corriente de campo de excitatriz)

Bobinas de campo shunt o en derivación

modelo 2.5JAGE tipo 11024

Serie No. 55397-1

KATOLIGHT CORPORATION

MANKATO , MINN. USA

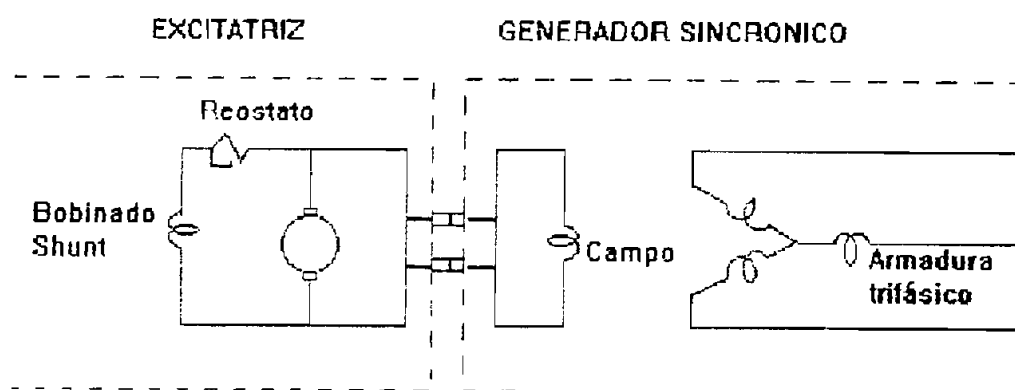


Figura 1.16 Generador Autoexcitado

1.10.3 Sistema de Regulación de Voltaje

Su objetivo es mantener el voltaje constante en los bornes de armadura del generador, para ello continuamente debe sensar la señal de voltaje en los terminales del

generador y la compara con una señal de referencia para obtener una señal de error, dependiendo de la magnitud de esta señal de error el sistema de regulación de voltaje actúa sobre la corriente que entrega la excitatriz al campo del generador para variar el voltaje generado y mantenerlo estable ante perturbaciones o variaciones de carga.

El regulador de voltaje del generador de estudio controla el voltaje generado por medio de un reóstato que regula la corriente que energiza a las bobinas de campo de la excitatriz determinando la cantidad de energía que pasa al rotor del alternador.

Los datos de placa del regulador de voltaje del generador son:

Marca : KATOLIGHT
Serie: 55397
Panel: 60055220-14
Regulador: RO
Voltios AC : 120/208
Voltios DC: 125
Frecuencia : 60 Hz

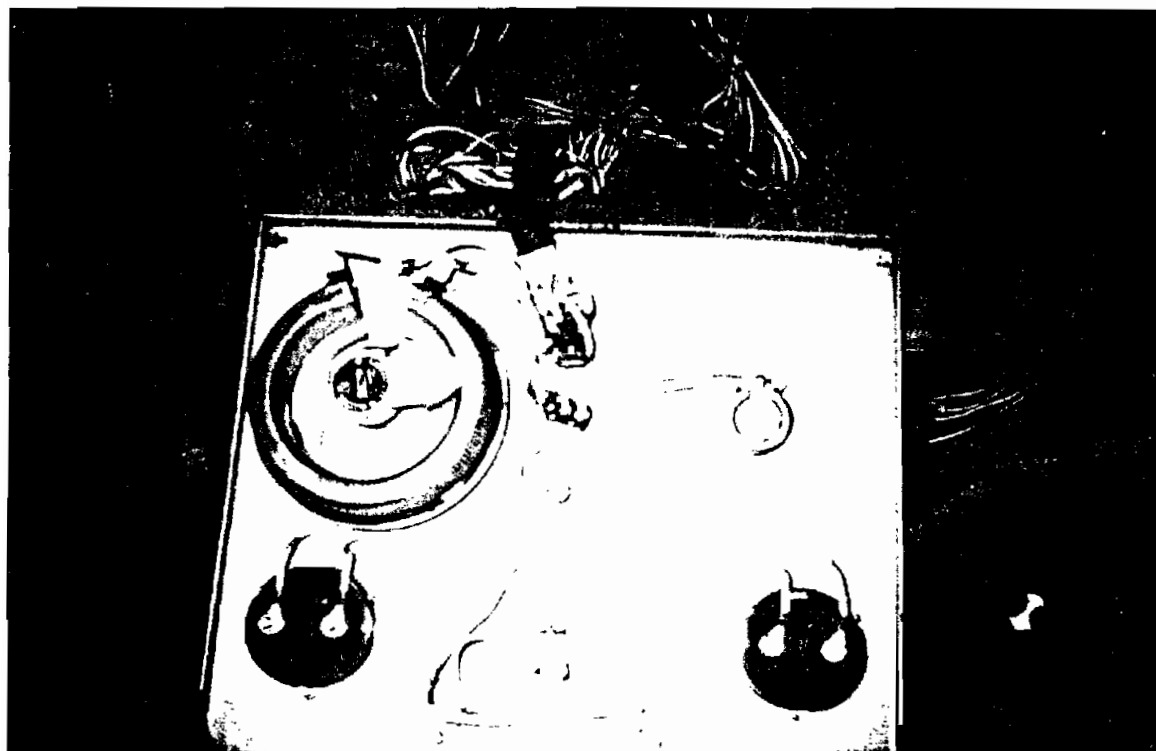
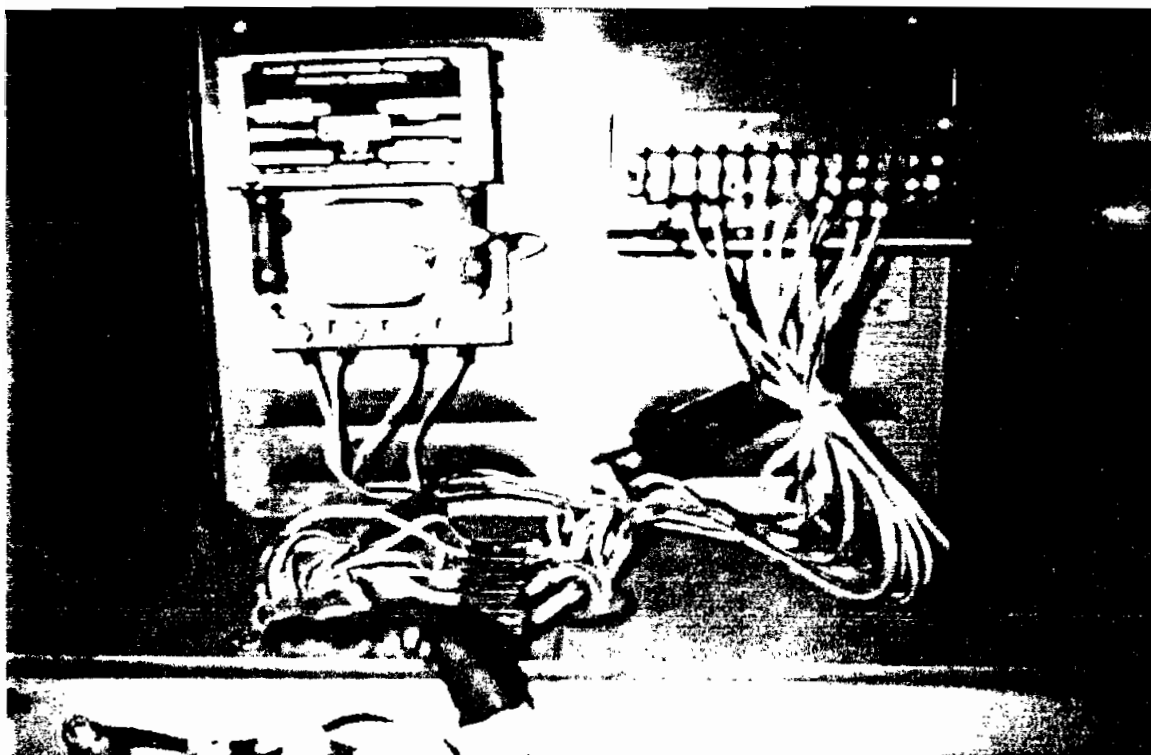


Figura 1.17 Regulador de Voltaje

1.11 DESCRIPCION DEL TRABAJO DE TESIS

En el capítulo I se realiza una descripción total del grupo de emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, tanto la parte del motor como la del generador con sus respectivos sistemas y además se presenta una introducción al funcionamiento de los motores diesel.

En el capítulo II se describen los métodos utilizados y las pruebas realizadas para obtener los parámetros eléctricos y mecánicos del grupo de emergencia necesarios para su estudio dinámico. Se presentan los resultados obtenidos junto a los circuitos utilizados para su obtención.

En el capítulo III se presentan los procedimientos aplicados para obtener las funciones de transferencia correspondientes a los diferentes sistemas del grupo de emergencia, de esta manera se determinan los valores de las constantes requeridas para su correspondiente simulación. Además se realiza el estudio de carga de la Facultad de Ingeniería Eléctrica para definir su modelación.

En el capítulo IV se procede a la simulación del Sistema Facultad de Ingeniería Eléctrica, con los valores obtenidos en los dos capítulos anteriores, colocando el generador de emergencia en una barra de generación identificada como oscilante y la carga conectada al tablero de transferencia en una barra de carga. Se analiza el comportamiento del generador de emergencia ante variaciones de carga, rechazo de carga y cortocircuito en el tablero de

transferencia, y en la mitad de la línea que une el tablero y el generador mediante la simulación con un programa de estabilidad transitoria y se comparan los resultados con las pruebas de variaciones de carga y rechazo de carga realizadas experimentalmente.

Por último en el capítulo V se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el transcurso de la realización de este trabajo de tesis.

CAPITULO II

DETERMINACION DE PARAMETROS ELECTRICOS Y MECANICOS

2.1 PARAMETROS ELECTRICOS

La máquina sincrónica está caracterizada por un número considerable de reactancias, constantes de tiempo y resistencias. Sin embargo, es necesario hallar las constantes, reactancias y resistencias desde el punto de vista práctico para realizar la simulación del grupo de emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

2.1.1 Conceptos Fundamentales

El análisis de la operación de máquinas sincrónicas bajo condiciones balanceadas o desbalanceadas puede considerarse basado en dos fundamentos: el método de componentes simétricas y la teoría de dos reacciones de Blondel.

La teoría de dos reacciones de Blondel's trata principalmente con corrientes de secuencia positivas. La onda de flujo que produce la corriente de secuencia positiva es estacionaria respecto al rotor y por lo tanto la posición relativa de la onda de flujo y la posición relativa del rotor es la misma. Si la posición relativa del rotor o de la onda de flujo es tal que una máxima cantidad de ese flujo enlaza el devanado de campo tendiendo a magnetizar o desmagnetizar el rotor en los ejes de los polos de campo, entonces esa corriente es una corriente de

eje directo y está afectada por una reactancia de eje directo. La corriente de secuencia positiva que tiende a magnetizar o desmagnetizar el rotor en el eje interpolar donde no hay flujo neto de encadenamiento con el devanado de campo, es una corriente de eje en cuadratura y está afectado por una reactancia de eje en cuadratura.

Para condiciones transitorias, la corriente de secuencia positiva es importante ya sea que la corriente de armadura sea repentina o continuamente aplicada. Despreciando la saturación el cortocircuito trifásico de una máquina de polos salientes en vacío cuyo único circuito del rotor es el devanado de campo induce una corriente directa en el campo. Si la corriente de campo total fuera conocida, la corriente de armadura total podría ser calculada como la relación de voltaje en vacío correspondiente a esa corriente de campo para la reactancia sincrónica. Esto es conveniente para contabilizar los incrementos en excitación del rotor por una reactancia ficticia tal que la corriente de cortocircuito es el voltaje previo al cortocircuito (en vacío) dividido para la reactancia ficticia. Para una máquina cuyo circuito del rotor es solamente el devanado de campo ésta es la reactancia transitoria, la presencia de circuitos de amortiguamiento causa grandes corrientes de cortocircuito y la reactancia ficticia se llama reactancia subtransitoria, mientras la reactancia transitoria tiene el mismo significado de antes, esto puede ser considerado como que esa reactancia la determinaría la corriente si el único circuito del rotor fuera el devanado de campo. Así pues es importante el reconocimiento y análisis de los efectos de

los circuitos adicionales del rotor tales como barras amortiguadoras, caminos de hierro sólido, etc.

2.1.2 Bases Fundamentales para Análisis de Condiciones Transitorias

Para ésto el voltaje y la corriente son convenientemente divididos en ciertas partes definidas. Para la corriente de armadura la primera distinción a hacerse es entre las componentes simétrica y asimétrica. La clasificación para voltaje de armadura es la misma que para la componente simétrica de la corriente de armadura. Esta clasificación da:

- 1) Una componente sostenida
- 2) Una componente que decae suavemente
- 3) Una componente que decae rápidamente

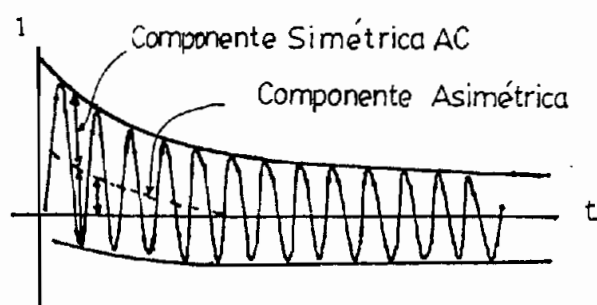


Figura 2.1 Onda Típica de Corriente de Cortocircuito

Considerando la onda de corriente en la figura 2.1, la corriente simétrica es corriente alterna y es rápidamente determinada dibujando 2 envolventes, la distancia media

entre las envolturas en cualquier instante es la componente simétrica. La componente asimétrica frecuentemente llamada componente DC está determinada por la curva punteada. La distancia desde esta última a la línea de corriente cero en cualquier instante es la componente asimétrica. Esta componente es en muchos casos principalmente corriente directa pero puede incluir 2^{da} armónica como en el caso de cortocircuito trifásico de una máquina de polos salientes sin barras de amortiguamiento. En tal caso la segunda armónica tiene un pico de valor positivo al mismo instante que la corriente alterna simétrica tiene valores de picos positivos y negativos, desde aquí la curva punteada llega a ser una curva tangente a la componente asimétrica total como en la figura 2.2.

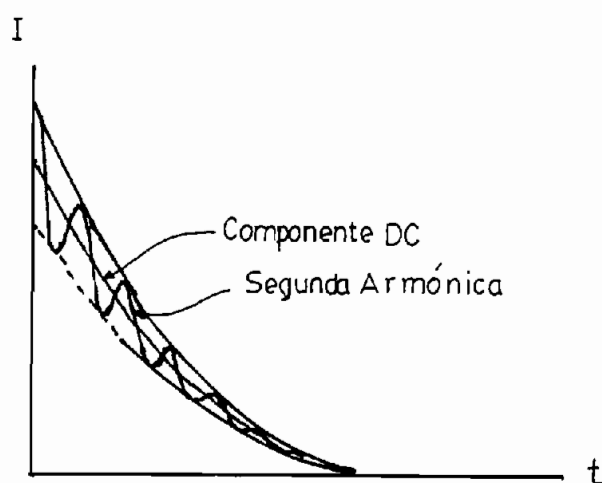


Figura 2.2 Componente Asimétrica de la Corriente en una Máquina de Polos Salientes sin Barras Amortiguadoras

Así pues al cortocircuitar súbitamente un generador trifásico sin carga, a velocidad nominal y con corriente de excitación se obtiene una forma de onda de corriente en el inducido como la que se muestra en la figura 2.3, donde puede apreciarse que para los primeros ciclos la corriente decrece de manera muy rápida, a esta duración se le llama PERIODO SUBTRANSITORIO, durante los ciclos que siguen la corriente disminuye algo más lentamente y esto se conoce como PERIODO TRANSITORIO, al final la corriente alcanza su valor de estado estacionario o de PERIODO PERMANENTE. Estas corrientes están limitadas respectivamente por las reactancias subtransitoria, transitoria y sincrónica .

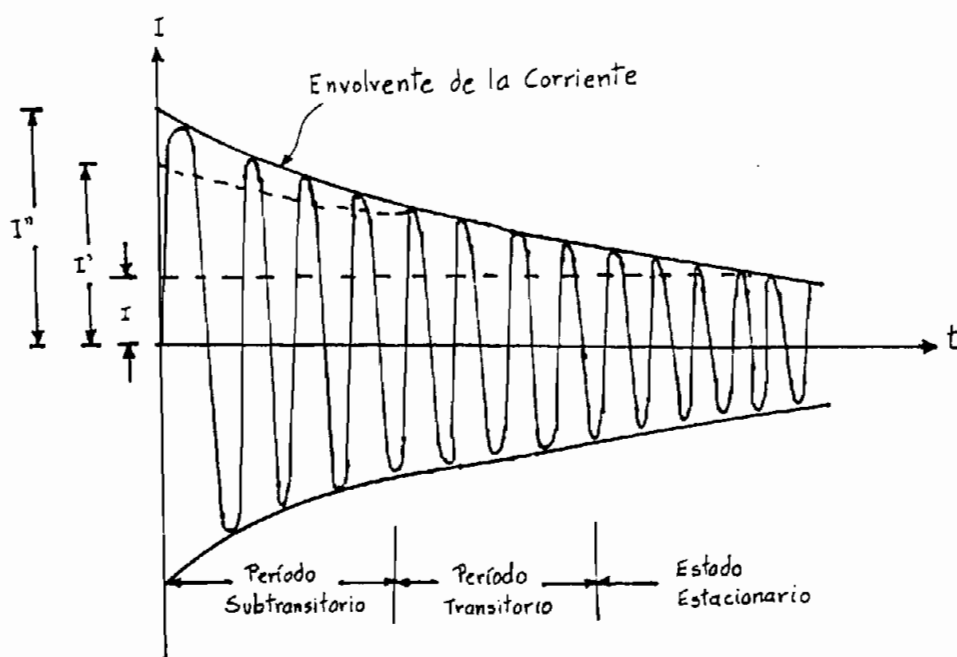


Figura 2.3 Corriente de Cortocircuito en un Generador Sincrónico

La reactancia subtransitoria se debe principalmente a la presencia de barras amortiguadoras, la reactancia transitoria se debe al devanado de campo y la reactancia sincrónica se debe a los devanados de inducido, como se puede observar en los circuitos equivalentes de la máquina descritos en 2.1.3.

2.1.3 Circuitos Equivalentes de la Máquina Sincrónica para diferentes Condiciones de Operación

2.1.3.1 En el Eje Directo

Considerando un cortocircuito súbito en los terminales del generador, el circuito de la armadura es casi puramente inductivo y el eje de la reacción de la armadura está situado a lo largo del eje de campo, esto es, a lo largo del eje directo, por lo tanto se tiene que:

En el período estacionario o permanente la corriente de la armadura está limitada solamente por la reactancia sincrónica X_d en el eje directo como se muestra en la figura 2.4.

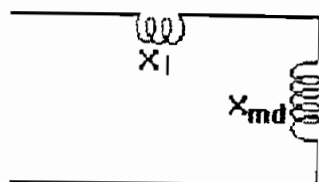


Figura 2.4 Circuito Equivalente de la Máquina Sincrónica en Estado Estable

Donde $X_d = X_l * X_{md}$

Siendo X_l la reactancia de dispersión y X_{md} la reactancia de magnetización en el eje directo.

En el período transitorio la corriente de cortocircuito es causada por una componente de corriente inducida en el circuito de campo cuya reactancia representativa es X_f y por la reactancia sincrónica X_d en el eje directo.

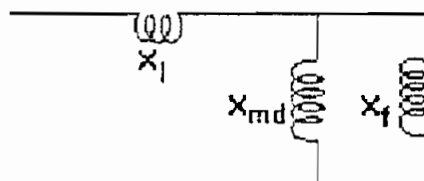


Figura 2.5 Circuito Equivalente de la Reactancia Transitoria en el Eje Directo

En el período subtransitorio, actúan los devanados amortiguadores en los polos de la máquina de polos salientes y los circuitos de corrientes parásitas cuyos ejes coinciden con el eje directo. Estos circuitos están entrelazados en el tiempo $t = 0$ con el flujo principal producido por el devanado de campo y tenderán también a mantener este flujo que sostiene la corriente de campo. Dichos circuitos tienen que considerarse en paralelo con el devanado de campo. El circuito equivalente para este caso está dado en la figura 2.6. $X_{d\alpha}$ es la reactancia de dispersión del devanado amortiguador o de los circuitos de corrientes parásitas, o ambos juntos en el eje directo. La reactancia que corresponde al circuito de la figura 2.6 es

la reactancia subtransitoria de eje directo X''_d . Esta es menor que la reactancia transitoria del eje directo X'_d y, por lo tanto, la presencia de un devanado amortiguador o trayectorias de corrientes parásitas incrementan los valores máximos de las corrientes transitorias de armadura y de campo.

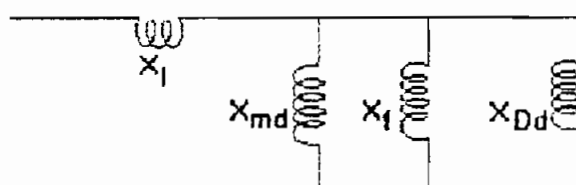


Figura 2.6 Circuito Equivalente de la Reactancia Subtransitoria de Eje Directo

Las amplitudes de las corrientes disminuyen con el tiempo y esto se debe a las resistencias de los devanados que consumen gradualmente la energía magnética acumulada en el devanado de campo en el tiempo $t = 0$. La proporción de disminución de los picos consecutivos está determinada por las constantes de tiempo de los devanados. El devanado amortiguador y los circuitos de las corrientes parásitas tiene relaciones mucho mayores de resistencia a reactancia de dispersión, esto es, constantes de tiempo mucho menores que el devanado de campo. Su influencia en los transitorios será por lo tanto, mucho más corta que la del devanado de campo. Así, el devanado amortiguador y los circuitos de las corrientes parásitas influyen en las corrientes transitorias únicamente durante los primeros ciclos (período subtransitorio) y el devanado de campo determina la disminución de las amplitudes para un tiempo

mucho más largo (período transitorio). El cambio de las amplitudes durante el período en cortocircuito es tal, que las amplitudes están determinadas en principio por la reactancia subtransitoria X''_d , figura 2.6, después por la reactancia transitoria X'_d figura 2.5, y , finalmente por la reactancia sincrónica $X_d = X_1 + X_{md}$, figura 2.4; esto es, la corriente transitoria de la armadura finaliza con la corriente de cortocircuito de estado estable, mientras que la corriente transitoria de campo finaliza con el valor cero. Durante el período de cortocircuito la reactancia de la máquina cambia de subtransitoria X''_d a sincrónica X_d .

2.1.3.2 En el Eje en Cuadratura

Si el cortocircuito súbito ocurre a una distancia del generador de modo que hay una resistencia considerable en el circuito, el eje de la reacción de armadura está desfasado con respecto al eje directo. En este caso, ambos ejes tienen que tratarse en una forma similar a la del funcionamiento de estado estable y tienen que aplicarse constantes diferentes a cada eje. Similarmente a las reactancias transitorias (X'_d) y subtransitorias (X''_d) del eje directo tiene que introducirse una reactancia transitoria (X'_q) y una subtransitoria (X''_q) del eje en cuadratura.

Es evidente que la reactancia transitoria en el eje en cuadratura está dada por el circuito de la figura 2.7, ya que no hay devanado de campo en el eje en cuadratura, esto es, $X'_q = X_q$. Es decir la reactancia transitoria es igual

a la de régimen estacionario como se puede ver en la figura 2.7.

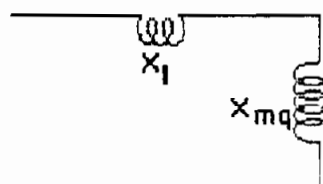


Figura 2.7 Circuito Equivalente de la Reactancia Transitoria en el Eje en Cuadratura

Donde $X_q = X_l + X_{mq}$, siendo X_l la reactancia de dispersión y X_{mq} la reactancia de magnetización en el eje en cuadratura.

Si la máquina de polos salientes tiene un devanado amortiguador cuya reactancia con respecto al eje en cuadratura es X_{dq} , la reactancia subtransitoria en el eje en cuadratura está dada por el circuito en la figura 2.8. El mismo circuito se aplica al rotor sólido si la reactancia de las trayectorias de las corrientes parásitas se sustituye por X_{dq} .

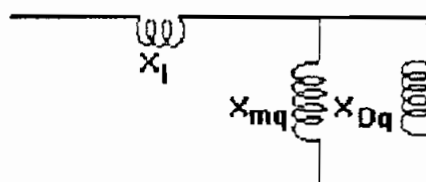


Figura 2.8 Circuito Equivalente de la Reactancia Subtransitoria en el eje en Cuadratura

2.1.4 Determinación de Parámetros Eléctricos

La medición de cantidades se hace en base a la teoría de dos ejes de la máquina sincrónica con representación aproximada de todos los circuitos adicionales al devanado de campo y circuitos estacionarios relativos, representados por dos circuitos equivalentes uno en el eje q y otro en el eje d, despreciando la resistencia de armadura.

Entonces se consideran 3 reactancias (sincrónica, transitoria y subtransitoria) y dos constantes de tiempo (transitoria y subtransitoria) en el estudio de fenómenos transitorios en el eje directo y dos reactancias (sincrónica y subtransitoria) y una constante de tiempo (subtransitoria) en el eje en cuadratura y la constante de tiempo de cortocircuito de la armadura.

Las constantes de tiempo se determinan considerando decaimiento exponencial de corriente y voltaje. Un análisis detallado de su determinación se presenta en la sección 2.1.5.

2.1.4.1 Determinación de la Impedancia Base

Con los valores nominales de voltaje y corriente del generador que son: 208 V línea-línea y 519 A respectivamente, la impedancia base se calcula con la ecuación 2.1.

$$Z_B = \frac{V_{NLL}}{\sqrt{3} * I_N} \quad (2.1)$$

$$Z_B = \frac{208}{\sqrt{3} * 519} = 0.231385 \, \Omega$$

2.1.4.2 Resistencia de los Devanados

La caída de voltaje se mide en los anillos rozantes y no a través de las escobillas (método voltímetro amperímetro). Para evitar calentamiento de los devanados, la corriente empleada debe ser de bajo valor. Para usar el método voltímetro - amperímetro se puede usar cualquier fuente DC.

La resistencia debe ser medida directamente en los terminales del devanado con el rotor en reposo. Las resistencias del devanado de armadura deberían ser medidas separadamente para cada fase. Si por alguna razón la resistencia de fase no puede ser medida directamente, las medidas se hacen entre cada par de terminales de línea de los devanados de armadura. Si la temperatura del devanado es desconocida, la corriente no debería ser mayor al 10 % de la corriente nominal del devanado y debería aplicarse no más de un minuto. El tiempo de medición debe ser tal que al instante de tomar las lecturas de los instrumentos, los indicadores permanezcan estables, es decir, cuando los transitorios hayan desaparecido en los instrumentos y en los circuitos cuya resistencia se está midiendo.

Con el método voltímetro-amperímetro y una fuente DC se deben tomar de 3 a 5 datos de voltajes y corrientes para luego sacar un valor promedio.

2.1.4.2.1 Medición de Resistencias

Las resistencias se miden por dos métodos: con un óhmetro y con el método voltímetro-amperímetro.

2.1.4.2.1.1 Resistencia de Campo

La resistencia de campo se mide por dos métodos: con un óhmetro y con el método voltímetro-amperímetro.

Con óhmetro: $R_{JK} = 12.8 \Omega$

Con método Voltímetro-Amperímetro:

| V | I | R |
|-------|-------|-------|
| 1.274 | 0.14 | 9.1 |
| 1.334 | 0.15 | 8.893 |
| 0.423 | 0.05 | 8.46 |
| 2.8 | 0.315 | 8.868 |
| 4.52 | 0.5 | 9.04 |

$$\bar{R} = 8.8762\Omega$$

El método voltímetro-amperímetro es más exacto que el método con óhmetro. Entonces $R_{JK} = 8.8762\Omega$.

2.1.4.2.1.2. Resistencias de Armadura

Las bobinas del estator están en conexión doble estrella con sus neutros cortocircuitados, por lo tanto se tienen dos bobinas por fase. Para determinar la resistencia de la armadura se aplican dos métodos: con un óhmetro y con el método voltímetro-amperímetro y se miden en una fase las resistencias de cada una de las bobinas por separado y en las otras dos fases se mide la resistencia de las dos bobinas conectadas en paralelo.

Con Ohmetro : cada bobina 0.2Ω
 por fase 0.1Ω

Con el Método Voltímetro-Amperímetro:

R_{WN} :

1^{era} Bobina

| V | I | R |
|-------|-------|---------|
| 0.001 | 0.325 | 0.00307 |
| 0.002 | 0.5 | 0.004 |
| 0.003 | 0.675 | 0.0044 |
| 0.008 | 1.6 | 0.005 |

$$\bar{R} = 0.004117 \Omega$$

2^{da} Bobina

| V | I | R |
|-------|-------|----------|
| 0.002 | 0.475 | 0.00421 |
| 0.005 | 1 | 0.005 |
| 0.008 | 1.525 | 0.005245 |

$$\bar{R} = 0.004818 \Omega$$

De los valores promedios de resistencia para cada bobina de la fase W se tiene como promedio:

$$\Rightarrow \bar{R} = 0.0044676 \Omega \text{ por cada bobina}$$

Como son dos bobinas por fase, el valor del circuito paralelo está dado por:

$$\Rightarrow \bar{R}_{WN} = 0.0022338 \Omega \checkmark$$

$$\text{Como } Z_B = 0.231385 \Omega$$

$$\Rightarrow \bar{R}_{WV} = 0.00965 \text{ pu}$$

Con el método voltímetro-amperímetro se determina la resistencia del circuito paralelo formado por las dos bobinas de la fase V.

R_{VN} :

| V | I | R |
|-------|-------|----------|
| 0.001 | 0.5 | 0.002 |
| 0.002 | 1 | 0.002 |
| 0.003 | 1.3 | 0.002307 |
| 0.004 | 1.575 | 0.002539 |

$$\Rightarrow \bar{R}_{VN} = 0.0022115 \, \Omega$$

$$\bar{R}_{VN} = 0.009557 \, \text{pu}$$

Con el método voltímetro-amperímetro se determina la resistencia del circuito paralelo formado por las dos bobinas de la fase U.

R_{UN} :

| V | I | R |
|-------|-------|------------|
| 0.001 | 0.55 | 0.00181818 |
| 0.002 | 0.925 | 0.002162 |
| 0.003 | 1.25 | 0.0024 |
| 0.004 | 1.5 | 0.002666 |
| 0.004 | 1.6 | 0.0025 |

$$\Rightarrow \bar{R}_{UN} = 0.002309236 \, \Omega$$

$$\bar{R}_{UN} = 0.0099799 \, \text{pu}$$

Entonces $R_{\text{fase-neutro}} = 0.0022 \, \Omega = 0.009 \, \text{pu}$

2.1.4.3 Reactancia Sincrónica X_d

Impedancia sincrónica es la relación entre la corriente de campo requerida para que circule la corriente nominal en un cortocircuito trifásico sostenido y la corriente de campo que produciría voltaje nominal en vacío, si no hubiera saturación [27].

De la figura 2.9 $X_d = a/b$

$$\Rightarrow X_d = \frac{\text{If para } I_n \text{ en cortocircuito}}{\text{If para } V_n \text{ en vacío sin saturación}} \quad (2.2)$$

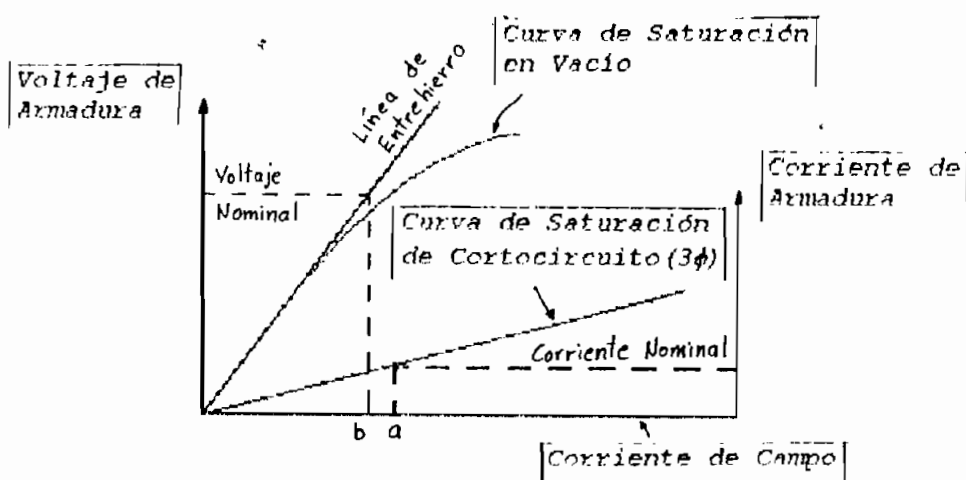


Figura 2.9 Reactancia Sincrónica

Otra forma de obtener X_d es: Con un cortocircuito trifásico sostenido y la corriente de campo en un valor arbitrario, X_d es el voltaje de línea del entrehierro correspondiente a esta corriente de campo, dividida para la corriente de cortocircuito sostenida [27]. Así de la figura 2.10, $X_d = c/d$.

$$X_d = \frac{\text{voltaje de armadura}}{I \text{ de cortocircuito de armadura}} \quad (2.3)$$

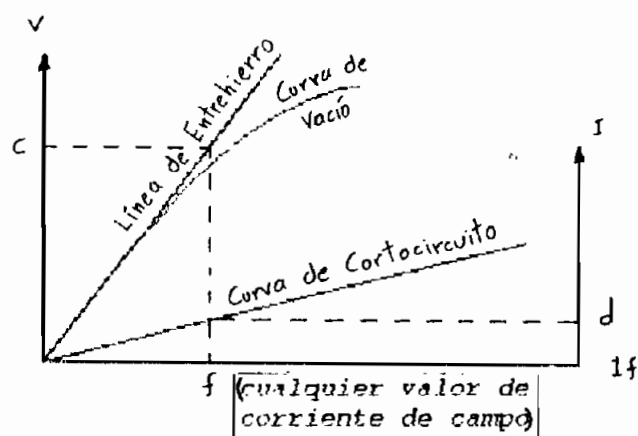


Figura 2.10 Reactancia Sincrónica

Los métodos en la figura 2.9 y 2.10 dan el mismo resultado a partir de los mismos datos, dando el valor no saturado.

2.1.4.3.1 Determinación de la Característica en Vacío a Velocidad Nominal

La máquina debe funcionar como generador mediante su máquina motriz a velocidad nominal. Se mide la corriente de excitación, voltaje de línea y frecuencia simultáneamente.

Los cambios de excitación deben ser en pasos graduales desde alto a bajo voltaje distribuidos uniformemente, variando el voltaje de armadura desde $1.3 V_N$ hasta $0.2 V_N$.

Si la curva obtenida no corta en el origen debido al voltaje residual se debe realizar una corrección trazando la línea de entrehierro en la curva de vacío hasta encontrar el punto de intersección con el eje X. La longitud del eje X desde el origen hasta el punto de intersección hallado, representa el valor de corrección que debe ser sumado a todos los valores medidos de la corriente de excitación [11]. Con esto se obtiene una curva de vacío que empieza en el origen, como se ilustra en la figura 2.11.

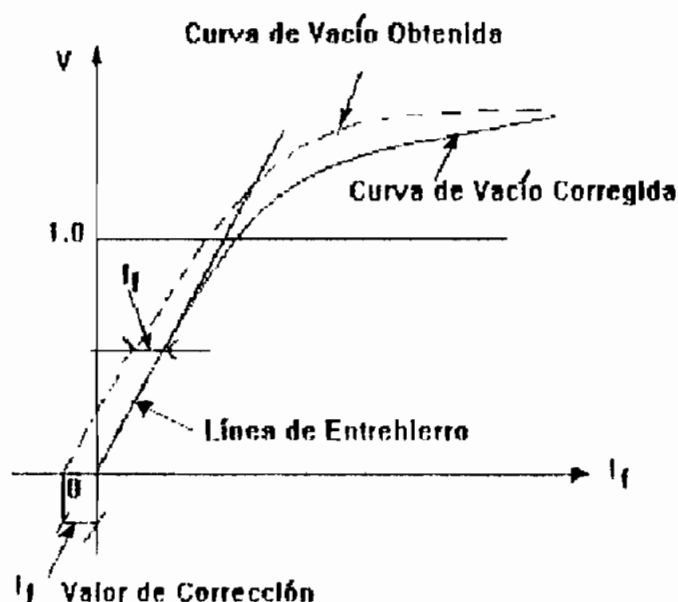


Figura 2.11 Curva de Vacío

De lo visto, se establecen en resumen las siguientes condiciones para esta prueba:

- . La máquina a probar debe funcionar como generador con la máquina motriz a velocidad nominal 1800 RPM
- . El voltaje de línea debe ser disminuido desde 130% al 2% de su valor nominal, esto es, desde 270.4 V. hasta 41.6 V.
- . Se debe medir corriente de excitación, frecuencia y voltaje de armadura, simultáneamente

El circuito utilizado es el siguiente:

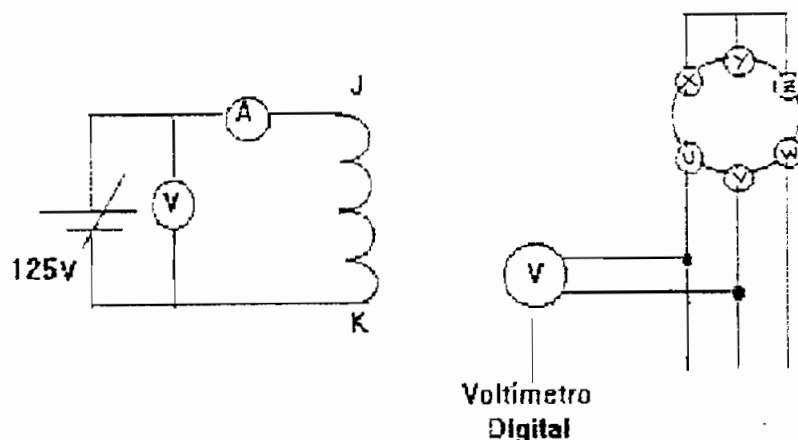


Figura 2.12 Circuito para Obtener la Curva de Vacío

Instrumentos:

- 1 Amperímetro DC (20 A_{DC})
 - 1 Voltímetro DC (125 V_{DC})
 - 1 Fuente variable de DC de 0 a 125 V_{DC} con capacidad de suministrar 20 A_{DC} (Se usó el grupo motor de inducción- generador de DC de una de las mesas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad)
 - 3 Voltímetros AC (208 V) o 1 voltímetro digital
- Los valores obtenidos de esta prueba están en la Tabla 2.1

| Excitación | | RPM | Voltaje en vacío | | | Voltaje Promedi | Vf/If |
|------------|---------|------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------|
| Voltaje | Amperaj | | V _{uv} | V _{v w} | V _{u w} | | |
| 120 | 14 | 1800 | 273 | 273 | 273 | 273 | 8.57 |
| 90 | 10.2 | 1800 | 241.9 | 242 | 241.9 | 241.93 | 8.82 |
| 78 | 9 | 1800 | 215.5 | 215.7 | 215.5 | 215.57 | 8.67 |
| 60 | 6.8 | 1800 | 199.2 | 199.3 | 199.2 | 199.23 | 8.82 |
| 52 | 5.8 | 1800 | 175.5 | 175.5 | 175.4 | 175.47 | 8.96 |
| 42 | 4.8 | 1800 | 150.8 | 150.8 | 150.3 | 150.63 | 8.75 |
| 36 | 4 | 1800 | 120 | 119.6 | 119.2 | 119.6 | 9 |
| 28 | 3.1 | 1800 | 102.1 | 102.2 | 102.3 | 102.2 | 9.03 |
| 24 | 2.7 | 1800 | 79.8 | 79.7 | 79.6 | 79.7 | 8.89 |
| 20 | 2.1 | 1800 | 67.3 | 67.1 | 67 | 67.13 | 9.52 |
| 16 | 1.7 | 1800 | 63.2 | 63.2 | 63.3 | 63.23 | 9.41 |

Tabla 2.1 Valores Obtenidos de Prueba de Vacío en el Generador de Emergencia

Con estos datos se traza la curva de vacío, la cual no corta en el origen, por lo que se debe corregir la corriente de campo para obtener la curva de vacío corregida, ésto se observa en la figura 2.13.

Como se ve la curva original inicia con un voltaje de armadura de 12 voltios para excitación nula debido al flujo remanente de los polos, esto es importante para garantizar la excitación del campo en el generador autoexcitado, que es el caso que se está analizando.

En la línea de entrehierro para $V_N = 208$ V, se tiene $I_f = 7.4$ A

2.1.4.3.2 Determinación de la Característica de Cortocircuito a Velocidad Nominal

La máquina debe funcionar como generador mediante la máquina motriz. El cortocircuito en las barras del generador se debe realizar después de los transformadores de corriente. La corriente de cortocircuito debe ser aumentada hasta el valor nominal $I_N = 519$ A. La corriente de excitación se aplica después de hacer el cortocircuito y se deben medir corriente de excitación y de armadura.

El circuito utilizado para esta prueba es el que se muestra en la figura 2.14.

A continuación se presenta la figura 2.13 con la curva de vacío original y corregida a partir de los datos obtenidos en 2.1.4.3.1.

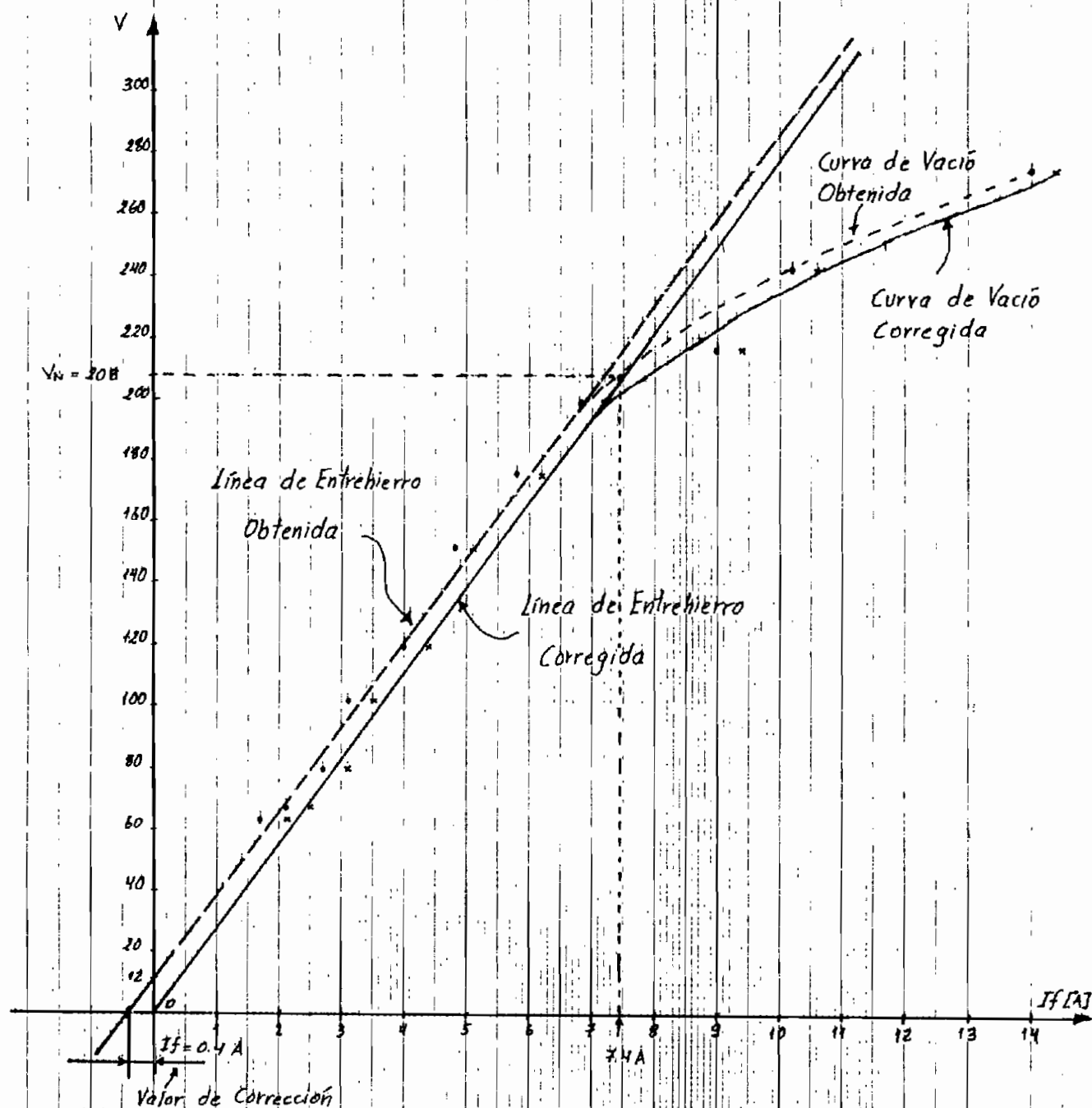


Figura 2.13 Curvas de Vacío Original y Corregida
a partir de los datos de la Tabla 2.1
(Prueba de Vacío)

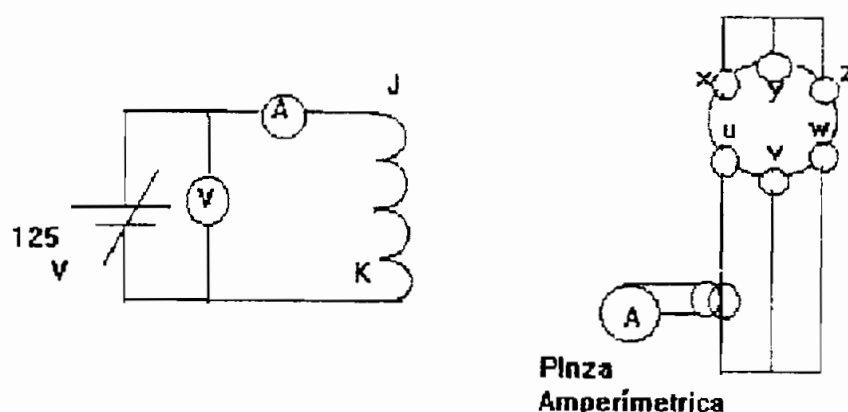


Figura 2.14 Circuito para Obtener la Característica de cortocircuito

Los instrumentos usados para esta prueba son:

- | | |
|--|------------------------|
| 1 Amperímetro DC | (20 A _{DC}) |
| 1 Voltímetro DC | (125 V _{DC}) |
| 1 Fuente variable de DC de 0 a 125 V _{DC} con capacidad de suministrar 20 A _{DC} (Se usó el grupo motor de inducción-generador de DC de una de las mesas del Laboratorio de Máquina Eléctricas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica) | |
| 3 Transformadores de Corriente AC | (600/5 A) |
| 3 Amperímetros AC | (5 A) |

Los tres transformadores de corriente y los tres amperímetros de corriente alterna pueden reemplazarse con una pinza amperimétrica y un multímetro digital para tomar las medidas con mayor comodidad y precisión por ajuste de las escalas, además se excluye con ésto el error por apreciación visual del observador.

