

# EFFECTO DE LA CARGA ELECTRICA EN EL COMPORTAMIENTO DINAMICO DEL GRUPO DE EMERGENCIA A DIESEL DE LA FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

Adriana J. Pacheco T., Ing.  
ECUATRAN S.A.

Jesús A. Játiva I, Ph.D.  
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

## RESUMEN

En el presente trabajo se presenta un estudio del efecto de las cargas estacionaria y dinámica sobre las variables de estado eléctricas del grupo de emergencia a diesel de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. En la fase experimental se analiza arranques de motores de inducción y sincrónicos, así como también rechazos de los mismos. Empleando un programa computacional de estabilidad se simula rechazos y variaciones de los dos tipos de carga, cuyos resultados especialmente de voltaje y frecuencia son contrastados con los que se obtienen experimentalmente, se realiza además un análisis de cortocircuitos trifásicos en las barras donde estan ubicados los motores de inducción de mayor potencia.

## ABSTRACT

In this work a study about static and dynamic load effects over electric state variables of the Diesel Electrical Engineering Department Emergency Group is presented. In the experimental stage, induction and synchronous motor starts are analyzed as well as their rejection. By using a computational program for transient stability analysis, rejection and variations of these types of load are simulated, whose results, specially voltage and frequency, are compared to those experimentally obtained. Additionally, three-phase short-circuits at the buses where the induction motors are located are simulated.

## 1. INTRODUCCION

Las características de las cargas eléctricas afectan el comportamiento dinámico del sistema de potencia. Cada vez es más importante conocer el efecto que producen las cargas dinámicas y estacionarias, tanto lineales como no lineales, sobre grupos de emergencia, debido al número creciente de este tipo de instalación en nuestro medio.

En la mayor parte de estudios de estabilidad se deja de lado la naturaleza dinámica de la carga produciendo resultados que se alejan de la realidad. El aumento de la energía cinética del sistema debido a las cargas rotativas puede ir en favor o en contra de la estabilidad del sistema, dependiendo del tipo de contingencia.

El análisis que se realiza en este trabajo sirve para determinar si el sistema de control y el equipo de protección soportan los fenómenos transitorios de la carga, para de esta forma, tomar medidas preventivas ante cualquier evento transitorio de carga que se presente en la realidad, y que no se produzcan salidas forzadas del grupo de emergencia.

## 2. MODELACION DEL SISTEMA ELECTRICO

El sistema eléctrico de la Facultad de Ingeniería Eléctrica cuando está alimentado unicamente por el grupo de emergencia se modela como un conjunto de 13 barras, cuyas carga estática se encuentra en la barra 3 y las dinámicas se ubican en las barras 5 hasta la 13.

En la Figura 1 se detalla el diagrama unifilar del sistema eléctrico de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Los datos generales y parámetros con los cuales se modela el generador y carga son:

### a) GRUPO MOTOR-GENERADOR

Grupo electrógeno a diesel, marca KATOLIGHT, de 150 kW y generador de 187 kVA

#### Máquina Motriz

Motor Diesel General Motors

Modelado como un sistema de turbina a vapor y regulador de velocidad hidráulico cuyas constantes son:

P1:  $T1 = TCH = 0.3$   
 $T2 = 0.01$   
 $T3 = 0.01$   
 $T4 = 0.01$   
 $T5 = 0.01$   
 $T6 = TI = 999999$

P2:  $T7 = TSM = 0.1$   
 $T8 = KPD = 0$   
 $K1 = FHP = 1$   
 $K2 = FIP = 0$   
 $K3 = FLP = 0$   
 $G2 = 0$

P3:  $G3 = 0$   
 $G4 = 0$   
 $G5 = KPR = 1$   
 $DCVU = CV_{\max} = 0.167$   
 $DCVL = CV_{\min} = 0.167$

P4:  $CVU = CV_{\text{open}} = 1$   
 $CVL = CV_{\text{close}} = 0$

#### Generador

Marca KATO	187 kVA
Voltaje nominal	120/208 V
Corriente nominal	519 A
Velocidad nominal	1800 r.p.m.
Frecuencia	60 Hz
Factor de Potencia	0.8
Corriente de Campo	11.95 A
Cuatro Polos	