Los valores obtenidos en esta prueba son los de la Tabla 2.2.

| Excitación | | RPM | Isc | |
|------------|---------|------|-----|-------|
| Voltaje | Amperaj | | Iu | Vf/If |
| 12 | 1.37 | 1800 | 111 | 8.75 |
| 13 | 1.5 | 1800 | 118 | 8.75 |
| 13.5 | 1.54 | 1800 | 123 | 8.75 |
| 14 | 1.6 | 1800 | 128 | 8.75 |
| 14.5 | 1.65 | 1800 | 134 | 8.75 |
| 15 | 1.71 | 1800 | 138 | 8.75 |
| 15.6 | 1.78 | 1800 | 145 | 8.75 |
| 16 | 1.83 | 1800 | 152 | 8.75 |
| 16.5 | 1.89 | 1800 | 158 | 8.75 |
| 17 | 1.94 | 1800 | 160 | 8.75 |
| 17.5 | 2 | 1800 | 167 | 8.75 |
| 18.1 | 2.05 | 1800 | 170 | 8.83 |
| 18.75 | 2.15 | 1800 | 175 | 8.72 |
| 19 | 2.16 | 1800 | 179 | 8.79 |
| 19.5 | 2.2 | 1800 | 185 | 8.86 |
| 20.4 | 2.3 | 1800 | 192 | 8.87 |
| 20.5 | 2.35 | 1800 | 195 | 8.72 |
| 21.5 | 2.45 | 1800 | 202 | 8.78 |
| 22 | 2.55 | 1800 | 210 | 8.62 |
| 23 | 2.62 | 1800 | 220 | 8.77 |
| 23.5 | 2.7 | 1800 | 224 | 8.7 |
| 25 | 2.85 | 1800 | 238 | 8.77 |
| 26.5 | 3.05 | 1800 | 253 | 8.69 |
| 32 | 3.75 | 1800 | 308 | 8.53 |
| 38 | 4.48 | 1800 | 370 | 8.48 |
| 44 | 5.2 | 1800 | 427 | 8.46 |
| 46 | 5.4 | 1800 | 448 | 8.51 |
| 49 | 5.7 | 1800 | 470 | 8.59 |
| 49 | 5.75 | 1800 | 475 | 8.52 |
| 50 | 5.8 | 1800 | 480 | 8.62 |
| 50.4 | 5.9 | 1800 | 489 | 8.54 |
| 51 | 5.95 | 1800 | 495 | 8.57 |
| 52 | 6.05 | 1800 | 503 | 8.59 |
| 52.4 | 6.15 | 1800 | 509 | 8.52 |
| 53 | 6.2 | 1800 | 514 | 8.55 |
| 54 | 6.25 | 1800 | 516 | 8.64 |
| 54 | 6.3 | 1800 | 520 | 8.57 |

Tabla 2.2 Valores Obtenidos en Prueba de Cortocircuito
Sostenido en el Generador de Emergencia

De los datos anteriores se obtiene la curva de cortocircuito de la máquina. (figura 2.15)

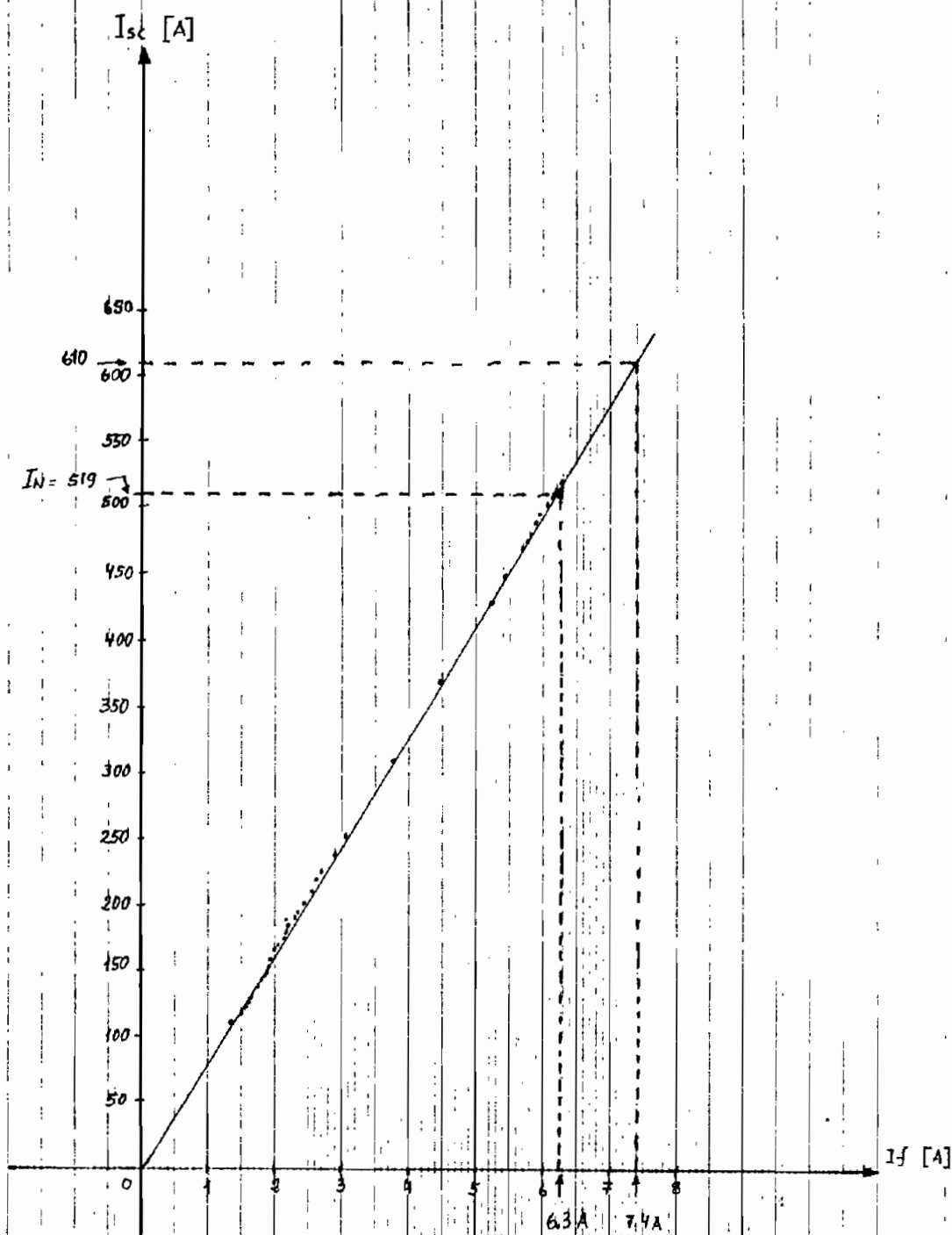


Figura 2.15 Curva de Cortocircuito del
Generador de Emergencia.

De la curva de cortocircuito de la máquina para corriente de campo $I_f = 7.4 \text{ A}$ la corriente de cortocircuito correspondiente es $I_{sc} = 610 \text{ A}$

2.1.4.3.3 Determinación de la Reactancia Sincrónica de Eje Directo X_d

Voltaje Nominal : $V_N = 208 \text{ V}$

Corriente Nominal: $I_N = 519 \text{ A}$

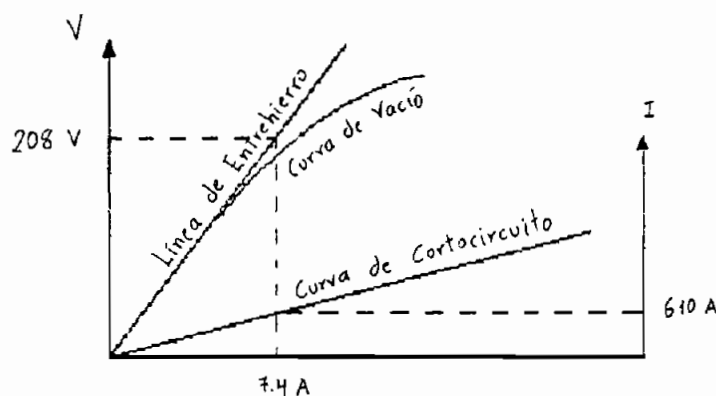


Figura 2.16 Reactancia Sincrónica

A partir de la ecuación 2.3 descrita en 2.1.4.3 se obtiene:

$$X_d = \frac{V_N}{\sqrt{3} \cdot I'} \quad (2.4)$$

Donde I' es la corriente de cortocircuito correspondiente a la corriente de campo que produce voltaje nominal en la línea de entrehierro.

En la línea de entrehierro (Ver figura 2.16)

$$V_N = 208 \text{ V} \quad \Rightarrow \quad I_f = 7.4 \text{ A}$$

$$I_f = 7.4 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad I_{sc} = 610 \text{ A}$$

$$\text{Entonces } I' = 610 \text{ A}$$

Por lo tanto

$$X_d = \frac{208}{\sqrt{3} \cdot 610} = 0.1967 \, \Omega$$

$$\text{Como } Z_B = 0.231385 \, \Omega$$

$$\text{Entonces } X_d = 0.8508 \text{ pu}$$

Otra forma de calcular X_d es como se presentó en 2.1.4.3 en la ecuación 2.2

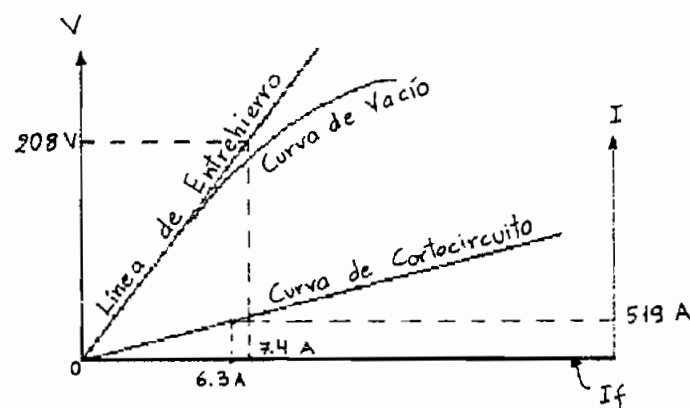


Figura 2.17 Reactancia Sincrónica a partir de Corrientes de Campo

A $V_N = 208 \text{ V}$, la corriente de campo es $I_f = 7.4 \text{ A}$ (en la línea de entrehierro)

A $I_N = 519 \text{ A}$, la corriente de campo es $I_f = 6.3 \text{ A}$

$$\text{Como } X_d = \frac{I_{fsc}}{I_{foc}} * Z_B \quad (2.5)$$

donde I_{fsc} es la corriente de campo que da corriente nominal con terminales del generador en cortocircuito.

I_{foc} es la corriente de campo que da voltaje nominal con terminales del generador en circuito abierto.

$$\text{Entonces } X_d = \frac{6.3}{7.4} * 0.231385$$

Por lo tanto $X_d = 0.196989 \, \Omega$

$$X_d = 0.85135 \, \text{pu}$$

2.1.4.4 Relación de Cortocircuito

$$K_c = \frac{I_{foc}}{I_{fsc}} \quad (2.6)$$

Donde :

I_{foc} es la corriente de campo para tener voltaje nominal en vacío.

I_{fsc} es la corriente de campo para tener corriente nominal en cortocircuito de sus terminales.

Para este caso

$$I_{foc} = 7.4 \, \text{A}$$

$$I_{fsc} = 6.3 \, \text{A}$$

Entonces

$$K_c = \frac{7.4}{6.3} = 1.1746$$

2.1.4.5 Reactancias Transitorias y Subtransitorias de Eje Directo

El procedimiento más comúnmente usado para la determinación de X_d' y X_d'' de una máquina síncrona trifásica es por análisis de un oscilograma de cortocircuito trifásico súbito a voltaje nominal en vacío.

La prueba se realiza aplicando un cortocircuito súbito a la armadura cuando está generando un voltaje deseado en vacío, menor al nominal, cuando la potencia de la máquina no es tan pequeña, para evitar sobrecalentamientos y daños por las altas corrientes que se desarrollan. La excitación de la máquina es, como regla, hecha en forma independiente con una fuente de continua [11].

Las 3 fases deben ser cortocircuitadas prácticamente en forma simultánea con diferencia máxima de 15° eléctricos entre fase y fase. Este valor puede excederse cuando la componente DC de la armadura no importa.

El tiempo de análisis no debe ser menor que $T_d' + 0.2$ s, que es el tiempo mínimo necesario para que los efectos subtransitorios y transitorios desaparezcan y la corriente tome su valor de estado estable o permanente. La reactancia subtransitoria depende de la corriente inicial (tiempo cero), por lo tanto esto último debe ser

determinado con precisión. La mayoría de máquinas tienen en cortocircuito trifásico una onda de corriente simétrica la cual puede ser tomada como sinusoidal.

Para determinar las componentes transitoria ($\Delta i_K'$) y subtransitoria ($\Delta i_K''$) se debe restar el valor de la corriente de cortocircuito sostenida $i(\infty)$ de la curva de componente periódica de corriente de armadura [11]. El resto, el cual es la suma de $\Delta i_K'$ y $\Delta i_K''$ se dibuja con escala semilogarítmica. Este dibujo puede ser una línea recta o curva. Esta línea representa la parte transitoria y subtransitoria de la corriente de cortocircuito analizada, a esta curva se le conoce como Δi_K . Cuando la última parte de este dibujo es una línea recta (corresponde a una exponencial), entonces la línea extrapolada a $t = 0$ da el valor inicial $[\Delta i_K' (0)]$ de la componente transitoria de la corriente de cortocircuito (figura 2.18).

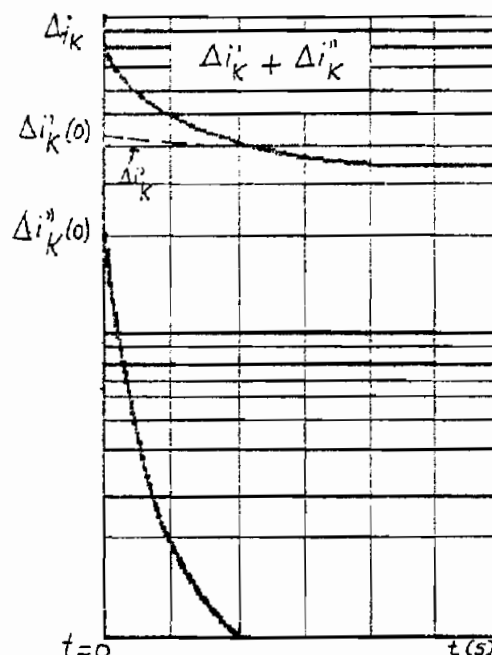


Figura 2.18 Componentes Transitoria y Subtransitoria

Cuando la última parte es curva se mide I_A (figura 2.19) al tiempo OA' donde OA' es 0.2 seg. o el tiempo al cual se consideran despreciables los efectos subtransitorios.

El tiempo OB' se mide cuando la corriente es

$$I_B = \frac{1}{s} I_A$$

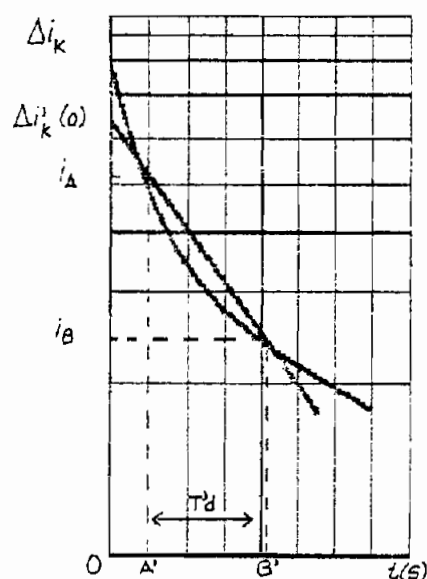


Figura 2.19 Componente Transitoria de Corriente

La constante de tiempo T_d' se toma como $(OB' - OA')s$. La línea recta a través de estos dos puntos I_B e I_A representa la curva de $\Delta i_k'$, es decir, de la componente transitoria y extrapolando al tiempo cero da el valor inicial $\Delta i_k'(0)$ de la componente transitoria de la corriente de cortocircuito.

La componente subtransitoria de la corriente de cortocircuito se define como la diferencia entre la curva $\Delta i_k' + \Delta i_k''$ y la línea recta que representa $\Delta i_k'$.

Como $\Delta i_K = \Delta i_K' + \Delta i_K''$. Y para $\Delta i_K'$ se ha obtenido una recta. Restando estas 2 curvas, es decir, la curva Δi_K menos la curva $\Delta i_K'$ se obtiene la curva $\Delta i_K''$

La variación de la componente subtransitoria de corriente en el tiempo $\Delta i_K''$ se dibuja también con escala semilogarítmica (figura 2.18).

2.1.4.5.1 Determinación de Cantidades con Prueba de Cortocircuito Súbito

Con la descripción realizada en 2.1.4.5 el cálculo de las reactancias transitoria y subtransitoria se concreta en:

$$X_d' = \frac{V(0)}{\sqrt{3} [I(\infty) + \Delta I_K'(0)]} \Omega \quad (2.7)$$

$$X_d'' = \frac{V(0)}{\sqrt{3} [I(\infty) + \Delta I_K'(0) + \Delta I_K''(0)]} \Omega \quad (2.8)$$

Donde $V(0)$ es el voltaje línea-línea en vacío antes del cortocircuito.

$I(\infty)$ es la corriente de cortocircuito de régimen permanente.

$\Delta I_K'(0)$ es la componente transitoria de la corriente al tiempo cero.

$\Delta I_K''(0)$ es la componente subtransitoria de la corriente al tiempo cero.

Considerando que el generador analizado es de potencia no muy pequeña y tiene varios años de servicio se ha estimado que la prueba de cortocircuito trifásico súbito debe hacerse con sumo cuidado y a un porcentaje menor al 50% del voltaje nominal, para evitar sobrecalentamientos y daños en la máquina por las altas corrientes transitorias y subtransitorias que se desarrollan súbitamente.

A continuación se presentan las condiciones en que se realiza la prueba, el equipo utilizado, los circuitos de potencia y de control empleados y los oscilogramas obtenidos.

Las condiciones que se deben considerar para esta prueba son:

- . Con el generador a velocidad nominal cortocircuitar súbitamente la armadura
- . La corriente de excitación debe ser controlada para que el voltaje en vacio antes del ensayo no sea mayor al 50% V_N , es decir no mayor a 104 V.
- . Se debe tomar la onda de corriente con un tiempo mínimo 0.5 s.

Los circuitos de potencia y control utilizados para esta prueba se muestran en la figura 2.20.

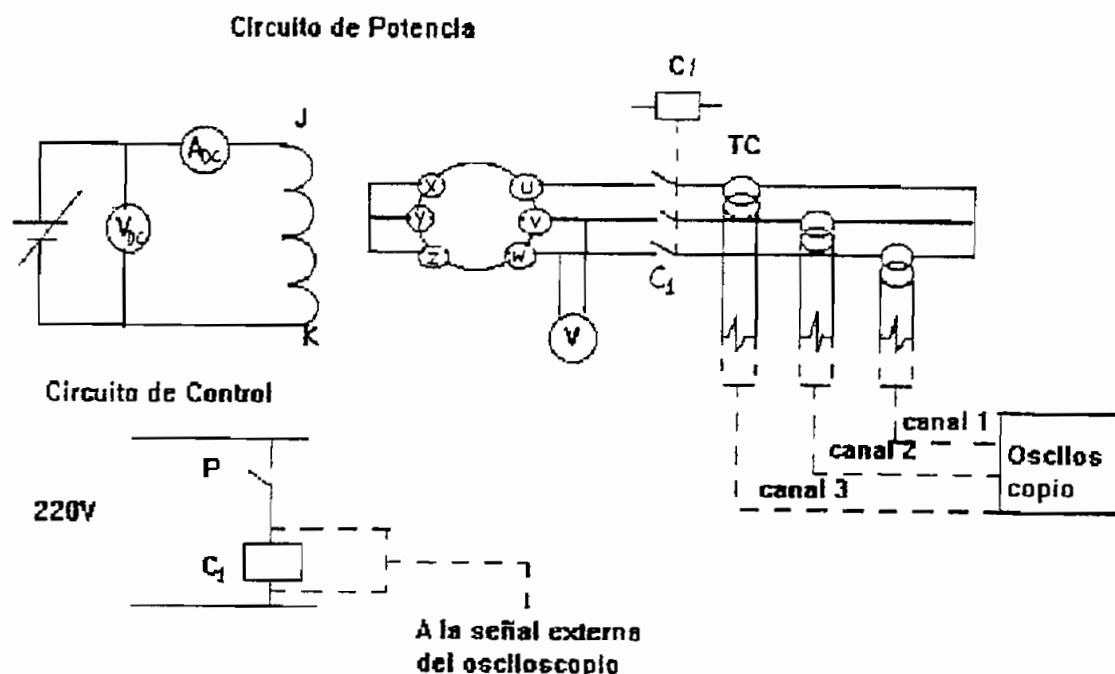


Figura 2.20 Circuito para Prueba de Cortocircuito Súbito

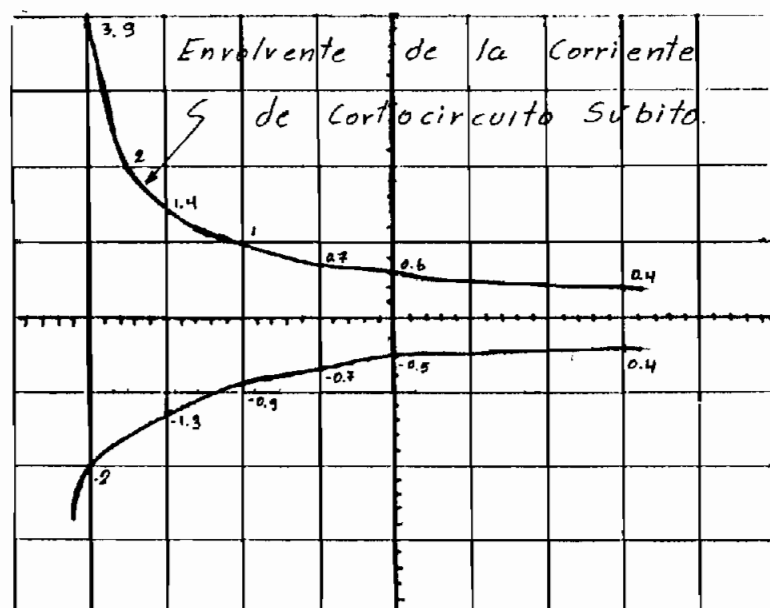
Se utilizan los siguientes instrumentos:

- 1 Amperímetro DC (20 A_{DC})
- 1 Voltímetro DC (125 V_{DC})
- 1 Fuente variable de DC de 0 a 125 V_{DC} con capacidad de suministrar 20 A_{DC} (Se usó el grupo motor de inducción-generador de DC de una de las mesas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad)
- 3 Transformadores de Corriente AC (1500/5 A)
- 1 Voltímetro AC (208 V)
- 3 Cargas resistivas para tomar señal de corriente del secundario del transformador como señales de voltaje a ser analizadas en el osciloscopio

- 1 Osciloscopio con memoria
- 1 Contactor trifásico con capacidad nominal de 300 A
- 1 Pulsador
- 1 Transformador de aislamiento para protección del osciloscopio

Debido a la baja capacidad del contactor de fuerza empleado y a las restricciones mencionadas anteriormente, la prueba de cortocircuito se realizó al 22.1 % del voltaje nominal. Se realizaron algunos ensayos de cortocircuito súbito y de éstos se escogió el que permitió obtener la siguiente onda de corriente que fue la que tuvo mejor representación gráfica por su claridad y tiempo de duración.

En la figura 2.21 se presenta la onda de corriente de cortocircuito súbito obtenida.



En el osciloscopio:

Ganancia: 5 V/div

Barrido: 0.1 s/div

Factor del Transformador
de Corriente y las Resistencias

Externas: $k = 76.923$

Figura 2.21 Onda de Corriente de Cortocircuito Súbito a la Armadura

Analizando la onda de corriente obtenida de la manera descrita anteriormente en 2.1.4.5 se obtienen las siguientes curvas. (figura 2.22).

De donde:

$$V(0) = 46 \text{ V}_{uv}$$

$$I(\infty) = 153.846 \text{ A}$$

$$\Delta I_K' (0) = 630 \text{ A}$$

$$\Delta I_K'' (0) = 716.15 \text{ A}$$

Con estos valores se pueden calcular las reactancias transitoria y subtransitoria de eje directo.

2.1.4.5.2 Cálculo de la Reactancia Transitoria de Eje Directo X_d'

Del análisis anterior, la reactancia transitoria de eje directo se calcula con la ecuación 2.7, esto es:

$$X_d' = \frac{V(0)}{\sqrt{3} [I(\infty) + \Delta I_K' (0)]} \quad \Omega$$

Siendo:

$$V(0) = 46 \text{ V}_{uv}$$

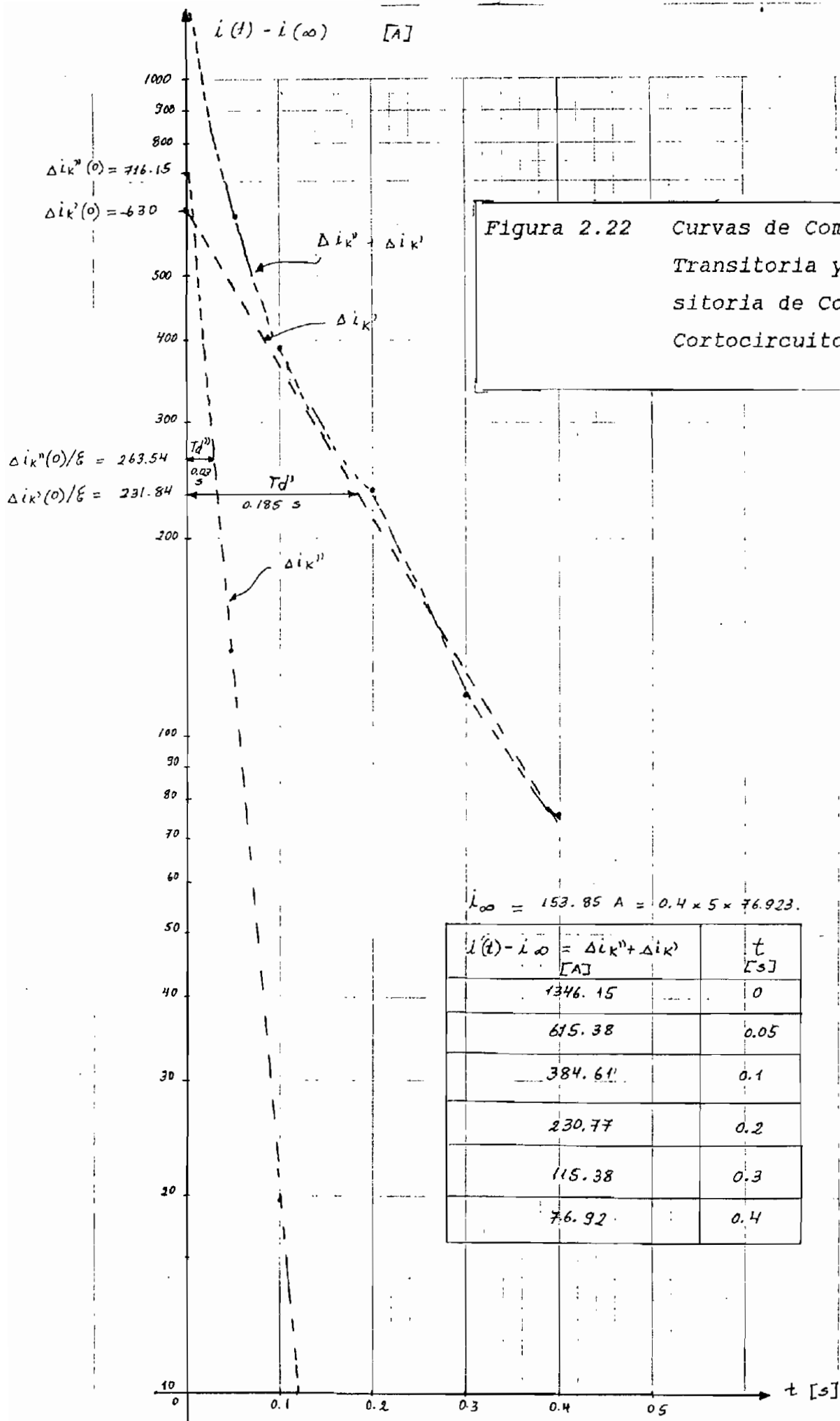
$$I(\infty) = 153.846 \text{ A}$$

$$\Delta I_K' (0) = 630 \text{ A}$$

Se obtiene:

$$X_d' = \frac{46}{\sqrt{3} [153.846 + 630]} \quad \Omega = 0.03388 \quad \Omega$$

$$X_d' = 0.1464 \text{ pu}$$



2.1.4.5.3 Cálculo de la Reactancia Subtransitoria de Eje Directo $X_{d''}$

Con la ecuación 2.8 vista en 2.1.4.5.1 se tiene:

$$X_{d''} = \frac{V(0)}{\sqrt{3} [I(\infty) + \Delta I_K'(0) + \Delta I_K''(0)]} \Omega$$

Como:

$$V(0) = 46 \text{ V}_{uv}$$

$$I(\infty) = 153.846 \text{ A}$$

$$\Delta I_K'(0) = 630 \text{ A}$$

$$\Delta I_K''(0) = 716.15 \text{ A}$$

$$X_{d''} = \frac{46}{\sqrt{3} [153.84 + 630 + 716.15]} \Omega = 0.017705 \Omega$$

$$X_{d''} = 0.0765 \text{ pu}$$

2.1.4.6 Reactancias de Eje en Cuadratura

2.1.4.6.1 Reactancia Sincrónica X_q

Debido a la dificultad para realizar la prueba de deslizamiento que requiere una fuente de voltaje trifásica variable con gran capacidad de corriente, mayor a las existentes en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad cuyas protecciones de sobrecorriente saltan a corrientes mayores 30 A, se usa un método alternativo aplicable.

Realizando la prueba de carga preferiblemente a factor de potencia unitario se toman los siguientes valores por fase:

I_{as} : corriente estatórica

V_{as} : voltaje terminal del estator

E_{ao} : voltaje en vacío

Introduciendo las ecuaciones en el programa "SOLVER-Q", se encuentran valores para el ángulo δ y la reactancia en cuadratura [9]. Las ecuaciones a resolver son las siguientes:

$$V_{as} + I_{as} \cdot r_s = X_q \cdot \sin(2 \cdot \delta) \cdot I_{as} / 2 - X_d \cdot I_{as} / 2 \cdot \sin(2 \cdot \delta) + E_{ao} \cdot \cos(\delta) \quad (2.9)$$

$$E_{ao} \cdot \sin(\delta) - I_{as} / 2 \cdot X_d \cdot (1 - \cos(2 \cdot \delta)) - I_{as} / 2 \cdot X_d \cdot (1 + \cos(2 \cdot \delta)) = 0 \quad (2.10)$$

Con los valores de la prueba de carga y los resultados de pruebas realizadas para r_s y X_d que se muestran a continuación en la Tabla 2.3, se obtiene con la ayuda del programa SOLVER-Q el valor de la reactancia en cuadratura.

| V_{as} | I_{as} | r_s | X_d | E_{ao} |
|----------|----------|-----------------|-----------------|----------|
| 121.53 V | 89.41 A | 0.0022 Ω | 0.1969 Ω | 123.38 V |

Tabla 2.3 Valores Obtenidos en una Prueba de Carga al Generador de Emergencia

$$X_q = 0.16587 \Omega$$

$$X_q = 0.7168 \text{ pu}$$

2.1.4.6.2 Reactancia Transitoria Xq'

Para determinar la reactancia Xq' se recomienda una prueba de cortocircuito trifásico súbito cuando el rotor está magnetizado en el eje en cuadratura [27], pero esto es difícil de precisar físicamente por lo que según la misma referencia anterior se puede aproximar que:

$$Xq' = Xd' \quad (2.11)$$

Entonces :

$$Xq' = 0.03388 \, \Omega$$

$$Xq' = 0.1464 \, \text{pu}$$

2.1.4.6.3 Reactancia Subtransitoria Xq''

Según [27] para máquinas de polos salientes la reactancia de secuencia negativa es igual al promedio de las reactancias subtransitorias en el eje directo y en el eje en cuadratura. Por lo tanto:

$$X_2 = \frac{Xd'' + Xq''}{2} \quad (2.12)$$

De donde:

$$Xq'' = 2(X_2) - Xd'' \quad (2.13)$$

De las pruebas realizadas:

$Xd'' = 0.0765 \, \text{pu}$ (reactancia subtransitoria de cortocircuito, sección 2.1.4.5.3)

$X_2 = 0.078 \, \text{pu}$ (reactancia de secuencia negativa, sección 2.1.4.7.2)

Entonces $Xq'' = 0.0795 \, \text{pu}$

2.1.4.7 Reactancia de Secuencia Negativa X_2

Para determinar la reactancia de secuencia negativa X_2 se realiza la prueba de cortocircuito sostenido línea-línea. Esta prueba es práctica para máquinas de polos salientes con barras de amortiguamiento y proporciona resultados bastante exactos para máquinas de polos salientes sin barras de amortiguamiento [27].

2.1.4.7.1 Prueba de Cortocircuito Sostenido Línea a Línea

Cualquier par de terminales son cortocircuitados con la máquina a velocidad nominal. Se recomienda medir potencia activa y potencia reactiva por armónicas de corriente y voltaje. Tomar medidas con algunas corrientes de cortocircuito. Hacer la prueba con corriente desde $0.3 I_N$ por el menor tiempo posible para evitar sobrecalentamiento [11]. Para máquinas de polos salientes la corriente se incrementa hasta el valor nominal si la vibración no es muy grande. Para máquinas de polos no salientes la corriente de armadura se limita al 50% del valor nominal [11].

Si las armónicas de voltaje y corriente pueden ser ignoradas, se aplica la siguiente fórmula:

$$X_2 = \frac{P}{\sqrt{3} I^2} \Omega \quad (2.14)$$

Cuando se consideran las armónicas se aplica la siguiente fórmula:

$$X_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2} \quad (2.15)$$

Donde:

P: potencia activa medida entre el terminal cortocircuitado y el terminal libre

Q: potencia reactiva medida entre el terminal cortocircuitado y el terminal libre

V: voltaje medido entre el terminal cortocircuitado y el terminal libre

I: corriente que circula por los dos terminales cortocircuitados

2.1.4.7.2 Determinación de la Reactancia de Secuencia Negativa X_2

Realizar un cortocircuito permanente de línea a línea con la máquina a velocidad nominal 1800 RPM. La corriente de cortocircuito debe ser aumentada desde 0.3 hasta 0.5 del valor nominal, esto es desde 155.7 A hasta 259.5 A y medir potencia activa, potencia reactiva como voltaje y corriente como se indica en el circuito a utilizar, figura 2.23.

Los instrumentos utilizados para esta prueba son:

- 1 Transformador de corriente (1500/5 A)
- 1 Amperímetro AC (5 A)
- 1 Voltímetro AC (208 V)
- 1 Voltímetro DC (125 V)
- 1 Amperímetro DC (20 A)
- 1 Watímetro
- 1 Varímetro

El circuito utilizado es:

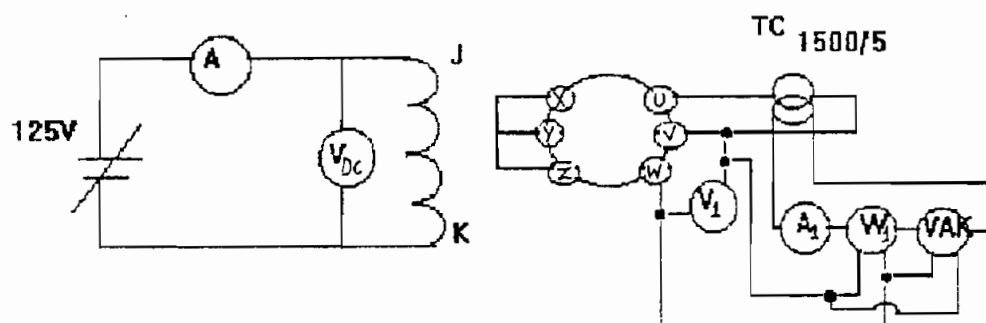


Figura 2.23 Circuito para la Prueba de Cortocircuito Línea-Línea

Los valores obtenidos con esta prueba son:

| Voltaje | Corriente | V1 | I1 | P1 | VAR | X ₂ ① | X ₂ ② | S | Qcal |
|---------|-----------|-----|-----|------|-----|------------------|------------------|-------|-------|
| 8.5 | 0.74 | 3.4 | 115 | 390 | →0 | 0.0170 | 0.0171 | 391 | 27.95 |
| 10 | 0.89 | 4.1 | 137 | 564 | →0 | 0.0173 | 0.0172 | 561.7 | |
| 12.5 | 1.16 | 5.5 | 178 | 990 | →0 | 0.0180 | 0.0176 | 979 | |
| 14.75 | 1.4 | 6 | 211 | 1410 | →0 | 0.0182 | 0.0147 | 1266 | |
| 16.75 | 1.62 | 7 | 243 | 1860 | →0 | 0.0181 | 0.0152 | 1701 | |
| 18 | 1.76 | 8 | 266 | 2220 | →0 | 0.0181 | 0.0166 | 2128 | |
| 20.15 | 1.98 | 9 | 300 | 2805 | →0 | 0.0179 | 0.0166 | 2700 | |

Tabla 2.4 Resultados de la Prueba de Cortocircuito Línea-Línea en el Generador de Emergencia

Si se ignoran armónicas:

$$X_2 = \frac{P}{\sqrt{3} I^2} \quad \text{①} \quad (2.14)$$

Si no se ignoran armónicas

$$X_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V^2}{P} - \frac{P^2}{P^2 + Q^2} \quad \text{②} \quad (2.15)$$

Como el varímetro usado no marcaba potencia reactiva ésta se calculó donde se podía cumplir que:

$$V.I = S > P$$

Entonces se aplica la fórmula 2.15 con Q calculado y se tiene que: $X_2 \text{ ①} = X_2 \text{ ②}$

$$\text{Con } Q \rightarrow 0 \text{ } X_2 \text{ es } X_2 = \frac{V^2}{P \sqrt{3}} \quad (\text{columna } X_2 \text{ ①})$$

Entonces:

$$\Rightarrow \bar{X}_2 = 0.01785635714 \quad \Omega$$

$$X_2 = 0.018 \quad \Omega$$

$$X_2 = 0.078 \text{ pu}$$

2.1.4.8 Reactancia de Secuencia Cero X_0

Para la determinación de esta reactancia se realiza la prueba de cortocircuito sostenido entre línea-línea-neutro, la cual se describe a continuación:

2.1.4.8.1 Prueba de Cortocircuito Sostenido Línea-Línea-Neutro

Este método tiene la ventaja que no requiere fuente de potencia monofásica como otras pruebas. Las bobinas de armadura deben estar conectadas en estrella, la máquina a velocidad nominal y debe estar con el campo excitado. Se debe medir la potencia activa y reactiva. Los valores de corriente y tiempo de prueba son limitados por el sobrecalentamiento y la vibración.

Como X_o es el valor efectivo cuando la corriente de secuencia cero iguala a la corriente nominal, la corriente de campo debería ser ajustada para dar un valor de $I_{\text{neutro}} = 3$ veces la corriente nominal, sin embargo buenos resultados se obtienen a baja corriente [11].

Como en todo cortocircuito sostenido la alta corriente asociada con cortocircuitos repentinos se pueden evitar si el cortocircuito se aplica sin fluir corriente de campo y entonces la corriente de campo sube y se ajusta para dar la corriente de armadura deseada.

Cuando se ignoran armónicos de voltaje y corriente se aplica la fórmula 2.16:

$$X_o = \frac{V_o}{I_o} \Omega \quad (2.16)$$

Considerando armónicos, la fórmula válida es:

$$X_o = \frac{V_o}{Q} \cdot \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} \Omega \quad (2.17)$$

Donde:

V_o : Voltaje medido entre los terminales cortocircuitados y el terminal libre

I_o : Corriente que circula por el neutro

P : Potencia activa medida entre los terminales cortocircuitados y el terminal libre

Q : Potencia reactiva medida entre los terminales cortocircuitados y el terminal libre

Como se calcula para algunos valores se dibuja X_0 en función de la corriente de neutro. El valor de X_0 cuando la corriente de neutro iguala tres veces la corriente de fase nominal se tomará como el valor de corriente nominal.

2.1.4.8.2 Determinación de la Reactancia Homopolar X_0

Con la descripción teórica de la sección 2.1.4.8.1 se resume las condiciones para esta prueba en lo siguiente: Realizar el cortocircuito permanente de línea a línea y centro de la estrella (neutro) con el generador a velocidad nominal 1800 RPM y aumentar la corriente de cortocircuito desde 0 hasta $0.3 I_N$, es decir desde 0 hasta 155.7 A.

El circuito utilizado para esta prueba es:

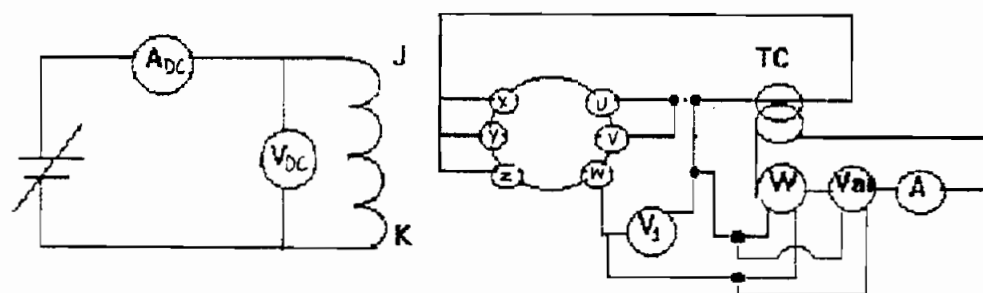


Figura 2.24 Circuito para Prueba de Cortocircuito Fase-Neutro

Los valores medidos en esta prueba son:

| Voltaje | Corriente | V1 | I | P | Q med | S | Qcal | X_0 (1) | X_0 (2) |
|---------|-----------|----|-----|-----|-------|-----|--------|-----------|-----------|
| 8,5 | 0,75 | 1 | 149 | 150 | →0 | 149 | --- | 0,0067 | |
| 10 | 0,9 | 1 | 178 | 195 | →0 | 178 | --- | 0,0056 | |
| 10,75 | 1 | 1 | 193 | 255 | →0 | 193 | --- | 0,0051 | |
| 11,75 | 1,075 | 2 | 215 | 345 | →0 | 430 | 256,66 | 0,0093 | 0,0027 |

Tabla 2.5 Resultados de la Prueba Cortocircuito Fase-Fase Neutro en el Generador de Emergencia

$$X_o = \frac{V_o}{I_o} \quad \text{sin armónicas} \quad (2.16)$$

$$X_o = \frac{V_o}{Q} \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} \quad \text{con armónicas} \quad (2.17)$$

Como Q tiende a cero se obtiene el valor de X_o con la fórmula 2.16, es decir sin considerar armónicas;

$$\bar{X}_o = 0.00612186925 \, \Omega$$

$$\text{Entonces:} \quad X_o = 0.006 \, \Omega$$

$$X_o = 0.026 \, \text{pu}$$

2.1.5 Constantes de Tiempo

Considerando una bobina que tiene una inductancia constante L (henrios o abohmios) y resistencia constante R (ohmios o abohmios). Si se cortocircuita sobre si misma a cualquier instante en el cual lleva corriente I, la corriente decae de acuerdo a la expresión exponencial:

$$i = I / e^{t/T} \quad (2.18)$$

Donde i es la corriente al tiempo t segundos, $T=L/R$ segundos y $e=2.718..$ base de logaritmos neperianos. Si $t=T$ $i = I/e = 0.368 I$, de aquí la constante de tiempo se define como la relación L/R o como el tiempo en segundos para que una corriente decayente no sostenida decrezca a 0.368 de su valor inicial asumiendo decaimiento exponencial [27].

En máquinas sincrónicas los circuitos del rotor no están todos concentrados y existe saturación a varios grados, de aquí que la corriente y el voltaje cambian no exponencialmente. En la mayoría de casos, sin embargo, se encuentra una buena aproximación para curvas exponenciales de las curvas reales, dando más peso a la parte inicial cuando los cambios de componentes son grandes. Se hace uso conveniente del efecto que una cantidad que decae exponencialmente es una línea recta cuando se dibuja en papel semilogarítmico; dos puntos determinan convenientemente esta línea y son el valor I al tiempo cero y el valor $1/s = 0.368$ de I al tiempo igual a la constante de tiempo.

2.1.5.1 Constantes de Tiempo de Eje Directo

Para determinar estas constantes se hace uso de las curvas obtenidas en el análisis de la corriente de cortocircuito trifásico súbito descrito anteriormente.

2.1.5.1.1 Constante de Tiempo Transitoria de Cortocircuito T_d'

Esta es la constante de tiempo del circuito de campo con la armadura cortocircuitada, de aquí la constante de tiempo de la componente transitoria se determina rápidamente del dibujo de esta componente de corriente. El valor saturado es obtenido desde el análisis de cortocircuito trifásico súbito a voltaje nominal en vacío. La inductancia o resistencia externas en el circuito de campo afectan el decremento de la corriente de campo.

Teóricamente, la variación de $\Delta i'$ debería ser exponencial solo para un estado de no saturación. T'_d es el tiempo para que la componente de corriente transitoria de armadura decrezca a $1/s \approx 0.368$ de su valor inicial.

De la componente transitoria $\Delta i_K'$ (figura 2.22) obtenida en el numeral 2.1.4.5.1 se obtiene:

El valor inicial de la corriente transitoria es:

$$\Delta i_K'(0) = 630 \text{ A}$$

$$1/s. (\Delta i_K'(0)) = (0.368). (630 \text{ A}) = 231.84 \text{ A}$$

Entonces, T_d' es el tiempo para que la curva $\Delta i_K'$ llegue al valor 231.84 A

Siendo $T_d' = 0.185$ segundos

2.1.5.1.2 Constante de Tiempo Subtransitoria de Cortocircuito T_d''

Esta es la constante de tiempo del circuito formado por los devanados amortiguadores y el circuito de campo con la armadura cortocircuitada. T''_d es el tiempo para que la componente subtransitoria de corriente de armadura baje a $1/s$ de su valor inicial. De la componente subtransitoria $\Delta i_K''$ (figura 2.22) obtenida en el numeral 2.1.4.5.1 se obtiene:

El valor inicial de la corriente subtransitoria es:

$$\Delta i_K''(0) = 716.15 \text{ A}$$

$$1/s \times \Delta i_K''(0) = 0.368 \times 716.15 \text{ A} = 263.54 \text{ A}$$

Entonces T_d'' es el tiempo para que la curva $\Delta i_K''$ llegue al valor 263.54 A

Resultando $Td'' = 0.03$ segundos

2.1.5.1.3 Constante de Tiempo del Circuito de Armadura T_a

T_a es el tiempo necesario para que la componente periódica de la corriente de excitación baje a $1/e$ de su valor inicial.

Conociendo la resistencia DC de la armadura r_a y la reactancia de secuencia negativa X_2 , T_a puede ser calculado de:

$$T_a = \frac{1}{2 \pi f} \cdot \frac{X_2}{r_a} \quad (2.19)$$

Donde f es la frecuencia nominal y r_a y X_2 están en las mismas unidades.

Como:

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$r_a = 0.0022 \, \Omega$$

$$X_2 = 0.018 \, \Omega$$

Entonces:

$$T_a = 0.0217 \text{ seg.}$$

2.1.5.1.4 Constante de Tiempo Transitoria de Circuito Abierto $T'do$

Esta es la constante de tiempo del circuito de campo con la armadura abierta. Esta prueba es conveniente para máquinas de polos salientes. Con la máquina funcionando con cerca del 50% del voltaje nominal en vacío, el devanado

de campo es repentinamente cortocircuitado sobre si mismo y Tdo' es determinada desde un dibujo semilogaritmico del voltaje de armadura. T'do es el tiempo requerido para que la diferencia de voltaje decrezca a $1/e \approx 0.368$ de su valor inicial. La diferencia entre el voltaje transitorio obtenido desde el oscilograma y el voltaje residual de la máquina se dibuja contra el tiempo en una escala semilogarítmica.

En resumen las condiciones para esta prueba son:
Estando el generador funcionando a velocidad nominal 1800 RPM con un valor de voltaje cerca al 50% del valor nominal en vacío, cortocircuitar el devanado de excitación súbitamente con un interruptor provisional y registrar el voltaje del estator en el osciloscopio.

El circuito utilizado es:

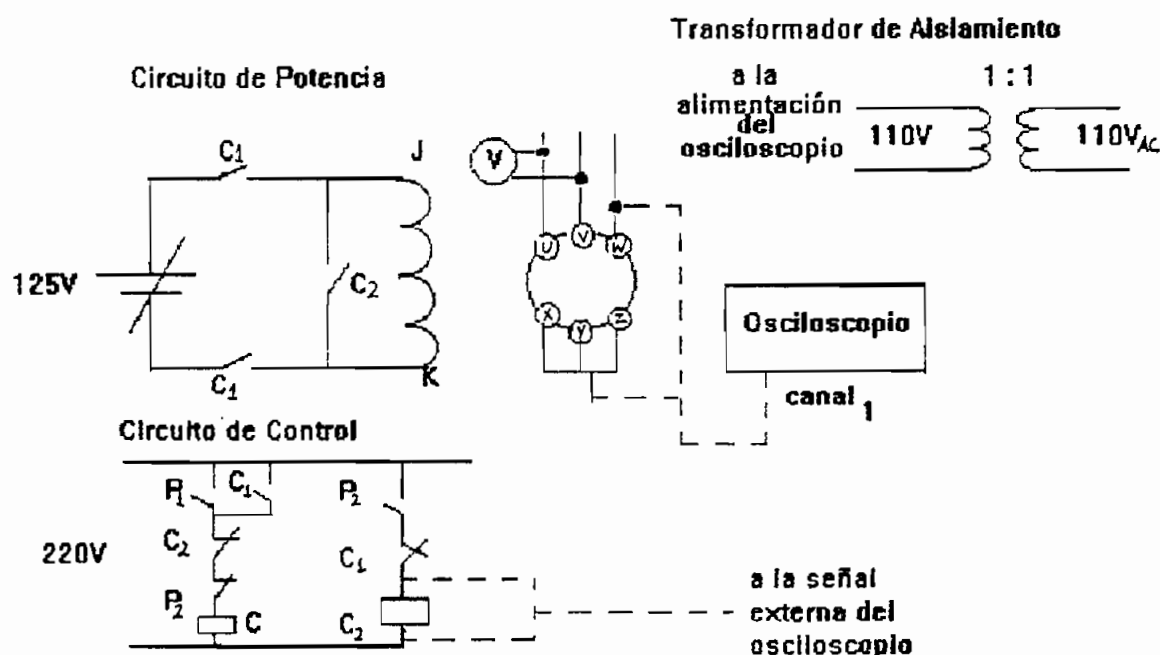


Figura 2.25 Circuito para Cortocircuito Súbito al Campo

Los instrumentos utilizados para esta prueba son:

- 1 Fuente variable de DC de 0 a 125 V_{DC} con capacidad de suministrar 20 A_{DC} (Se usó el grupo motor de inducción-generador de DC de una de las mesas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad)
- 1 Voltímetro AC (208 V)
- 1 Punta de prueba con atenuación para tomar señal de voltaje entre fase y neutro para analizar en el osciloscopio
- 1 Osciloscopio con memoria
- 1 Contactor trifásico con capacidad nominal de 300 A para el cortocircuito de campo (C2)
- 1 Contactor trifásico con capacidad nominal de 20 A para abrir el cortocircuito del campo (C1)
- 2 Pulsadores
- 1 Transformador de aislamiento para protección del osciloscopio.

Se realizan algunas pruebas de cortocircuito súbito al campo a diferentes valores de voltaje en vacío antes del cortocircuito y se tabulan sus valores inicial y 1/s del valor inicial (Tabla 2.6) y considerando que $T_{do'}$ es el tiempo para que el voltaje baje a 0.368 de su valor inicial, se obtienen los siguientes valores de $T_{do'}$. Es conveniente aclarar que lo que interesa es el tiempo y no el valor del voltaje, por ésto los valores tabulados deben multiplicarse por un factor de escala para tener valores reales.

| Uuv antes del corto | Valor inicial | 0.368 valor inicial | T_{do}' |
|---------------------|---------------|------------------------|----------------|
| 46 | 3.3 | 1.2144 | ≈ 0.1 |
| 100.8 | 1.7 | 0.6256 | ≈ 0.04 |
| 96 | 1.7 | 0.6256 | 0.32 |
| 40 | 1.7 | 0.8256 | < 0.04 |
| 34 | 1.8 | 0.6624 | < 0.04 |

Tabla 2.6 Resultados Obtenidos de la Prueba de Cortocircuito Súbito al Campo del Generador de Emergencia

Extrapolando estos valores de T_{do}' se tiene a voltaje nominal:

$$\Rightarrow T_{do}' \text{ a } V_N \approx 0.64 \text{ s}$$

Otra forma de obtener esta constante de tiempo es en función de parámetros conocidos como se indica a continuación:

$$T_{do}' = \frac{X_d}{X_d'} T_d' \quad (2.20)$$

$$T_{do}' = \frac{0.851 \text{ pu}}{0.1464 \text{ pu}} \cdot 0.185 \text{ s} = 1.07514 \text{ s}$$

Generalmente T_{do}' tiene valores mayores que 1 segundo y el valor obtenido mediante la prueba de cortocircuito súbito al campo es muy bajo, quizás debido a que la prueba no se realizó a voltajes mayores por razones de seguridad, por lo que se decide aceptar el valor de:

$$T_{do}' = 1.07514 \text{ s.}$$

2.1.5.1.5 Constante de Tiempo Subtransitoria de Circuito Abierto T_{do}''

En función de parámetros conocidos según [27]:

$$T_{do}'' = \frac{X_d'}{X_d''} \cdot T_d'' \quad (2.21)$$

$$T_{do}'' = \frac{0.1464 \text{ pu}}{0.0765 \text{ pu}} \times 0.03 \text{ s} = 0.05741 \text{ s}$$

Entonces $T_{do}'' = 0.05741 \text{ s}$.

2.1.5.2 Constantes de Tiempo del Eje en Cuadratura

Para determinar las constantes de tiempo en el eje en cuadratura los procedimientos son similares a los utilizados en las constantes de tiempo del eje directo, con la condición de que el rotor sea magnetizado en el eje en cuadratura el momento de hacer la prueba de cortocircuito trifásico súbito. Este instante es difícil de precisar físicamente, por lo que se hace la aproximación de tomar los valores de las constantes de tiempo del eje en cuadratura iguales a los establecidos para el eje directo. Considerando además que algunas de las constantes del eje en cuadratura no tienen sentido práctico.

2.1.5.2.1 Constante de Tiempo Transitoria de Cortocircuito Tq'

Esta constante debe ser determinada desde una prueba de cortocircuito trifásico súbito con el rotor magnetizado en el eje en cuadratura. Por lo expuesto antes, no se determina experimentalmente Tq' y se considera aproximadamente $Tq' = Td' = 0.185$ segundos

2.1.5.2.2 Constante de Tiempo Subtransitoria de Cortocircuito Tq''

Igual que Tq' , esta constante se determina de la prueba indicada para Tq' . Como tal prueba no se realiza, se considera aproximadamente $Tq'' = Td'' = 0.03$ segundos

2.1.5.2.3 Constante de Tiempo Transitoria de Circuito Abierto Tqo'

En función de los parámetros conocidos según [24]:

$$T_{qo'} = \frac{X_q}{X_{q'}} \cdot T_{q'} \quad (2.22)$$

$$T_{qo'} = \frac{0.717 \text{ pu}}{0.1464 \text{ pu}} \cdot (0.185 \text{ s}) = 0.906045 \text{ s}$$

Entonces $T_{qo'} = 0.906045$ segundos

2.1.5.2.4 Constante de Tiempo Subtransitoria de Circuito Abierto T_{qo}''

T_{qo}'' se puede determinar desde:

$$T_{qo}'' = \frac{X_{q'}}{X_{q''}} \cdot T_{q''} \quad (2.23)$$

$$T_{qo}'' = \frac{0.1464 \text{ pu}}{0.0795 \text{ pu}} \cdot (0.03 \text{ s}) = 0.05524 \text{ s}$$

Entonces $T_{qo}'' = 0.05524 \text{ s}$

2.2 DETERMINACION DE PERDIDAS DE LA MAQUINA SINCRONICA

Una máquina sincrónica presenta las siguientes pérdidas:

- 1 Pérdidas I^2R de armadura
- 2 Pérdidas de desvío o adicionales de carga
- 3 Pérdidas en el núcleo
- 4 Pérdidas I^2R del campo
- 5 Pérdidas de la excitatriz
- 6 Pérdidas en el reóstato del campo
- 7 Pérdidas de contacto de las escobillas
- 8 Pérdidas de fricción de las escobillas
- 9 Pérdida de fricción y desvío
- 10 Pérdidas de ventilación y refrigeración

Para usos posteriores se hace necesario definir los siguientes tipos de pérdidas:

2.2.1 Pérdidas en el Núcleo

Las pérdidas en el núcleo se toman como la diferencia de la potencia necesaria para operar la máquina a velocidad nominal con excitación para producir un voltaje en los terminales correspondientes al voltaje interno calculado, y la potencia requerida para operar la máquina sin excitación a la misma velocidad. El voltaje interno se determina corrigiendo el voltaje de terminal nominal para la resistencia que cae solamente.

Midiendo la potencia mecánica necesaria para mantener la velocidad sincrónica durante la prueba se podrán conocer las pérdidas totales en vacío, que corresponden a las pérdidas por fricción y ventilación, más las pérdidas en el núcleo, correspondientes al flujo de la máquina sin carga. Las pérdidas por fricción y ventilación a la velocidad sincrónica son constantes, mientras que las pérdidas en el núcleo, con circuito abierto, son función del flujo que a su vez es proporcional al voltaje en sus terminales.

La potencia necesaria para arrastrar la máquina, sin excitar, a la velocidad sincrónica corresponde a las pérdidas mecánicas por fricción y ventilación. Cuando se excita el devanado de campo, la potencia necesaria aumentará por corresponder no solo a las pérdidas citadas sino también a las del núcleo; por lo que se podrá conocer el valor de las últimas por la diferencia entre los valores de la potencia absorbida en uno u otro caso.

2.2.2 Pérdidas de Fricción y Ventilación

Aquí se incluyen las pérdidas de fricción de las escobillas, y es la potencia requerida para conducir la máquina sin excitación a velocidad nominal con las escobillas en contacto. Estas pérdidas resultan de la energía que el aire o gas refrigerante requieren a través del sistema de ventilación para la parte exterior o del enfriador de la máquina y de aquella necesaria para la operación de equipo conectado directo al eje.

Las pérdidas mecánicas se deben a la fricción en los rodamientos y con el aire. Las pérdidas en el núcleo se deben a la histéresis y a las corrientes parásitas. Con frecuencia estas pérdidas se toman en grupo y se las llama pérdidas en vacío o pérdidas rotacionales de la máquina. En vacío toda la potencia que entra a la máquina se convierte en estas pérdidas. Por lo tanto, una medida de la potencia en vacío será aproximadamente, el valor de las pérdidas mecánicas.

Las pérdidas indeterminadas son todas aquellas que no se pueden clasificar en las categorías anteriores. Por convención, se asume que son iguales al 1% de la potencia de salida de la máquina [9].

2.3 POTENCIA MECANICA Y RENDIMIENTO

La máquina sincrónica usada como generador tiene como fuente de potencia mecánica una máquina impulsora a diesel, que tiene la propiedad de mantener casi constante

la velocidad a cualquier carga y así la frecuencia del sistema de potencia no es errática. No toda la potencia mecánica que entra al generador sincrónico se convierte en potencia eléctrica. La diferencia entre las potencias de entrada y de salida del generador corresponde a las pérdidas de la máquina.

Para la determinación de la constante de inercia se requiere conocer la potencia mecánica de la máquina en vacío, por lo que se hace necesario la descripción de las pérdidas más importantes tanto del motor como del generador. En el motor se definen las siguientes potencias, que tienen que ver directamente con sus pérdidas.

2.3.1 Potencia de Fricción

Potencia de fricción es la potencia que consumen las piezas del motor tales como pistones y cilindros más la potencia necesaria para la compresión. La fricción es un factor de pérdida y un productor de calor. La potencia de fricción se obtiene restando de la potencia indicada (potencia teórica) la potencia útil. La potencia de fricción son todas las pérdidas que se producen en el motor. Esta medida viene a ser así un factor que indica el rendimiento de un determinado motor.

2.3.2 Potencia al Freno

Potencia de freno es la potencia que se puede acoplar a la carga para realizar trabajo útil.

2.3.3 Potencia Nominal

Potencia nominal es la potencia que el motor es capaz de producir en condiciones de trabajo normales según el fabricante.

La potencia nominal de un motor se calcula para uso máximo de presión, velocidad y par motor que no deben sobrepasarse para no averiar el motor. La potencia nominal depende en parte de la cilindrada en litros del motor. Partiendo de esto el fabricante calcula los esfuerzos máximos y las revoluciones por minuto que el motor podrá soportar sin averiarse probándolo en diferentes condiciones para conocer la potencia nominal que asegure al motor duración larga y funcionamiento seguro.

2.3.4 Rendimiento Mecánico

En un motor funcional aparte de las pérdidas de fricción hay otros componentes y accesorios que también absorben potencia así: la bomba de combustible, la bomba de agua, el ventilador, la dinamo o el alternador, el sistema de encendido, las válvulas, la bomba de aceite, los compresores y sobrealimentadores, las bombas hidráulicas (de reserva), y el compresor de aire acondicionado.

El accionamiento de todos estos componentes y accesorios absorbe potencia del motor y reduce su rendimiento. Por lo tanto, el rendimiento mecánico se calcula restando todas estas pérdidas y las pérdidas causadas por fricción interna.

2.3.5 Rendimiento Térmico

El rendimiento térmico al freno es la potencia al freno dividida para el combustible quemado y multiplicado por 100. Entonces el rendimiento térmico al freno es un índice de la eficacia con que el motor convierte la energía calórica en potencia útil.

El rendimiento térmico al freno tiene en cuenta todas las pérdidas que se producen en el motor y se denomina a veces también rendimiento global.

Eficiencia térmica es entonces la relación de la potencia desarrollada por el motor en el eje o cigüeñal a la potencia disponible en el combustible. Se representa con η . Aunque los grandes motores estacionarios de plantas de potencia, con sobrealimentación alcanzan altas eficiencias térmicas, de hasta el 40%, la mayor parte de motores de combustión interna tienen eficiencias comprendidas entre 15 y 30%.

Un kilogramo de combustible Diesel produce cerca de 10200 kcal de energía (1 libra de este combustible produce 18500 BTU aproximadamente) [28].

Al igual que el CEC (consumo específico de combustible en kg/h/HP), la eficiencia térmica varía según la velocidad del motor y la apertura del acelerador

El rendimiento térmico al freno de un motor típico es 32% [28].

2.4 PARAMETROS MECANICOS

Cuando se usa una máquina como un generador se suministra un par mecánico al eje de la máquina, y por lo general se hace girar a velocidad constante (o casi constante). Se generan voltajes en las bobinas de la máquina y se puede suministrar energía eléctrica a una carga conectada. En este caso se establece un par de reacción mecánica y las leyes de Newton pueden aplicarse para describir el par mecánico; el par eléctrico se obtiene de las ecuaciones matriciales de la máquina sincrónica.

El par que se aplica al eje exteriormente tiene que compensarse con diversos tipos de pares de la máquina, como son: un efecto de inercia, un par viscoso o de resistencia del aire, par de elasticidad debido a la torsión de eje y por último un par que se ejerce sobre el rotor, de origen eléctrico; por tanto:

$$T_r = J d\omega_r/dt + D\omega_r + 1/kf \omega_r dt + T_e \quad (2.24)$$

Donde:

T_r : Par exterior aplicado [N-m]

J : Momento de Inercia total del rotor [N-m-seg²]

D : Coeficiente angular de fricción viscoso [N-m-seg]

k : Es la deformación del eje del rotor [N-m]

T_e : Es el par de origen eléctrico [N-m]

La torsión que sufre el eje es pequeña por lo que se puede considerar despreciable, luego:

$$1/kf \omega_r dt = 0$$

$$T_r = Jd\omega_r/dt + D\omega_r + T_e \quad (2.25)$$

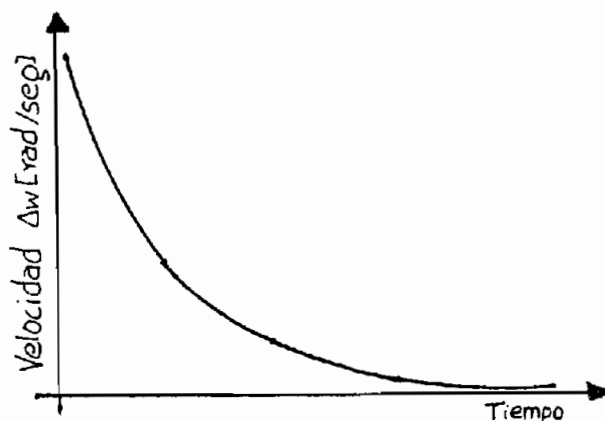


Figura 2.26 $W = f(t)$

2.4.1 Cálculo de la Potencia Mecánica del Grupo de Emergencia

Para determinar la constante de inercia H es necesario conocer la potencia mecánica que está ingresando al generador en vacío, para ello se determinará una potencia mecánica aproximada a partir del consumo del combustible en vacío y de la eficiencia térmica del combustible diesel.

$$\text{eficiencia térmica} = \frac{\text{Potencia en el cigüeñal}}{\text{Potencia dispon.en el combustible}} = \eta \quad (2.26)$$

$n = 40\%$ en grandes plantas

$15\% < n < 30\%$ mayoría

1 Kgr de combustible diesel 10200 Kcal de energía

1 libra de combustible diesel 18500 BTU \rightarrow 40700 BTU/Kgr

Según [2] para el diesel se tiene:

| Variable | Valor medio | Desviación Estandar |
|--|----------------|---------------------|
| Volúmen aromáticos % | 13,5 | 23,9 |
| δ Kg/m ³ (°API) | 779,3 (50) | 0,058 (13,5) |
| Volatilidad °C (°F) | 171,11 (340) | 57,2 (2) |
| Calor de combustión MJ / Kg (BTU / pound) | 43,421 (18668) | 0,862 (371) |

Tabla 2.7 Valores Típicos para el Diesel

Por las referencias [14], [15] y [16] los consumos característicos de grupos electrógenos comerciales de diferente potencia son:

180 Kw a 60 Hz, 25% de carga, se consume 3.4 gph 12.8 Lph
 200 Kw a 60 Hz, 25% de carga, se consume 5 gph 18.9 Lph
 230 Kw a 60 Hz, 25% de carga, se consume 6.2 gph 23.5 Lph

El grupo de emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica consume 3 galones de diesel por hora en vacío.

Sabiendo que:

1 galón = 3.785 litros

1 litro = 1000 cm³

Y considerando como valores promedio para el combustible diesel los siguientes:

Densidad = 0.7793 gr/cm³

Calor de combustión = 43.421 MJ/ Kgr

Además:

$$1 \text{ kWh} = \frac{10^3 \text{ J}}{\text{s}} \cdot 3600 \text{ s} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Entonces:

$$\begin{array}{rcl}
 3.785 \text{ li} & 1000 \text{ cm}^3 & 0.7793 \text{ gr} & 4,421 \text{ MJ} & 1 \text{ kWh} \\
 1 \text{ galón} & \text{-----} & & & = 35.576 \text{ kWh} \times 3 = 10.67 \text{ kWh} \\
 1 \text{ galón} & 1 \text{ li} & \text{cm}^3 & \text{Kgr} & 3.6 \cdot 10^6 \text{ J}
 \end{array}$$

Asumiendo una eficiencia térmica del diesel y del grupo electrógeno total del 30%,

$$\Rightarrow 1 \text{ galón} \rightarrow 10.67 \text{ kWh}$$

Como en 1 hora en vacío se consumen 3 galones de diesel:

$$3 (\text{gal/h}) (10.67 \text{ kWh}) = 32.01 \text{ kWh}$$

\Rightarrow En el eje del rotor del generador hay 32.01 kWh

Pero la potencia mecánica que es la potencia en el cigüeñal del motor es la potencia que entregaría el grupo en el rotor del generador (32.01 kWh) más la potencia que se pierde en el núcleo y que se asume como 10% de la potencia nominal del generador.

$$10\% P_n = 10\% \cdot (150 \text{ kW}) = 15 \text{ kW}$$

$$\text{Así, } P_m = 32.01 \text{ kWh} + 10\% P_{\text{Nominal}} = 47.01 \text{ kW}$$

$$P_m = 47.01 \text{ kW}$$

2.4.2 Constante de Inercia H

Para determinar la constante H debe realizarse una medición exacta de la velocidad del rotor en función del tiempo, cuando se permita que el rotor gire a una velocidad determinada sin carga y luego se quite la alimentación que

dio su movimiento. En el caso de una máquina síncrona se debe desconectar también la excitación debido a que crea un par eléctrico.

A partir de la ecuación de oscilación de la máquina síncrona se puede desarrollar una expresión para evaluar el valor de H.

Esto es:

$$P_m - P_e = \frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D\omega \quad (2.27)$$

Donde : P_m = potencia mecánica

P_e = potencia eléctrica

D = coeficiente de amortiguamiento

f = frecuencia

ω = velocidad angular

δ = ángulo delta

Aplicando las siguientes condiciones de operación en la ecuación:

$P_e = 0$ porque el generador está en vacío, sin carga

$P_m = 0$ al momento de apagar el motor

Se obtiene:

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D\omega = 0$$

Como $\omega = d\delta/dt$

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d\omega}{dt} + D\omega = 0$$

Desarrollando en el dominio de Laplace:

$$\frac{H}{n f} (sW(s) + K) + DW(s) = 0$$

Operando matemáticamente:

$$W(s) \left[s \frac{H}{n f} + D \right] = - \frac{KH}{n f}$$

De donde:

$$W(s) = -K \frac{1}{D n f} \frac{1}{s + \frac{H}{D n f}}$$

Entonces:

$$W(t) = -K \cdot e^{-\frac{D n f}{H} t}$$

Cuando $t = 0 \rightarrow W(t) = W_n$

$$\text{Entonces } W_n = -K e^0 \Rightarrow W(t) = W_n e^{-\frac{D n f}{H} t}$$

Si $t = t_1$ cuando $W(t) = 0.05 W_n$

$$0.05 W_n = W_n e^{-\frac{D n f}{H} t_1}$$

Simplificando W_n en ambos lados de la ecuación y sacando el logaritmo natural a ambos lados:

$$\ln 0.05 = -\frac{D \pi f}{H} t_1$$

Entonces:

$$H = \frac{D \pi f t_1}{3} \quad (2.28)$$

Para obtener D:

Sin carga y a velocidad constante

$$P_e = 0 \quad (\text{sin carga})$$

$$dw/dt = 0 \quad (\text{velocidad constante})$$

$$P_m - P_e = \frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + Dw \quad (2.27)$$

$$\text{Como } w = d\delta/dt$$

$$P_m - P_e = \frac{H}{\pi f} \frac{dw}{dt} + Dw \quad (2.29)$$

Reemplazando las condiciones establecidas de vacío y velocidad constante en esta ecuación se tiene:

$$P_m = Dw$$

$$\text{Entonces } D = \frac{P_m}{W_r} \quad (2.30)$$

Reemplazando D en la ecuación 2.28 se tiene:

$$H = \frac{P_m \pi f t_1}{3W_r} \quad (2.31)$$

Donde P_m está en kW

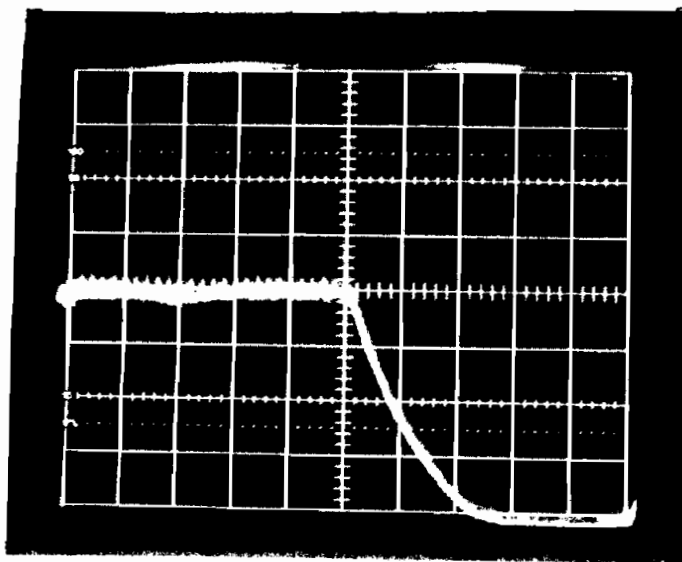
ω_r está en rad/s

f está en ciclos/s (Hz)

t_1 el tiempo en segundos para que la velocidad del rotor llegue a 0.05 de la velocidad inicial

2.4.2.1 Determinación de H y D

Se obtiene la curva de la velocidad en función del tiempo de la máquina sincrónica (figura 2.27) para determinar el tiempo t_1 que se demora en bajar la velocidad del rotor desde su valor nominal hasta el 5% de la velocidad inicial. La potencia mecánica en vacío calculada anteriormente, el tiempo t_1 , la frecuencia f y la velocidad angular ω_r se reemplazan en la ecuación 2.31 para calcular H.



Ganancia 2 V/div

Barrido 5 s/div

Figura 2.27 Velocidad del rotor Vs t

Como:

$$P_m = 47.01 \text{ kW}$$

$$\omega_r = 377 \text{ rad/s}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$\text{de la figura 2.27 } t_1 = 13 \text{ s}$$

Entonces:

$$H = \frac{(47.01) \cdot (\pi) \cdot (60) \cdot (13)}{3 \cdot (377)} = 101.85 \text{ [kW s]}$$

Como los kVA nominales de la máquina son 187, el valor de H en [kW s / kVA] es:

$$H = \frac{101.85}{187} = 0.54 \text{ [kW s / kVA]}$$

De la literatura consultada [29], [30] para determinar la constante de amortiguamiento D, se observa que su valor está entre 0 y 3 pu. Así D vale entre 0 y 1 pu cuando se considera solo la fricción mecánica y las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas de Eddy en la máquina sincrónica. D vale 2 pu si se considera el efecto de la frecuencia sobre la carga aparte de la fricción mecánica y pérdidas por histéresis y corrientes parásitas de Eddy. Y D puede valer 3 pu al considerar los devanados de amortiguamiento en el rotor además del efecto de la frecuencia sobre la carga y las pérdidas por fricción mecánica, histéresis y corrientes parásitas de Eddy.

En el caso del presente estudio, se modela la carga de la Facultad con ecuaciones de las componentes en función de

variaciones de frecuencia y voltaje, se modelan los devanados de amortiguamiento en el rotor, quedando únicamente por considerar la fricción mecánica, las pérdidas por histéresis y las corrientes parásitas de Eddy, por lo tanto y debido al tamaño del grupo de emergencia se asume un valor de 0.5 pu como constante de amortiguamiento.

Es necesario aclarar que el valor de D (ecuación 2.30) obtenido para calcular la constante de inercia H considera solo fricción mecánica y pérdidas por histéresis y corrientes parásitas de Eddy, por lo que su valor es menor a la constante de amortiguamiento D requerida para simulación ya que ésta depende del momento propio, el cual es proporcional a las resistencias del estator, al cuadrado de la fem de la máquina, al deslizamiento cuando la máquina está fuera de sincronismo y al devanado de amortiguamiento.

CAPITULO III

FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL GRUPO DE EMERGENCIA

3.1 MAQUINA MOTRIZ

El programa de estabilidad transitoria en el que se analiza el comportamiento del grupo de emergencia permite simular tres tipos de sistemas mecánicos con sus respectivos reguladores de velocidad, éstos son sistemas de turbina de vapor, sistemas de turbinas a gas y sistemas de turbinas hidráulicas.

La máquina motriz del generador de emergencia se modelará como un sistema de turbina de vapor. Pues de los tres mencionados anteriormente éste es el más parecido al no existir un modelo para sistemas a diesel.

Todo sistema de turbina de vapor utiliza válvulas controladas por el gobernador para controlar el flujo de vapor. Se asume que todo control de turbina es cumplido por válvulas controladoras del gobernador (es decir, excluyendo las válvulas interceptoras y válvulas de parada).

En el motor diesel también existen válvulas controladas por el regulador de velocidad que a su vez controlan el ingreso de combustible a través de los inyectores. La cámara de vapor y la tubería de ingreso para el primer cilindro de la turbina y recalentadores y, tubería crossover introducen retardos entre el movimiento

de la válvula y el cambio en el flujo del vapor. En el motor diesel la cámara de vapor de la turbina tiene su equivalente en la cámara de combustión, y aquí no se consideran tuberías de alta presión y crossover ni tampoco recalentadores, pues solo existirán las tuberías del sistema de combustible para la admisión a los cilindros y las del sistema de escape de los gases quemados, los cuales no introducen retardos importantes comparados con los de la cámara de combustión. Por ésto el modelo del sistema turbina de vapor se simplifica grandemente al adaptarlo al caso específico de este motor diesel.

El principal objetivo en la modelación del sistema a vapor para estudios de estabilidad transitoria es el tomar en cuenta esos retardos en la operación del sistema. Los cambios de presión a la entrada de las válvulas controladas del gobernador también son importantes en algunos estudios de estabilidad. Los controles del caldero son diseñados para regular la presión de la válvula pero la respuesta controlada del caldero no es suficientemente rápido para compensar las variaciones de presión debido al movimiento de las válvulas controladas del gobernador. Puede asumirse que hay alguna presión en el generador de vapor el cual permanece constante por el intervalo de tiempo para un estudio de estabilidad y ese cambio de presión depende del cuadrado del flujo de vapor que va por el caldero desde el punto de presión constante de las válvulas.

La variación de presión de las válvulas puede ser significativa en simulación de perturbaciones, lo cual resulta en cambios de frecuencia permanentes relativamente

grandes. Esto no es considerado importante cuando las variaciones de frecuencia son pequeñas y centradas alrededor de la frecuencia nominal del sistema.

La cámara de vapor y tubería de alta presión de la turbina a vapor se representa por el diagrama de bloques de la figura 3.1.

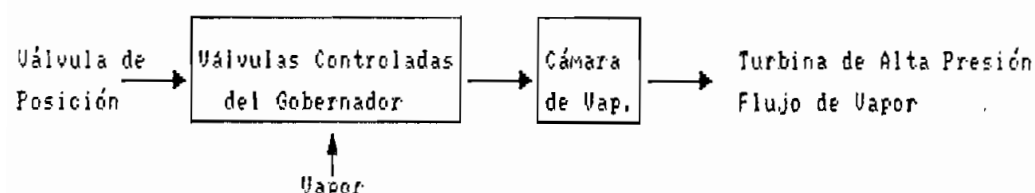


Figura 3.1 Diagrama de Bloque

La cámara de vapor introduce un tiempo de retardo el cual está representado por la constante de tiempo T_{CH} , como se puede ver en el modelo matemático de la figura 3.2.

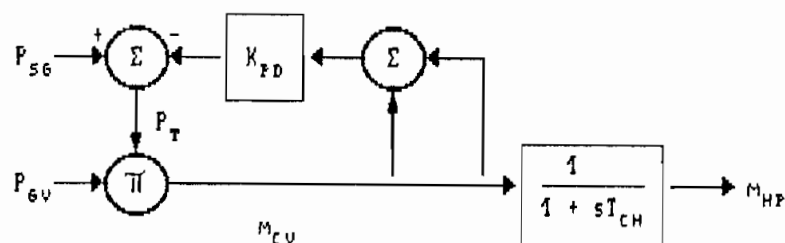


Figura 3.2 Modelo No Lineal Aproximado

La presión P_{sg} es una presión interna del caldero asumida constante sobre el intervalo estable y P_T es una presión variable a la entrada de las válvulas controladas del gobernador. El parámetro K_{PD} es un coeficiente de la tubería de caída. El modelo de la figura 3.3 muestra un modelo lineal de la cámara de vapor y tubería de presión si la caída por el tubo del caldero es ignorada.

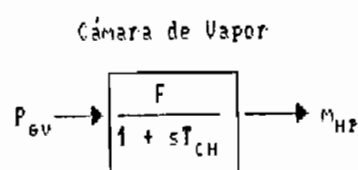


Figura 3.3 Modelo Lineal

Este modelo es aplicable al sistema del motor diesel, cámara de combustión principalmente. Existen seis comunes configuraciones del sistema de vapor, pero el programa de estabilidad que se usa está adaptado para modelar una de estas configuraciones que es la denominada Tandem Compound, Single Reheat (de varios cilindros y simple recalentamiento), cuyo diagrama de bloques y modelo de aproximación lineal se presenta a continuación en las figuras 3.4 A y 3.4 B) respectivamente.

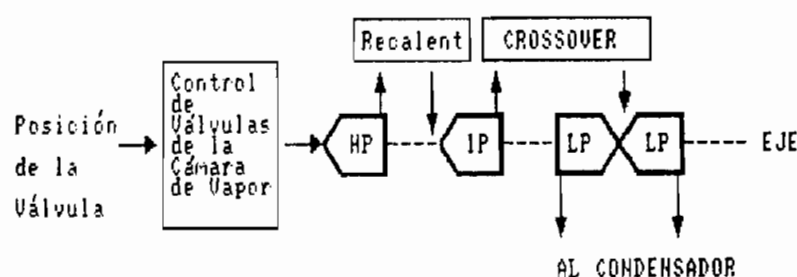


Figura 3.4.a Configuración del Sistema Compuesto con Recalentamiento

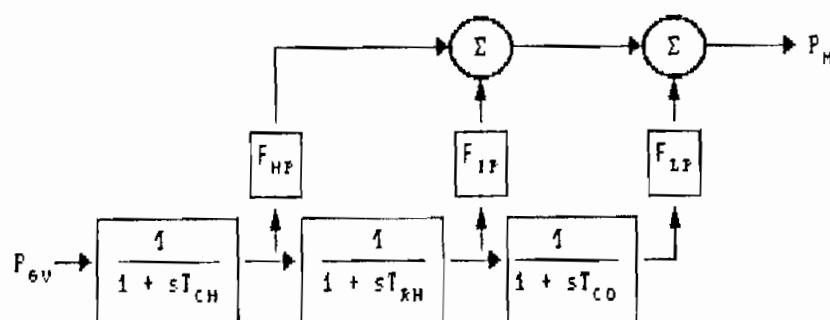


Figura 3.4.b Modelo de Aproximación Lineal

Las constantes de tiempo T_{CH} , T_{RH} y T_{CO} representan retardos debido a la cámara de vapor y su tubería interior, recalentadores y tubería crossover, respectivamente. Las fracciones F_{HP} , F_{IP} y F_{LP} representan partes de la potencia total de la turbina desarrolladas en los varios cilindros.

La configuración más simple para sistemas de turbina a vapor y que se ajusta mejor a la modelación del motor diesel es la denominada Nonreheat (sin recalentamientos), cuyo diagrama de bloques y modelo lineal aproximado se representa a continuación en las figuras 3.5.a y 3.5.b, respectivamente.

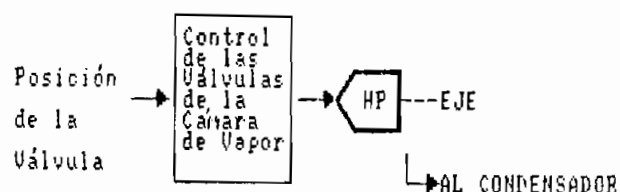


Figura 3.5.a Diagrama de Bloques del Sistema sin Recalentamiento

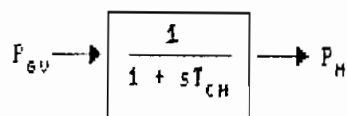


Figura 3.5.b Aproximación Lineal

Por lo tanto es necesario dar los valores correspondientes a las constantes requeridas por el programa para simplificar el sistema de configuración de varios cilindros con recalentamiento a uno sencillo sin recalentamiento que es el más aproximado para simular.

Para sistemas de turbinas de vapor de configuración sin recalentamiento, los valores de T_{CH} están entre 0.2 y 0.5 segundos, por lo que se tomará para este caso particular el valor $T_{CH} = 0.3$ segundos.

3.2 SISTEMA DE REGULACION DE VELOCIDAD

El motor diesel tiene un regulador de velocidad de tipo hidráulico con válvulas eléctricas de tipo solenoide que son comandadas desde un dispositivo de control del grupo de emergencia. Por lo que se considera el sistema de regulación de velocidad como de tipo electro-hidráulico para su modelación y obtención de las respectivas funciones de transferencia.

Un mecanismo de control de velocidad electro-hidráulico da flexibilidad a través del uso de circuitos electrónicos en lugar de componentes mecánicos en las

partes de baja potencia. En el sistema a vapor el control electro-hidráulico consiste de: un transductor de velocidad, un relé de velocidad, un servomotor hidráulico y válvulas controladas del gobernador, las cuales son relacionadas funcionalmente como se muestra en la figura 3.6.

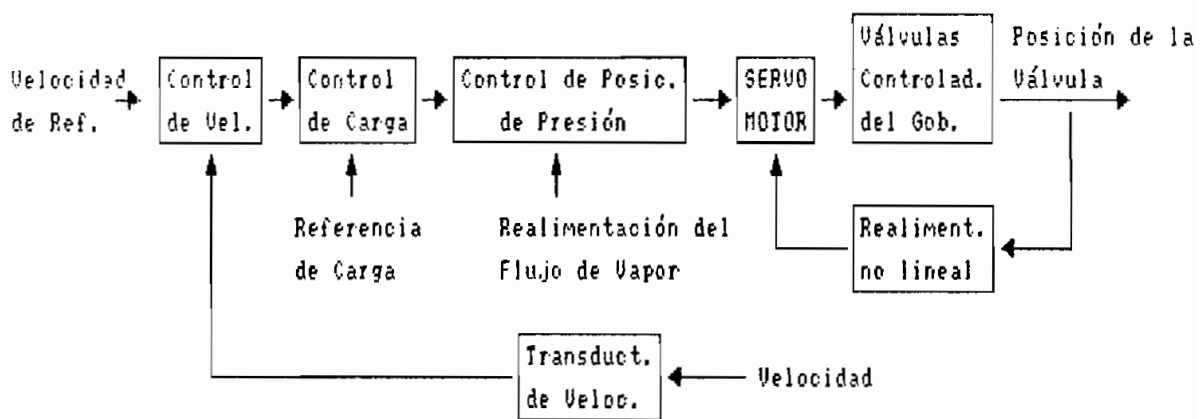


Figura 3.6 Diagrama de Bloques del Sistema de Regulación de Velocidad Electrohidráulico

El diagrama de bloques de la figura 3.7, muestra un modelo matemático aproximado.

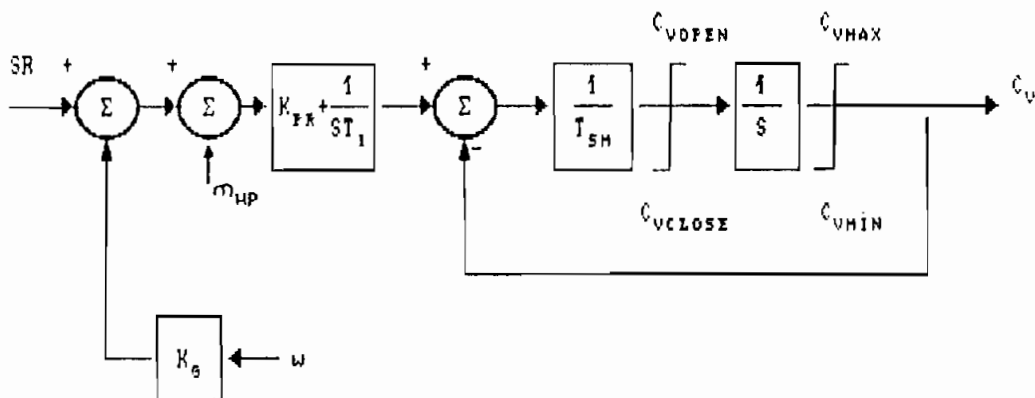


Figura 3.7 Modelo Aproximado para Sistema de Control EH

El transductor de velocidad produce una posición, la cual se asume lineal, indicación instantánea de velocidad y es representada por una ganancia K_v la cual es el recíproco de regulación o caída de velocidad. La señal SR es obtenida desde el cambiador de velocidad del gobernador y es determinada por el sistema de control de generación automática. Esto representa una composición de carga y velocidad de referencia y se asume constante sobre el intervalo de un estudio de estabilidad.

El relé de velocidad se representa como un integrador con constante de tiempo T_r y realimentación directa. El servomotor es representado por un integrador con constante de tiempo T_{sm} (valor típico 0.1 s) y realimentación directa. El flujo de vapor (o primera etapa de sobrecarga) de realimentación y el lazo de realimentación del servomotor da una linealidad mejorada respecto del sistema mecánico hidráulico.

El servomotor mueve las válvulas y es físicamente grande para unidades grandes. La velocidad de limitación del servomotor debe ocurrir para grandes desviaciones de velocidad rápidas, y límites en velocidad son mostradas a la entrada del integrador representante del servomotor. Los límites de posición son también indicados y deben corresponder a válvulas completamente abiertas o la posición del limitador de carga.

En estudios de sistemas de potencia, las no linealidades en el mecanismo de control de velocidad son normalmente despreciadas excepto para límites nominales.

El modelo de turbina a vapor que reconoce el programa de estabilidad a utilizar es el de la figura 3.8 y las constantes requeridas para modelar el sistema del motor a diesel del grupo de emergencia a partir de la simplificación del modelo a vapor son:

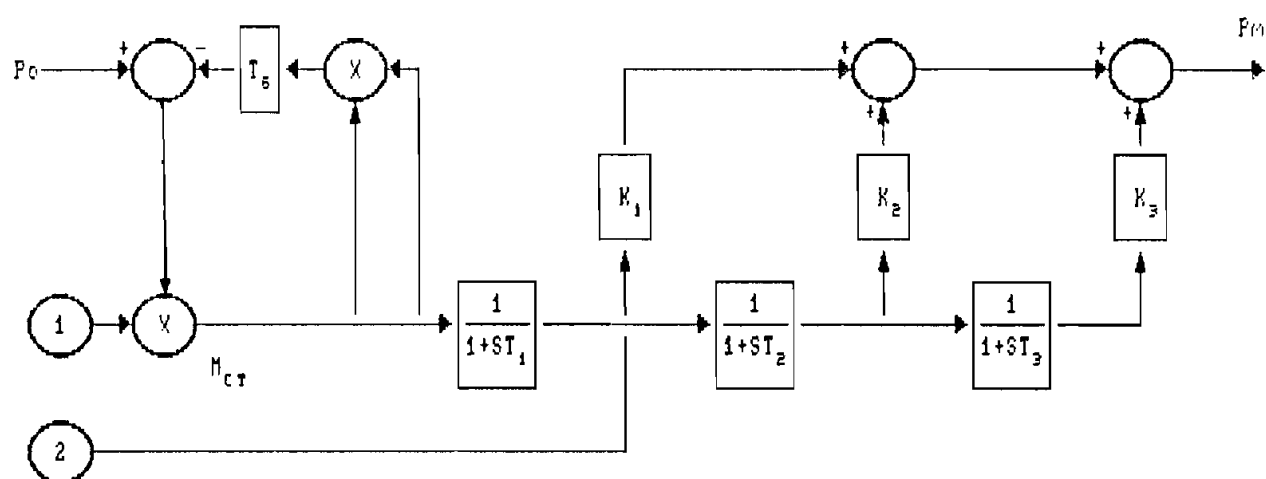
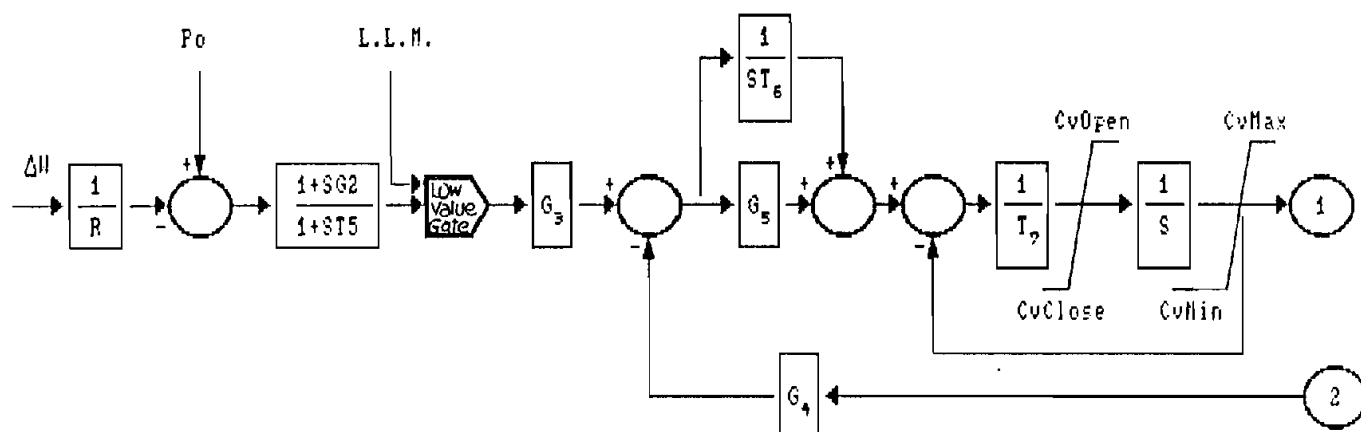


Figura 3.8 Modelo de Turbina a Vapor

Constantes para el Modelo:

$$\begin{aligned}
 P1 : \quad T_1 &= T_{CH} = 0.3 \\
 T_2 &= 0.01 \\
 T_3 &= 0.01 \\
 T_4 &= 0.01 \\
 T_5 &= 0.01 \\
 T_6 &= T_1 = 999999
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P2 : \quad T_7 &= T_{SM} = 0.1 \\
 T_8 &= K_{FP} = 0 \\
 K_1 &= F_{HP} = 1 \\
 E_2 &= F_{IP} = 0 \\
 K_3 &= F_{LP} = 0 \\
 G_2 &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P3 : \quad G_3 &= 0 \\
 G_4 &= 0 \\
 G_5 &= K_{PF} = 1 \\
 DCVU &= C_{Vmax} = 0.167 \\
 DCVL &= C_{Vmin} = -0.167
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P4 : \quad CVU &= C_{Vopen} = 1 \\
 CVL &= C_{Vclose} = 0
 \end{aligned}$$

3.3 SISTEMA DE EXCITACION DE LA MAQUINA SINCRONICA

El sistema de excitación del grupo de emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica es un Sistema de Excitación tipo DC1 pues utiliza un generador de DC como fuente de excitación del sistema de potencia. Este modelo

es descrito por el diagrama de bloques de la figura 3.9. Y en él se pueden observar el regulador de voltaje representado por un bloque con una función de transferencia caracterizada por una ganancia y una constante de tiempo (K_A y T_A), la excitatriz caracterizada por la constante de tiempo T_E realimentada por un bloque que representa la saturación de la excitatriz ($S_E + K_E$), el filtro de entrada al regulador representado por T_E y T_C y el estabilizador del regulador cuya función de transferencia consta de una constante de tiempo (T_F) y una ganancia (K_F).

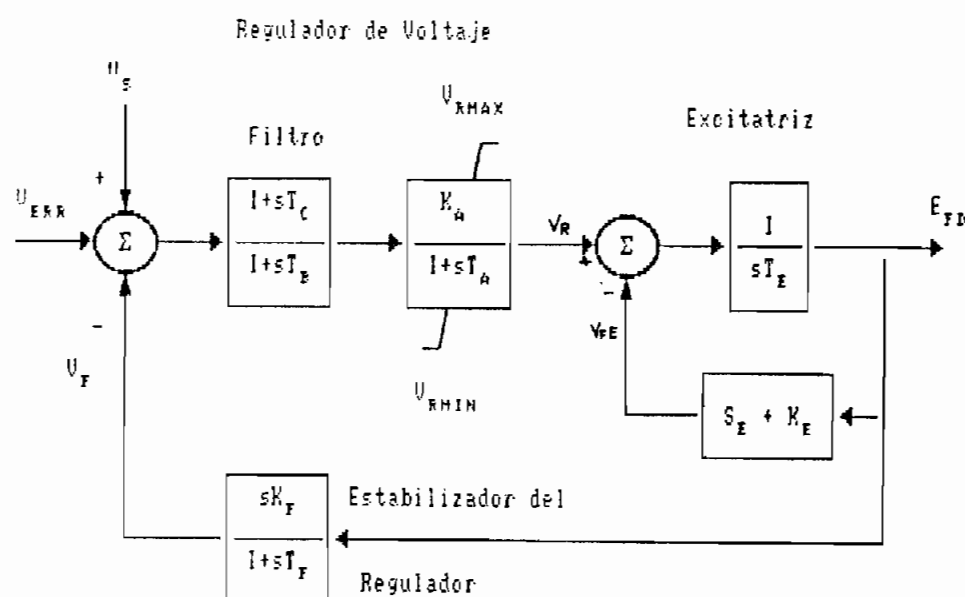


Figura 3.9 Sistema de Excitación tipo DC1

Las siguientes funciones son importantes en todo sistema de excitación y se identifican y describen así:

- Transductor de voltaje y compensador de carga
- Estabilizador de sistemas de potencia

Un diagrama de bloques del transductor del voltaje terminal y el compensador de carga se muestra en la figura 3.10

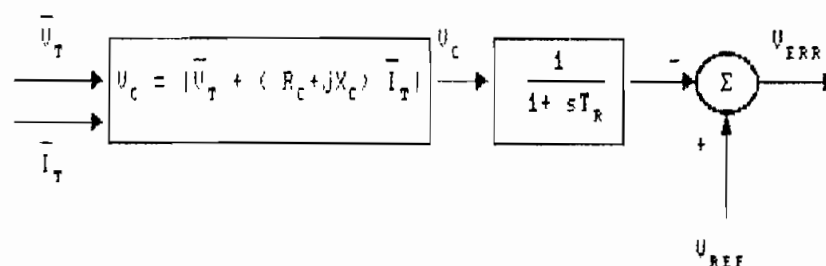


Figura 3.10 Modelo del Compensador de Carga y Transductor de Voltaje Terminal del Generador

Cuando no se emplea compensaciones de carga ($R_c=X_c=0$), el diagrama de bloque se reduce a un simple circuito sensor y comparador. El voltaje terminal del generador es sensado y usualmente reducido a cantidades DC. Mientras el voltaje asociado con el transductor de voltaje puede ser complejo para propósitos de modelación este puede ser usualmente reducido a una única constante de tiempo (T_R). Para muchos sistemas, esta constante de tiempo es muy pequeña y provisionalmente podría ponerse cero. Entonces T_R tiende a cero.

La salida del transductor del voltaje terminal es comparado con una referencia, la cual representa el voltaje terminal deseado ajustado. La señal de referencia del regulador de voltaje equivalente V_{REF} , es calculada para satisfacer las condiciones iniciales de operación. Se toma por lo tanto un valor único para la condición de carga del

generador que está siendo estudiada. La señal de error resultante es amplificada como se describe en el modelo de sistema de excitación apropiado para dar un voltaje de campo y por consiguiente un voltaje terminal para satisfacer las ecuaciones del circuito en estado estable. Sin compensaciones de carga el sistema de excitación dentro de sus características de regulación trata de mantener un voltaje terminal determinado por la señal de referencia.

Para el estudio del sistema de excitación de la máquina síncrona debe analizarse principalmente para la simulación, la excitatriz y el sistema de regulación de voltaje.

3.3.1 Sistema de Regulación de Voltaje

La principal entrada a este modelo es el error de voltaje terminal V_{ERR} desde el transductor de voltaje terminal del generador y del compensador de carga descrito en 3.3.

La realimentación estabilizadora V_f es restada y la señal estabilizadora del sistema de potencia V_s es sumada a V_{ERR} . En el estado estable estas dos señales anteriores son cero permaneciendo solo la señal de error de voltaje terminal. La señal resultante es amplificada en el regulador. La mayor constante de tiempo T_A y ganancia K_A asociadas con el regulador de voltaje se muestran incorporadas con límites típicos de saturación o limitaciones del amplificador de la fuente de potencia. Estos reguladores de voltaje utilizan fuentes de potencia

que no son esencialmente afectadas por transitorios breves en el generador o en barras cercanas. Las constantes de tiempo T_b y T_c deben ser usadas para modelar constantes de tiempo equivalentes inherentes en el regulador de voltaje pero estas constantes de tiempo son frecuentemente suficientemente pequeñas para ser despreciadas y provisionalmente deberían ser cero como dato de entrada [13].

La salida del regulador de voltaje, V_R es usada para controlar la excitatriz, la cual es autoexcitada. Cuando se usa un campo paralelo autoexcitado, K_E representa la posición del réostato del campo paralelo. La mayoría de estas excitatrices utilizan campo shunt autoexcitables con reguladores de voltaje operado en un modo comúnmente llamado "buck-boost". La mayoría de operadores de estación rastrean manualmente el regulador de voltaje por franjas periódicas del Set point del réostato así como el cero de la salida del regulador de voltaje. Esto puede ser simulado por selección del valor de K_E , así esas condiciones iniciales son satisfechas con $V_R =$ cero. El término S_E representa la saturación de la excitatriz y este valor es una función del voltaje de salida de la excitatriz E_{FD} . La señal V_F derivada de E_{FD} es normalmente usada para dar estabilidad al sistema de excitación. La señal de realimentación normalmente derivada del voltaje de campo del generador, es usado para compensar parcialmente la constante de tiempo de la excitatriz y permitir una operación estable del sistema de control de excitación con altas posiciones de ganancia del regulador de estado estable.

Para operación en línea puede ser deseable reducir la caída de ganancia del regulador de voltaje a altas frecuencias para minimizar la contribución negativa del regulador a los amortiguamientos del sistema de potencia. Esto es particularmente aplicable donde el amortiguamiento no es realizado por el uso de un estabilizador del sistema de potencia.

Es así como la reducción de ganancia transitoria puede ser representada en los modelos mediante una adecuada selección de las constantes de tiempo de los lazos en el camino delantero del regulador de excitación (T_B y T_F) o equivalentemente con la selección de parámetros adecuados (K_F , T_F) en el camino de estabilización de la excitatriz.

3.3.2 Modelo Matemático de la Excitatriz

La excitatriz de la máquina síncrona del grupo de emergencia de la Facultad es del tipo DC rotativa autoexcitada.

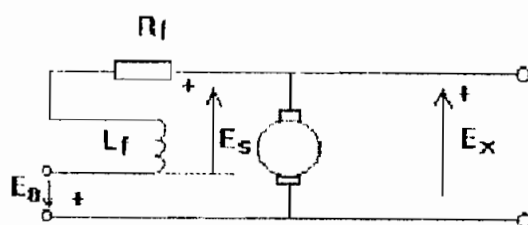


Figura 3.11 Excitatriz Autoexcitada

Asumiendo que E_a representa el voltaje de un amplificador en serie con el campo paralelo de la excitatriz se tiene:

$$\bar{E}_s = \bar{E}_x + \bar{E}_a \quad (3.1)$$

En forma de diagrama de bloque:

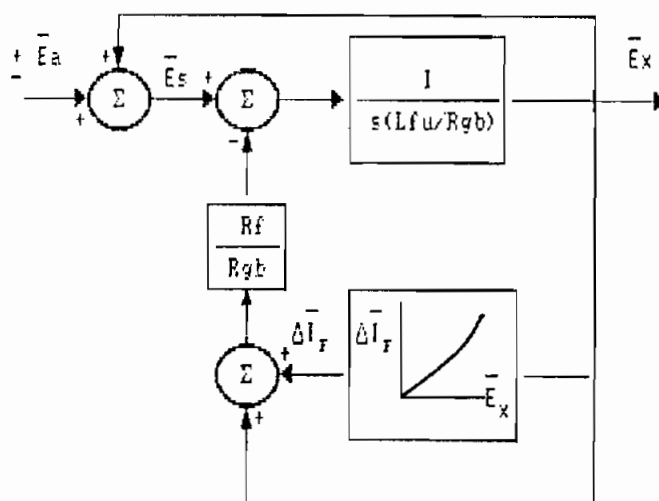


Figura 3.12 Excitatriz Autoexcitada

Esto se reduce a la forma vista en la figura 3.13

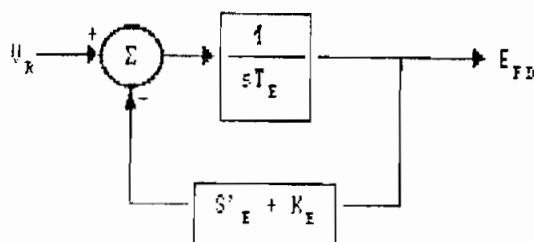


Figura 3.13 Diagrama de Bloque de la Excitatriz

donde:

$$K_E = \frac{Rf}{R_{gb}} + 1 \quad (3.2)$$

$$T_E = \frac{L_{fu}}{P_{gb}} \quad (3.3)$$

$$S_{E'} = R_F \cdot \frac{S_E}{R_{gb}} \quad (3.4)$$

$$V_R = \bar{E}_a \quad (3.5)$$

$$E_{fd} = \bar{E}_s \quad (3.6)$$

$P_{gb} = R_g$ resistencia base de la excitatriz R_g en la figura 3.14.

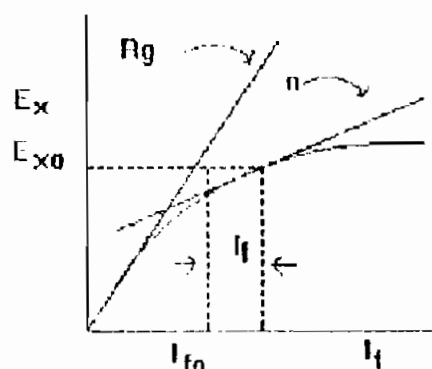


Figura 3.14 Curva de Saturación de la Excitatriz

E_{x0} es el voltaje de excitación cuando el generador de voltaje da valor nominal en circuito abierto en la línea de entrehierro.

El efecto del ajuste periódico del set point del reóstato así como el de la salida del regulador de voltaje V_R es cambiar R_F y por lo tanto para cambiar K_E y la función de saturación S_E .

3.3.3 Función de Saturación

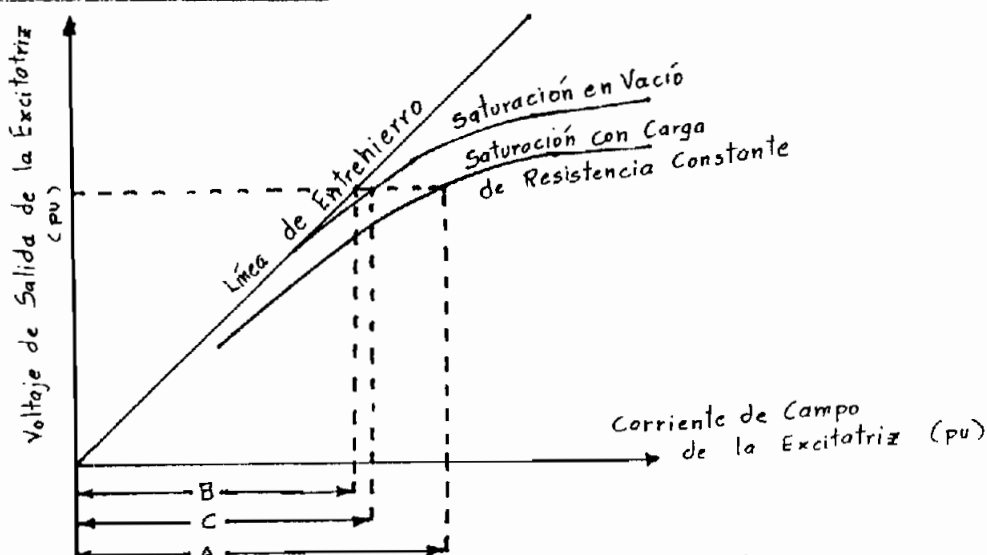


Figura 3.15 Característica de Saturación

La función de saturación de la excitatriz S_E es definida como un multiplicador de voltaje de salida de excitación en pu, para representar el incremento en los requerimientos de excitación de la excitatriz por causa de la saturación. La figura 3.15 muestra el cálculo de un valor particular de S_E . A un voltaje de salida de la excitatriz dado, las cantidades A, B y C se definen como la excitación de la excitatriz, es decir, corrientes de campo de la excitatriz requeridas para producir un voltaje de salida sobre la curva de saturación de resistencia de carga constante, sobre la línea de entrehierro y sobre la curva de vacío respectivamente. La curva de saturación de resistencia de carga constante se usa en la definición de S_E para excitatrices con conmutador DC y S_E es dada por:

$$S_E = \frac{A - B}{B} \quad (3.7)$$

Este mismo concepto se aplica al generador para obtener su función de saturación, la cual puede ser definida adecuadamente por 2 puntos. Para que sea consistente el procedimiento sugerido se debe establecer 2 voltajes, en los cuales se debe especificar S_E . Considerando que S_E para alternadores es:

$$S_E = \frac{C - B}{B} \quad (3.8)$$

De las curvas de vacío y de la línea de entrehierro del generador se obtiene la saturación a 1.0 del voltaje nominal y 1.2 del voltaje nominal.

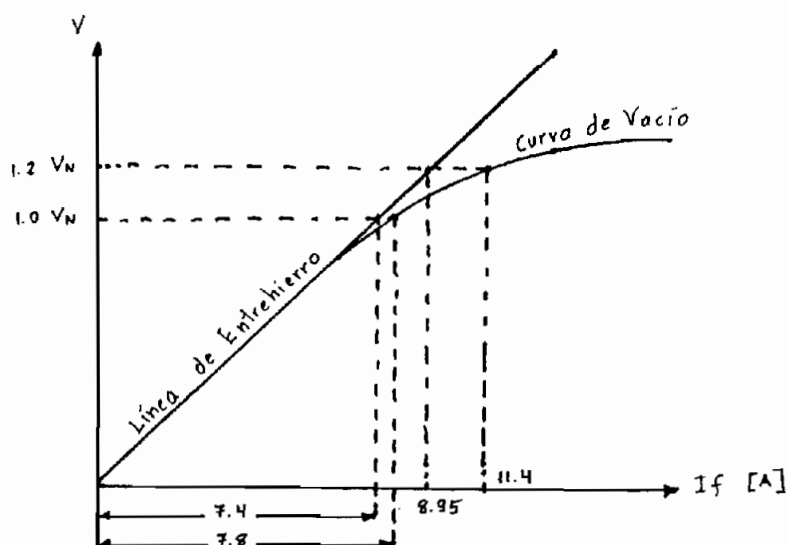


Figura 3.16 Característica de Saturación del Generador

Los valores de saturación del generador son:

S_E a 1.2 V_N

$$S_E = \frac{C - B}{B} = \frac{11.4 - 8.95}{8.95} = 0.273743$$

$$S_E (1.2) = 0.273743$$

$$S_E (1) = \frac{7.3-7.4}{7.4} = 0.05405$$

$$S_E (1) = 0.05405$$

3.3.4 Determinación de Valores Típicos del Sistema de Excitación

Siendo el sistema de excitación del grupo de emergencia tipo DC1 con excitatriz autoexcitada, se utilizan los siguientes parámetros típicos para este modelo[13]:

DATOS TÍPICOS

Modelo: DC1

| | |
|----------------------|--------|
| T_p | 0 s |
| K_A | 400 |
| T_A | 0.02 s |
| $E_{FD \text{ Máx}}$ | 3.9 pu |
| $E_{FD \text{ Min}}$ | 0.0 pu |
| K_E | 1 |
| K_F | 0.03 |
| T_F | 1.0 s |

Para la velocidad de 1800 RPM:

| | |
|-------------------|------|
| $V_R \text{ Máx}$ | 8.2 |
| $V_R \text{ Min}$ | -7.4 |
| $S_E \text{ Máx}$ | 1.1 |
| $S_{E, 75}$ | 0.5 |
| T_E | 1.3 |

Debiendo corregirse los valores de $E_{FD \text{ MAX}}$, $E_{FD \text{ MIN}}$, $V_R \text{ MAX}$ y $V_R \text{ MIN}$, porque en los valores típicos han asumido

$$E_{FD} (\text{PLENA CARGA}) = 3.0 \text{ pu.}$$

El factor de corrección es:

$$\frac{E_{FD} \text{ (plena carga)}}{3.0} \text{ pu}$$

Entonces de las curvas de vacío y cortocircuito del generador, se obtiene: $E_{FD \text{ BASE}} = 61.5 \text{ V}$. Siendo $E_{FD \text{ BASE}}$ el voltaje de campo para que haya voltaje nominal en vacío.

De la curva de cortocircuito se obtiene: E_{FD} a plena carga es igual a 54V. $E_{FD} \text{ (plena carga)}$ es el voltaje de campo para obtener corriente nominal en pruebas de cortocircuito sostenido.

$$\Rightarrow E_{FD} \text{ (plena carga) pu} = 54/61.5 = 0.878 \text{ pu}$$

Entonces el factor de corrección es:

$$\frac{E_{FD} \text{ (plena carga)}}{3.0} = \frac{0.878}{3}$$

Por lo tanto, los valores corregidos son:

$$E_{FD \text{ máx}} = 1.1427 \text{ pu}$$

$$V_{R \text{ MAX}} = 2.4026 \text{ pu}$$

$$V_{P \text{ MIN}} = -2.1682 \text{ pu}$$

Y las demás constantes se mantienen iguales.

El sistema de excitación tipo DC1 reconocido por el programa de estabilidad es el de la figura 3.17

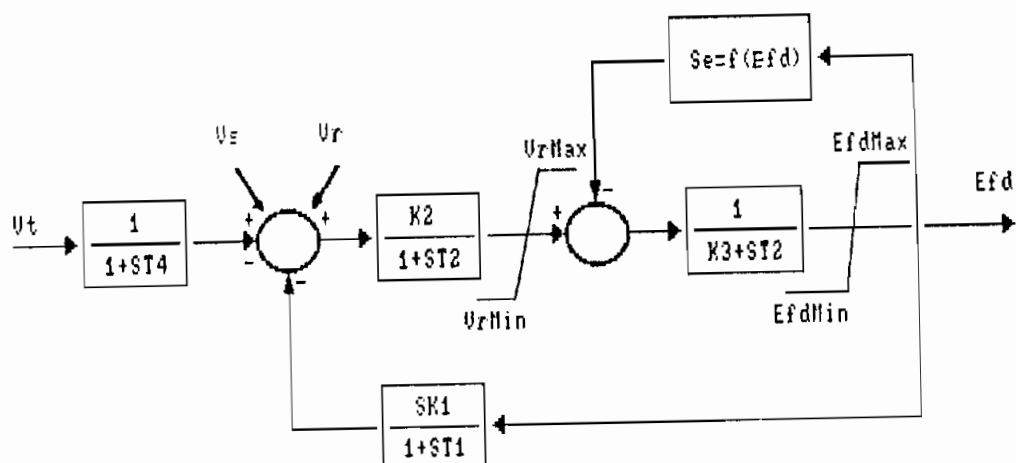


Figura 3.17 Sistema de Excitación Modelo DC1

Cuyas constantes típicas son:

A1 : $T_1 = T_K = 1 \text{ s}$

$T_2 = T_A = 0.02 \text{ s}$

$T_3 = T_E = 1.3 \text{ s}$

$T_4 = T_R = 0 \text{ s}$

$T_5 = \text{no existe}$

$K_1 = K_F = 0.03 \text{ s}$

A2 : $K_2 = K_A = 400$

$K_3 = 0$

$E_{FD \text{ MAX}} = 1.1427 \text{ pu}$

$E_{FD \text{ MIN}} = 0 \text{ pu}$

$V_R \text{ MAX} = 2.4026 \text{ pu}$

$V_R \text{ MIN} = -2.1682 \text{ pu}$

A3 : $S_E \text{ MAX} = 1.1$

$S_E (0.75 \text{ MAX}) = 0.5$

$K_C = \text{no existe}$

$K_D = \text{no existe}$

$K_P = \text{no existe}$

$K_I = \text{no existe}$

3.4 MODELACION DE LA CARGA ALIMENTADA

La modelación de la carga es una parte crucial en la simulación de estabilidad transitoria porque la respuesta del sistema puede cambiar dramáticamente dependiendo del tipo de sistema que se esté analizando.

Convencionalmente la carga ha sido representada como potencia constante, corriente constante o impedancia constante. Para obtener resultados ajustados a la respuesta real del sistema se debe considerar en las características de la carga el voltaje y la frecuencia para la simulación.

Se han hecho esfuerzos para representar las cargas como una función polinomial del voltaje y la frecuencia donde los coeficientes pueden ser obtenidos desde los datos experimentales. Por otro lado el modelo dinámico de carga representa la característica variable en tiempo de un gran motor de inducción.

De estudios de Tesis realizadas [1] se obtiene la referencia de los polinomios para 10 tipos de cargas característica que son:

$$P = 1.0 + K_1 .\Delta V + K_2 .\Delta V^2 + K_3 .\Delta V^3 + K_4 .\Delta V^4 + K_5 .\Delta F + K_6 .\Delta V \Delta F$$

$$Q = K_7 + K_8 .\Delta V + K_9 .\Delta V^2 + K_{10} .\Delta V^3 + K_{11} .\Delta V^4 + K_{12} .\Delta F + K_{13} .\Delta V \Delta F$$

Para sistemas de aire acondicionado tipo trifásico:

$$P = 1.0000 + 0.0883 .\Delta V + 0.3510 .\Delta V^2 + 0.0000 .\Delta V^3 + 0.0000 .\Delta V^4 + 1.0982 .\Delta F - 2.3560 .\Delta V \Delta F$$

$$Q = 0.5330 + 1.3360 .\Delta V + 5.2100 .\Delta V^2 + 2.3380 .\Delta V^3 + 0.0000 .\Delta V^4 - 0.6638 .\Delta F - 10.2820 .\Delta V \Delta F$$

Para sistemas de aire acondicionado tipo monofásico:

$$P = 1.000 + 0.2016 \cdot \Delta V + 1.6598 \cdot \Delta V^2 - 9.1079 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 + 0.9942 \cdot \Delta F - 2.1680 \cdot \Delta V \Delta F$$

$$Q = 0.2427 + 0.5581 \cdot \Delta V + 7.0228 \cdot \Delta V^2 - 6.5456 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 + 0.3079 \cdot \Delta F - 9.4606 \cdot \Delta V \Delta F$$

Para sistemas de aire acondicionado tipo ventana:

$$P = 1.0000 + 0.4675 \cdot \Delta V + 1.9601 \cdot \Delta V^2 + 0.0000 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 + 0.7029 \cdot \Delta F - 2.8865 \cdot \Delta V \Delta F$$

$$Q = 0.6896 + 1.6993 \cdot \Delta V + 3.8889 \cdot \Delta V^2 + 7.6570 \cdot \Delta V^3 + 53.7198 \cdot \Delta V^4 - 1.8918 \cdot \Delta F - 14.1787 \cdot \Delta V \Delta F$$

Para sistemas de calentadores de ducto

$$P = 1.0000 + 1.5655 \cdot \Delta V + 0.8548 \cdot \Delta V^2 + 0.0000 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 + 0.5288 \cdot \Delta F - 0.7530 \cdot \Delta V \Delta F$$

$$Q = 0.1472 + 0.3518 \cdot \Delta V + 1.1825 \cdot \Delta V^2 + 0.0000 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 - 0.1400 \cdot \Delta F - 3.4677 \cdot \Delta V \Delta F$$

Para sistemas de calentadores de agua, horno, freidoras:

$$P = 1.0000 + 2.0000 \cdot \Delta V + 1.0000 \cdot \Delta V^2 + 0.0000 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 + 0.0000 \cdot \Delta F + 0.0000 \cdot \Delta V \Delta F$$

$$Q = 0.0000 + 0.0000 \cdot \Delta V + 0.0000 \cdot \Delta V^2 + 0.0000 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 + 0.0000 \cdot \Delta F + 0.0000 \cdot \Delta V \Delta F$$

Para sistemas de secadoras de ropa

$$P = 1.0000 + 2.0400 \cdot \Delta V + 0.9950 \cdot \Delta V^2 - 0.5930 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 + 0.0000 \cdot \Delta F + 0.0000 \cdot \Delta V \Delta F$$

$$Q = 0.1307 + 0.4271 \cdot \Delta V + 0.6274 \cdot \Delta V^2 + 0.4690 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 - 0.3118 \cdot \Delta F - 0.6734 \cdot \Delta V \Delta F$$

Para sistemas de refrigeradoras y congeladores:

$$P = 1.0000 + 0.7594 \cdot \Delta V + 1.4361 \cdot \Delta V^2 + 0.0000 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 + 0.6641 \cdot \Delta F - 3.3710 \cdot \Delta V \Delta F$$

$$Q = 0.7820 + 1.9298 \cdot \Delta V + 4.2231 \cdot \Delta V^2 + 0.0000 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 - 1.1025 \cdot \Delta F - 9.2356 \cdot \Delta V \Delta F$$

Para sistemas de iluminación incandescente:

$$P = 1.0000 + 1.5520 \cdot \Delta V + 0.4590 \cdot \Delta V^2 + 0.0000 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 + 0.0000 \cdot \Delta F + 0.0000 \cdot \Delta V \Delta F$$

$$Q = 0.0000 + 0.0000 \cdot \Delta V + 0.0000 \cdot \Delta V^2 + 0.0000 \cdot \Delta V^3 + 0.0000 \cdot \Delta V^4 + 0.0000 \cdot \Delta F + 0.0000 \cdot \Delta V \Delta F$$

$$Q = 0.0000 + 0.0000 \Delta V + 0.0000 \Delta V^2 + 0.0000 \Delta V^3 + 0.0000 \Delta V^4 + 0.0000 \Delta F + 0.0000 \Delta V \Delta F$$

Para sistemas de iluminación fluorescente:

$$P = 1.0000 + 0.6534 \Delta V - 1.6500 \Delta V^2 + 0.0000 \Delta V^3 + 0.0000 \Delta V^4 + 0.8879 \Delta F + 0.0000 \Delta V \Delta F$$

$$Q = -0.1535 - 0.0403 \Delta V + 2.7340 \Delta V^2 + 0.0000 \Delta V^3 + 0.0000 \Delta V^4 - 1.1684 \Delta F + 0.0000 \Delta V \Delta F$$

Para Motores de Inducción:

$$P = -0.0340 + 0.8196 \Delta V + 1.5362 \Delta V^2 + 0.0000 \Delta V^3 + 0.0000 \Delta V^4 + 1.4233 \Delta F + 0.0000 \Delta V \Delta F$$

$$Q = 0.0000 + 2.0000 \Delta V + 0.0000 \Delta V^2 + 0.0000 \Delta V^3 + 0.0000 \Delta V^4 - 0.4700 \Delta F + 0.0000 \Delta V \Delta F$$

Después de realizar un estudio de la carga instalada en la Facultad de Ingeniería Eléctrica (Apéndice A) y asumiendo factores de utilización y en algunos casos también factores de potencia se obtienen, en resumen los siguientes resultados (Tabla 3.1). Donde P_{total} es la potencia total obtenida al multiplicar la potencia unitaria de cada carga por el número total de unidades registrado en el estudio de carga de la Facultad y P es la potencia total multiplicada por un factor de utilización estimado. En algunos aparatos eléctricos registrados no se conoce el factor de potencia por lo que se hace necesario asumir un factor de potencia aproximado para calcular la potencia reactiva Q

| Descrip | Tipo | No | P.tota | fu | P | fp | S | Q |
|-----------|-----------|-----|--------|------|----------|------|----------|----------|
| Lámparas | fluor. | 757 | 53695 | 0,6 | 32217 | 0.95 | 33912.63 | 10589.24 |
| Focos | incand. | 31 | 2980 | 0.3 | 894 | 1 | 894 | 0 |
| Reflector | | 15 | 3000 | 0.3 | 900 | 0.95 | 947.384 | 295.8164 |
| Carg.res | cafet | 22 | 7280 | 0.25 | 1820 | 1 | 1820 | 0 |
| | cautines | | | 0.4 | | | | |
| | coc.eléc | | | 0.1 | | | | |
| | cal.agua | | | 0.1 | | | | |
| Relojes | | 1 | 20 | 0.9 | 18 | 0.99 | 18.18182 | 2.564867 |
| Maq/fax | | 8 | 680 | 0.4 | 272 | 0.98 | 277.551 | 55.23208 |
| Comp. | monit | 64 | 11520 | 0.6 | 6912 | 0.9 | 7680 | 3347.642 |
| Comp. | up | 60 | 24000 | 0.6 | 14400 | 0.98 | 14693.88 | 2924.051 |
| Plot/impr | | 32 | 5780 | 0.4 | 2312 | 0.98 | 2359.184 | 469.4727 |
| Laser/Co | | 3 | 2242 | 0.5 | 1121 | 0.98 | 1143.878 | 227.6293 |
| Ventilad. | | 2 | 46 | 0.1 | 4.6 | 0.95 | 4.842105 | 1.51195 |
| Oscilad. | | 26 | 1201 | 0.5 | 600.5 | 0.98 | 612.7551 | 121.937 |
| Radio/G. | | 16 | 480 | 0.6 | 288 | 0.95 | 303.1579 | 94.66124 |
| TV | | 1 | 450 | 0.4 | 180 | 0.98 | 183.6735 | 36.55064 |
| Fuentes | | 46 | 5397 | 0.6 | 3238.2 | 0.98 | 3304.286 | 657.5461 |
| Oscilosc. | | 40 | 3580 | 0.4 | 1432 | 1 | 1432 | 0 |
| Multimet. | | 28 | 840 | 0.4 | 336 | 0.98 | 342.8571 | 68.22787 |
| Proyect. | | 8 | 5200 | 0.3 | 1560 | 0.98 | 1591.837 | 316.7722 |
| Apar.elec | | 32 | 2438 | 0.45 | 1097.1 | 0.98 | 1119.49 | 222.7762 |
| Anal.espe | | 1 | 430 | 0.15 | 64.5 | 0.9 | 71.66667 | 31.23884 |
| Transf. | | 1 | 5000 | 0.2 | 1000 | 0.98 | 1020.408 | 203.0591 |
| eq.protec | | 7 | 1860 | 0.1 | 186 | 0.98 | 189.7959 | 37.769 |
| eq.uO | | 15 | 539 | 0.25 | 134.75 | 1 | 134.75 | 0 |
| MotorDC | | 37 | 50549 | 0.35 | 17692.15 | 0.85 | 20814.29 | 10964.63 |
| M.induc | trifásica | 12 | 25352 | 0.4 | 10140.8 | 0.85 | 11930.35 | 6284.717 |
| M.induc | monofás. | 5 | 4511 | 0.3 | 1353.3 | 0.85 | 1592.118 | 838.7018 |
| M.sincró | | 8 | 12020 | 0.35 | 4207 | 0.85 | 4949.412 | 2607.27 |
| M.W.Var | | 2 | 7400 | 0.35 | 2590 | 0.85 | 3047.059 | 1605.141 |
| | | | 238490 | | 106970.9 | | | 42004.16 |

Tabla 3.1 Resumen de Estudio de Carga Instalada en la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

La carga de la Facultad es clasificada de acuerdo a los 10 tipos de carga cuyos polinomios de potencia activa y reactiva se conocen, para esto se ha aproximado el comportamiento de algunas cargas a uno semejante a los que tendrían cualquiera de los diez modelos de carga conocidos, estableciéndose los respectivos porcentajes para poder

simular el comportamiento del grupo de emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Los porcentajes establecidos son:

| | |
|--|---------|
| Sistema de aire acondicionado tipo trifásico | 0.000 % |
| Sistema de aire acondicionado tipo monofásico | 0.021 % |
| Sistema de aire acondicionado tipo ventana | 0.000 % |
| Sistema de calentadores de ducto | 27.91 % |
| Sistema de calentadores de agua, hornos, freidoras | 6.637 % |
| Sistema de secadoras de ropa | 0.000 % |
| Sistema de refrigeradores y congeladores | 0.000 % |
| Sistema de iluminación incandescente | 1.677 % |
| Sistema de iluminación fluorescente | 30.12 % |
| Sistema de Motores de Inducción | 33.64 % |

3.4.1 Determinación del Estatismo del Generador

De la prueba de carga realizada con ayuda de un analizador industrial se tiene que para un incremento de carga de 4580 W se produce una disminución de frecuencia en estado estable de 0.06 Hz.

$$\Delta f = 0.06 \text{ Hz}$$

$$\Delta P = 4580 \text{ W}$$

$$\Delta R = 1.31 \cdot 10^{-5} \text{ Hz/W}$$

$$\text{Como } f_p = 60 \text{ Hz}$$

$$P_B = 150 \text{ Kw}$$

$$\Delta R_{pu} = 1.31 \cdot 10^{-5} \cdot (150 \cdot 10^3)$$

$$\Delta R_{pu} = 0.0020 \text{ pu}$$

$$\Delta R \% = 3.27 \%$$

3.5 MODELACION DEL GRUPO DE EMERGENCIA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

El sistema eléctrico de la Facultad de Ingeniería Eléctrica funcionando únicamente con el grupo de emergencia se modela como un sistema de dos barras, siendo la una barra de generación, barra oscilante y es donde se conecta el grupo de emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, la otra barra es de carga, físicamente está representada por el Tablero de Transferencia de la Facultad y es donde se asume conectada toda la carga eléctrica de la Facultad. La línea que une estas dos barras no contiene ningún transformador y físicamente es el conductor que atraviesa por debajo del piso el Laboratorio de Máquinas Eléctricas desde el grupo de emergencia hasta el Tablero de Transferencia.

Para realizar el estudio de estabilidad del Sistema de Emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica es necesario correr primero un flujo de potencia del sistema, para lo cual se deben calcular los parámetros de la línea que une las barras de generación y de carga.

Los parámetros de esta línea son resistencia, inductancia y capacitancia. En este caso se consideran efectos capacitivos nulos. Se conoce que la línea cuyos parámetros se quiere determinar es un cable de cobre de 18 hilos que se puede aproximar a uno de tipo 20, con tres conductores por fase y que tiene una longitud de 35 metros.

Con estos datos aproximados se obtiene de tablas el valor de la resistencia:

$$R = 9.44944 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Para calcular la inductancia L:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s}$$

Por ser 3 conductores por fase:

$$D_s = (RMG^6 d_{aa'}^2 d_{aa''}^2 d_{a'a''}^2)^{1/12}$$

Donde, RMG se toma como el RMG del conductor ASCR 18/1

$$RMG = 0.603 \text{ cm.}$$

$d_{aa'} = 2 \text{ cm.}$ (distancia del conductor 1 al conductor 2 de la fase a)

$d_{aa''} = 4 \text{ cm.}$ (distancia del conductor 1 al conductor 3 de la fase a)

$d_{a'a''} = 2.5 \text{ cm.}$ (distancia del conductor 2 al conductor 3 de la fase a)

$$\Rightarrow D_s = 1.28 \text{ cm.}$$

$$D_{eq} = (D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{AC})^{1/3}$$

$D_{AB} = 6.06 \text{ cm.}$ (distancia equivalente entre fase A y B)

$D_{BC} = 7.41 \text{ cm.}$ (distancia equivalente entre fase B y C)

$D_{AC} = 14.29 \text{ cm.}$ (distancia equivalente entre fase A y C)

$$\Rightarrow D_{eq} = 8.63 \text{ cm.}$$

$$\Rightarrow L = 3.8167 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\Rightarrow L = 1.335845 \text{ H}$$

$$\Rightarrow X_L = 5.036 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Como el programa requiere de datos en por unidad de 100 MVA y 208 V se obtienen los siguientes valores:

$$Z_B = \frac{KV^2}{MVA} = \frac{(0.208)^2}{100} \Omega = 4.3264 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$\Rightarrow R = \frac{R[\Omega]}{Z_B} = 21.84 \text{ pu} = 2184\%$$

$$\Rightarrow X_L = \frac{X[\Omega]}{Z_B} = 11.64 \text{ pu} = 1164\%$$

El voltaje en vacío de la máquina es 213.8 V
Considerando $V_B = 208 \text{ V}$

$$V = \frac{213.8 \text{ V}}{208 \text{ V}} = 1.02788 \text{ pu}$$

Con estos datos y los obtenidos en el capítulo II se completa la información para los archivos de datos (Apéndice C) que permiten simular el grupo de emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

CAPITULO IV

SIMULACION DINAMICA Y CONTRASTACION DE RESULTADOS DEL GRUPO DE EMERGENCIA

En general el programa permite analizar una serie de variables en cada corrida de simulación, como por ejemplo: ángulo interno del rotor, frecuencia del generador, voltaje de campo de la excitatriz, torque de aceleración del generador, voltaje, potencia real y reactiva en las barras, flujo de potencia en las líneas y otras.

Las variables a ser analizadas durante el comportamiento transitorio de la máquina son: frecuencia del generador y voltaje en las barras. El análisis de estas variables permite estudiar el desempeño de los sistemas de regulación de velocidad y de regulación de voltaje del grupo de emergencia.

Entonces en los casos que se simulan a continuación, se analiza principalmente la frecuencia del generador y los voltajes en las barras.

4.1 RECHAZO DE CARGA

Cuando un generador de energía eléctrica está funcionando con carga nominal o con cualquier porcentaje de carga diferente de cero, si repentinamente se le desconecta toda la carga eléctrica que tiene dejándolo en condiciones de vacío, se dice que hay rechazo de carga. En esta condición se observa una variación apreciable en la

frecuencia del generador desde un valor de estado estable antes de la desconexión hasta un valor mayor de frecuencia, el cual es limitado por el regulador de velocidad, la inercia de la máquina y la fricción de las partes mecánicas. Este comportamiento se justifica porque con la condición de rechazo de carga la corriente es cero y por ello también la potencia eléctrica, entonces la potencia de aceleración de la máquina es igual a la potencia mecánica y tiene un valor positivo mayor que cero, por ello la respuesta es el aceleramiento del ángulo y la subida de frecuencia y voltaje terminal. Siendo la variable más afectada, la frecuencia del generador, ésta debe ser controlada por una actuación rápida del regulador de velocidad o de los relés de sobre velocidad si los hubiera.

De un estudio de carga instalada de la Facultad de Ingeniería Eléctrica (Apéndices A y B) asumiendo factores de utilización para los diferentes tipos de carga existentes se obtiene un valor estimado de potencia máxima que requiere la Facultad en condiciones de demanda máxima, sin embargo este valor $P = 106970.9 \text{ W}$ es solo el 71.31% de la capacidad nominal del generador de emergencia por lo que este valor de potencia se le considera solo como una potencia alta (la máxima que se obtiene en la Facultad) para cargar el generador. Valores de potencia media y baja se obtienen a partir de datos de carga obtenidos con un analizador industrial, correspondiendo a la potencia media al valor más alto obtenido durante ese estudio de carga que por facilidad se realizó un día sábado con el Laboratorio de Máquinas de la Facultad como carga principal y la potencia baja se considera al valor más bajo registrado por

el analizador cuando la carga principalmente es solo iluminación.

Entonces de lo expuesto un resumen de potencias activas y reactivas altas, medias y bajas disponibles en la Facultad, se detalla a continuación:

| | | |
|----------|----------|-----|
| P.alta = | 106970.9 | W |
| P.med = | 36800 | W |
| P.baja = | 15520 | W |
| Q.alta = | 42004.16 | VAR |
| Q.med = | 20000 | VAR |
| Q.min = | 1510 | VAR |

La potencia media $P = 36800$ W corresponde al 24.53% de la capacidad nominal del generador y la potencia baja $P = 15.520$ W corresponde al 13.33% por lo que se puede decir que si estas son las condiciones de operación comunes del generador de emergencia, este no entregará su capacidad nominal actualmente a menos que se le incremente la carga de otros edificios.

4.1.1 Rechazo de Carga en Condiciones de Demanda Alta

Una vez corrido el flujo de potencia con demanda alta se simula su rechazo a $t = 0.2$ s en la barra de carga. Analizando los resultados obtenidos de frecuencia del generador y voltaje en las barras se observa que la frecuencia sube desde 60 Hz hasta 60.09 Hz y se estabiliza en este valor a $t = 5.9$ s como respuesta a la actuación del

regulador de velocidad y a la fricción de las partes mecánicas. El tiempo de análisis es 9.5 s, ver figura 4.1.

En cuanto al voltaje (figura 4.2), sus valores iniciales son 1.03 pu para la barra de generación y 1.00 pu para la barra de carga y se observa que a $t = 0.2$ s al rechazarse toda la carga, el voltaje en las dos barras es igual a 1.03 pu. El voltaje en la barra de generación no sube porque el regulador de voltaje actúa rápidamente como se puede ver en la figura 4.3 donde se observa la variación del voltaje de campo de la excitatriz desde su valor inicial de 1.093 pu hasta 1.091 pu a $t = 2.3$ s.

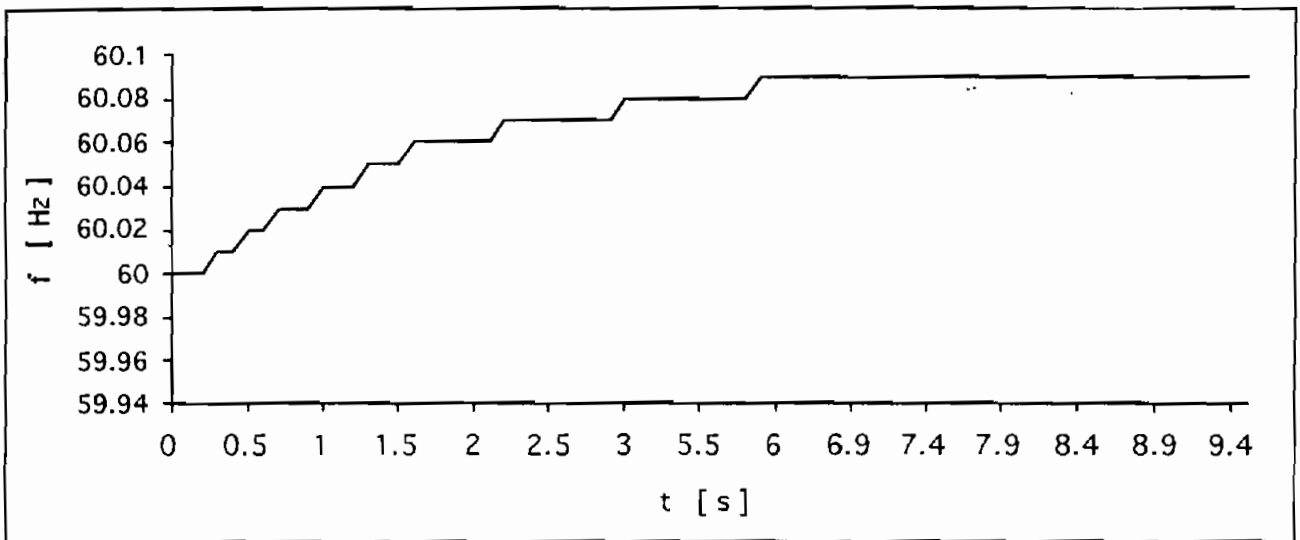


Figura 4.1 Frecuencia del Generador durante Rechazo de Carga a Demanda Alta

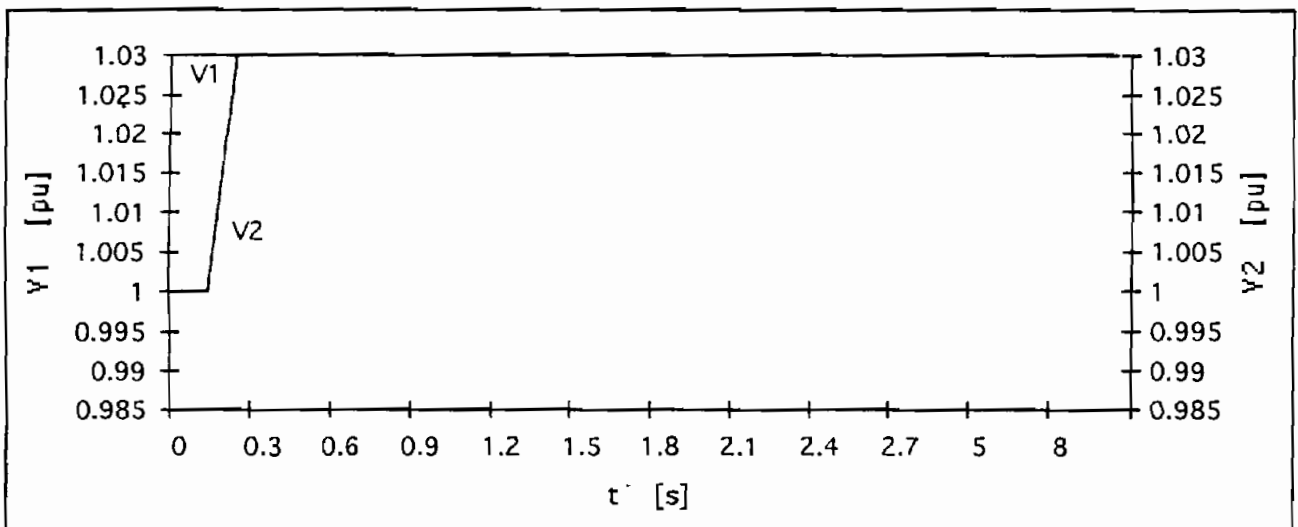


Figura 4.2 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Rechazo de Carga a Demanda Alta

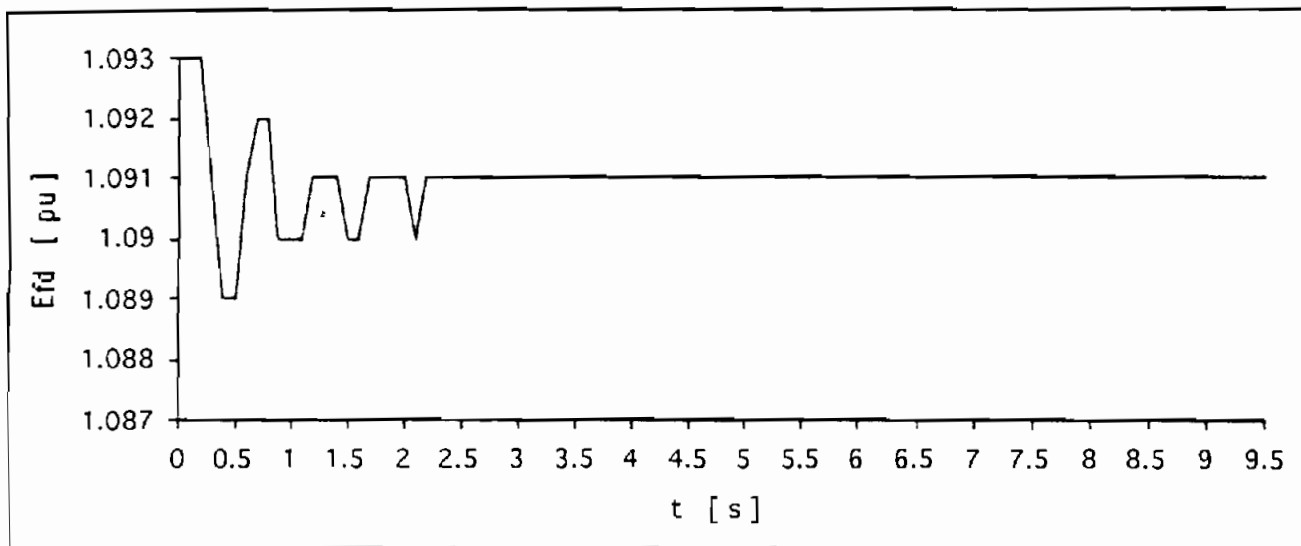


Figura 4.3 Voltaje de Campo del Generador Durante Rechazo de Carga a Demanda Alta

4.1.2 Rechazo de Carga en Condiciones de Demanda Media

Para este caso se corre un flujo de potencia con la carga media de la Facultad y se simula el rechazo de esta carga en $t = 0.2$ s. El tiempo de análisis es 4.5 s.

Se observa que la frecuencia sube desde 60 Hz hasta 60.03 Hz a $t = 2.5$ s, en este valor se estabiliza por la actuación del regulador de velocidad. Ver figura 4.4.

En cuanto al voltaje, los voltajes en las barras de generación y carga que inicialmente son de 1.03 y 1.02 pu respectivamente pasan a ser iguales a 1.03 pu después del rechazo de carga a $t = 0.2$ s. Ver figura 4.5.

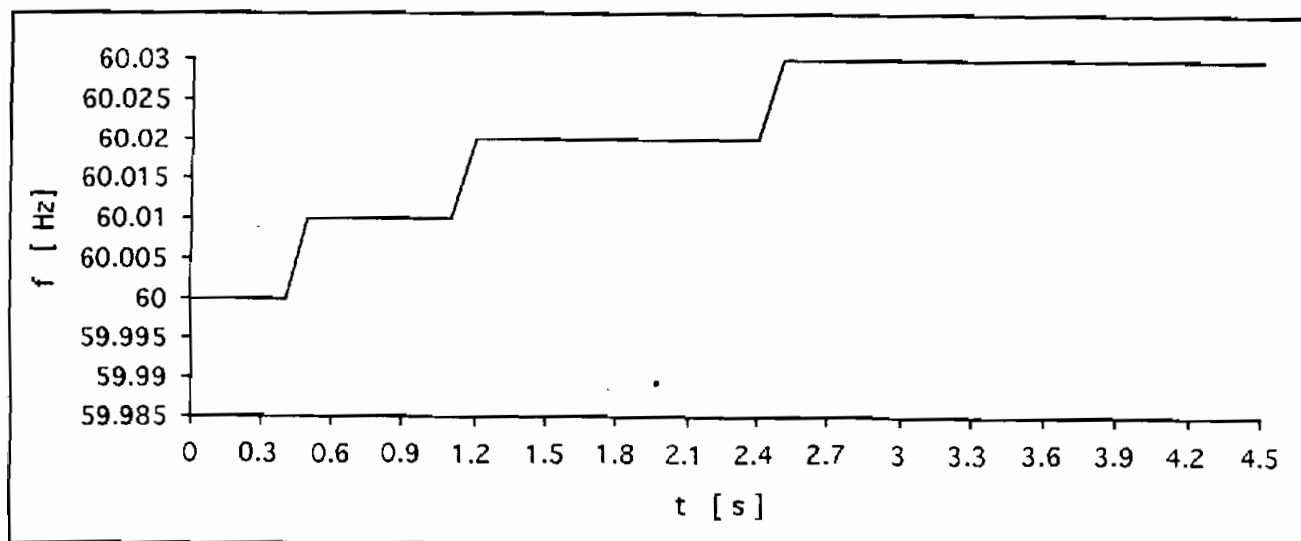


Figura 4.4 Frecuencia del Generador Durante Rechazo de Carga a Demanda Media

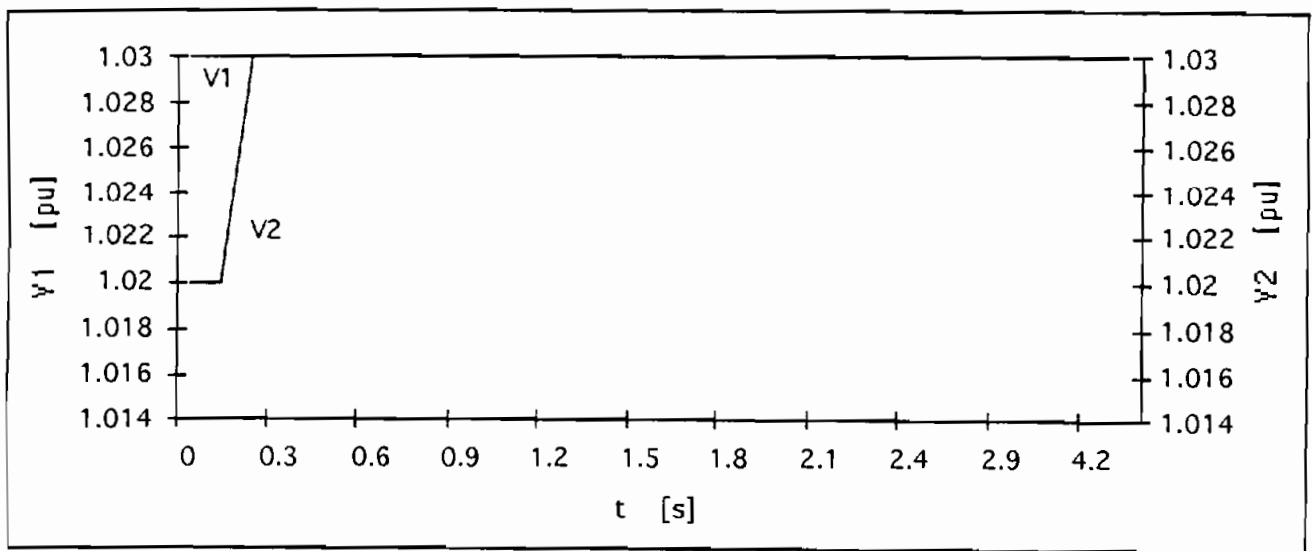


Figura 4.5 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Rechazo de Carga a Demanda Media

4.1.3 Rechazo de Carga en Condiciones de Demanda Baja

Previamente se corre un flujo de potencia con la demanda baja de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y al correr el programa de estabilidad con un tiempo de análisis de 2.5 s se obtiene:

La frecuencia sube desde 60 Hz hasta 60.01 Hz a $t=0.8$ s. Este valor de estado estable se obtiene por la actuación del regulador de velocidad. Ver figura 4.6.

En cuanto al voltaje al igual que en los casos anteriores, se estabiliza en 1.03 pu para la barra de carga y la de generación una vez ocurrido el rechazo de carga a $t = 0.2$ s. Ver figura 4.7. Los valores iniciales son 1.03 pu para la barra de generación y 1.02 para la barra de carga.

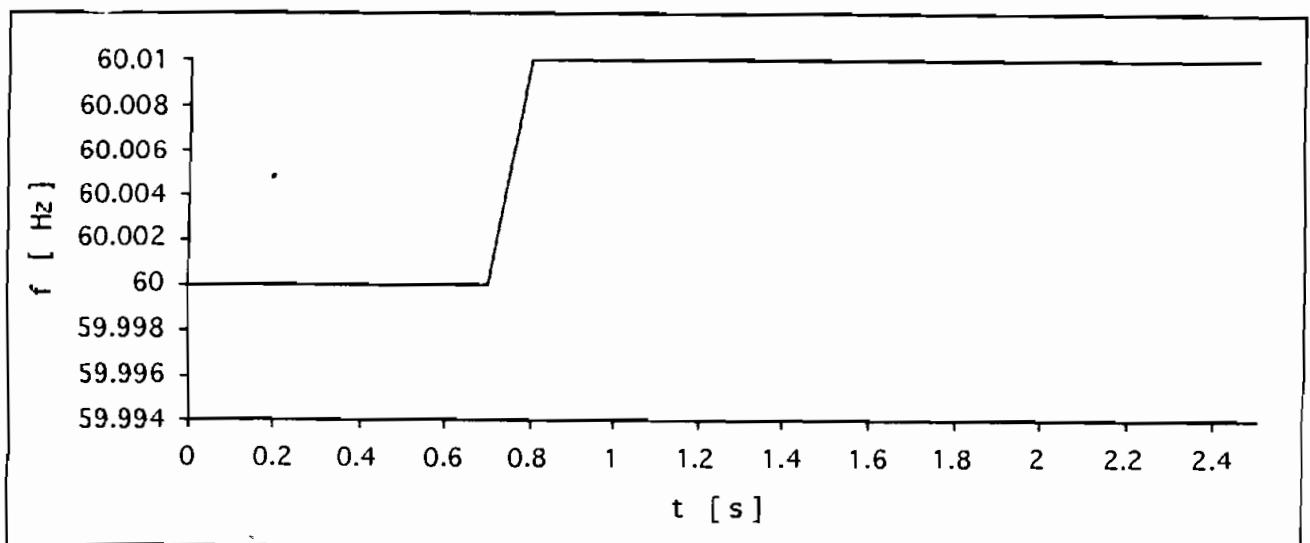


Figura 4.6 Frecuencia del Generador Durante Rechazo de Carga a Demanda Baja

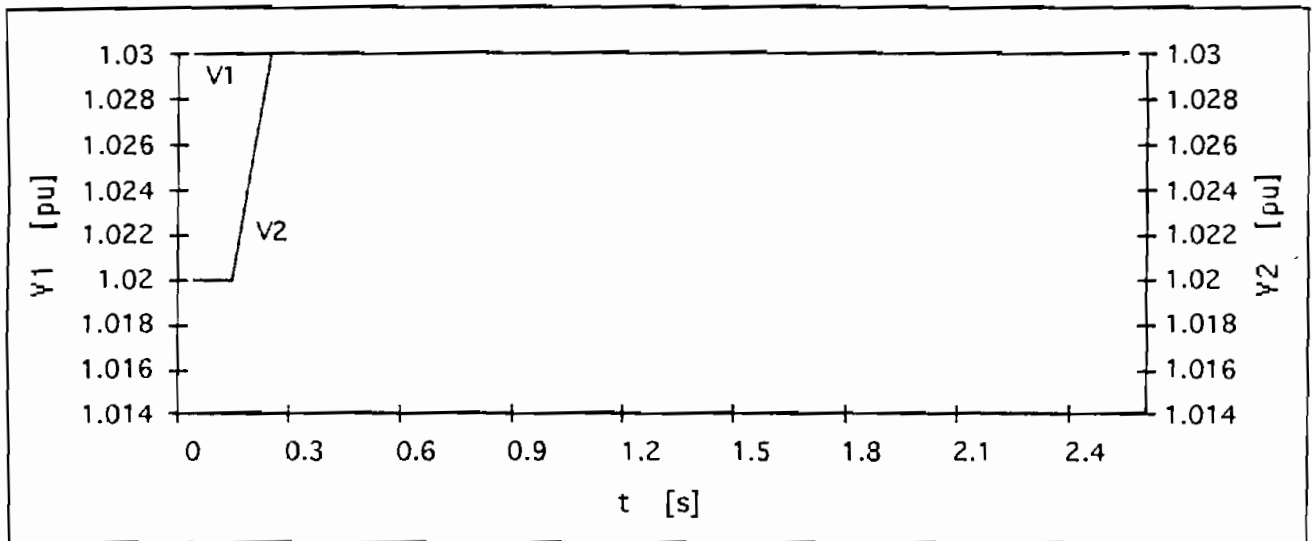


Figura 4.7 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Rechazo de Carga a Demanda Baja

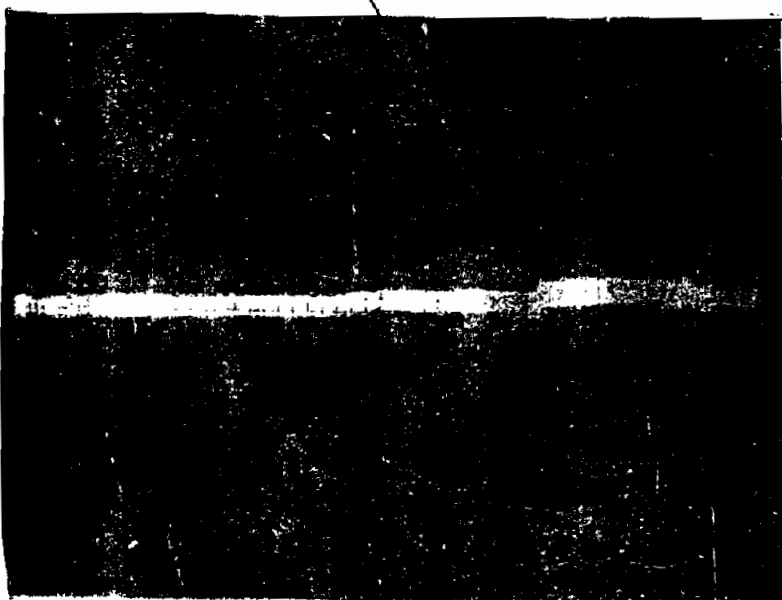
Como se observa en los resultados anteriores se produce una variación mayor en la frecuencia para un rechazo de carga en condición de demanda alta, pues la frecuencia aumenta más que para los casos de rechazo de carga en condiciones de demanda media o baja, además el tiempo de estabilización de la frecuencia es también mayor para el rechazo de carga con demanda alta. Sin embargo no se llega a condiciones de sobrevelocidad gracias a la actuación del regulador de velocidad, la inercia de la máquina y el rozamiento de las partes mecánicas.

En cuanto al voltaje en los tres casos: cuando está cargado el sistema en condición de demanda alta, media o baja, al producirse el rechazo de la carga el sistema se queda en vacío por lo que el voltaje en la barra de carga y en la de generación es igual a 1.03 pu que es el valor de voltaje inicial en la barra de generación. Este voltaje no varía debido a la actuación del regulador de voltaje.

La variación de frecuencia más crítica (en el rechazo de carga en condición de demanda alta) no llega a una décima de Hz. Esto manifiesta una buena regulación de velocidad ya que la condición de demanda alta significa un 71.31% de la carga nominal del generador.

Experimentalmente no se hizo la prueba de rechazo de carga en condición de demanda alta, pues la prueba se realizó un día sábado para no interferir con las labores docentes de la Facultad y en este día no se logra la condición de demanda alta, pues la mayoría de laboratorios y oficinas permanecen cerradas, sin embargo, se realizaron rechazos de carga en condiciones de demanda menores a la alta, observándose la velocidad del rotor en el osciloscopio en función del tiempo muy estable, difícil de precisar la variación de frecuencia ocasionada por la desconexión de la carga. Los resultados obtenidos experimentalmente son semejantes a los obtenidos de la simulación. A continuación se presenta una fotografía y un gráfico ploteado desde un osciloscopio, de la onda de velocidad del rotor en función del tiempo para pruebas de rechazo de carga realizadas experimentalmente.

Instante del Rechazo de Carga



Ganancia 3 V/div

Barrido 5 s/div

$\Delta f \approx 0.1 \text{ Hz}$

*para rechazo de
demanda media*

Figura 4.8a Velocidad del Rotor en Función del Tiempo

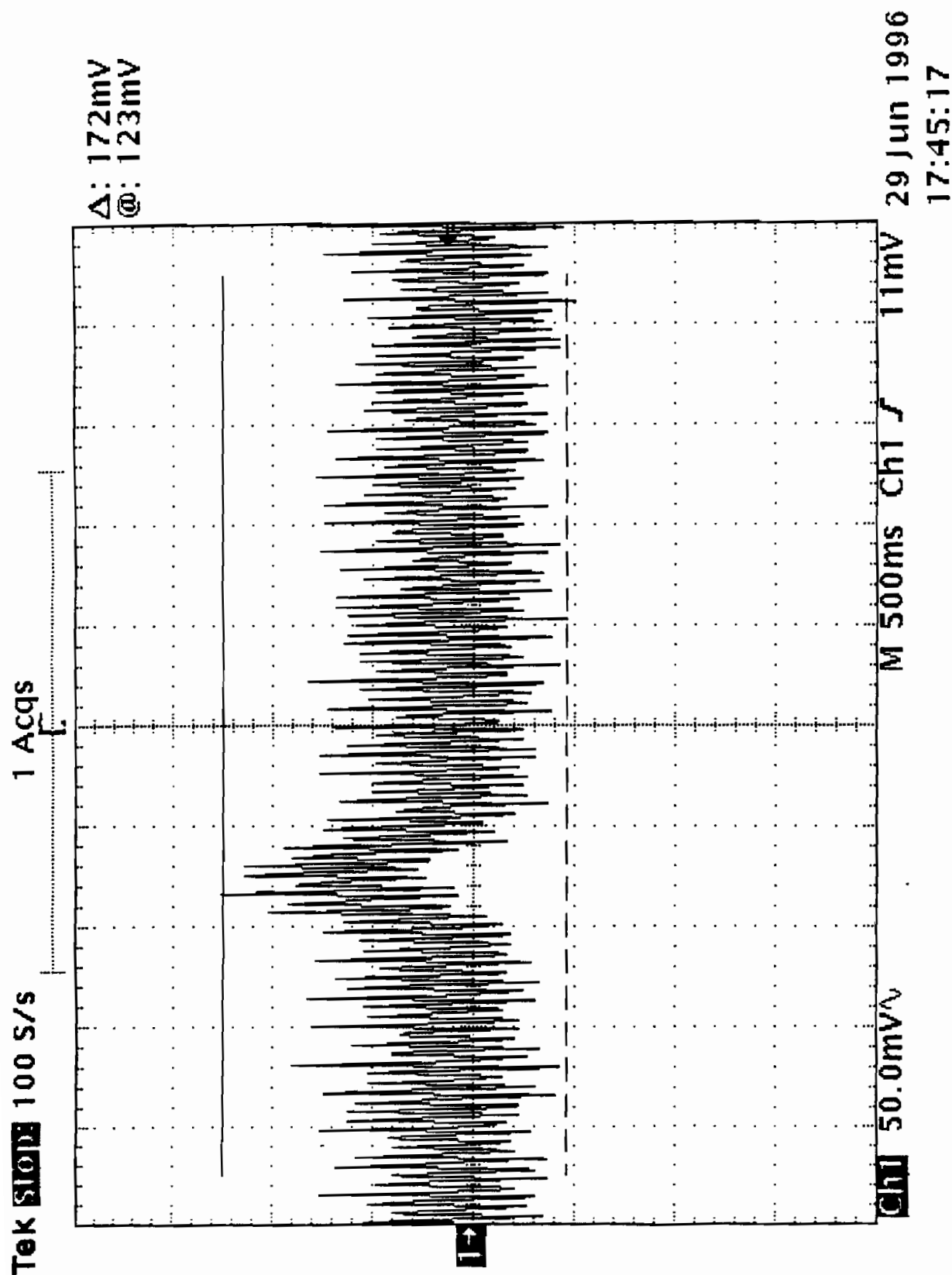


Figura 4.9b Velocidad del Rotor en Función del Tiempo
(Rechazo de Carga)

4.2 VARIACIONES DE CARGA ELECTRICA

El caso de variación de carga eléctrica se presenta cuando el generador está cargado con un cierto valor y en un instante dado se disminuye o incrementa un porcentaje de carga eléctrica al generador. Las variaciones de carga eléctrica se analizan mediante la frecuencia del generador y el voltaje en la barra de carga. Por lo tanto, los sistemas que actúan son el regulador de velocidad y el regulador de voltaje.

4.2.1 Variación de Carga desde Condición de Demanda Alta a Media

El tiempo de análisis es 5.2 s. Se produce la disminución de carga eléctrica a $t = 0.2$ s observándose que la frecuencia sube desde 60 Hz hasta 60.05 Hz a $t = 2.5$ s y se estabiliza en este valor, ver figura 4.9.

En cuanto al voltaje se observa que en la barra de carga sube de 1 pu a 1.03 pu, ver figura 4.10.

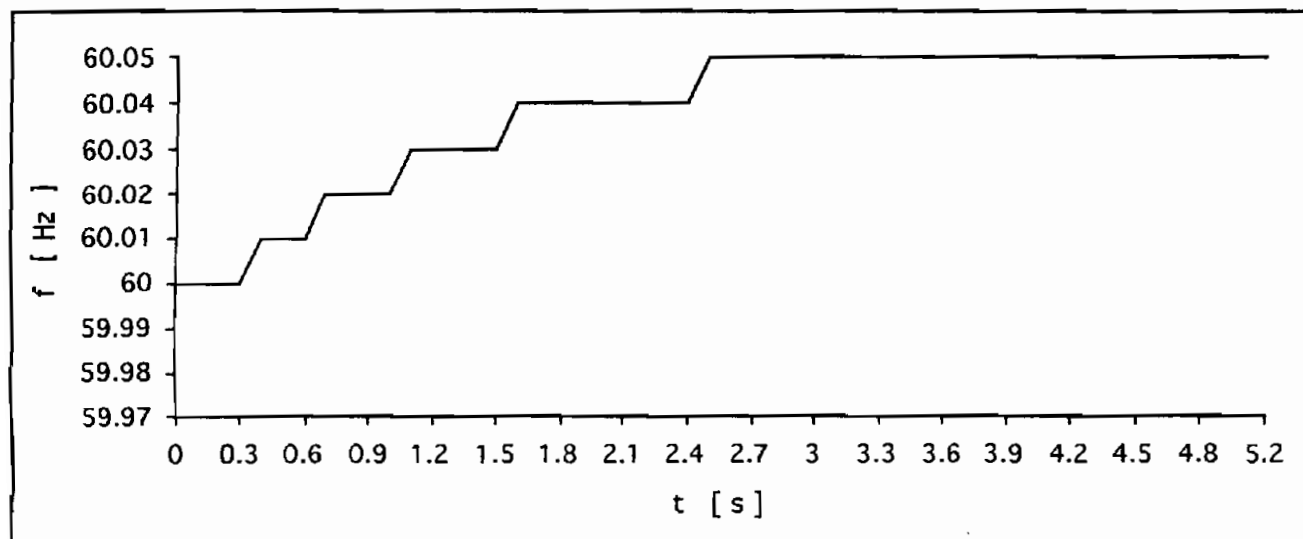


Figura 4.9 Frecuencia del Generador Durante Variación de Carga desde Alta a Media

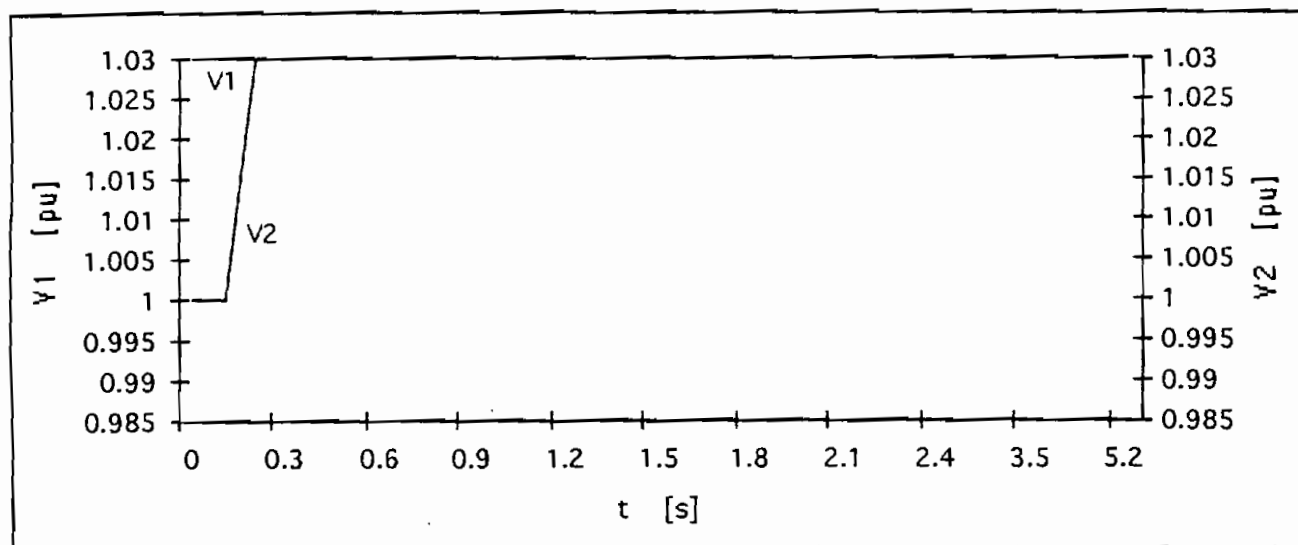


Figura 4.10 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Variación de Carga desde Alta a Med

4.2.2 Variación de Carga desde Condición de Demanda Alta a Baja

El tiempo de análisis es 4.7 s. Se produce la disminución de carga a $t = 0.2$ s y se observa que la frecuencia sube desde 60 Hz hasta 60.07 Hz a $t = 3.3$ s, ver figura 4.11. La frecuencia se estabiliza en 60.07 Hz.

En cuanto al voltaje se observa que en la barra de carga éste sube de 1 pu a 1.03 pu, ver figura 4.12.

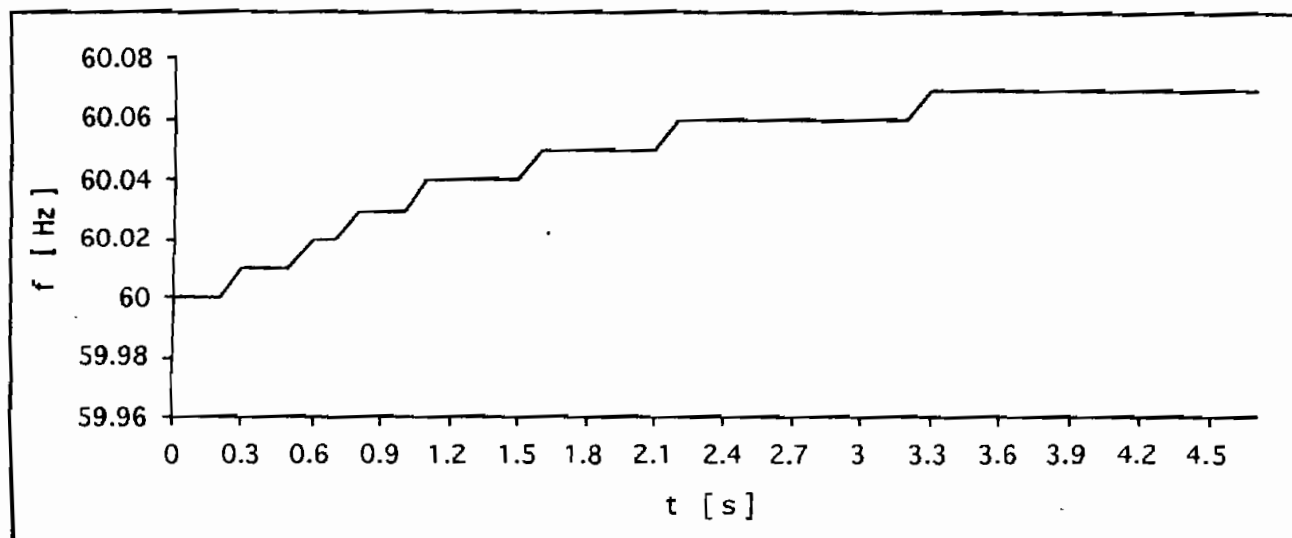


Figura 4.11 Frecuencia del Generador Durante Variación de Carga desde Alta a Baja

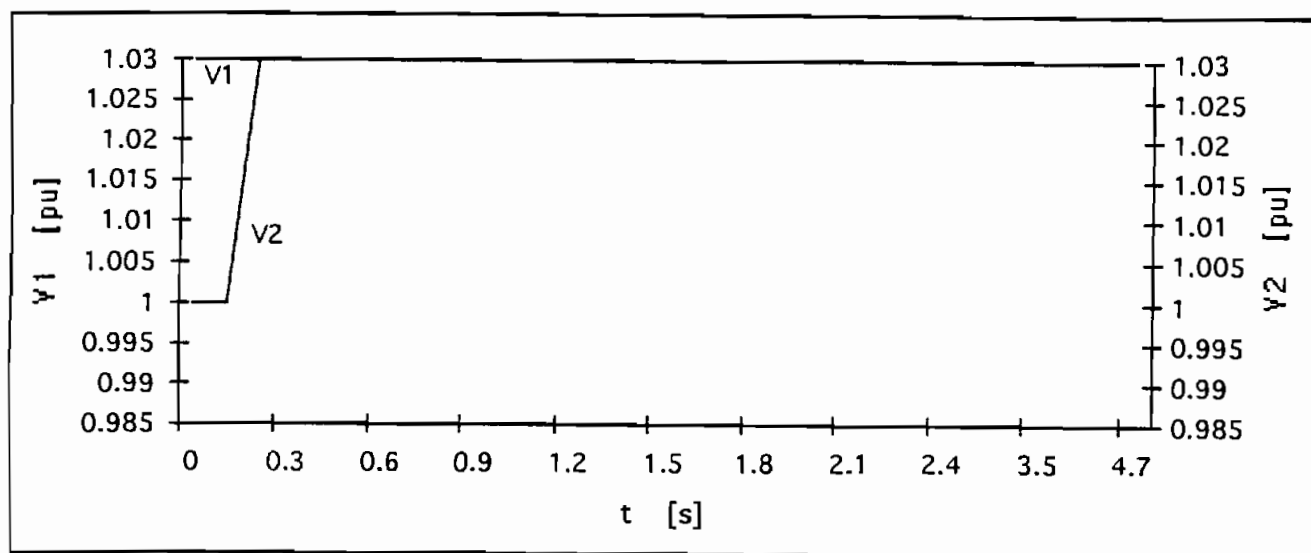


Figura 4.12 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Variación de Carga desde Alta a Baja

4.2.3 Variación de Carga desde Condición de Demanda Media a Baja

Después de correr un flujo de potencia con la demanda media de la Facultad de Ingeniería Eléctrica se realiza la simulación de la disminución de carga a $t = 0.2$ s y se observa que la frecuencia sube desde 60 Hz hasta 60.02 Hz a $t = 2.8$ s y en este valor se estabiliza, ver figura 4.13. El tiempo de análisis es 5.1 s.

En cuanto al voltaje se observa que en la barra de carga éste se mantiene en 1.02 pu y en la barra de generación permanece en 1.03 pu, ver figura 4.14.

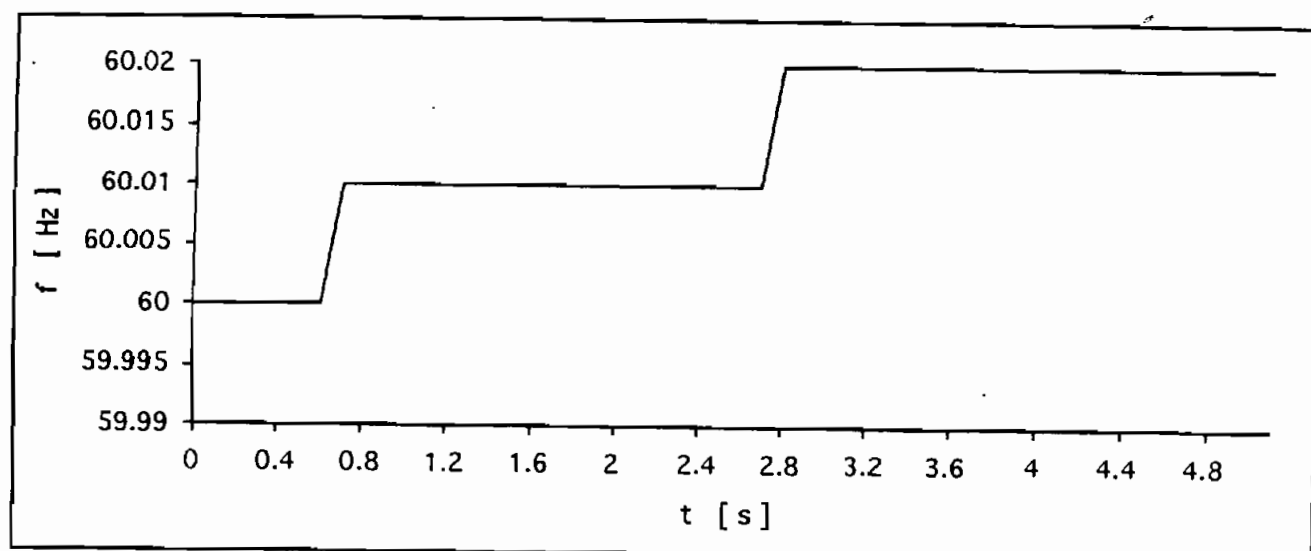


Figura 4.13 Frecuencia del Generador Durante Variación de Carga desde Media a Baja

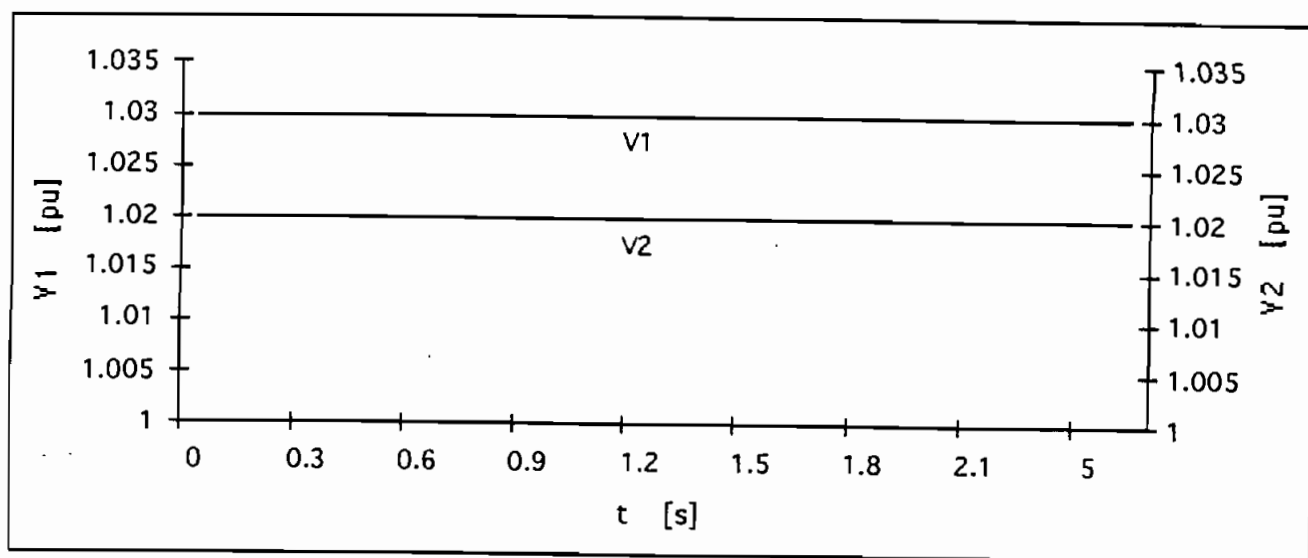


Figura 4.14 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Variación de Carga desde Media a Baja

4.2.4 Variación de Carga desde Condición de Demanda

Baja a Media

De una condición anterior de variación de carga desde condición de demanda alta a baja, se ha conseguido la condición de baja carga, con ello se procede a incrementar la carga para obtener la condición de demanda media.

La frecuencia anterior al incremento de carga es 60.07 Hz, este valor varía al realizarse el incremento de carga a $t = 4.7$ s así baja y se estabiliza en el valor de 60.06 Hz por la actuación del regulador de velocidad. Esto se observa en los resultados que se presentan en la figura 4.15. El voltaje se mantiene invariable después del incremento de carga, es decir tiene el valor de 1.03 pu, ver figura 4.16.

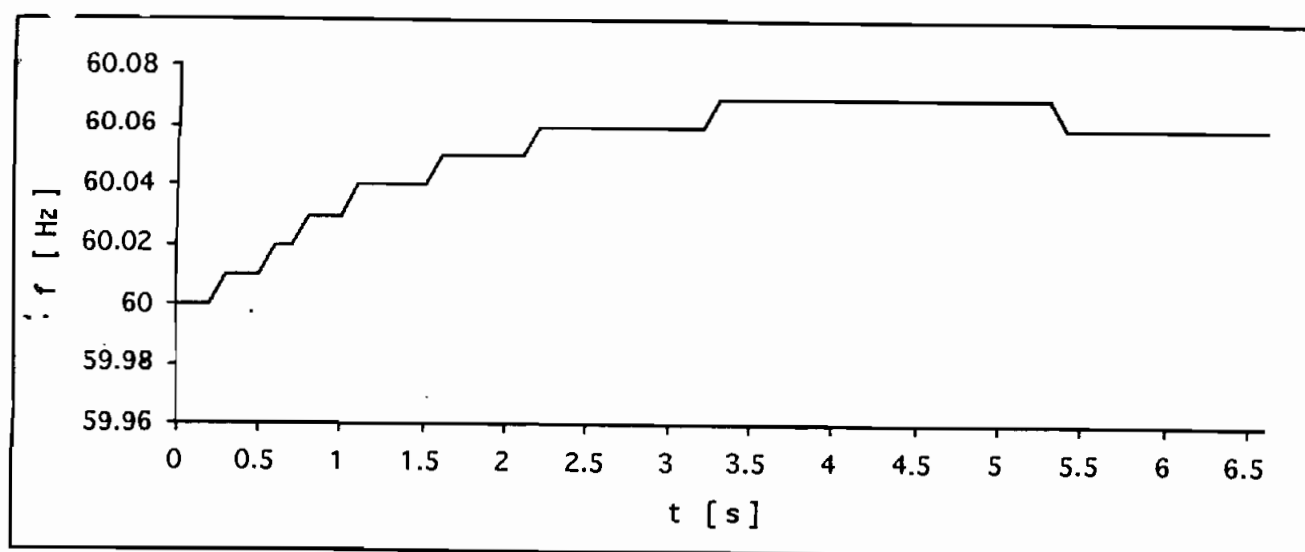


Figura 4.15 Frecuencia del Generador Durante Variación de Carga desde Baja a Media

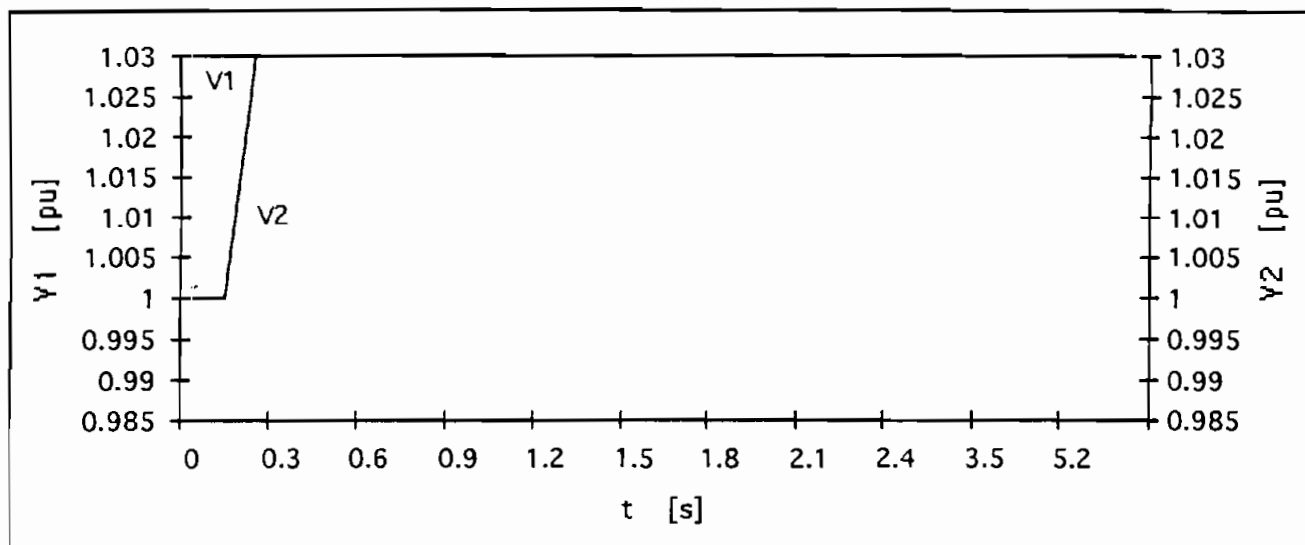


Figura 4.16 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Variación de Carga desde Baja a Med

4.2.5 Variación de Carga desde Condición de Demanda Baja a Alta

Al igual que en el caso anterior, de una variación de carga desde condición de demanda alta a baja, se ha conseguido la condición de demanda baja para proseguir a incrementarla al valor de demanda alta.

La frecuencia anterior al incremento de carga es de 60.07 Hz, este valor varía al realizarse el incremento de carga a $t = 4.7$ s. La frecuencia baja hasta el valor de 60 Hz a $t = 8.4$ s y en este valor se estabiliza por acción del regulador de velocidad. Esto se observa en los resultados que se presentan en la figura 4.17.

En la barra de carga el voltaje varía de 1.03 pu a 1 pu después del incremento de carga, ver figura 4.18.

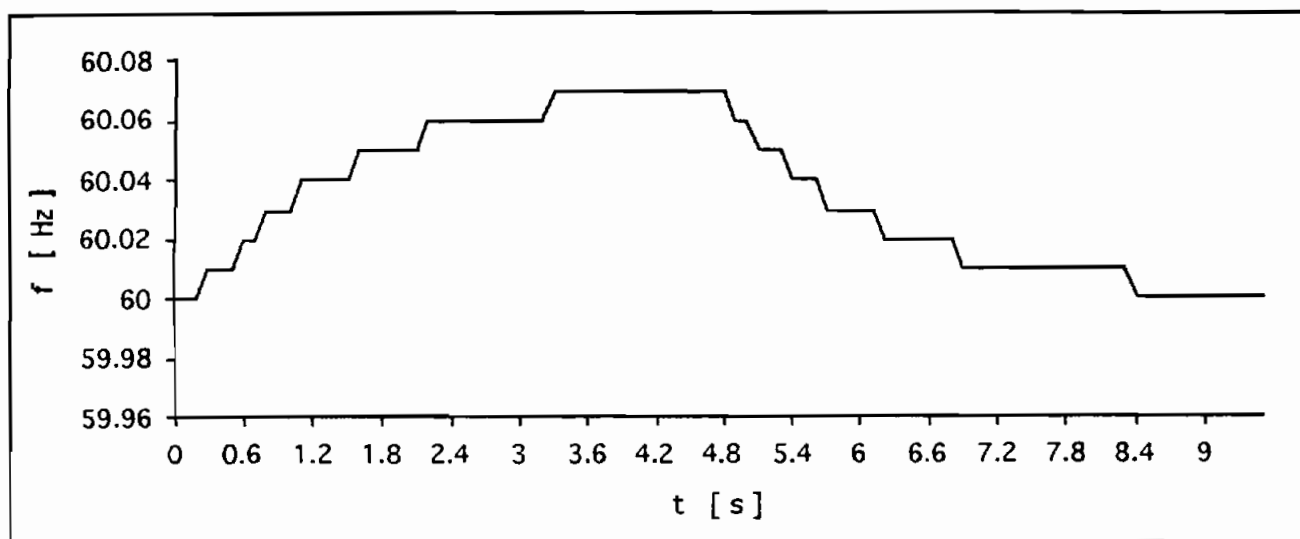


Figura 4.17 Frecuencia del Generador Durante Variación de Carga desde Baja a Alta

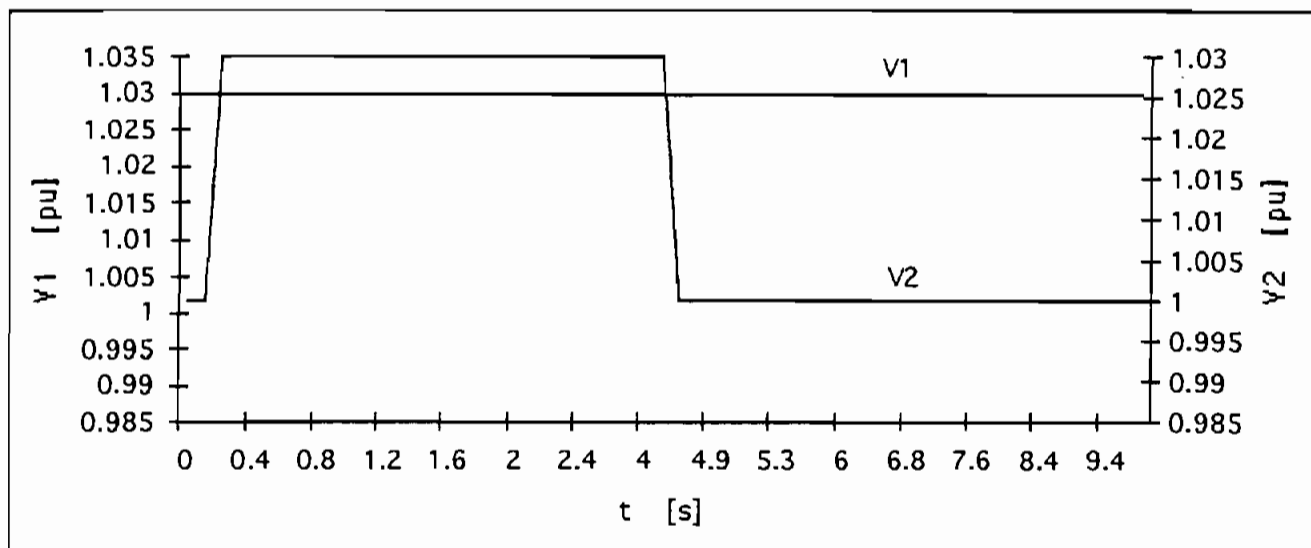


Figura 4.18 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Variación de Carga desde Baja a Alta.

4.2.6 Variación de Carga desde Condición de Demanda Media a Alta

Como en 4.2.5, de una variación de carga desde condición de demanda alta a media, se ha conseguido la condición de demanda media para luego incrementarla a demanda alta.

La frecuencia anterior al incremento de carga es de 60.05 Hz, este valor varía al realizarse el incremento de carga a $t = 5.1$ s. Entonces la frecuencia baja hasta el valor de 60 Hz a $t = 8.4$ s. En esta frecuencia se estabiliza por la acción del regulador de velocidad. Esto se observa en los resultados que se presentan en la figura 4.19. En la barra de carga el voltaje varía desde 1.03 pu hasta 1 pu después del incremento de carga, ver figura 4.20.

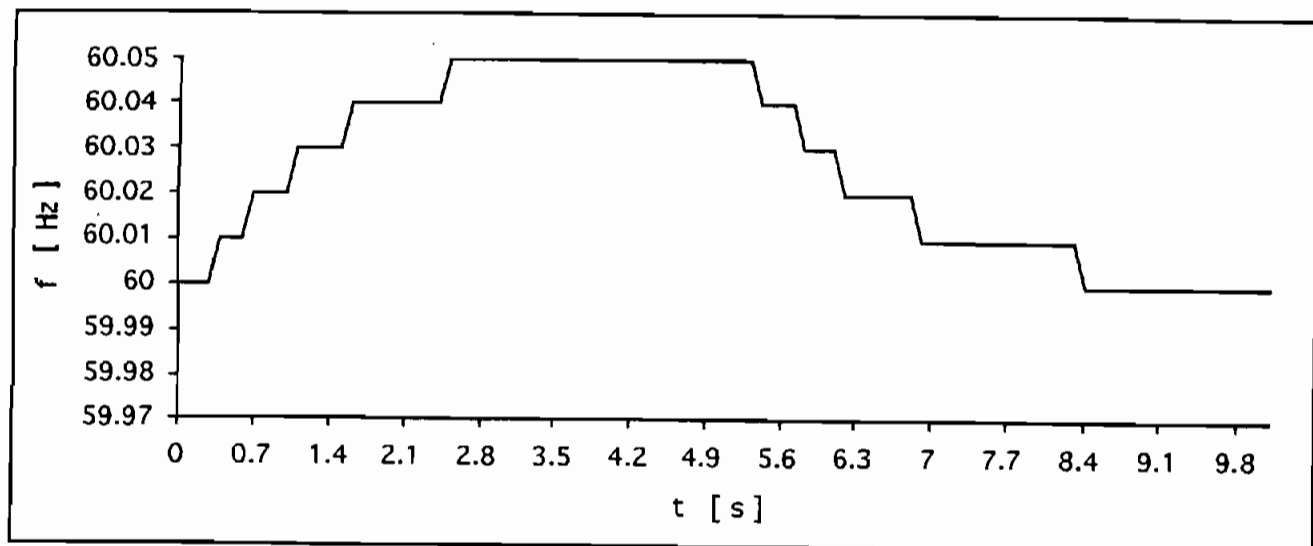


Figura 4.19 Frecuencia del Generador Durante Variación de Carga desde Medio a Alta.

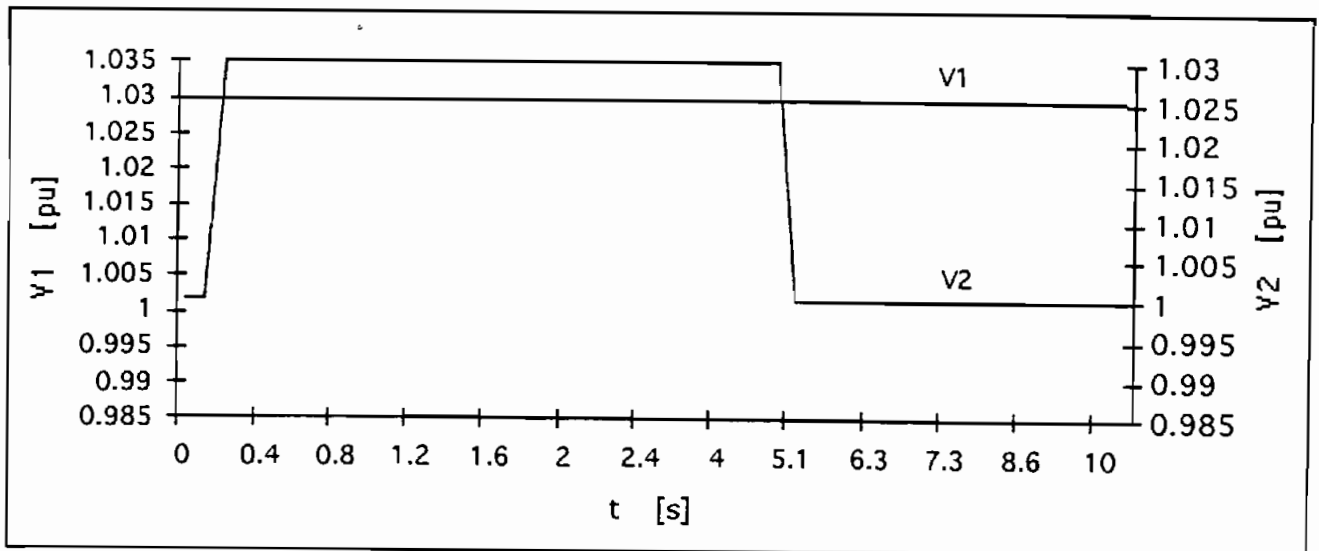


Figura 4.20 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Variación de Carga desde Media a Alta

De las simulaciones de variaciones de carga eléctrica realizadas se puede concluir que mientras mayor es la variación de carga mayor es la variación de frecuencia y mayor el tiempo que toma la máquina para estabilizarse. Así, en disminuciones de carga si mayor es la carga disminuida mayor es la frecuencia a la que se estabiliza por ejemplo para variación de carga alta a media la frecuencia de estabilización es 60.05 Hz y es menor que la frecuencia de estabilización para variación de carga alta a baja cuyo valor es 60.07 Hz porque la variación de carga es mayor en este caso. El voltaje sube al disminuir la carga por exceso de potencia reactiva.

Para incrementos de carga se produce una disminución de la frecuencia proporcional al incremento de carga. Esto es si la variación es grande la frecuencia baja y se estabiliza en un valor mucho menor al que tenía antes del incremento de carga como se puede ver en la variación de baja a media carga donde la frecuencia baja desde 60.07 hasta 60.06 Hz. En cuanto al voltaje si el incremento de carga no es considerable el voltaje no cambia pero si por el contrario lo es, el voltaje disminuye.

Entonces para disminuciones de carga el sistema se comporta de manera muy semejante que para rechazos de carga. En cuanto al valor mismo de la variación de frecuencia se observa que es menor a los obtenidos para rechazos de carga, es decir no llega ni a una décima de Hz, lo cual se verifica en las fotografías tomadas en las pruebas de variaciones de carga presentadas en las figuras 4.21. En la fotografías es difícil apreciar la variación de frecuencia en la onda de velocidad del rotor tomada en el osciloscopio cuando varía la carga. Es necesario aclarar también que experimentalmente las variaciones de carga no han sido considerables sino pequeñas de acuerdo a la disponibilidad de equipo de seccionamiento en la prueba.

Experimentalmente las variaciones de carga realizadas no producen cambios apreciables de la frecuencia en la señal de velocidad del rotor en función del tiempo tomada en el osciloscopio.

En cuanto al voltaje se observa que conforme varía la carga varía el voltaje en la barra de carga por la actuación del regulador de voltaje ante variaciones de potencia reactiva producidas por las variaciones de carga. Así si la carga aumenta el voltaje disminuye y si la carga disminuye el voltaje aumenta..

A continuación se presenta un gráfico ploteado desde un osciloscopio y una fotografía de la variación de la velocidad del rotor cuando se realiza el arranque de algunos motores, figuras 4.21a y 4.21b. Se observa como durante el arranque la velocidad del rotor baja (incremento de carga) y cuando la corriente se estabiliza la velocidad sube (disminución de carga).

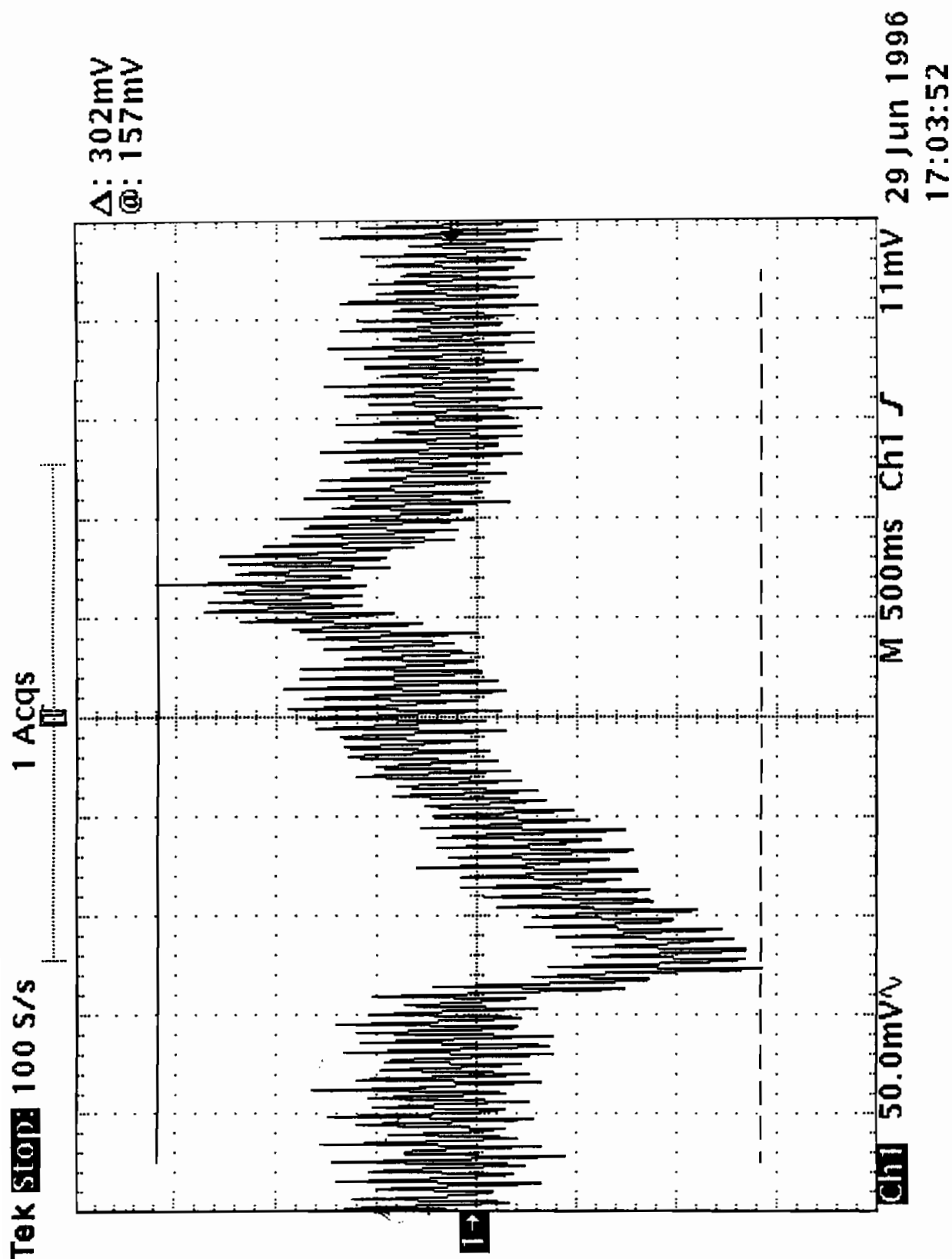
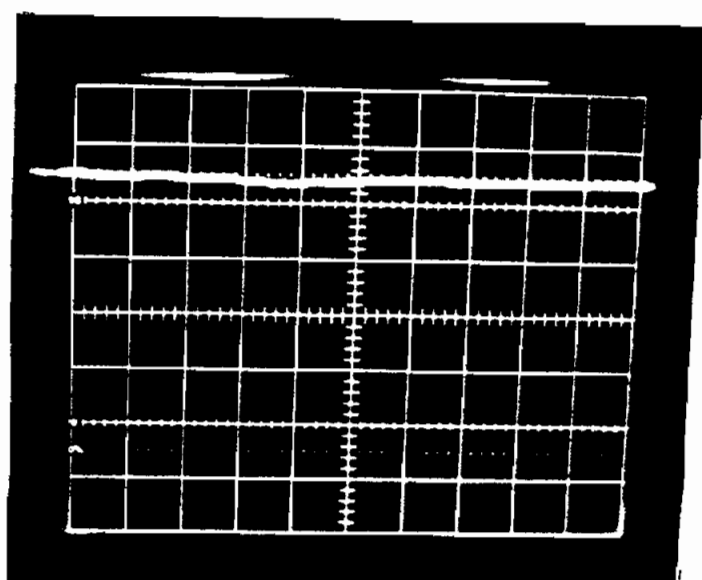


Figura 4.21a Velocidad del Rotor en Función del Tiempo



Ganancia 3 V/div

Barrido 5 s/div

Figura 4.21b Velocidad del Rotor en Función del Tiempo
(Arranque de motores)

4.3 CORTOCIRCUITOS

El cortocircuito es una falla perjudicial para cualquier sistema eléctrico, que debido al incremento de corriente puede ocasionar daños severos en barras, líneas y equipos eléctricos, al sobrepasar su capacidad nominal de corriente. En el sistema analizado, un cortocircuito trifásico específicamente, produce elevaciones de corriente peligrosas que significan un excesivo y violento incremento de carga eléctrica en el generador de emergencia.

Los cortocircuitos trifásicos no se realizan experimentalmente por razones de seguridad. La única forma de conocer qué es lo que pasa con la máquina, es mediante la simulación de estos casos. Para ello se simulan cortocircuitos trifásicos en la mitad de la línea que se encuentra entre la barra de generación y la de carga que correspondería a la que se encuentra entre el grupo de

emergencia y el tablero de transferencia. En los análisis se incluyen las siguientes variaciones: cortocircuito trifásico con despeje de falla, cortocircuito trifásico sin despeje de falla, cortocircuito trifásico con reconexión y también se ha simulado el cortocircuito trifásico en la barra de carga y no en la línea.

4.3.1 Cortocircuito Trifásico en Condición de Demanda Alta

4.3.1.1 Cortocircuito Trifásico en la Mitad de la Línea con Despeje de Falla

Para una falla trifásica a $t = 0.15$ s y despeje por apertura de la línea a $t = 0.45$ s con un tiempo de estudio de 10 s se observa que la frecuencia baja desde 60 Hz hasta 58.91 Hz a $t = 0.45$ s, instante en el que se abre la línea y se despeja la falla, entonces sube la frecuencia hasta 60.09 Hz a $t = 9.8$ s y en este valor se mantiene, ver figura 4.22. Esto significa que cuando se produce el cortocircuito se desarrollan altísimas corrientes transitorias, las que multiplicadas por la impedancia que existe durante el cortocircuito que sería la equivalente de las reactancias subtransitorias y transitorias de la máquina y la de la línea, producen una gran demanda de potencia eléctrica del generador, mayor que la potencia mecánica que entrega la máquina motriz, produciéndose un desequilibrio en la potencia de aceleración de la máquina, es decir la potencia de aceleración es negativa y esto hace que la frecuencia baje durante el cortocircuito. Cuando se despeja la falla abriendo la línea la potencia eléctrica

es cero por lo que la potencia de aceleración será igual a la potencia mecánica que recibe el generador, es decir la potencia de aceleración es positiva, esto produce que la frecuencia suba. Debido a la actuación del regulador de velocidad, la inercia de la máquina y la fricción de las partes mecánicas, la frecuencia no sube indefinidamente sino que alcanza un valor estable y la potencia de aceleración de la máquina tiene su valor de equilibrio cero.

Se observa que en condiciones iniciales los voltajes de las barras de generación y carga son 1.03 y 1 pu, respectivamente, y cuando se produce la falla a $t = 0.15$ s el voltaje en la barra de carga es 0 pu y el voltaje en la barra de generación empieza a bajar hasta 1.01 pu, entonces se abre la línea y comienza a recuperarse el voltaje en la barra de generación llegando a su valor inicial 1.03 pu a $t = 0.95$ s, mientras que el voltaje en la barra de carga permanece en cero debido a que la línea se abrió y no se reconectó, ver figura 4.23. Cuando se produce el cortocircuito la corriente de armadura del generador induce una corriente de campo mayor a la anterior al cortocircuito y ésta sigue creciendo porque el regulador de voltaje trata de mantener el voltaje de referencia en los terminales del generador, el cual está disminuyendo debido a la cercanía a la que se produjo el cortocircuito. Entonces cuando se despeja la falla como la corriente de campo es mayor que antes del cortocircuito se produce un exceso de potencia reactiva y por ello un aumento del voltaje terminal del generador, como la falla se despeja abriendo la línea la corriente de armadura es cero, esto a su vez disminuye la

corriente de campo, lo cual produciría una disminución del voltaje terminal del generador, pero por la acción del regulador de voltaje este se mantiene constante en la barra de generación.

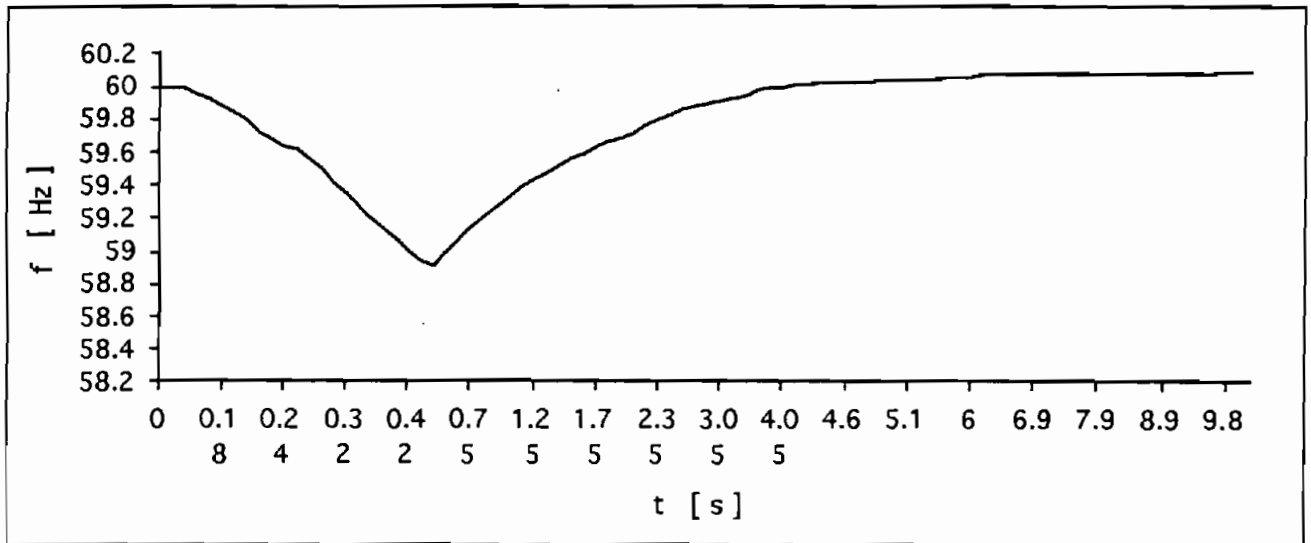


Figura 4.22 Frecuencia del Generador Durante Cortocircuito 3 ϕ y Despeje, 50% de la Línea, Demanda Alta

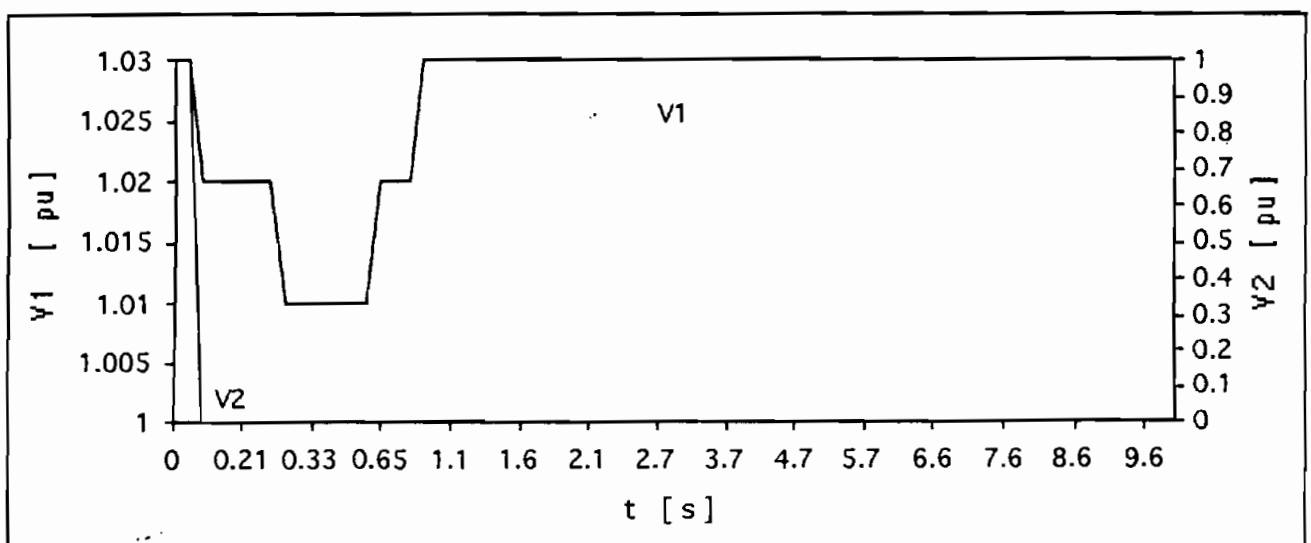


Figura 4.23 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Cortocircuito 3 ϕ y Despeje, 50% de la Línea, Demanda Alta

4.3.1.2 Cortocircuito Trifásico en la Mitad de la Línea con Despeje de Falla y Reconexión de la Línea

Se produce una falla trifásica a $t = 0.15$ s en la mitad de la línea que une la barra de generación y la barra de carga. El tiempo de estudio es 9.8 s. A $t = 0.45$ s se abre la línea y a $t = 1.3$ s se reconecta la línea.

En cuanto a la frecuencia se observa que ésta baja desde 60 Hz hasta 58.91 Hz a $t = 0.45$ s, instante en el que se despeja la falla, luego sube hasta 59.45 Hz a $t = 1.3$ s, entonces se reconecta la línea y se observa que la frecuencia sigue subiendo hasta estabilizarse en 60 Hz a $t = 7.8$ s, ver figura 4.24. Esto significa que durante el cortocircuito la potencia de aceleración es negativa por lo que la frecuencia baja, cuando se despeja la falla la potencia de aceleración es positiva entonces la frecuencia sube, como por la actuación del regulador de velocidad sobre la máquina motriz la potencia de aceleración es próxima a cero pero positiva, cuando se reconecta la línea la potencia eléctrica es diferente de cero pero no mayor que la potencia mecánica por lo que la potencia de aceleración es un poco positiva nuevamente, por esto se observa que la frecuencia sigue subiendo un poco sin embargo la acción del regulador logra que la frecuencia se estabilice.

El voltaje en las barras de generación y carga, cuyos valores iniciales son 1.03 y 1 pu respectivamente, varían de la siguiente manera: el voltaje en la barra de carga durante el cortocircuito es 0 pu, en la barra de generación

el voltaje baja hasta 1.01 pu. Cuando se despeja la falla el voltaje sube hasta 1.03 pu a $t = 0.88$ s. A $t = 1.3$ s, que es cuando se reconecta la línea, el voltaje en la barra de generación y la de carga vuelven a ser 1.03 y 1 pu respectivamente, ver figura 4.25. Durante el cortocircuito la corriente de campo sube por la inducción que realiza la corriente de armadura sobre el rotor (efecto transformador de la máquina síncronica) y por la acción del regulador de voltaje para mantener el voltaje nominal en los terminales del generador, a pesar de lo cual baja por la cercanía al lugar del cortocircuito. Cuando se despeja la falla existe más potencia reactiva que la inicial debido al aumento de la corriente de campo durante el cortocircuito, por lo que el voltaje sube, pero como la corriente es cero por la apertura de la línea la corriente de campo baja y el voltaje en la barra de generación no sube más que su valor inicial con carga, entonces cuando se reconecta la línea la corriente de armadura es diferente de cero y la corriente de campo tiende a subir pero por la actuación del regulador el voltaje en los terminales del generador se mantiene constante.

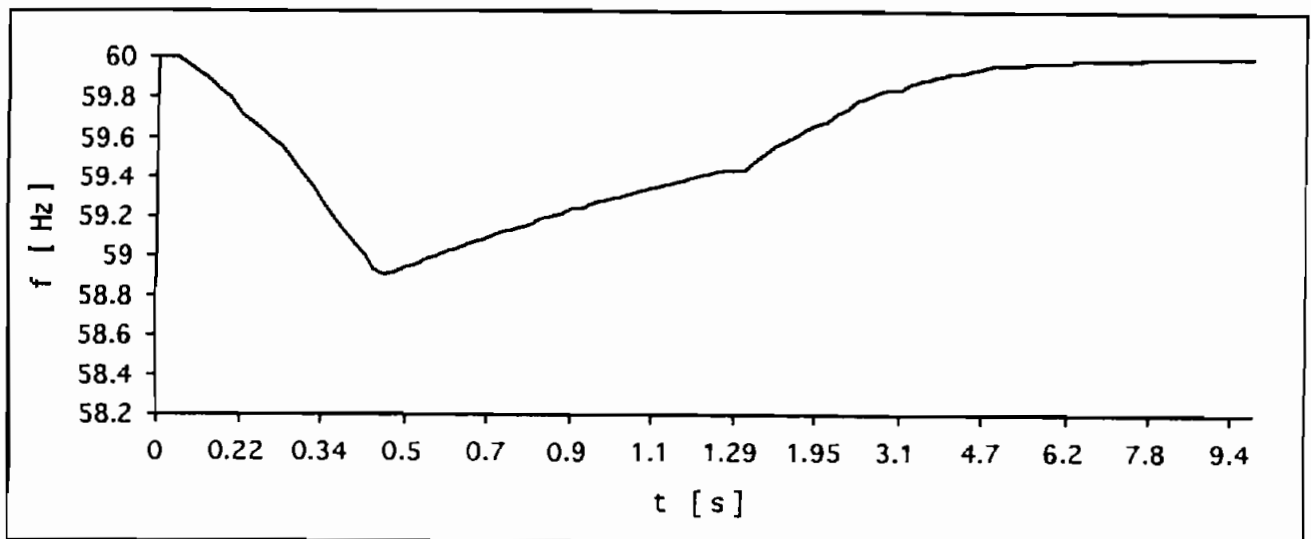


Figura 4.24 Frecuencia del Generador Durante Cortocircuito 3 ϕ , Despeje y Reconexión, 50% de la Línea, Demanda Alta

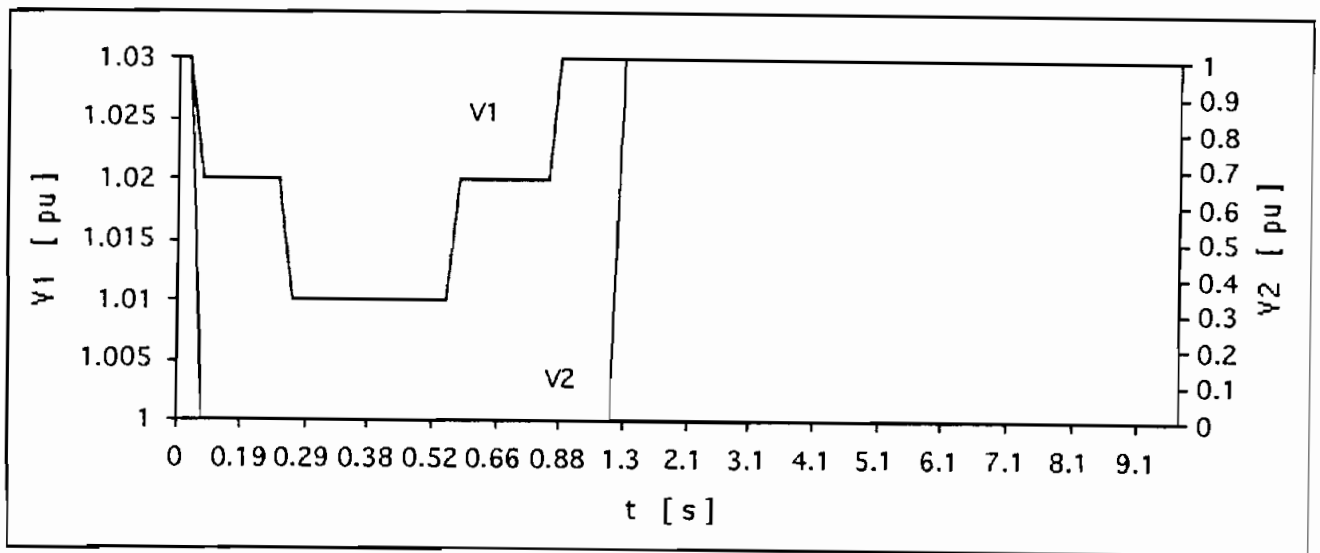


Figura 4.25 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Cortocircuito 3 ϕ , Despeje y Reconexión, 50% de la Línea, Demanda Alta

4.3.1.3 Cortocircuito Trifásico en la Mitad de la Línea sin Despeje de Falla

El tiempo de estudio es 10.4 s, a $t = 0.15$ s se produce una falla trifásica en la mitad de la línea y no se despeja. Entonces se observa que la frecuencia baja desde 60 Hz hasta 54.73 Hz a $t = 9.9$ s y alrededor de este valor se mantiene, ver figura 4.26. Cuando ocurre el cortocircuito la potencia eléctrica es mucho mayor que la potencia mecánica que da la máquina motriz, por lo tanto la potencia de aceleración es negativa y la frecuencia disminuye, por la actuación del regulador de velocidad la potencia mecánica aumenta para compensar el incremento de potencia eléctrica y lograr que la potencia de aceleración sea cero. Como no se despeja la falla la potencia de aceleración sigue siendo cero y la frecuencia permanece constante pero muy baja respecto de su valor nominal.

El voltaje de la barra de generación baja hasta 0.95 pu a $t = 2.95$ s, valor en el que se estabiliza. El voltaje en la barra de carga se mantiene en 0 pu durante el cortocircuito, ver figura 4.27. Por el cortocircuito la alta corriente de armadura induce un aumento en la

corriente de campo, el voltaje en la barra de generación tiende a disminuir porque el cortocircuito es cercano a la barra de generación pero el regulador de voltaje trata de mantener el voltaje nominal en los terminales del generador, como la corriente de cortocircuito alcanza su valor de estado permanente la corriente de campo también lo hace y por ello el voltaje en la barra de generación se mantiene constante.

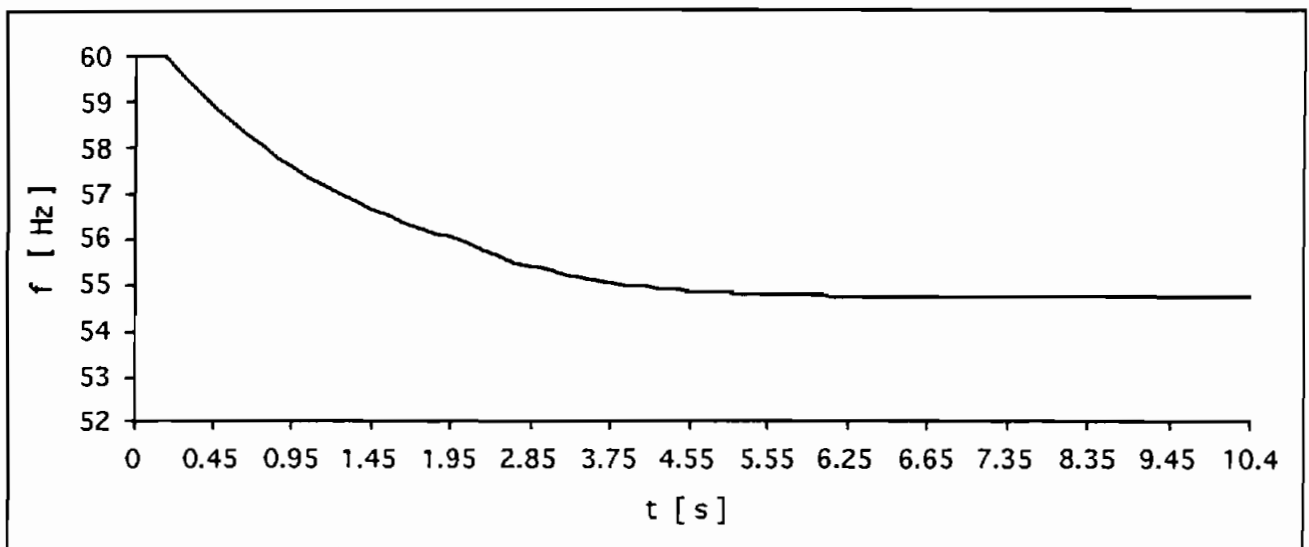


Figura 4.26 Frecuencia del Generador Durante Cortocircuito 3ϕ , Sin Despeje, 50% de la Línea, Demanda Alta

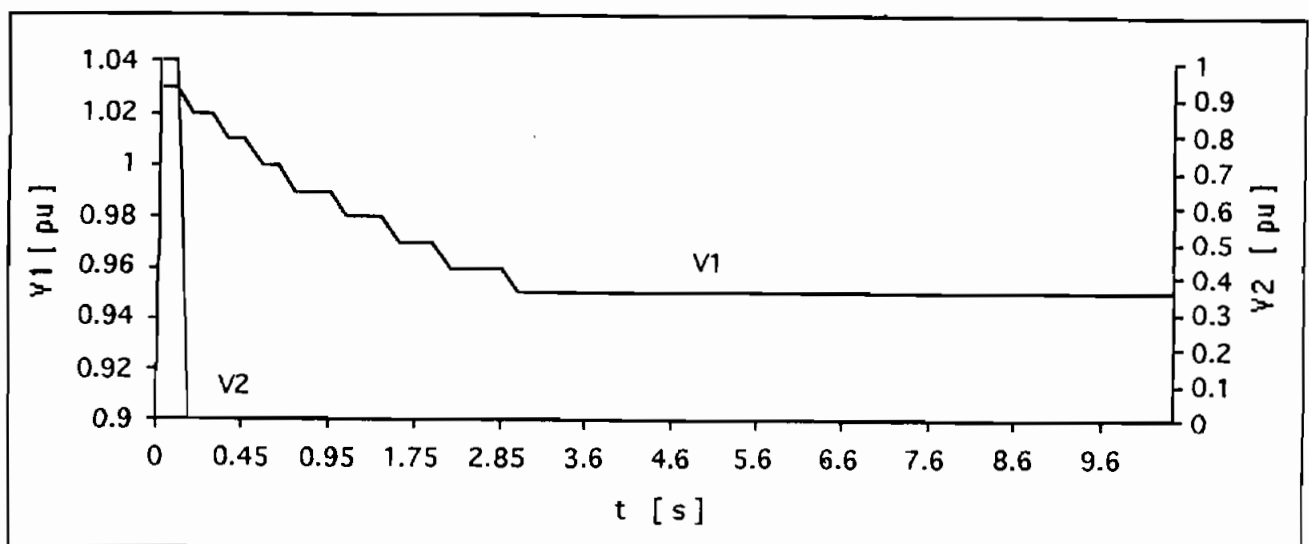


Figura 4.27 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Cortocircuito 3ϕ , Sin Despeje, 50% de la Línea, Demanda Alta

4.3.1.4 Cortocircuito Trifásico en la Barra de Carga con Despeje de Falla

El tiempo de estudio es 9.4 s, la falla ocurre a $t = 0.15$ s en la barra de carga y a $t = 0.45$ s se despeja la falla.

La frecuencia baja desde 60 Hz hasta 59.46 Hz a $t = 0.45$ s, luego sube hasta 60.09 Hz a $t = 8.85$ s estabilizándose en este valor, ver figura 4.28. Se observa que el comportamiento de la frecuencia en este caso es similar al descrito en 4.3.1.1, excepto que en este caso la frecuencia no baja hasta 58.91 Hz como ocurre cuando el cortocircuito se realiza en la mitad de la línea.

En cuanto al voltaje, en la barra de generación baja desde su valor inicial de 1.03 pu hasta 1.02 pu, luego del despeje se recupera rápidamente al valor inicial de 1.03 pu. El voltaje en la barra de carga es cero ya que no se reconecta la línea que se abrió al despejar la falla, ver figura 4.29. Por comparación con 4.3.1.1 se observa que el voltaje en la barra de generación baja menos cuando el cortocircuito ocurre en la barra de carga que cuando ocurre en la mitad de la línea.

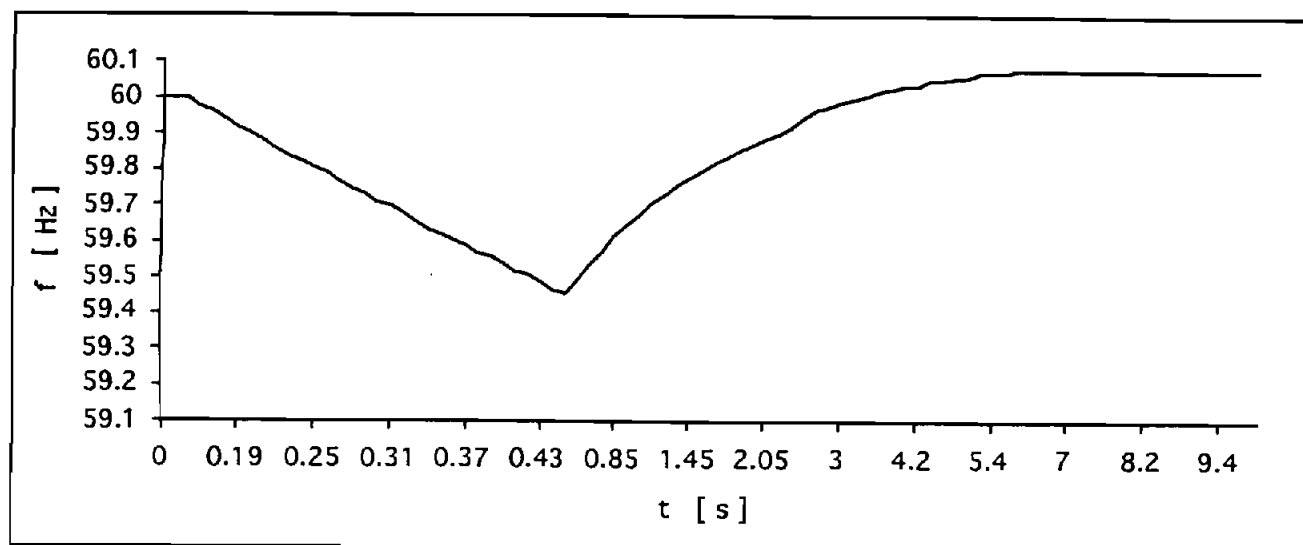


Figura 4.28 Frecuencia del Generador Durante Cortocircuito 3ϕ y Despeje, en Barra de Carga, Demanda Alta

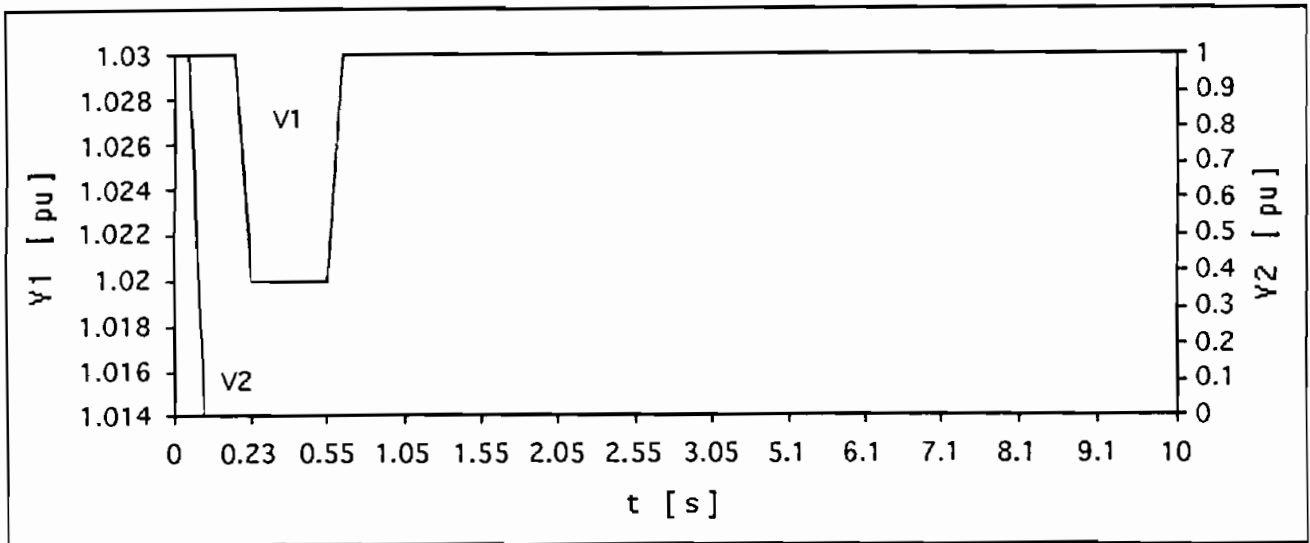


Figura 4.29 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Cortocircuito 3 ϕ y Despeje, en Barr de Carga, Demanda Alta

4.3.2 Cortocircuito Trifásico en Condición de Demanda Media

4.3.2.1 Cortocircuito Trifásico en la Línea con Despeje de Falla

El tiempo de estudio es de 8.55 s. El cortocircuito se produce a $t = 0.15$ s y se abre la línea a $t = 0.45$ s. Se observa que la frecuencia baja durante el cortocircuito hasta 58.9 Hz a $t = 0.45$ s y una vez que se despeja la falla sube hasta 60.03 Hz a $t = 7.75$ s y en este valor se estabiliza, ver figura 4.30. Durante el cortocircuito la frecuencia se comporta igual que con cortocircuito con demanda alta, pero varía después del despeje de falla pues con demanda media se estabiliza en un valor menor de frecuencia.

El voltaje en la barra de carga en condiciones normales de carga media es de 1.02 pu, durante el cortocircuito y después de él tiene un valor de 0 pu, mientras que el valor del voltaje en la barra de generación

que inicialmente es de 1.03 pu por el cortocircuito baja a 1.01 pu luego sube a 1.03 pu a $t = 0.95$ s, ver figura 4.31. Se observa que el voltaje en la barra de generación se comporta igual que en 4.3.1.1.

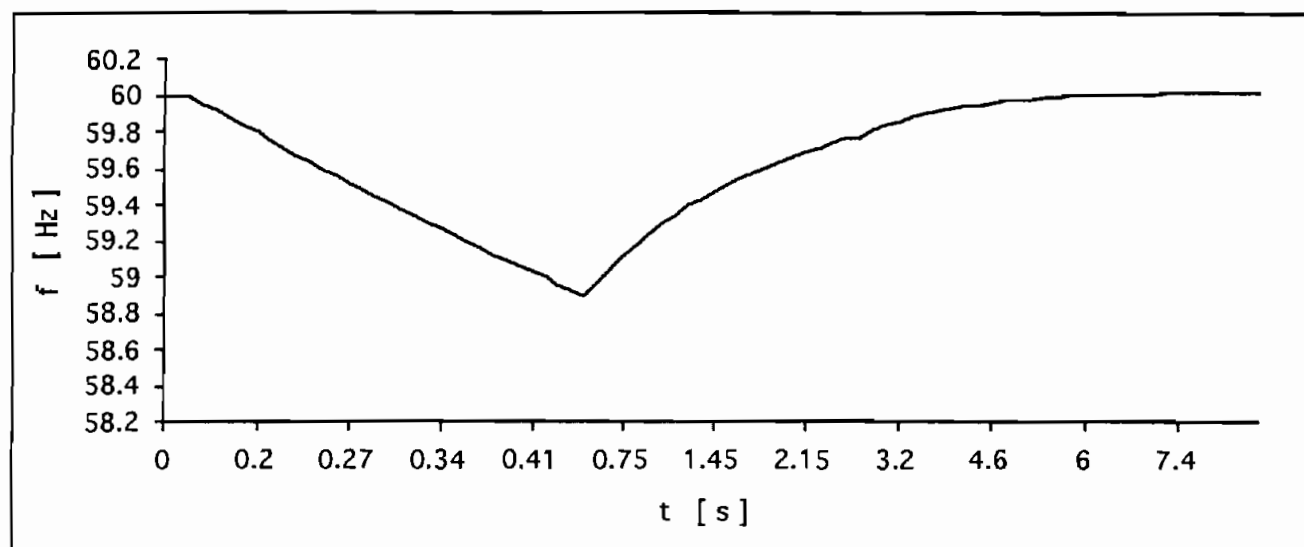


Figura 4.30 Frecuencia del Generador Durante Cortocircuito 3 ϕ y Despeje, 50% de la Línea, Demanda Media

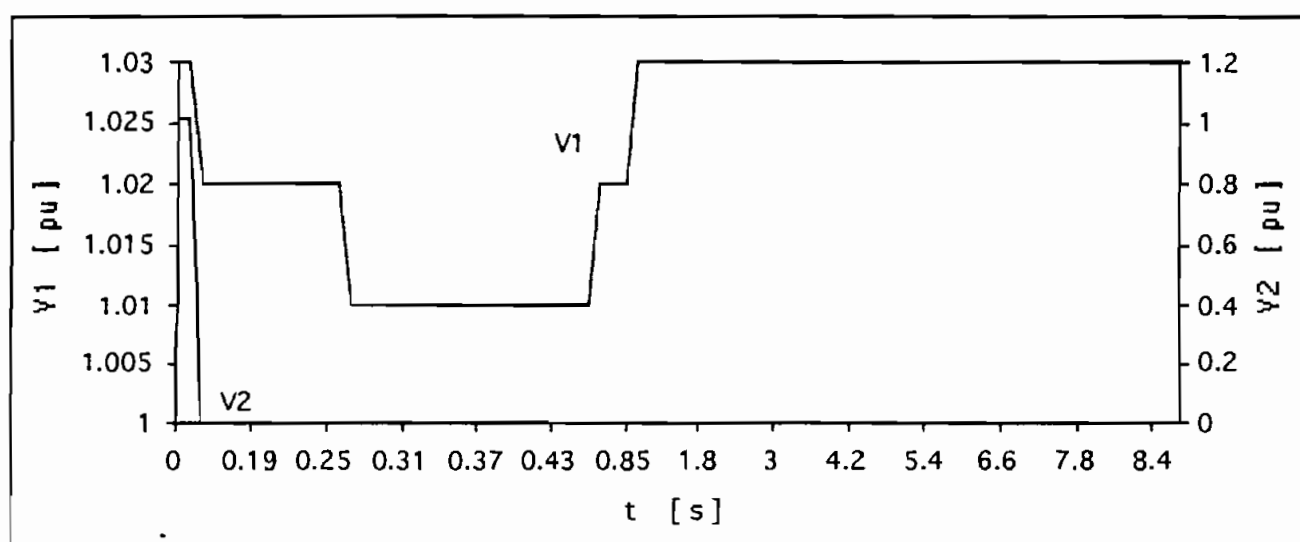


Figura 4.31 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Cortocircuito 3 ϕ y Despeje, 50% de la Línea, Demanda Media

4.3.2.2 Cortocircuito Trifásico en la Mitad de la Línea con Despeje de Falla y Reconexión

El tiempo de estudio es 9.8 s. Se produce una falla trifásica a $t = 0.15$ s en la mitad de la línea, a $t=0.45$ s la línea se abre para despejar la falla y a $t = 1.3$ s la línea es reconectada.

Entonces se observa que la frecuencia baja hasta 58.9 Hz luego sube hasta 59.42 Hz a $t = 1.3$ s, instante en el que se produce la reconexión, entonces sube la frecuencia hasta estabilizarse en 60 Hz desde $t = 7.9$ s, ver figura 4.32. Durante el cortocircuito la frecuencia se comporta igual que con demanda alta, después del despeje de falla y la reconexión de la línea se tiene que las frecuencias de estabilización son mayores con demanda alta que con demanda media.

En cuanto al voltaje de las barras de generación y carga, cuyos valores iniciales son 1.03 y 1.02 pu, respectivamente, se observa lo siguiente: en la barra de generación baja hasta 1.01 pu y cuando se despeja la falla a $t = 0.45$ s empieza a subir hasta 1.03 pu a $t = 0.91$ s y una vez que se reconecta la línea, el voltaje de generación se mantiene en 1.03 pu y el voltaje en la barra de carga sube de 0 a 1.02 pu por la reconexión, ver figura 4.33. El voltaje en la barra de generación se comporta de manera semejante al obtenido en 4.3.1.2. En la barra de carga los valores son diferentes.

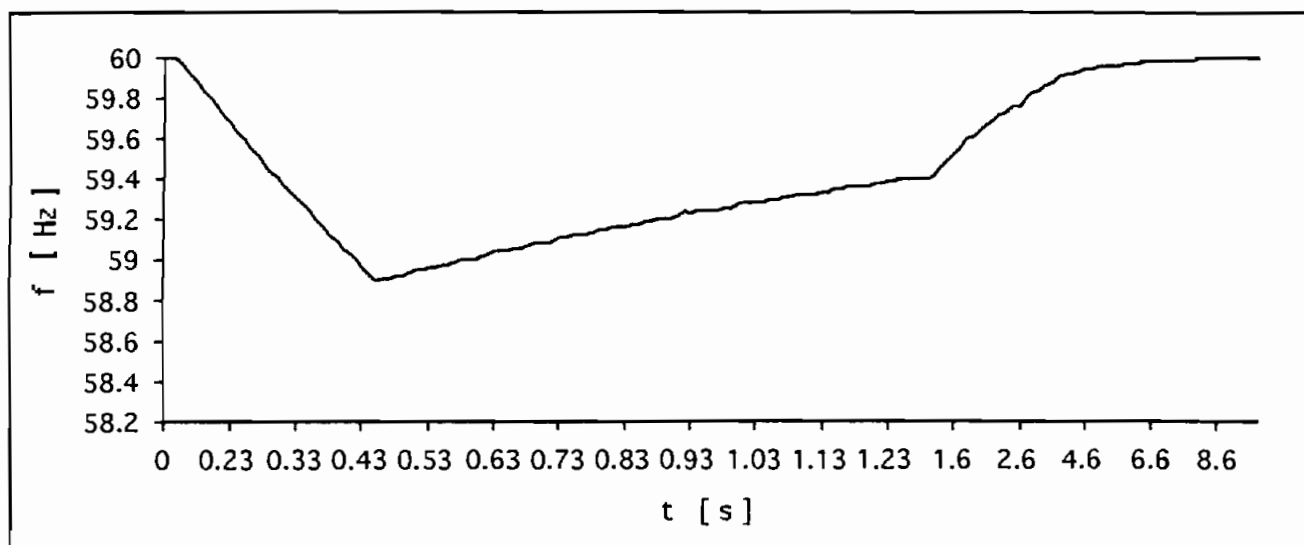


Figura 4.32 Frecuencia del Generador Durante Cortocircuito 3 ϕ , Despeje y Reconexión, 50% de la Línea, Demanda Media

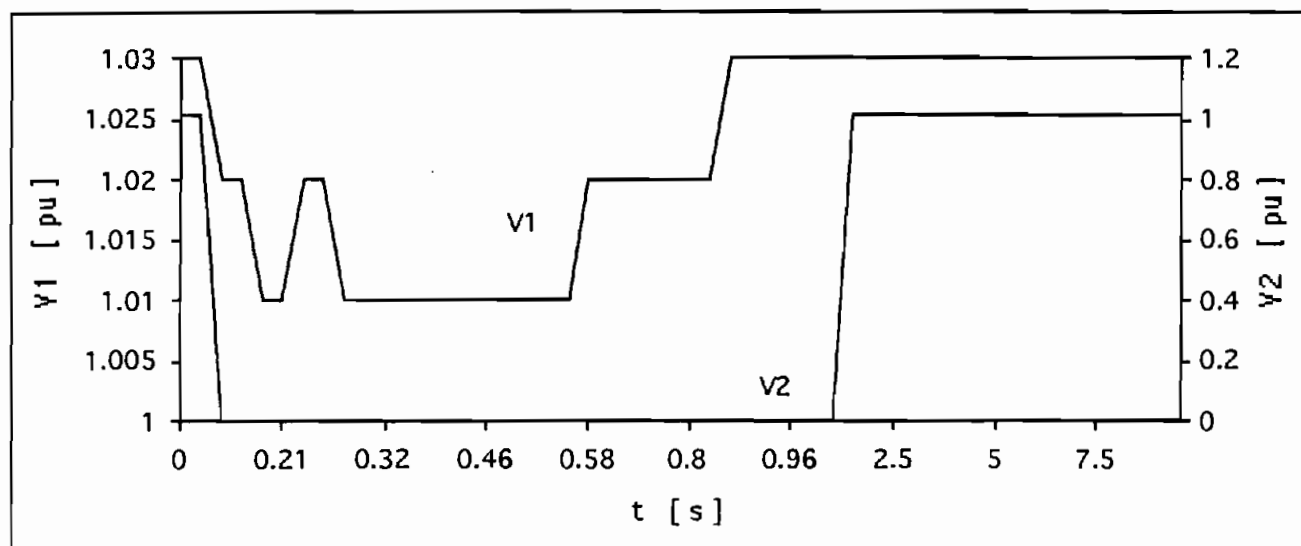


Figura 4.33 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Cortocircuito 3 ϕ , Despeje y Reconexión, 50% de la Línea, Demanda Media

4.3.2.3 Cortocircuito Trifásico en la Mitad de la Línea sin Despeje de Falla

El tiempo de análisis es de 9 s. A $t = 0.15$ s ocurre una falla trifásica en medio de la línea que une las barras de carga y generación, observándose que la frecuencia baja hasta 54.68 Hz a $t = 8.45$ s, ver figura 4.34. Se observa que la frecuencia se comporta casi igual

durante un cortocircuito con demanda alta y con demanda media.

En cuanto al voltaje, en la barra de generación baja hasta 0.94 pu a $t = 7.75$ s mientras en la barra de carga se mantiene en 0 pu debido a que no se despeja la falla, ver figura 4.35. Se observa que con demanda alta el voltaje en la barra de generación se estabiliza en 0.95 pu y con demanda media se estabiliza en 0.94 pu.

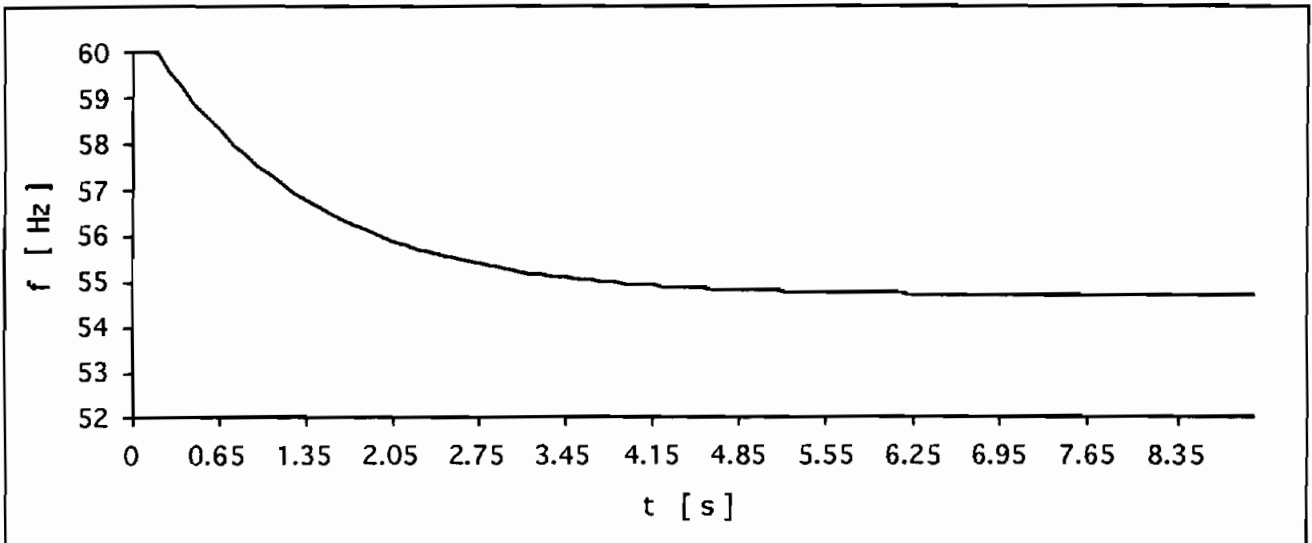


Figura 4.34 Frecuencia del Generador Durante Cortocircuito 3 ϕ , Sin Despeje, 50% de la Línea, Demanda Medi

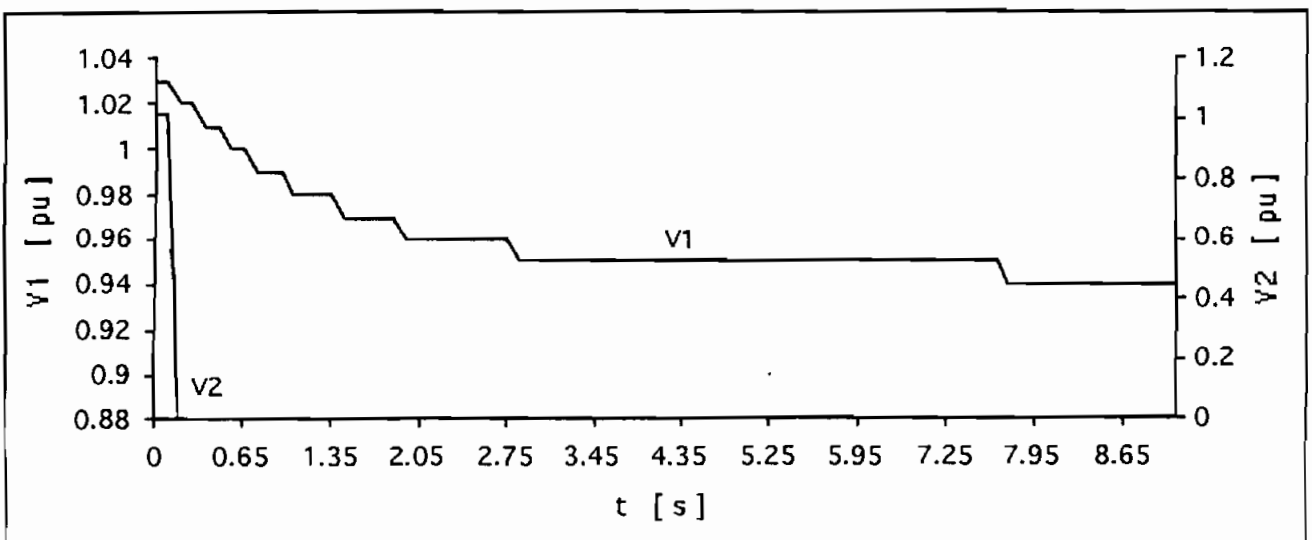


Figura 4.35 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Cortocircuito 3 ϕ , Sin Despeje, 50% de la Línea, Demanda Media

4.3.2.4 Cortocircuito Trifásico en la Barra de Carga con Despeje de Falla

Se analiza un tiempo de 8.55 s. A $t = 0.15$ s ocurre una falla trifásica en la barra de carga, se despeja la falla a $t = 0.45$ s abriendo la línea entre las barras de generación y la de falla. En cuanto a la frecuencia se observa que baja hasta 59.45 Hz a $t = 0.45$ s, luego sube a 60.03 Hz a $t = 6.85$ s, ver figura 4.36. Durante el cortocircuito la frecuencia se comporta semejante a 4.3.1.4, pero después del despeje de la falla se estabiliza en una frecuencia mayor con demanda alta antes que con demanda media.

En cuanto al voltaje en la barra de generación desde su valor inicial de 1.03 pu baja hasta 1.02 pu y cuando se despeja la falla sube en 0.2 s a 1.03 pu a $t = 0.65$ s. El voltaje en la barra de carga baja de 1.02 pu a 0 pu y en él se mantiene por no haber reconexión de la línea, ver figura 4.37. Igual que en 4.3.1.4 el voltaje en la barra de generación baja hasta 1.02 pu en el cortocircuito.

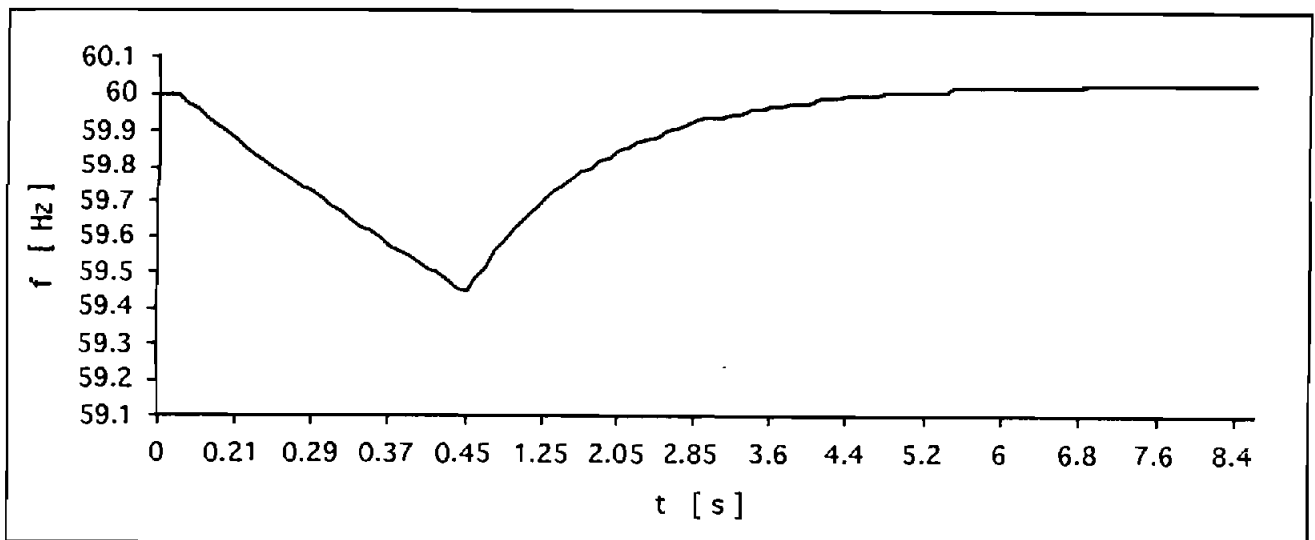


Figura 4.36 Frecuencia del Generador Durante Cortocircuito 3ϕ y Despeje, en Barra de Carga, Demanda Medi

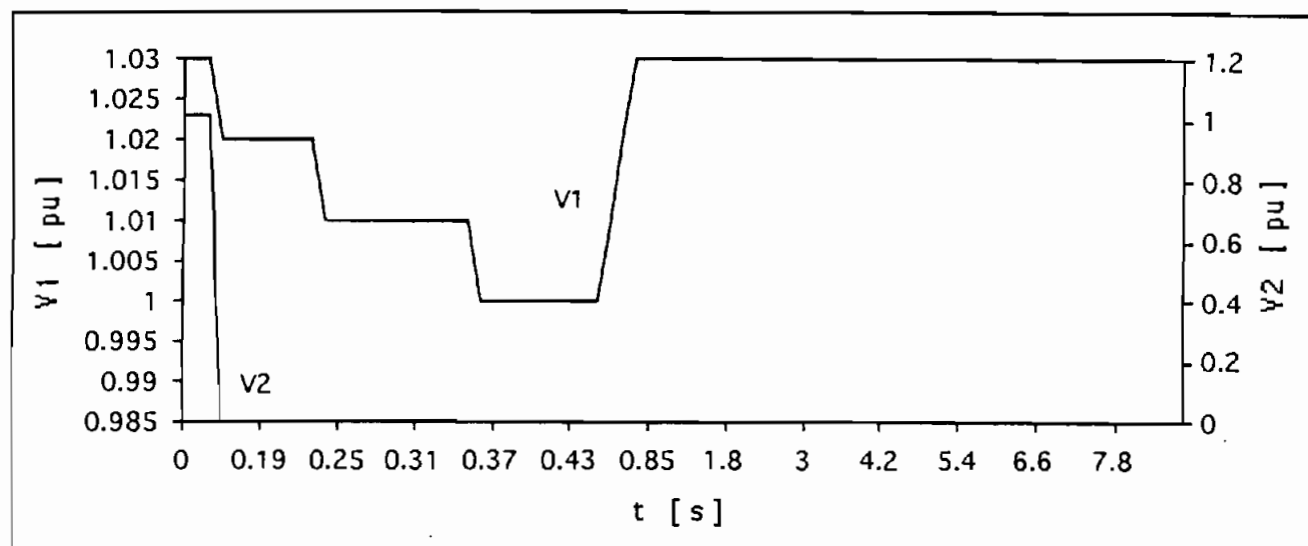


Figura 4.37 Voltaje en las Barras de Generación (1) y Carga (2) Durante Cortocircuito 3 ϕ y Despeje, en Barr de Carga, Demanda Media

Si el cortocircuito se realiza en la mitad de la línea la frecuencia baja hasta 58.9 Hz, si se realiza en la barra de carga baja hasta 59.5 Hz, entonces se observa que conforme más cerca de la barra de generación se realice el cortocircuito mucho menor será la frecuencia a la que llega. Si se despeja la falla y no se reconecta la frecuencia se estabiliza en un valor mayor a la frecuencia anterior al cortocircuito, si se realiza la reconexión la frecuencia se estabiliza en un valor un poco menor que la frecuencia anterior al cortocircuito. Si no se despeja la falla la frecuencia tiende a estabilizarse en un valor muy bajo de frecuencia. Esta bajada de frecuencia se debe a que el cortocircuito se considera como carga por lo que tiende a frenar la máquina.

Existe mayor potencia de aceleración mientras más cerca esté al generador porque la corriente de cortocircuito se aplica totalmente al generador mientras que si ocurre a cierta distancia esta corriente es atenuada por la impedancia existente.

El valor al que baja la frecuencia durante el cortocircuito es independiente de la carga por ello se ve que éste es el mismo para cortocircuitos con demanda máxima

o media entonces de lo que si depende es del lugar donde ocurren. Si la falla se despeja y no se reconecta la línea los valores en los que se estabiliza la frecuencia son iguales con análisis de demandas media o alta, pero si se reconecta la línea, entonces si variará la frecuencia de estabilización dependiendo de la magnitud de la carga reconectada.

Para demanda alta durante el cortocircuito el voltaje de la barra de generación baja hasta 1.01 pu y en el peor caso (cuando no hay despeje de falla) baja hasta 0.95 pu y no sube. Conforme mas lejos del generador sea el cortocircuito el voltaje no bajará tanto durante el cortocircuito. Así, para un cortocircuito en la barra de carga el voltaje baja solo hasta 1.02 pu. Al igual que la frecuencia el voltaje al que baja por el cortocircuito es independiente de la condición de demanda, sin embargo esto importa cuando se reconecta la línea y el voltaje debe estabilizarse.

Se observa que para un cortocircuito en condición de demanda alta el sistema toma más tiempo en estabilizarse, que si el cortocircuito fuera con carga media, y lo hará en un valor mayor de frecuencia después del despeje de la falla. Y si se realiza la reconexión, la frecuencia se estabiliza para carga máxima en un valor menor que para carga media. Si ocurre el cortocircuito y no se despeja la falla se observa que la frecuencia baja rápidamente y a un tiempo de 2.05 s aproximadamente ya está en 55.94 Hz. Si el cortocircuito se produce en la barra de carga y no en la línea, el tiempo de estabilización de la frecuencia es menor que si el cortocircuito ocurriera en la mitad de la línea.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Del desarrollo de esta tesis se tienen las siguientes conclusiones:

-Se comprueba que la curva de vacío no corta en el origen para un generador autoexcitado, como aquel del grupo de emergencia estudiado, pues debe haber un flujo remanente que garantice la excitación del campo.

-No todos los parámetros eléctricos se pueden determinar debido en parte a limitaciones del equipo de laboratorio y otras al dimensionamiento de las protecciones en el laboratorio, pues conforme aumenta la potencia de la máquina a probar se requiere de fuentes de voltaje con grandes capacidades de corriente, debido a los pequeños valores de las reactancias de la máquina.

- Para determinar los parámetros eléctricos transitorios y subtransitorios de eje directo el rotor debe estar magnetizado en el eje directo, lo correspondiente se aplica para los parámetros en cuadratura.

- La prueba de cortocircuito trifásico súbito proporciona información del régimen transitorio y subtransitorio para el cálculo de reactancias y constantes de tiempo. Sin embargo se aplica generalmente para obtener los parámetros

en el eje directo mientras que para los parámetros en cuadratura se usan métodos alternativos, porque al estar girando el rotor a velocidad sincrónica es difícil hacer coincidir el instante del cortocircuito súbito a los terminales del generador con el instante en que el rotor es magnetizado en el eje en cuadratura.

- Para determinar las reactancias subtransitorias de eje directo y en cuadratura existe una prueba alternativa al cortocircuito súbito que se realiza con la máquina parada. Se necesita una fuente monofásica con buena capacidad de corriente, dependiendo de la potencia del generador. Esta consiste en alimentar la máquina parada con un voltaje monofásico a dos de los terminales del generador, cortocircuitando el rotor se toman medidas de voltaje, corriente y potencia. Es preferible optar por pruebas con la máquina parada porque dan resultados más acertados ya que aquí existe un procedimiento para conocer cuando el rotor está magnetizado en el eje directo o en el eje en cuadratura. En este caso particular, al intentar realizar esta prueba actuaron las protecciones por la corriente grande que se desarrolla, debido al valor pequeño de las reactancias de la máquina.

-La reactancia de secuencia negativa X_2 y subtransitoria X_d'' fueron determinadas mediante dos pruebas diferentes, dando valores muy semejantes.

-En estado estable la regulación de voltaje del generador está en el orden del 18%, debido al alto valor de su

reactancia sincrónica X_d de 0.1968 ohmios, equivalente a 85 % en base de los datos de placa.

-Debido a que no se dispuso de datos técnicos del fabricante del grupo de emergencia, se hicieron ciertas aproximaciones necesarias como la del rendimiento térmico para determinar la potencia mecánica en vacío.

-Por comparación con catálogos de otras máquinas térmicas, el rendimiento térmico del grupo de emergencia es bajo pues consume una medida de combustible en vacío de 3 galones por hora mientras que un grupo electrógeno comercial de 180 kW consume esta cantidad de combustible al 25% de su capacidad nominal.

-La potencia mecánica en vacío que corresponde a pérdidas en el núcleo, y pérdidas mecánicas de fricción y ventilación debe ser semejante a la potencia de fricción del motor que especifica el fabricante. En este caso particular, la potencia mecánica encontrada si está en el orden de la potencia de fricción especificada para grupos electrógenos comerciales de similar capacidad de potencia.

-Los reguladores hidráulicos tienden a regular a ritmo de galope por el retraso con que se produce la respuesta del motor a la acción del regulador. El motor no responde continuamente al requerimiento de cambio de velocidad del regulador, esto se evidencia en la variación de la frecuencia que se produce cuando hay una variación significativa de carga. Sin embargo, en el caso analizado tanto en la simulación como en las pruebas experimentales

se obtiene una respuesta muy rápida del regulador de velocidad cuando se presentan variaciones de carga. Aunque debe considerarse que en la simulación no se modeló el motor diesel sino que se aproximó a un sistema a vapor como máquina motriz.

-Del estudio de carga realizado se establece que la carga de la Facultad estimada como máxima corresponde al 71.31% de la capacidad nominal del generador de emergencia, la demanda media al 24.53% y la demanda mínima que sería solo iluminación al 13.33%. Debe recalcar que no se consideró en este estudio la carga de ninguna otra Facultad o edificio. Se observa que la carga de la Facultad de Ingeniería Eléctrica puede modelarse principalmente como de impedancia constante, tanto en su potencia activa como reactiva. Sus componentes más representativas son la iluminación fluorescente y las máquinas eléctricas del Laboratorio de Máquinas. El factor de potencia puede ser aproximado a 0.95 en atraso.

-La comparación de algunos resultados obtenidos del análisis dinámico del grupo de emergencia mediante simulación con los resultados de pruebas de laboratorio indica que los modelos escogidos para el sistema de excitación, regulador de voltaje, máquina motriz y regulador de velocidad son apropiados.

-Existen condiciones que sí son posibles de simular pero no es conveniente su realización por limitaciones de equipo de maniobra en el laboratorio, como los cortocircuitos en la barra de carga o tablero de transferencia.

- De los resultados de la simulación de rechazos de carga se observa que la frecuencia se estabiliza en un valor más alto para un rechazo de carga alta que para un rechazo de carga media o baja y se demora más tiempo en hallar su valor de estado estable. Esto se explica porque al producirse el rechazo de carga (potencia eléctrica cero) la potencia de aceleración del generador es positiva e igual a toda la potencia mecánica que recibe el generador en el eje, y ésta es mayor conforme mayor es la carga anterior al rechazo, entonces se acelera la máquina y la frecuencia aumenta hasta que el regulador de velocidad con su actuación sobre la máquina motriz estabilice la frecuencia.

-Experimentalmente el rechazo de carga se realizó con demanda media y baja, observándose la velocidad del rotor prácticamente constante, lo cual coincide con lo obtenido en la simulación.

-Se observa en la simulación que para disminuciones de carga, la frecuencia sube dependiendo de la magnitud de la variación de carga, pues lo hará más para una variación mayor como ocurre cuando se varía de demanda alta a baja. Esto se asemeja a lo que ocurre en los rechazos de carga, considerando que en un rechazo de carga la frecuencia subirá más que para una variación de carga. Para incrementos de carga, la potencia eléctrica requerida sube, la potencia de aceleración tiende a hacerse negativa por lo que la frecuencia disminuye. La frecuencia disminuye más si el incremento de carga es mayor, es decir en este caso la frecuencia sube más para una variación desde demanda baja a alta que para una variación de demanda baja a media.

Experimentalmente las variaciones de carga realizadas no son considerables y son menores a las analizadas en la simulación, por lo que se justifica que la variación de la velocidad en el rotor no sea apreciable. En la simulación, la variación de frecuencia es muy pequeña para los casos analizados.

-Los resultados que se obtienen de la simulación de cortocircuitos demuestran que la frecuencia baja rápidamente, independiente del valor de demanda al que ocurre el cortocircuito, pero sí depende del lugar donde ocurre la falla, es decir baja más mientras más cerca esté a la barra de generación. Tomándose el cortocircuito como un incremento brusco de carga, la potencia eléctrica sube repentinamente haciendo que la potencia de aceleración sea muy negativa y consecuentemente provocando la bajada de frecuencia. Si no se despeja la falla el regulador de velocidad de la máquina actúa para compensar la potencia eléctrica requerida por el cortocircuito, haciendo que la potencia de aceleración sea nuevamente cero, con lo que la frecuencia se estabiliza en un valor muy bajo. Si se realiza el despeje, la potencia eléctrica baja, la potencia de aceleración sube y por ello la frecuencia sube. La reconexión de la línea equivaldría a un incremento de carga por lo que la frecuencia nuevamente baja y se estabiliza en su valor inicial.

-Por la simulación de cortocircuitos se puede decir que la frecuencia se comporta de igual manera para cualquier condición de demanda. Sin embargo cuando hay reconexión de

la línea la frecuencia baja conforme mayor es la demanda de carga.

-El lugar donde ocurre el cortocircuito influye en la frecuencia y el voltaje produciendo resultados más graves mientras más cerca esté del generador, pues la frecuencia y el voltaje presentarán mayores depresiones.

-De lo analizado en la simulación de cortocircuitos se observa que la frecuencia podría salir de los límites permitidos si no se despeja en un tiempo adecuado. Esto señala también que se debería analizar el riesgo de cortocircuito y de ser alto considerar la utilización de un mejor sistema de protecciones que permita despejar la falla o usar relés de frecuencia que permitan sacar de servicio a la unidad de emergencia.

-A pesar de los años de servicio que tiene el grupo de emergencia a diesel de la Facultad de Ingeniería Eléctrica su comportamiento dinámico está dentro de los límites de operación, por lo que se puede decir que se encuentra en buen estado de funcionamiento.

-A partir de la simulación de varias condiciones de funcionamiento de un generador de emergencia se pueden establecer las calibraciones del sistema de protecciones para evitar el deterioro prematuro. En este caso se observa que para rechazos de carga la frecuencia no sube más de 0.1 Hz por lo que no se requiere relés de sobrevelocidad. Las variaciones de carga producen variaciones de frecuencia pequeñas que no requieren

protección especial. En cuanto a la variación de frecuencia que se produce durante un cortocircuito se observa que baja rápidamente y esto puede ser perjudicial al motor que está diseñado para funcionar a velocidad de 1800 rpm, por lo que se debería tener un relé de baja frecuencia que apague el generador de emergencia cuando la frecuencia baje más de 3 Hz. Se puede también controlar ésta falla con protecciones de sobrecorriente que actúen rápidamente antes de que la frecuencia baje a valores perjudiciales para el grupo de emergencia.

RECOMENDACIONES

-Para la realización de los cortocircuitos sostenidos en pruebas de laboratorio para obtener la reactancia sincrónica, deben hacerse con los terminales de armadura cortocircuitados con conexiones cortas, atornilladas cuando la máquina está en reposo; la condición de cortocircuito sostenido debe obtenerse manejando la máquina a velocidad nominal y aplicando corriente de campo controlada, así se elimina las altas corrientes asociadas con cortocircuitos súbitos.

-El cortocircuito súbito para determinar parámetros transitorios y subtransitorios de la máquina sincrónica, debe realizarse con un disyuntor 3Ø que soporte corrientes transitorias de por lo menos cinco veces la capacidad nominal del generador, de lo contrario se debe limitar el voltaje generado en vacío antes del cortocircuito para limitar las corrientes transitorias que se desarrollan.

-Para mantener un correcto funcionamiento del grupo de emergencia debe realizarse revisiones a intervalos de tiempo establecidos si es posible por el fabricante o sino por la experiencia alcanzada en su utilización.

-Es recomendable que en las revisiones de un grupo de emergencia, sean éstas programadas o imprevistas, se hagan evaluaciones de desajustes de los diversos elementos y piezas reemplazadas con el objeto de tener índices de frecuencia adecuada para verificación y a la vez reservas de repuestos. El grupo de emergencia debe estar siempre en condiciones óptimas para cuando se requiera su funcionamiento, por lo que se deben realizar análisis periódicos de fluidos como combustible, aceite y agua.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Armas Brito, Galo, "Características de frecuencia y voltaje de carga para estudios de sistemas eléctricos de potencia", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1995.

- [2] Armstrong, G.T., "Net Heat of Combustion of Aviation Gasoline and its Correlation with Composition and Aniline Gravity Product".

- [3] Deers, John, "Motores".

- [4] Detroit Diesel, "Incline 71", Parts Catalog.

- [5] Detroit Diesel, "Gem Set Performance curves".

- [6] Detroit Diesel, "Construction & Industrial Performance Curves 2 cycles forward Plan Models".

- [7] Detroit Diesel, "V-71 Parts Catalog".

- [8] DOSNI, "Protocolos de pruebas tipo y calorimétricas / Central Hidráulica de Paute", 1993.

- [9] Granja Ruales, Ivan Andrés, "Pruebas de Máquinas rotativas de AC", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1995.

- [10] Huang, Chin-Chiang and Chu, Wen-Chen, "Manual of Power System Transient Stability Program (PC Version)", The University of Texas at Arlington, Junio 1991.
- [11] IEC, "Recommendations for rotating electrical machinery (excluding machines for traction vehicles)", Publication 34-4, 1967.
- [12] IEEE Committee Report, "Dynamic models for Steam and Hydro turbines in Power System studies".
- [13] IEEE Working Group on Computer Modelling of Excitation Systems, "Excitation system models for power system Stability studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No 2, February 1981.
- [14] Kohler Power Systems, "Standard Features", Model 180 ROZJ, Catálogos de un Grupo Electrógeno de 180 Kw.
- [15] Kohler Power Systems, "Standard Features", Model 200 ROZD, Catálogos de un Grupo Electrógeno de 200 Kw.
- [16] Kohler Power Systems, "Standard Features", Model 230 ROZD, Catálogos de un Grupo Electrógeno de 230 Kw.
- [17] Marter, D.H, "Motores Térmicos", UTEHA, 1964.
- [18] Pérez Molina, Patricio, "Prácticas de verificación y chequeo en motores diesel estacionarios", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1983.

- [19] Reinoso Jurado, Vinicio, "Modelación y Simulación de los Sistemas de regulación de velocidad de Turbina", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1981.
- [20] Salazar, Luis, "Ingeniería Eléctrica Experimental".
- [21] Samaniego, Julio, "Sistemas de excitación. Modelos y Simulación", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1978.
- [22] Sánchez Villacís, Eloy, "Determinación del valor calórico de combustibles comerciales líquidos usados en el país", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1975.
- [23] Soria RE, Diego, "Diseño y construcción de un laboratorio para un motor diesel de un grupo electrógeno", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1985.
- [24] Sugiyamat Nishiwakit. Takedas, Abes, "Measurements of synchronous machine parameters under operating condition", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 4, April 1982.
- [25] Valencia Gallon, Hernán, "Grupos Electrógenos Diesel", Universidad Pontificia Bolivariana, 1994.
- [26] Vásquez, Alfonso, "Modelo Digital de la Máquina Síncronica para estudio de fallas", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1988.

- [27] Wright-Sherwin, "Determination of Synchronous Machine Constants by Test", IEEE, December 1931.
- [28] Wasdyke, "Motores Diesel".
- [29] Anderson P. and Fouad A., "Power System Control and Stability", Iowa State the University Press, IOWA, USA, first edition, 1977.
- [30] Stevenson William, "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia".

APÉNDICES

APÉNDICE A

ESTUDIO DE CARGA INSTALADA EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.

Al realizar un censo de carga instalada en todos los laboratorios, oficinas y aulas del edificio antiguo de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, tomando los datos de placa de los aparatos y máquinas y estimando en algunos casos una potencia aproximada, se tienen los siguientes resultados:

ESTUDIO DE CARGA

| Descripción | Número | Tipo/Marca | Punitaria (W) | Ptotal (W) |
|---------------------|--------|---------------|---------------|------------|
| Lámparas | 196 | fluorescente | 60 | 11.760 |
| Lámparas | 557 | fluorescente | 75 | 41.775 |
| Reflectores | 15 | | 200 | 3.000 |
| Cafeteras | 10 | | 535 | 5.350 |
| Focos | 25 | incandescente | 100 | 2.500 |
| Relojes | 1 | | 20 | 20 |
| Focos | 6 | incandescente | 80 | 480 |
| Máquina de Escrib | 7 | | 80 | 560 |
| Lámparas | 4 | fluorescente | 40 | 160 |
| Computad. (Monitor) | 64 | | 180 | 11.520 |
| Computad. (Up) | 60 | | 400 | 24.000 |
| Computad. (plotter) | 2 | | 90 | 180 |
| Impresora Láser | 1 | | 552 | 552 |
| Impresoras | 28 | | 190 | 5.320 |
| Ventiladores | 2 | | 23 | 46 |
| Osciladores | 20 | | 60 | 1.200 |
| Radios | 16 | | 30 | 480 |
| Aparato (Tesis) | 1 | | 900 | 900 |
| Plotter de analog. | 2 | | 140 | 280 |
| Fuentes | 25 | MOD LEA 10 | 28 | 700 |
| Osciloscopios | 17 | Tektronix | 170 | 2.890 |
| Osciloscopios | 23 | Philips | 30 | 690 |
| Comp. Analógico | 2 | | 100 | 200 |
| Ctrl y Sist de Med | 1 | | 110 | 110 |
| Aparat. electrom | 1 | | 170 | 170 |
| ROM EXPANDER | 1 | | 120 | 120 |
| Cautines | 10 | | 23 | 230 |

| Descripción | Número | Tipo/Marca | Punitaria (W) | Ptotal (W) |
|------------------------|--------|------------|---------------|------------|
| Multímetro | 28 | | 30 | 840 |
| Aparato comput | 1 | | 240 | 240 |
| Microlab 51 | 3 | | 30 | 90 |
| Aparato ctrl dig. | 3 | | 6 | 18 |
| Programador de Mem | 1 | | 60 | 60 |
| Prob.de Integr. | 1 | | 60 | 60 |
| Prob.lógicos | 10 | | 5 | 50 |
| Proyectores | 8 | | 650 | 5.200 |
| Trazad. de curvas | 1 | | 20 | 20 |
| Aparato electrónico | 1 | | 70 | 70 |
| Medidor dist arm | 1 | | 30 | 30 |
| Medid pot.salida | 2 | | 30 | 60 |
| Fuente de voltaje | 4 | | 28 | 112 |
| Analizad.espectro | 1 | | 430 | 430 |
| Fte.de voltaje DC | 1 | | 320 | 320 |
| Fte de P _{DC} | 4 | | 300 | 1.200 |
| TV pequeña | 1 | | 200 | 200 |
| Tv grande | 1 | | 450 | 450 |
| VHS | 1 | | 150 | 150 |
| Calibrador | 1 | | 90 | 90 |
| Copiadoras | 2 | | 845 | 1.690 |
| Fax | 1 | | 120 | 120 |
| Calentador de agua | 1 | Tesis | 1200 | 1.200 |
| Horno | 1 | Tesis | 5000 | 5.000 |
| Fte DC conmutada | 1 | | 2400 | 2.400 |
| Tesis conversores | 1 | | 150 | 150 |
| Lámparas C.Indust. | 40 | | 1 | 40 |
| Cocina Eléctrica | 1 | | 500 | 500 |
| Transformador | 1 | | 5000 | 5.000 |
| Galvanómetro | 1 | | 30 | 30 |
| Meter.box | 1 | | 150 | 150 |
| Burden(Lab. Prot.) | 2 | | 90 | 180 |
| STEP DOWN | 1 | | 500 | 500 |
| Tablero relés Prot | 2 | | 500 | 1.000 |
| Fuente poder | 1 | | 65 | 65 |
| Swr meter | 2 | | 15 | 30 |

| Descripción | Número | Tipo/Marca | Punitaria (W) | Ptotal (W) |
|--------------------|--------|---------------|---------------|------------|
| Power meter | 1 | | 15 | 15 |
| Fuente potencia | 1 | | 5 | 5 |
| Fte I ^ V | 1 | | 70 | 70 |
| Aparato Lab MicroO | 1 | | 100 | 100 |
| Counter 1100 MHz | 1 | | 25 | 25 |
| Gunn power supply | 1 | | 30 | 30 |
| Indicador ondas | 1 | | 80 | 80 |
| Fuente poder | 1 | | 220 | 220 |
| Medidor de Q | 1 | | 25 | 25 |
| Gener. de potencia | 1 | | 15 | 15 |
| Fuente DC | 1 | | 5 | 5 |
| Condensador | 1 | | 50 | 50 |
| Oscilador UHF | 2 | UHF | 0.2 | 0.4 |
| Fuente UHF | 2 | UHF | 50 | 100 |
| Osciladores | 2 | Frec.Intermed | 0.2 | 0.4 |
| Fuentes | 2 | Frec.Intermed | 50 | 100 |
| Amplificadores. | 3 | Frec.Intermed | 45 | 135 |
| Oscilador | 1 | | 0.15 | 0.15 |
| Oscilador | 1 | | 0.2 | 0.2 |
| Fuente | 1 | | 50 | 50 |
| Detec.impedancias | 1 | | 50 | 50 |
| Fuente impedancias | 1 | | 50 | 50 |
| Medidor de Q | 1 | | 33 | 33 |
| Medidor nivel seña | 1 | | 1 | 1 |

En cuanto a máquinas eléctricas se tiene:

| Descripción | # | V (V) | I (A) | Tipo | Pu (W) | Pr (W) | fp | |
|-------------|---|-------|-------|--------------|--------|--------|------|----|
| Dinamómetro | 1 | 125 | 3.5 | DC | 250 | 250 | 1 | |
| Motor | 1 | 108 | 1.7 | rot devan AC | 250 | 250 | 0.83 | 3Ø |
| Motor | 4 | 180 | 5 | DC | 746 | 2984 | 1 | |
| Motor | 1 | 208 | 5 | asincrónica | 1100 | 1100 | | 3Ø |
| Motor | 1 | 220 | 1.9 | | 370 | 370 | 0.68 | 3Ø |
| Compres.peq | 2 | 115 | | | 430 | 430 | | |
| Compres.gra | 1 | 115 | 19 | Ø | 2185 | 2185 | | |
| Generad.mot | 1 | 220 | 10.5 | DC | 1800 | 1800 | | |
| Generad.mot | 1 | 150 | 8.4 | DC | 1800 | 1800 | 1 | |

| Descripción | # | V (V) | I (A) | Tipo | Pu(W) | P _r (W) | fp | |
|-------------|---|---------|-----------|--------------|--------|--------------------|-----------|----|
| D-Mot | 2 | 230/400 | 4.45/2.56 | Δ/Ysincronic | 1500 | 3000 | 1 | 30 |
| D-Gen | 1 | 230/400 | 3.8/2.17 | Δ/Ysincronic | 1350 | 1350 | 0.9 | 30 |
| D-Mot | 1 | 220/380 | 8/4.6 | Δ/Yinducción | 1800 | 1800 | 0.77 | 30 |
| G-Generador | 4 | 220 | 4.1 | DC | 900 | 3600 | | |
| G-Motor | 4 | 220 | 4.85 | DC | 800 | 3200 | | |
| Generador | 1 | 230 | 8.7 | sincrónica | 2000 | 2000 | 0.8 | 30 |
| Motor | 1 | 220Δ | 18 | w variable | 4100 | 4100 | | |
| Generador | 1 | 220 | 7.25 | sincrónica | 2200 | 2200 | 0.8 | 30 |
| Motor | 1 | 220 | 9.9-13.5 | w variable | 3300 | 3300 | 0.49-0.95 | 30 |
| Generador | 1 | 110 | 18 | Dc | 1470 | 1470 | | |
| Motor | 1 | 110 | 28 | DC | 2572 | 2572 | | |
| Motor | 1 | 110 | 28 | Dc | 2572 | 2572 | | |
| Generador | 1 | 110 | 18.2 | DC | 2000 | 2000 | | |
| Motor | 1 | 220 | 10.5 | DC | 2300 | 2300 | | |
| Motor | 1 | 220/380 | 14/8.1 | inducción | 3675 | 3675 | | |
| Dinamo | 1 | 110 | 1.8 | DC | 200 | 200 | | |
| Dinamo | 1 | 110 | 18.2 | DC | 2000 | 2000 | | |
| Motor | 1 | 220/380 | 11/6.5 | inducción | 2940 | 2940 | | 30 |
| Motor | 1 | 110 | 22.7 | Dc | 2500 | 2500 | | |
| Motor | 1 | 110 | 13 | Dc | 1250 | 1250 | | |
| Motor | 1 | 220/380 | 7/4.04 | sincrónica | 1470 | 1470 | | |
| Motor | 1 | 110 | 40 | DC | 5000 | 5000 | | |
| Dinamo | 1 | 110 | 18.2 | DIN CPD | 2000 | 2000 | | |
| Dinanómetro | 1 | 125 | 3.5 | DC | 248.7 | 248.7 | | |
| Máquina | 1 | 125 | 3.5 | DC CPUND | 438 | 438 | | |
| Motor | 2 | 220/380 | 16.3/9.6 | inducción | 4042.5 | 8085 | 0.8 | 30 |
| Dinanómetro | 1 | 110 | 40 | DC | 5000 | 5000 | | |
| Motor | 4 | 115 | 3.4 | DC | 391 | 1564 | | |
| Generador | 2 | 125 | 1 | DC | 125 | 250 | | |
| Motor | 2 | 208 | 2.4 | inducción | 778.17 | 1556 | 0.9 | 30 |
| Generador | 2 | 208 | 3 | sincrónica | 1000 | 2000 | 0.92 | 30 |
| Dinanómetro | 1 | 110 | 40 | DC | 5000 | 5000 | | |
| Motor | 1 | 220/380 | 4.7/2.7 | inducción | 1100 | 1100 | 0.77 | 30 |
| Motor | 1 | 220/380 | 2.6/1.5 | inducción | 746 | 746 | 0.75 | 30 |
| Motor | 1 | 110 | 5 | DC | 550 | 550 | | |

| Descripción | # | V (V) | I (A) | Tipo | P _u (W) | P _r (W) | fp | |
|-------------|---|---------|-------|-----------|--------------------|--------------------|----|----|
| Motor | 1 | 115 | 7.8 | inducción | 897 | 897 | | 3Ø |
| Motor | 1 | 220 | | inducción | 3730 | 3730 | | 3Ø |
| Torno | 1 | 220/440 | | inducción | 750 | 750 | | |
| Afiladora | 1 | 115 | 5.6 | inducción | 249 | 249 | | 3Ø |

Según estos datos la potencia total instalada en el edificio antiguo de la Facultad de Ingeniería Eléctrica es 238940 W. Se debe aclarar que los aparatos eléctricos registrados son aquellos que se usan normalmente y aquellos que se usan en las prácticas de laboratorio.

Haciendo un resumen de los datos tabulados, asumiendo factores de utilización y en algunos casos estimando factores de potencia se tiene la siguiente tabla (Tabla A) donde P_{total} es la potencia total instalada de un determinado tipo de carga y P es la potencia que se estima se usa de ese determinado tipo de carga. Con P y fp se calculan S y Q de cada tipo de carga.

Entonces la Facultad de Ingeniería Eléctrica tiene una demanda de potencia máxima estimada de 106970.6 W y una demanda de potencia reactiva de 42004.16 VAR.

| Descrip | Tipo | No | P.total | f _u | P | f _p | S | Q |
|-----------|-----------|-----|---------|----------------|----------|----------------|----------|----------|
| Lámparas | fluor. | 757 | 53695 | 0.6 | 32217 | 0.95 | 33912.63 | 10589.24 |
| Focos | incand. | 31 | 2980 | 0.3 | 894 | 1 | 894 | 0 |
| Reflector | | 15 | 3000 | 0.3 | 900 | 0.95 | 947.384 | 295.8164 |
| Carg res | cafet | 22 | 7280 | 0.25 | 1820 | 1 | 1820 | 0 |
| | cautines | | | 0.4 | | | | |
| | coc.eléc | | | 0.1 | | | | |
| | cal agua | | | 0.1 | | | | |
| Relojes | | 1 | 20 | 0.9 | 18 | 0.99 | 18.18182 | 2.564867 |
| Maq/fax | | 8 | 680 | 0.4 | 272 | 0.98 | 277.551 | 55.23208 |
| Comp. | monit | 64 | 11520 | 0.6 | 6912 | 0.9 | 7680 | 3347.642 |
| Comp | up | 60 | 24000 | 0.6 | 14400 | 0.98 | 14693.88 | 2924.051 |
| Plot/impr | | 32 | 5780 | 0.4 | 2312 | 0.98 | 2359.184 | 469.4727 |
| Laser/Co | | 3 | 2242 | 0.5 | 1121 | 0.98 | 1143.878 | 227.6293 |
| Ventilad. | | 2 | 46 | 0.1 | 4.6 | 0.95 | 4.842105 | 1.51195 |
| Oscilad | | 26 | 1201 | 0.5 | 600.5 | 0.98 | 612.7551 | 121.937 |
| Radio/G. | | 16 | 480 | 0.6 | 288 | 0.95 | 303.1579 | 94.66124 |
| TV | | 1 | 450 | 0.4 | 180 | 0.98 | 183.6735 | 36.55064 |
| Fuentes | | 46 | 5397 | 0.6 | 3238.2 | 0.98 | 3304.286 | 657.5461 |
| Oscilosc. | | 40 | 3580 | 0.4 | 1432 | 1 | 1432 | 0 |
| Multimet | | 28 | 840 | 0.4 | 336 | 0.98 | 342.8571 | 68.22787 |
| Proyect. | | 8 | 5200 | 0.3 | 1560 | 0.98 | 1591.837 | 316.7722 |
| Apar.elec | | 32 | 2438 | 0.45 | 1097.1 | 0.98 | 1119.49 | 222.7762 |
| Anal.espe | | 1 | 430 | 0.15 | 64.5 | 0.9 | 71.66667 | 31.23884 |
| Transf. | | 1 | 5000 | 0.2 | 1000 | 0.98 | 1020.408 | 203.0591 |
| eq.protec | | 7 | 1860 | 0.1 | 186 | 0.98 | 189.7959 | 37.769 |
| eq.uO | | 15 | 539 | 0.25 | 134.75 | 1 | 134.75 | 0 |
| MotorDC | | 37 | 50549 | 0.35 | 17692.15 | 0.85 | 20814.29 | 10964.63 |
| M.induc | trifásica | 12 | 25352 | 0.4 | 10140.8 | 0.85 | 11930.35 | 6284.717 |
| M.induc | monofás. | 5 | 4511 | 0.3 | 1353.3 | 0.85 | 1592.118 | 838.7018 |
| M.sincró | | 8 | 12020 | 0.35 | 4207 | 0.85 | 4949.412 | 2607.27 |
| M.W Var | | 2 | 7400 | 0.35 | 2590 | 0.85 | 3047.059 | 1605.141 |
| | | | 238490 | | 106970.9 | | | 42004.16 |

Tabla A Resumen de Estudio de Carga Instalada en la
Facultad de Ingeniería Eléctrica

APENDICE B

***ESTUDIO DE CARGA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA CON AYUDA
DE UN ANALIZADOR INDUSTRIAL***

A continuación se presentan los datos de corrientes, voltajes, potencias activas, potencias reactivas, frecuencia y factor de potencia, tanto trifásicos como por fase, registrados por el analizador industrial MACROLOGIC 2000 el día sábado 20 de enero de 1996 con el edificio antiguo de la Facultad de Ingeniería Eléctrica abastecido por el grupo de emergencia. Los registros se hicieron cada cinco minutos desde las 11:00 hasta las 13:11 h. Las cargas eléctricas principalmente usadas fueron iluminación y el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad. Al final de este apéndice se adjuntan los gráficos de corrientes, voltaje promedio y factor de potencia obtenidos con los datos registrados.

| | | | | | | | | | |
|---------|----|----------|-------|--------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| Record# | 70 | 01/18/96 | IR | IS | IT FRECUENCIA | PT | P3F | DEMAXI | DEMINT |
| | | | 0.00 | 0.00 | 10.00 | 10.00 | | 0.00 | 0.00 |
| Record# | 70 | | FR | FS | FT | P3F | DEMAXI | DEMINT | |
| | | | 0.00 | 0.00 | 10.00 | 10.00 | 0.00 | 0.00 | |
| Record# | 70 | | QR | QS | QT | Q3F | | | |
| | | | 0.00 | 0.00 | 10.00 | 10.00 | | | |
| Record# | 70 | | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHANO | | |
| | | | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.00 | 0.00 | | |
| Record# | 71 | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM | | |
| | | 01/20/96 | 10.56 | 122.06 | 122.41 | 122.94 | 122.47 | | |
| Record# | 71 | | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | | |
| | | | 7.15 | 6.78 | 7.15 | 60.60 | | | |
| Record# | 71 | | FR | FS | FT | P3F | DEMAXI | DEMINT | |
| | | | 0.77 | -0.71 | 0.81 | 0.86 | 2.69 | 2.09 | |
| Record# | 71 | | QR | QS | QT | Q3F | | | |
| | | | 0.42 | -0.42 | 0.34 | 0.34 | | | |
| Record# | 71 | | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHANO | | |
| | | | 0.88 | -0.86 | 0.92 | 0.93 | 0.00 | | |
| Record# | 72 | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM | | |
| | | 01/20/96 | 10.57 | 122.06 | 122.41 | 122.76 | 122.41 | | |
| Record# | 72 | | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | | |
| | | | 6.40 | 6.02 | 6.78 | 60.57 | | | |
| Record# | 72 | | FR | FS | FT | P3F | DEMAXI | DEMINT | |
| | | | 0.69 | -0.63 | 0.77 | 0.82 | 2.40 | 1.97 | |
| Record# | 72 | | QR | QS | QT | Q3F | | | |
| | | | 0.37 | -0.38 | 0.32 | 0.32 | | | |
| Record# | 72 | | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHANO | | |
| | | | 0.88 | -0.86 | 0.92 | 0.93 | 0.00 | | |
| Record# | 73 | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM | | |
| | | 01/20/96 | 10.58 | 121.88 | 122.23 | 122.76 | 122.29 | | |
| Record# | 73 | | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | | |
| | | | 6.40 | 6.02 | 6.78 | 60.57 | | | |
| Record# | 73 | | FR | FS | FT | P3F | DEMAXI | DEMINT | |
| | | | 0.69 | -0.63 | 0.77 | 0.82 | 2.40 | 1.85 | |
| Record# | 73 | | QR | QS | QT | Q3F | | | |
| | | | 0.37 | -0.38 | 0.32 | 0.32 | | | |
| Record# | 73 | | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHANO | | |
| | | | 0.88 | -0.86 | 0.92 | 0.93 | 0.00 | | |
| Record# | 74 | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM | | |
| | | 01/20/96 | 10.59 | 121.88 | 122.23 | 122.59 | 122.23 | | |
| Record# | 74 | | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | | |
| | | | 6.78 | 6.40 | 7.15 | 60.57 | | | |
| Record# | 74 | | FR | FS | FT | P3F | DEMAXI | DEMINT | |

| | | | | | | |
|------------|----------|-------|---------------|--------|--------|--------|
| Record# 74 | 0.72 | -0.67 | 0.79 | 0.83 | 2.98 | 1.79 |
| | IR | OS | BI | OSF | | |
| Record# 74 | 0.41 | -0.40 | 0.38 | 0.37 | | |
| Record# 74 | 0.07 | -0.86 | 0.90 | 0.90 | XCHANO | 0.00 |
| Record# 75 | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| Record# 75 | 01/20/96 | 10.60 | 122.06 | 122.41 | 122.76 | 122.41 |
| Record# 75 | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| Record# 75 | 6.40 | 6.40 | 6.78 | 60.54 | | |
| Record# 75 | FR | FS | FT | FSF | DEMAXI | DEMIHI |
| Record# 75 | 0.68 | -0.57 | 0.75 | 0.75 | 2.61 | 1.80 |
| Record# 75 | OR | OS | OI | OSF | | |
| Record# 75 | 0.39 | -0.40 | 0.36 | 0.35 | | |
| Record# 75 | FFP | FFS | FFT | FFSF | XCHANO | |
| Record# 75 | 0.87 | -0.86 | 0.90 | 0.90 | 0.00 | |
| Record# 76 | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| Record# 76 | 01/20/96 | 11.01 | 122.06 | 122.23 | 122.76 | 122.35 |
| Record# 76 | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| Record# 76 | 6.40 | 6.40 | 6.78 | 60.57 | | |
| Record# 76 | FR | FS | FT | FSF | DEMAXI | DEMIHI |
| Record# 76 | 0.68 | -0.67 | 0.76 | 0.76 | 2.35 | 1.93 |
| Record# 76 | OR | OS | OI | OSF | | |
| Record# 76 | 0.39 | -0.40 | 0.34 | 0.33 | | |
| Record# 76 | FFR | FFS | FFT | FFSF | XCHANO | |
| Record# 76 | 0.87 | -0.86 | 0.91 | 0.91 | 0.00 | |
| Record# 77 | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| Record# 77 | 01/20/96 | 11.02 | 122.06 | 122.41 | 122.76 | 122.41 |
| Record# 77 | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| Record# 77 | 6.40 | 6.40 | 6.79 | 60.54 | | |
| Record# 77 | FR | FS | FT | FSF | DEMAXI | DEMIHI |
| Record# 77 | 0.68 | -0.67 | 0.75 | 0.75 | 2.64 | 1.91 |
| Record# 77 | OR | OS | OI | OSF | | |
| Record# 77 | 0.39 | -0.40 | 0.36 | 0.35 | | |
| Record# 77 | FFR | FFS | FFT | FFSF | XCHANO | |
| Record# 77 | 0.87 | -0.86 | 0.90 | 0.90 | 0.00 | |
| Record# 78 | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| Record# 78 | 01/20/96 | 11.03 | 121.89 | 122.23 | 122.76 | 122.29 |
| Record# 78 | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| Record# 78 | 6.40 | 6.02 | 6.78 | 60.54 | | |
| Record# 78 | FR | FS | FT | FSF | DEMAXI | DEMIHI |
| Record# 78 | 0.68 | -0.63 | 0.75 | 0.79 | 2.33 | 1.91 |
| Record# 78 | OR | OS | OI | OSF | | |
| Record# 78 | 0.39 | -0.38 | 0.36 | 0.38 | | |

| | | | | | | | |
|-----------|-------|----------|-------|------------|--------|---------|--------|
| | 78 | 0.87 | -0.86 | 0.70 | 0.90 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | | HH | VR | VS | VI | VFROM |
| | 79 | 01/20/96 | 11.04 | 122.06 | 122.41 | 122.76 | 122.41 |
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | | |
| | 79 | 6.40 | 6.02 | 6.40 | 60.54 | | |
| Record# | PR | PS | PI | PSF | DEMAXI | DEMINTI | |
| | 79 | 0.69 | -0.63 | 0.72 | 0.75 | 2.41 | 1.85 |
| Record# | QR | QS | QT | QSF | | | |
| | 79 | 0.37 | -0.38 | 0.31 | 0.30 | | |
| Record# | FRF | FPS | FPI | FP3F | XCHANO | | |
| | 79 | 0.88 | -0.86 | 0.92 | 0.93 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | | HH | VR | VS | VI | VFROM |
| | 80 | 01/20/96 | 11.05 | 121.88 | 122.23 | 122.59 | 122.23 |
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | | |
| | 80 | 6.40 | 6.02 | 6.78 | 60.54 | | |
| Record# | PR | PS | PI | PSF | DEMAXI | DEMINTI | |
| | 80 | 0.68 | -0.62 | 0.75 | 0.80 | 2.63 | 1.81 |
| Record# | QR | QS | QT | QSF | | | |
| | 80 | 0.39 | -0.39 | 0.36 | 0.36 | | |
| Record# | FRF | FPS | FPI | FP3F | XCHANO | | |
| | 80 | 0.87 | -0.85 | 0.90 | 0.91 | 0.00 | |
| * Record# | FECHA | | HH | VR | VS | VI | VFROM |
| | 81 | 01/20/96 | 11.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | | |
| | 81 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 60.54 | | |
| Record# | PR | PS | PI | PSF | DEMAXI | DEMINTI | |
| | 81 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Record# | QR | QS | QT | QSF | | | |
| | 81 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | |
| Record# | FRF | FPS | FPI | FP3F | XCHANO | | |
| | 81 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | | HH | VR | VS | VI | VFROM |
| | 82 | 01/20/96 | 11.06 | 121.88 | 122.23 | 122.76 | 122.29 |
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | | |
| | 82 | 6.40 | 6.02 | 6.78 | 60.54 | | |
| Record# | PR | PS | PI | PSF | DEMAXI | DEMINTI | |
| | 82 | 0.68 | -0.62 | 0.75 | 0.80 | 2.35 | 1.93 |
| Record# | QR | QS | QT | QSF | | | |
| | 82 | 0.39 | -0.39 | 0.36 | 0.36 | | |
| Record# | FRF | FPS | FPI | FP3F | XCHANO | | |
| | 82 | 0.87 | -0.85 | 0.90 | 0.91 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | | HH | VR | VS | VI | VFROM |
| | 83 | 01/20/96 | 11.10 | 117.99 | 118.17 | 118.52 | 118.73 |

| | | | | | | |
|---------|----------|-------|--------|------------|--------|---------|
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | |
| 83 | 65.88 | 61.18 | 70.59 | 60.51 | | |
| Record# | FR | FS | PT | P3F | DEMAXI | DEMINTI |
| 83 | 7.63 | -6.47 | 8.07 | 9.23 | 27.95 | 19.26 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 83 | -1.48 | -3.22 | -2.19 | -6.89 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHANO | |
| 83 | -0.98 | -0.90 | -0.96 | 0.80 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VI | VPRON |
| 84 | 01/20/96 | 11.15 | 121.88 | 122.23 | 122.59 | 122.23 |
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | |
| 84 | 80.00 | 75.29 | 84.71 | 60.54 | | |
| Record# | FR | FS | PT | P3F | DEMAXI | DEMINTI |
| 84 | 8.56 | -7.92 | 9.46 | 10.11 | 33.25 | 24.34 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 84 | 4.66 | -4.70 | 4.28 | 4.24 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHANO | |
| 84 | 0.88 | -0.86 | 0.91 | 0.92 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VI | VPRON |
| 85 | 01/20/96 | 11.20 | 121.70 | 122.06 | 122.59 | 122.11 |
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | |
| 85 | 80.00 | 75.29 | 84.71 | 60.54 | | |
| Record# | FR | FS | PT | P3F | DEMAXI | DEMINTI |
| 85 | 8.66 | -7.90 | 9.56 | 10.32 | 33.81 | 23.30 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 85 | 4.44 | -4.69 | 4.04 | 3.80 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHANO | |
| 85 | 0.89 | -0.86 | 0.92 | 0.94 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VI | VPRON |
| 86 | 01/20/96 | 11.25 | 121.88 | 122.06 | 122.41 | 122.11 |
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | |
| 86 | 80.00 | 75.29 | 84.71 | 60.51 | | |
| Record# | FR | FS | PT | P3F | DEMAXI | DEMINTI |
| 86 | 8.68 | -7.90 | 9.55 | 10.32 | 37.37 | 23.30 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 86 | 4.45 | -4.69 | 4.04 | 3.80 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHANO | |
| 86 | 0.87 | -0.86 | 0.92 | 0.94 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VI | VPRON |
| 87 | 01/20/96 | 11.30 | 122.06 | 122.41 | 122.76 | 122.41 |
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | |
| 87 | 61.18 | 56.47 | 70.59 | 60.63 | | |
| Record# | FR | FS | PT | P3F | DEMAXI | DEMINTI |
| 87 | 7.18 | -6.46 | 8.49 | 9.21 | 31.98 | 13.85 |

| | | | | | | |
|---------|----------|-------|---------------|--------|--------|--------|
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 87 | 2.04 | -2.45 | 1.75 | 1.33 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 87 | 0.96 | -0.93 | 0.98 | 0.99 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | V5 | VT | VFROM |
| 88 | 01/20/96 | 11.35 | 122.06 | 122.59 | 122.94 | 122.53 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| 88 | 42.35 | 32.94 | 61.18 | 60.63 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DEMAX1 | DEMINT |
| 88 | 5.11 | -3.84 | 7.51 | 8.78 | 20.93 | 14.01 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 88 | 0.79 | -1.25 | 0.41 | -0.04 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 88 | 0.99 | -0.95 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | V5 | VT | VFROM |
| 89 | 01/20/96 | 11.40 | 122.06 | 122.41 | 122.76 | 122.41 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| 89 | 42.35 | 32.94 | 56.47 | 60.63 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DEMAX1 | DEMINT |
| 89 | 5.09 | -3.84 | 6.92 | 8.17 | 17.11 | 14.00 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 89 | 0.92 | -1.24 | 0.38 | 0.05 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 89 | 0.98 | -0.95 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | V5 | VT | VFROM |
| 90 | 01/20/96 | 11.45 | 122.06 | 122.23 | 122.76 | 122.35 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| 90 | 42.35 | 51.76 | 56.47 | 60.57 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DEMAX1 | DEMINT |
| 90 | 5.09 | -6.15 | 6.91 | 5.85 | 20.90 | 13.99 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 90 | 0.92 | -1.50 | 0.55 | -0.04 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 90 | 0.98 | -0.97 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | V5 | VT | VFROM |
| 91 | 01/20/96 | 11.50 | 121.88 | 122.41 | 122.59 | 122.29 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| 91 | 56.47 | 51.76 | 70.59 | 60.51 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DEMAX1 | DEMINT |
| 91 | 6.80 | -6.16 | 8.61 | 9.25 | 28.45 | 17.07 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 91 | 1.05 | -1.50 | 0.90 | 0.45 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 91 | 0.99 | -0.97 | 0.99 | 1.00 | 0.00 | |

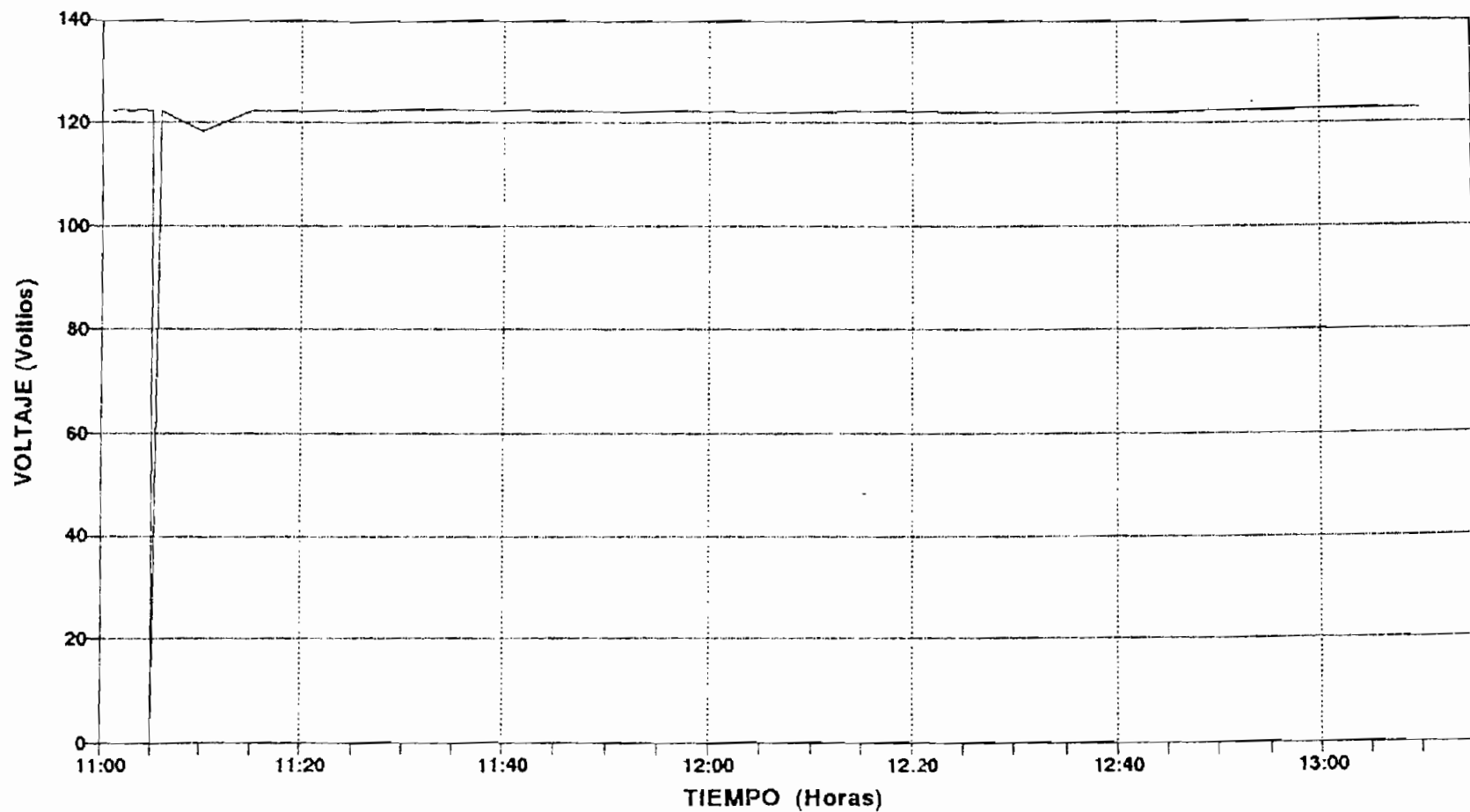
| | | | | | | |
|---------|----------|-------|---------------|--------|--------|--------|
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 92 | 01/20/96 | 11.55 | 121.70 | 122.23 | 122.41 | 122.11 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| 92 | 65.68 | 61.18 | 84.71 | 60.38 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DEMAXI | DEMIMI |
| 92 | 7.89 | -7.31 | 10.31 | 10.90 | 32.13 | 20.10 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 92 | 1.42 | -1.60 | 1.08 | 0.90 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHANO | |
| 92 | 0.98 | -0.98 | 0.99 | 1.00 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 93 | 01/20/96 | 12.00 | 121.70 | 122.23 | 122.59 | 122.17 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| 93 | 70.59 | 61.18 | 94.12 | 60.38 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DEMAXI | DEMIMI |
| 93 | 8.45 | -7.38 | 11.52 | 12.60 | 32.17 | 23.22 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 93 | 1.52 | -1.23 | 0.63 | 0.92 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHANO | |
| 93 | 0.98 | -0.99 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 94 | 01/20/96 | 12.03 | 121.53 | 122.23 | 122.41 | 122.06 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| 94 | 84.71 | 80.00 | 103.53 | 60.37 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DEMAXI | DEMIMI |
| 94 | 0.97 | -9.44 | 12.52 | 13.05 | 41.11 | 24.54 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 94 | 2.57 | -2.56 | 1.94 | 1.95 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHANO | |
| 94 | 0.97 | -0.97 | 0.99 | 0.99 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 95 | 01/20/96 | 12.10 | 121.70 | 122.06 | 122.41 | 122.06 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| 95 | 89.41 | 89.41 | 112.94 | 60.38 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DEMAXI | DEMIMI |
| 95 | 9.92 | -9.77 | 13.30 | 13.44 | 38.58 | 30.07 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 95 | 4.48 | -4.86 | 3.78 | 3.40 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHANO | |
| 95 | 0.91 | -0.90 | 0.96 | 0.97 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 96 | 01/20/96 | 12.15 | 121.70 | 122.23 | 122.41 | 122.11 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |

| | | | | | |
|---------|----------|--------|---------------|--------|--------|
| 95 | 84.71 | 84.71 | 103.53 | 60.41 | |
| Record# | FR | PS | PT | PJT | DEMAXI |
| 96 | 9.29 | -9.27 | 12.19 | 12.21 | 38.42 |
| Record# | OR | OS | OT | OST | |
| 96 | 4.48 | -4.61 | 3.46 | 3.33 | |
| Record# | FFR | FFS | FPT | FFSF | XCHAO |
| 96 | 0.90 | -0.90 | 0.96 | 0.96 | 0.00 |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT |
| 97 | 01/20/96 | 12.20 | 121.88 | 122.23 | 122.59 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | VFROM |
| 97 | 84.71 | 89.41 | 96.82 | 60.41 | |
| Record# | FP | FS | PT | PSF | DEMAXI |
| 97 | 9.30 | -9.79 | 11.65 | 11.17 | 34.89 |
| Record# | OR | OS | OT | OSF | DEMINI |
| 97 | 4.48 | -4.87 | 3.31 | 2.93 | 28.54 |
| Record# | FFR | FFS | FPT | FFCF | XCHAO |
| 97 | 0.90 | -0.90 | 0.96 | 0.97 | 0.00 |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT |
| 98 | 01/20/96 | 12.25 | 121.53 | 122.06 | 122.41 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | VFROM |
| 98 | 89.41 | 89.41 | 103.53 | 60.38 | |
| Record# | PR | PS | PT | PSF | DEMAXI |
| 98 | 9.54 | -9.52 | 12.01 | 12.03 | 41.41 |
| Record# | OR | OS | OT | OSF | DEMINI |
| 98 | 5.19 | -5.33 | 4.06 | 3.92 | 23.06 |
| Record# | FFR | FFS | FPT | FFCF | XCHAO |
| 98 | 0.89 | -0.87 | 0.95 | 0.95 | 0.00 |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT |
| 99 | 01/20/96 | 12.30 | 121.53 | 122.06 | 122.41 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | VFROM |
| 99 | 89.41 | 98.82 | 108.24 | 60.35 | |
| Record# | PR | PS | PT | PSF | DEMAXI |
| 99 | 9.41 | -10.22 | 12.44 | 11.64 | 41.65 |
| Record# | OR | OS | OT | OSF | DEMINI |
| 99 | 5.43 | -5.41 | 4.35 | 3.57 | 29.64 |
| Record# | FFR | FFS | FPT | FFCF | XCHAO |
| 99 | 0.87 | -0.85 | 0.94 | 0.96 | 0.00 |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT |
| 100 | 01/20/96 | 12.35 | 121.70 | 122.05 | 122.41 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | VFROM |
| 100 | 89.41 | 98.82 | 108.24 | 60.35 | |
| Record# | PR | PS | PT | PSF | DEMAXI |
| 100 | 9.43 | -10.22 | 12.33 | 11.53 | 37.72 |
| Record# | | | | | DEMINI |
| 100 | | | | | 30.86 |

| | | | | | | |
|---------|----------|--------|--------|------------|--------|---------|
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 100 | 5.44 | -6.41 | 4.86 | 3.88 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 100 | 0.87 | -0.85 | 0.93 | 0.95 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 101 | 01/20/96 | 12.40 | 121.53 | 121.88 | 122.23 | 121.88 |
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | |
| 101 | 103.53 | 112.94 | 117.65 | 60.29 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DEMAX1 | DEMINT1 |
| 101 | 10.41 | -11.09 | 13.10 | 12.42 | 51.13 | 30.30 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 101 | 7.07 | -8.15 | 5.92 | 4.84 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 101 | 0.83 | -0.81 | 0.91 | 0.93 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 102 | 01/20/96 | 12.45 | 121.53 | 121.88 | 122.23 | 121.88 |
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | |
| 102 | 108.24 | 112.94 | 122.35 | 60.44 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DEMAX1 | DEMINT1 |
| 102 | 11.23 | -11.66 | 13.91 | 13.48 | 83.36 | 20.32 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 102 | 6.85 | -7.31 | 5.48 | 5.02 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 102 | 0.85 | -0.85 | 0.93 | 0.94 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 103 | 01/20/96 | 12.50 | 122.06 | 122.41 | 122.76 | 122.41 |
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | |
| 103 | 56.47 | 61.18 | 84.71 | 60.44 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DEMAX1 | DEMINT1 |
| 103 | 6.81 | -7.39 | 10.40 | 9.82 | 28.51 | 21.77 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 103 | 1.05 | -1.24 | 0.06 | -0.12 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 103 | 0.99 | -0.99 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 104 | 01/20/96 | 12.55 | 122.06 | 122.59 | 122.76 | 122.47 |
| Record# | IR | IS | IT | FRECUENCIA | | |
| 104 | 56.47 | 61.18 | 84.71 | 60.44 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DEMAX1 | DEMINT1 |
| 104 | 6.81 | -7.40 | 10.40 | 9.81 | 28.52 | 21.78 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 104 | 1.05 | -1.24 | 0.06 | -0.13 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 104 | 0.99 | -0.99 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | |

| | | | | | | |
|---------|----------|-------|---------------|--------|--------|---------|
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 105 | 01/20/96 | 13.00 | 122.41 | 122.75 | 122.94 | 122.70 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| 105 | 37.65 | 56.47 | 70.59 | 60.54 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DENAXI | DEMIMI |
| 105 | 4.58 | 6.13 | 8.68 | 19.39 | 28.26 | 15.41 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 105 | 0.48 | -3.25 | -0.16 | -2.93 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 105 | 0.99 | -0.88 | -1.00 | 0.99 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 106 | 01/20/96 | 13.05 | 122.41 | 122.94 | 123.12 | 122.82 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| 106 | 23.53 | 37.65 | 65.88 | 60.63 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DENAXI | DEMIMI |
| 106 | 2.86 | -4.56 | 8.10 | 6.40 | 20.81 | 13.93 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 106 | 0.30 | -0.76 | -0.35 | -0.82 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 106 | 0.99 | -0.99 | -1.00 | 0.99 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 107 | 01/20/96 | 13.10 | 122.41 | 122.94 | 122.94 | 122.76 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| 107 | 10.87 | 37.65 | 65.88 | 60.63 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DENAXI | DEMIMI |
| 107 | 2.30 | -4.56 | 8.09 | 5.81 | 16.86 | 12.24 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 107 | -0.04 | -0.76 | -0.35 | -1.16 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 107 | 1.00 | -0.99 | -1.00 | 0.98 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 108 | 01/20/96 | 13.13 | 106.52 | 106.69 | 106.67 | 106.63 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |
| 108 | 0.00 | 4.71 | 9.41 | 60.60 | | |
| Record# | PR | PS | PT | P3F | DENAXI | DEMIMI |
| 108 | 0.00 | -0.50 | -0.75 | -1.24 | 0.00 | -295.07 |
| Record# | QR | QS | QT | Q3F | | |
| 108 | 0.00 | -0.08 | -0.67 | -0.75 | | |
| Record# | FPR | FPS | FPT | FP3F | XCHAN0 | |
| 108 | 0.73 | -0.99 | -0.74 | -0.85 | 0.00 | |
| Record# | FECHA | HH | VR | VS | VT | VFROM |
| 109 | 01/22/96 | 8.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Record# | IR | IS | IT FRECUENCIA | | | |

FIE : GRUPO ELECTROGENO
VOLTAJE -11:00 a 13:11 h 20-Jan-96

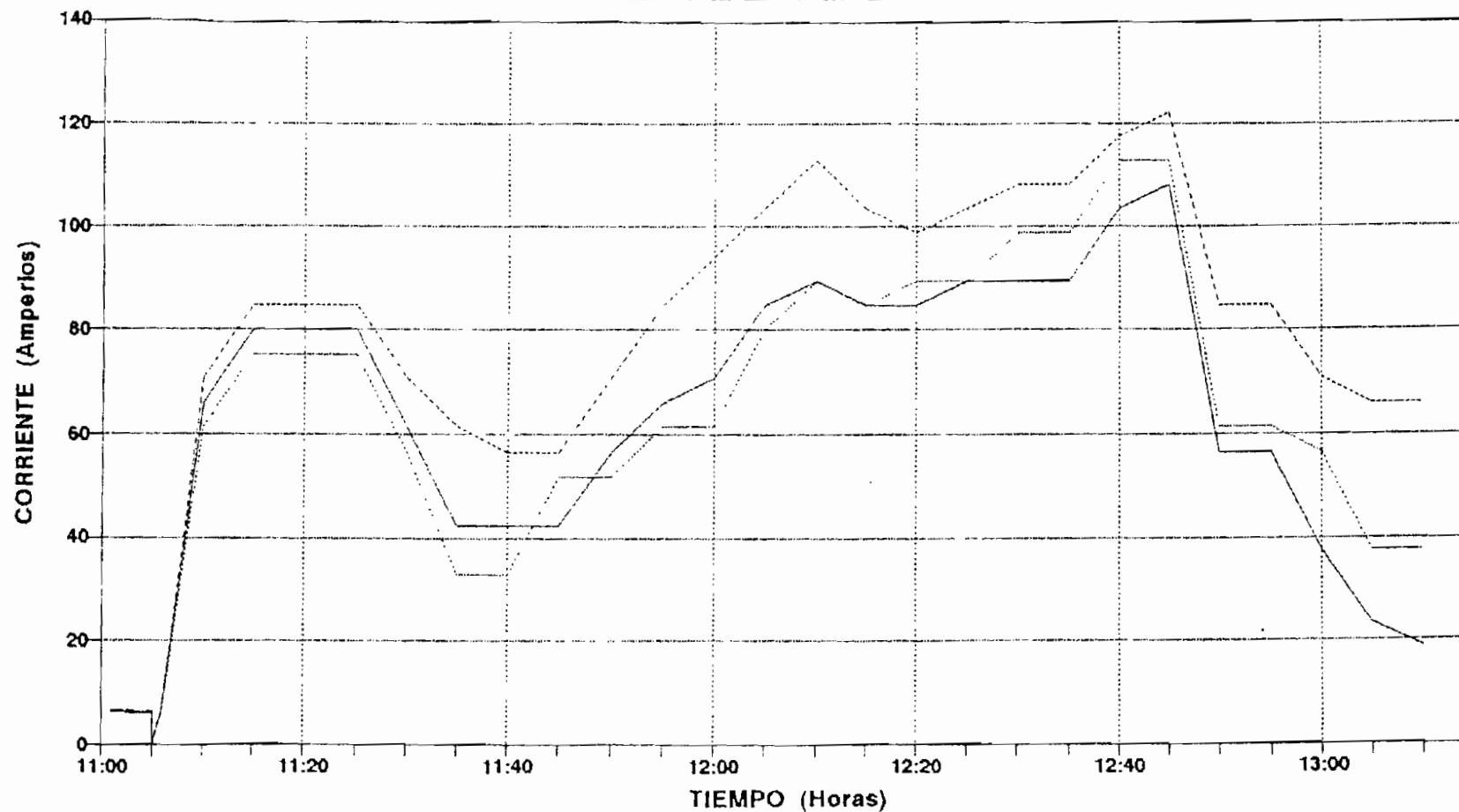


MACROLOGIC 2000

— Voltaje Promedio

MACROLOGIC 2000

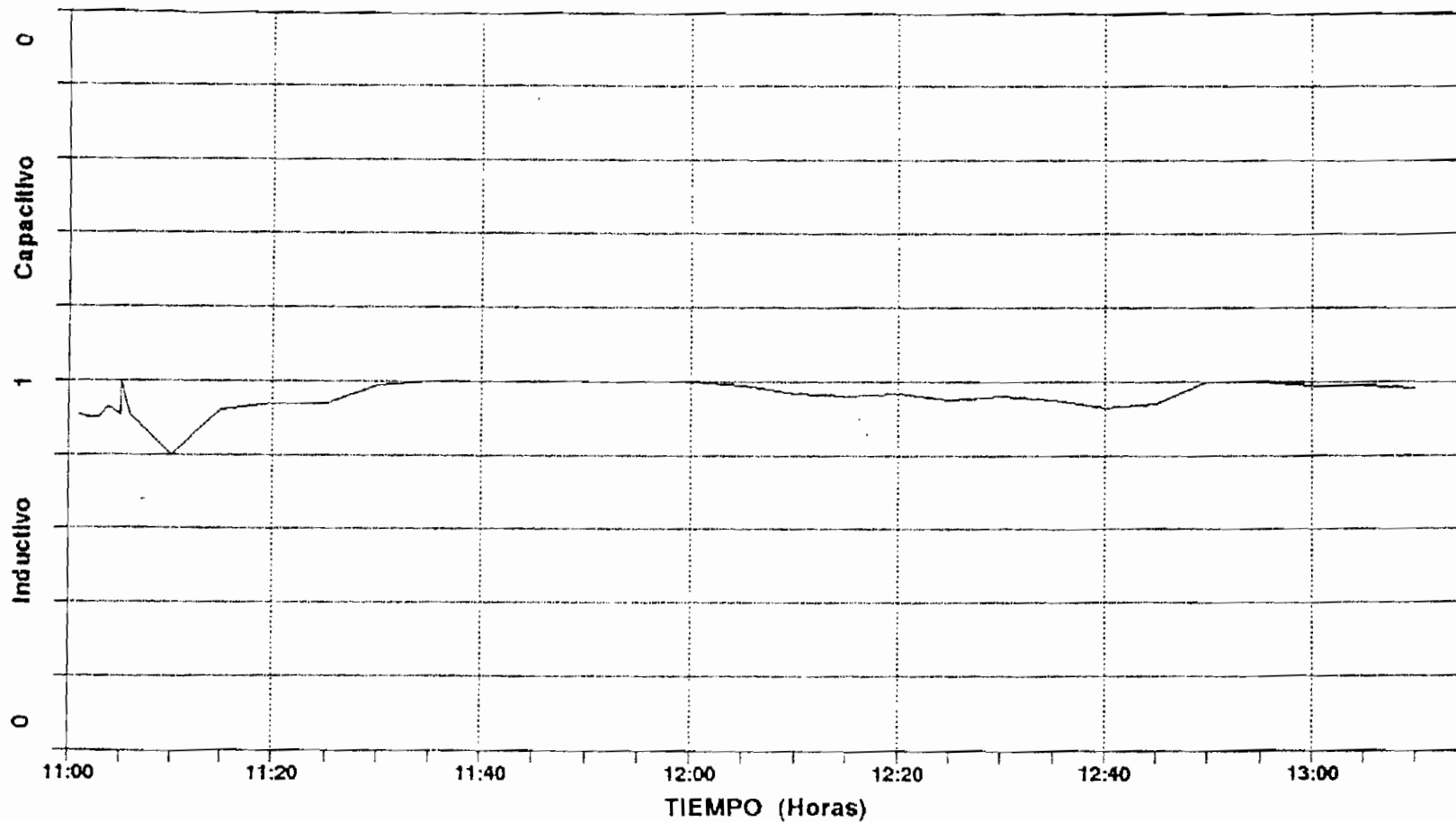
FIE : GRUPO ELECTROGENO
CORRIENTES -11:00 a 13:11 h 20-Jan-96



MACROLOGIC 2000

— Fase R - - - Fase S . . . Fase T

FIE : GRUPO ELECTROGENO
Factor de Potencia -11:00 a 13:11 h 20-Jan-96



MACROLOGIC 2000

— fp total

APÉNDICE C

ARCHIVOS DE DATOS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN DEL GRUPO DE EMERGENCIA.

Contenido: Archivo de datos para simular el grupo de emergencia y Datos de entrada y Resultados de correr el flujo de potencia del Sistema Eléctrico de Emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica en condición de Demanda Alta, Medía y Baja.

Archivo de Datos para la Simulación del Grupo de Emergencia

```

60.0
*** SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA ***
0 1 G1 SM3 0.54 0.18700 0.150 0.80 0.7830.05 0.27
    0.85082 0.14640 0.07650 1.07000 0.06000
    0.71688 0.14640 0.07950 0.90605 0.05524 0.08600 0.0217
    100 1 201 1 0.03270
D
    100 1
        1.00000 0.02000 1.30000 0.00000 0.03000
        400.0000 0.00000 1.14270 0.00000 2.40260 -2.16820
        1.10000 0.50000
D
    201 1
        0.30000 0.01000 0.01000 0.01000 0.01000 9999999
        0.10000 0.00000 1.00000 0.00000 0.00000 0.00000
        0.00000 0.00000 1.00000 0.16700 -0.16700
        1.00000 0.00000
D
D
1.0000 0.0883 0.3510 0.0000 0.0000 1.0982 -2.3560
0.5330 1.3360 5.2100 2.3380 0.0000 -0.6638 -10.2820
1.0000 0.2016 1.6598 -9.1079 0.0000 0.9942 -2.1680
0.2427 0.5581 7.0228 -6.5456 0.0000 0.3079 -9.4606
1.0000 0.4675 1.9601 0.0000 0.0000 0.7029 -2.8865
0.6896 1.6993 3.8889 7.6570 53.7198 -1.8918 -14.1787
1.0000 1.5655 0.8548 0.0000 0.0000 0.5288 -0.7530
0.1472 0.3518 1.1825 0.0000 0.0000 -0.1400 -3.4677
1.0000 2.0000 1.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
1.0000 2.0400 0.9950 -0.5930 0.0000 0.0000 0.0000
0.1307 0.4271 0.6724 0.4690 0.0000 -0.3118 -0.6734
1.0000 0.7594 1.4361 0.0000 0.0000 0.6641 -3.3710
0.7820 1.9298 4.2231 0.0000 0.0000 -1.1025 -9.2356
1.0000 1.5520 0.4590 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
1.0000 0.6534 -1.6500 0.0000 0.0000 0.8879 0.0000
-0.1535 -0.0403 2.7340 0.0000 0.0000 -1.1684 0.0000
-0.0340 0.8196 1.5302 0.0000 0.0000 1.4233 0.0000
0.0000 2.0000 0.0000 0.0000 0.0000 -0.4700 0.0000

```

```

5 9 2
100 0.021 0.000 27.91 6.637 0.000 0.000 1.677 30.12 33.64
)
)

```

**Datos de Entrada y Resultados de correr el Flujo de
Potencia del Sistema de Emergencia de la FIE en condición
de Demanda Alta**

```

1
SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.
4
1      2 1      2184. 1164.  0.000
9999
5
1      2 GEN #1      1028  0.    0.  0    0.    0.    1  0.    0.    0  1
2      0 BUS #2      1000 -2.    0.  0.    0.    0.    0 0.11 0.04    0  1
9999
6
.000100 .000100
11
12
3  S7LFHIS  UNKNOWN
30

```

PAGE 1

* 1 *

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

* 4 *

* 5 *

```

1      2 GEN #1      1028  0.    0.  0    0.    0.    1  0.    0.    0  1
2      1000 -2.    0.  0.    0.  0.    0 0.11 0.04    0  1
9999

```

* 6 *

PROGRAM CONSTANTS

```

MAXIMUM ITERATIONS          = 20
BUS MW MISMATCH SOLUTION TOLERANCE = .000100
BUS HVAR MISMATCH SOLUTION TOLERANCE = .000500
LTC XFMR TAP SOLUTION TOLERANCE   = .005000
REMOTE GEN VOLTAGE SOLUTION TOL.   = .005000
LOSS CALCULATION DEVIATION        = .050000

```

* 11 *

COMPLETE ORDER

PROGRESS OF CONVERGENCE

| ITER BUSES OUT OF TOL. | | | TOTAL ABSOLUTE MISMATCH | | | |
|------------------------|-------|-------|-------------------------|-------|--------|----------|
| NO. | ANGLE | V-MAG | ANGLE | V-MAG | P (MW) | Q (MVAR) |
| 1 | 1 | 0 | .031 | .000 | .056 | .116 |
| 2 | 0 | 1 | .000 | .001 | .002 | .001 |
| 3 | 0 | 0 | .000 | .000 | .000 | .000 |

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3 PAGE 2

ABNORMAL SUMMARY REPORT

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3 PAGE 3

SYSTEM SUMMARY

```

*****
*
*
*      TOTAL LOAD      MW      MVAR      *
*      .11      .04      *
*
*      SHUNTS      .00      *
*
*      TOTAL LOSSES      .00      .00      *
*
*      MISMATCH      .00      .00      *
*      -----      *
*      TOTAL GEN      .11      .04      *
*
*
*
*
*      TOTAL BUSES      2      LIMIT 3000      *
*
*      TOTAL LINES      1      LIMIT 5500      *
*
*      TOTAL XFMRs      0      LIMIT 750      *
*
*      TOTAL GENS      1      LIMIT 750      *
*
*****

```

SYSTEM SUMMARY BY AREAS

| X-----AREA IDENTIFICATION-----X | | | | X-----ELEMENTS-----X | | | | | X---GENERATION---X | |
|---------------------------------|------------------|------|------|----------------------|----------|-----|-----|-----|--------------------|------|
| UNUSED | X-----LOAD-----X | | | STATIC | CHARGING | | | | | |
| NO. | NAME | | | BUS | LIN | GEN | LTC | FS | MW | MVAR |
| MVAR | MW | MVAR | MVAR | MVAR | MVAR | | | | | |
| 1 | .0 | .1 | .0 | .0 | 2 | 1 | 1 | 0 0 | .1 | .0 |
| ***** SYSTEM TOTALS ACTUAL | | | | | | | | | | |
| .0 | .1 | .0 | .0 | .0 | 2 | 1 | 1 | 0 | .1 | .0 |
| | | | | | LIMITS | 400 | 800 | 750 | 750 | 750 |

-----X

= 20

= 3

= .000100

= .000500

= .005000

= .005000

= .050000

 0-----SYSTEM LOSSES-----X
 .00 .00

X-----TOLERANCES-----

MAXIMUM ITERATIONS

ACTUAL ITERATIONS

BUS ANGLE MISMATCH TOLERANCE

BUS VOLTAGE MISMATCH TOLERANCE

LTC TRANSFORMER TAP TOLERANCE

REMOTE GENERATION VOLTAGE TOLERANCE

LOSS CALCULATION DEVIATION

AREA INTERCHANGE SUMMARY

| X-----AREA IDENTIFICATION-----X | | | | X-----CONTROL BUS-----X | | | X---EXPORT | |
|---------------------------------|-----------|--------|--------|-------------------------|------|--------|------------|---|
| (MW) | TOLERANCE | P LOSS | Q LOSS | NO. | NAME | GEN-MW | ACTUAL | D |
| ESTRED | (MW) | MW | MVAR | | | | | |
| 1 | | .00 | .00 | | | | | |

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3

PAGE 6

| | | | | REGULATED BUS SUMMARY | |
|---|---------------|---------------|-------|-------------------------|----------------------------|
| NO. | GENERATOR BUS | P-GEN | Q-GEN | Q-MIN | Q-MAX VOLTAGE-DESIRED VOLT |
| AGE-ACTUAL CONTROLLED BUS GENERATOR VOLTAGE | | | | | |
| 1 | GEN #1 | .11 | .04 | | 1.02800 1. |
| 02800 | 1 | 1.02800 SWING | | | |
| * INDICATES DESIRED VOLTAGE NOT HELD | | | | FIXED INDICATES IDENTIC | |
| AL MVAR LIMITS | | | | | |

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3

PAGE 7

| BUS NAME | NAME | MW | VOLTS MVAR | ANGLE TAP | GENERATION | | LOAD | | SHUNT MVAR | TO BUS |
|-------------|--------|------|---------------|--------------|------------|-------------|------|------|---------------|-----------|
| | | | | | MW ANG | MVAR RTG | MW | MVAR | | |
| 1 | GEN #1 | | 1.028 | .0 | .1 | .0 | .0 | .0 | .0 | ----- |
| 2 | | | | | | | | | | |
| BUS #2 | | .11 | .04 | | | | | | | |
| 2 | BUS #2 | | .999 | -.2 | .0 | .0 | .1 | .0 | .0 | ----- |
| 1 | | | | | | | | | | |
| GEN #1 | | -.11 | -.04 | | | | | | | |

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3

PAGE 8

\$ 12 *

UNIT = 3 .FILE NAME = S9LFHIS ,STATUS = UNKNOWN

HISTORY DISK FILE S9LFHIS HAS BEEN WRITTEN ON UNIT 3 WITH THE TITLE ----
PAGE 8

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

* 30 *

*** END-OF-JOB ***

Stop - Program terminated.

Datos de Entrada y Resultados de correr el Flujo de
Potencia del Sistema de Emergencia de la FIE en condición
de Demanda Media

```

1
SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.
4
1      2 1      2184. 1164.  0.000
9999
5
1  2 GEN #1      1028  0.   0.  0   0.   0.   1  0.   0.   0   1
2  0 BUS #2      1000 -2.   0.  0.   0.   0.   0 0.04 0.02   0   1
9999
6
.000100 .000100
11
12
3  S9LFHIS      UNKNOWN
30

```

PAGE 1

* 1 *

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

* 4 *

* 5 *

```

1  2 GEN #1      1028  0.   0.  0   0.   0.   1  0.   0.   0   1
2  1000 -2.   0.  0.   0.  0.   0 0.04 0.02   0   1
9999

```

* 6 *

PROGRAM CONSTANTS

```

MAXIMUM ITERATIONS      = 20
BUS MW MISMATCH SOLUTION TOLERANCE = .000100
BUS MVAR MISMATCH SOLUTION TOLERANCE = .000500
LTC XFMR TAP SOLUTION TOLERANCE = .005000
REMOTE GEN VOLTAGE SOLUTION TOL. = .005000
LOSS CALCULATION DEVIATION = .050000

```

* 11 *

COMPLETE ORDER

PROGRESS OF CONVERGENCE

| ITER BUSES OUT OF TOL. | | | TOTAL ABSOLUTE MISMATCH | | | |
|------------------------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|---------|
| NO. | ANGLE | V-MAG | ANGLE | V-MAG | P(MW) | Q(MVAR) |
| 1 | 1 | 1 | .035 | .018 | .126 | .096 |
| 2 | 1 | 1 | .001 | .001 | .005 | .001 |
| 3 | 0 | 0 | .000 | .000 | .000 | .000 |

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3 PAGE 2

ABNORMAL SUMMARY REPORT

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3 PAGE 3

SYSTEM SUMMARY

```

*****
*
*
*          MW      MVAR
*    TOTAL LOAD      .04      .02
*
*    SHUNTS              .00
*
*    TOTAL LOSSES      .00      .00
*
*    MISMATCH          .00      .00
*    -----
*
*    TOTAL GEN         .04      .02
*
*
*
*
*
*
*    TOTAL BUSES      2    LIMIT 3000
*
*    TOTAL LINES      1    LIMIT 5500
*
*    TOTAL XFMRs      0    LIMIT 750
*
*    TOTAL GENS       1    LIMIT 750
*
*****

```

SYSTEM SUMMARY BY AREAS

| X-----AREA IDENTIFICATION-----X | | | | X-----ELEMENTS-----X | | | | X---GENERATION---X | | | | |
|---------------------------------|--------|------|------|----------------------|----------|----------------------------|-----|--------------------|-----|----|----|------|
| NO. | UNUSED | LOAD | NAME | STATIC | CHARGING | BUS | LIN | GEN | LTC | PS | MW | MVAR |
| | MVAR | MW | MVAR | MVAR | MVAR | | | | | | | |
| 1 | .0 | .0 | .0 | .0 | .0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | .0 | .0 |
| ***** SYSTEM TOTALS ACTUAL | | | | | | | | | | | | |
| | .0 | .0 | .0 | .0 | .0 | 2 | 1 | 1 | 0 | | .0 | .0 |
| | | | | | | LIMITS 400 800 750 750 750 | | | | | | |

-----X

= 20

= 3

= .000100

= .000500

= .005000

= .005000

= .050000

X---SYSTEM LOSSES---X
 .00 .00

X-----TOLERANCES-----

MAXIMUM ITERATIONS

ACTUAL ITERATIONS

BUS ANGLE MISMATCH TOLERANCE

BUS VOLTAGE MISMATCH TOLERANCE

LTC TRANSFORMER TAP TOLERANCE

REMOTE GENERATION VOLTAGE TOLERANCE

LOSS CALCULATION DEVIATION

AREA INTERCHANGE SUMMARY

| X-----AREA IDENTIFICATION-----X | | | | X-----CONTROL BUS-----X | | | X--EXPORT | |
|---------------------------------|-----------|--------|--------|-------------------------|------|--------|-----------|---|
| (MW)--X | TOLERANCE | P LOSS | Q LOSS | NO. | NAME | GEN-MW | ACTUAL | D |
| NO. | NAME | MW | MVAR | | | | | |
| ESIED | (MW) | MW | MVAR | | | | | |
| 1 | | .00 | .00 | | | | | |

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3

PAGE 6

NO. GENERATOR BUS P-GEN Q-GEN Q-MIN
AGE-ACTUAL CONTROLLED BUS GENERATOR VOLTAGE

1 GEN #1 .04 .02
02800 1 1.02800 SWING

* INDICATES DESIRED VOLTAGE NOT HELD
AL MVAR LIMITS

REGULATED BUS SUMMARY
Q-MAX VOLTAGE-DESIRED

1.02800

FIXED INDICATES IDE

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3

PAGE 7

| BUS NAME | NAME | MW | VOLTS MVAR | ANGLE TAP | GENERATION MW ANG | MVAR RTG | LOAD MW MVAR | SHUNT MVAR | T B |
|----------|--------|------|------------|-----------|-------------------|----------|--------------|------------|-----|
| 1 | GEN #1 | | 1.028 | .0 | .0 | .0 | .0 | .0 | --- |
| BUS #2 | | .04 | .02 | | | | | | |
| 2 | BUS #2 | | 1.017 | -.0 | .0 | .0 | .0 | .0 | --- |
| GEN #1 | | -.04 | -.02 | | | | | | |

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3

PAGE 8

* 12 *

UNIT = 3 ,FILE NAME = S9LFHIS ,STATUS = UNKNOWN

HISTORY DISK FILE S9LFHIS HAS BEEN WRITTEN ON UNIT 3 WITH THE TITLE ----
PAGE 8

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

* 30 *

**** END-OF-JOB ****

Stop - Program terminated.

Datos de Entrada y Resultados de correr el Flujo de
Potencia del Sistema de Emergencia de la FIE en condición
de Demanda Baja

```

1
SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.
4
1      2 1      2184. 1164.  0.000
9999
5
1      2 GEN #1      1028  0.   0.  0   0.   0.   1  0.   0.   0   1
2      0 BUS #2      1000 -2.   0.  0.   0.   0.   0 0.02 0.00  0   1
9999
6
.000100 .000100
11
12
3      S9LFHIS      UNKNOWN
30

```

PAGE 1

* 1 *

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

* 4 *

* 5 *

```

1      2 GEN #1      1028  0.   0.  0   0.   0.   1  0.   0.   0   1
2      1000 -2.   0.  0.   0.  0.   0 0.02 0.00  0   1
9999

```

* 6 *

PROGRAM CONSTANTS

```

MAXIMUM ITERATIONS      = 20
BUS MW MISMATCH SOLUTION TOLERANCE = .000100
BUS MVAR MISMATCH SOLUTION TOLERANCE = .000500
LTC XFMR TAP SOLUTION TOLERANCE    = .005000
REMOTE GEN VOLTAGE SOLUTION TOL.   = .005000
LOSS CALCULATION DEVIATION         = .050000

```

* 11 *

COMPLETE ORDER

PROGRESS OF CONVERGENCE

| ITER BUSES OUT OF TOL. | | | TOTAL ABSOLUTE MISMATCH | | | |
|------------------------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|---------|
| NO. | ANGLE | V-MAG | ANGLE | V-MAG | P(MW) | Q(MVAR) |
| 1 | 1 | 1 | .034 | .025 | .146 | .076 |
| 2 | 1 | 1 | .001 | .001 | .006 | .001 |
| 3 | 0 | 0 | .000 | .000 | .000 | .000 |

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.
SWING BUS 1 ITERATIONS = 3

PAGE 2

ABNORMAL SUMMARY REPORT

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.
SWING BUS 1 ITERATIONS = 3

PAGE 3

SYSTEM SUMMARY

```

*****
*
*
*          MW          MVAR
*      TOTAL LOAD      .02      .00
*
*      SHUNTS              .00
*
*      TOTAL LOSSES      .00      .00
*
*      MISMATCH          .00      .00
*      -----
*      TOTAL GEN          .02      .00
*
*
*
*
*
*      TOTAL BUSES      2      LIMIT 3000
*
*      TOTAL LINES      1      LIMIT 5500
*
*      TOTAL XFMRs      0      LIMIT 750
*
*      TOTAL GENS       1      LIMIT 750
*
*****

```

SYSTEM SUMMARY BY AREAS

| X-----AREA IDENTIFICATION-----X | | | | X-----ELEMENTS-----X | | | | | X---GENERATION---X | | |
|---------------------------------|------------------|------|------|----------------------|----------|-----|-----|-----|--------------------|----|------|
| UNUSED | X-----LOAD-----X | | | STATIC | CHARGING | | | | | | |
| NO. | NAME | | | | BUS | LIN | GEN | LTC | PS | MW | MVAR |
| MVAR | MW | MVAR | MVAR | MVAR | MVAR | | | | | | |
| 1 | | | | | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | .0 | .0 |
| .0 | .0 | .0 | .0 | .0 | .0 | | | | | | |
| ***** SYSTEM TOTALS | | | | ACTUAL | 2 | 1 | 1 | 0 | | .0 | .0 |
| | | | | | .0 | | | | | | |
| | | | | LIMITS | 400 | 800 | 750 | 750 | 750 | | |

-----X

= 20

= 3

= .000100

= .000500

= .005000

= .005000

= .050000

X---SYSTEM LOSSES---X
 .00 .00

X-----TOLERANCES-----

MAXIMUM ITERATIONS

ACTUAL ITERATIONS

BUS ANGLE MISMATCH TOLERANCE

BUS VOLTAGE MISMATCH TOLERANCE

LTC TRANSFORMER TAP TOLERANCE

REMOTE GENERATION VOLTAGE TOLERANCE

LOSS CALCULATION DEVIATION

AREA INTERCHANGE SUMMARY

| X-----AREA IDENTIFICATION-----X | | | | X-----CONTROL BUS-----X | | | X---EXPORT | |
|---------------------------------|-----------|--------|--------|-------------------------|------|--------|------------|---|
| (MW)--X | TOLERANCE | P LOSS | Q LOSS | | | | | |
| NO. | NAME | | | NO. | NAME | GEN-MW | ACTUAL | D |
| ESIED | (MW) | MW | MVAR | | | | | |
| 1 | | .00 | .00 | | | | | |

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3

PAGE 6

NO. GENERATOR BUS P-GEN Q-GEN Q-MIN
AGE-ACTUAL CONTROLLED BUS GENERATOR VOLTAGE
1 GEN #1 .02 .00
02800 1 1.02800 SWING
* INDICATES DESIRED VOLTAGE NOT HELD
AL MVAR LIMITS

REGULATED BUS SUMMARY

Q-MAX : VOLTAGE-DESIRED VOLT
1.02800 1.
FIXED INDICATES IDENTIC

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3

PAGE 7

| BUS NAME | NAME | MW | VOLTS MVAR | ANGLE TAP | GENERATION MW ANG | MVAR RTG | LOAD MW | MVAR | SHUNT MVAR | TO BUS |
|----------|--------|------|------------|-----------|-------------------|----------|---------|------|------------|--------|
| 1 | GEN #1 | | 1.028 | .0 | .0 | .0 | .0 | .0 | .0 | ----- |
| 2 | | | | | | | | | | |
| BUS #2 | | .02 | .00 | | | | | | | |
| 2 | BUS #2 | | 1.024 | -.1 | .0 | .0 | .0 | .0 | .0 | ----- |
| 1 | | | | | | | | | | |
| GEN #1 | | -.02 | .00 | | | | | | | |

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

SWING BUS 1 ITERATIONS = 3

PAGE 8

* 12 *

UNIT = 3 ,FILE NAME = S9LFHIS ,STATUS = UNKNOWN

HISTORY DISK FILE S9LFHIS HAS BEEN WRITTEN ON UNIT 3 WITH THE TITLE ----
PAGE 8

SISTEMA DE EMERGENCIA DE LA F.I.E.

* 30 *

**** END-OF-JOB ****

Stop - Program terminated.