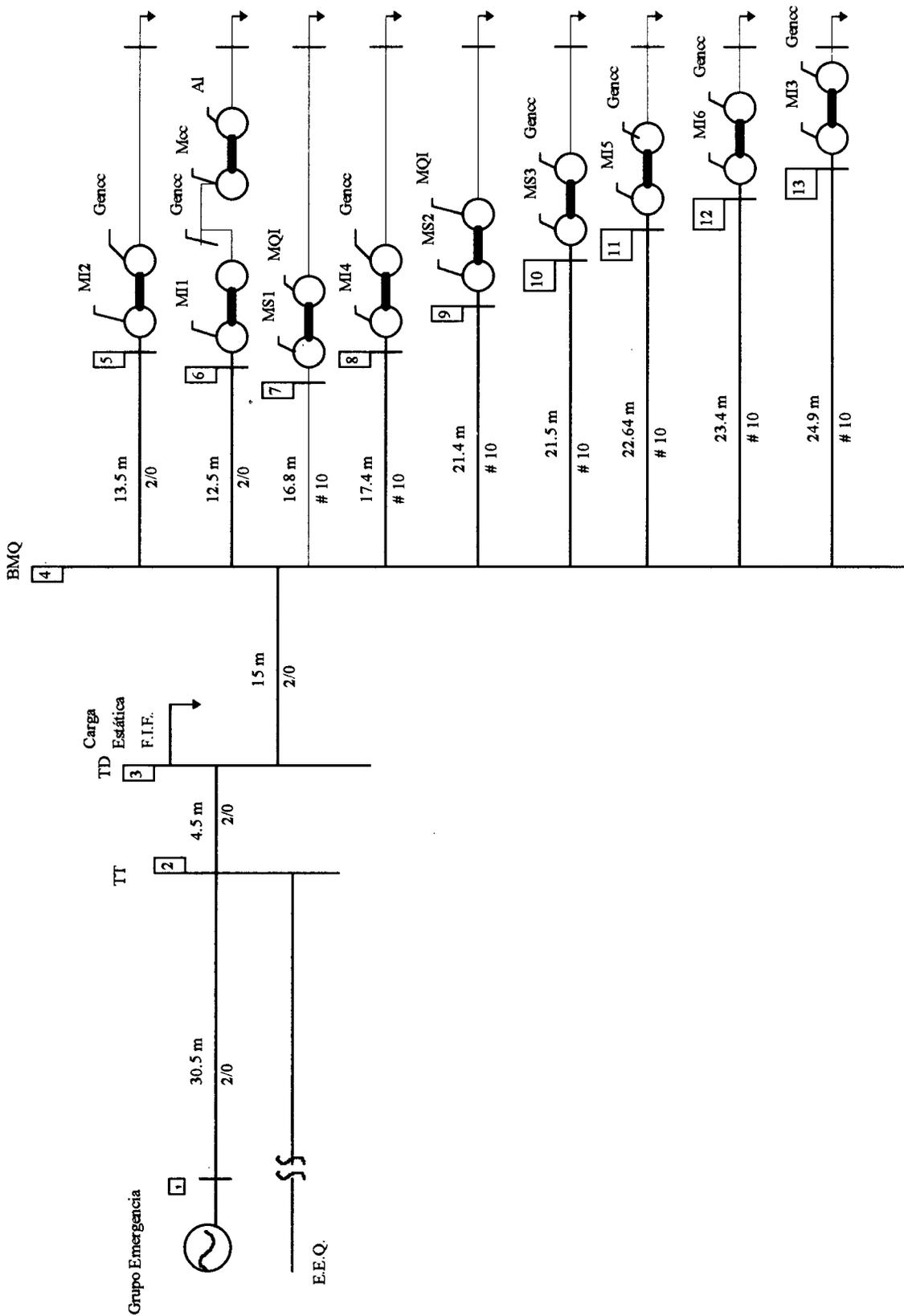


Figura 1 Diagrama del Sistema Eléctrico de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

### Sistema de excitación

Autoexcitado, utiliza un generador de DC como fuente de excitación del sistema de potencia, por lo tanto, se lo modela como sistema de excitación tipo DC1 cuyos parámetros típicos son:

A1:  $T1 = TK = 1$  s  
 $T2 = TA = 0.02$  s  
 $T3 = TE = 1.3$  s  
 $T4 = TR = 0$  s  
 $T5 =$  no existe  
 $K1 = KF = 0.03$  s

A2:  $K2 = KA = 400$   
 $K3 = 0$   
 EFD Máx = 1.1427 pu  
 EFD Mín = 0.0 pu  
 V R Máx = 2.4026 pu  
 V R Mín = -2.1682 pu

A3: SE Máx = 1.1  
 SE.75 = 0.5  
 KC = no existe  
 Ko = no existe  
 Kp = no existe  
 KI = no existe

El arranque del motor diesel es eléctrico y dispone de un motor de arranque de 24 V de corriente continua.

Exitatriz de corriente continua, 2500 W, 20 A, 125 V, 0.5 A (corriente de campo de excitatriz).

Regulador de Voltaje del generador, RO, 120/208 VAC, 125 VDC, 60 Hz.

Los parámetros eléctricos que caracterizan al grupo de emergencia se encuentran en la Tabla 4 de características de motores sincrónicos.

### b) CARGAS ESTATICAS

Para simular la carga estática del edificio antiguo de la Facultad de Ingeniería Eléctrica se establece el porcentaje que representa a cada carga. Preambiente se clasifica la carga de acuerdo a los 12 tipos de carga, cuyos coeficientes de potencia activa y reactiva se presentan en la Tabla 1.

El porcentaje total de carga estática se indica en la tabla 2.

Tabla 2 Porcentaje de Carga Estática

Descripción	P (kW)	Q (kVAR)	% P	% Q
Ilumin. Fluores.	33,796	11,109	59,7440	45,2983
Ilumin. Incandes.	2,756	0,000	4,8720	0,0000
Calent. Agua	3,263	0,000	5,7683	0,0000
Computador	8,852	8,532	15,6490	34,7886
Osciloscopios	1,301,01	2,298	4,118	
Fuentes	1,781	2,254	3,1491	9,1918
Aire Acondicion	0,005	0,002	0,0081	0,0090
Eq. Varios	4,815	1,622	8,512	6,6140
TOTAL	56,568	24,525	100,0076	100,0196

### c) CARGAS DINAMICAS

La carga dinámica de la Facultad de Ingeniería Eléctrica está formada por motores de inducción y motores sincrónicos. En las tablas 3 y 4 se encuentra un resumen de los parámetros obtenidos.

### 3. ARRANQUE DE MOTORES DE INDUCCION Y SINCRONICOS

Tabla 1 Coeficientes Polinomiales de P y Q

TIPO DE CARGA		Const.	$\Delta V$	$\Delta V^2$	$\Delta V^3$	$\Delta V^4$	$\Delta F$	$\Delta F \cdot \Delta V$
		$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k_6$	
		$k_7$	$k_8$	$k_9$	$k_{10}$	$k_{11}$	$k_{12}$	$k_{13}$
Aire acondicionado 3φ	P	1.0000	0.0883	0.3510	0.0000	0.0000	0.9800	-2.3560
	Q	0.5330	1.3360	5.2100	2.3380	0.0000	-0.7030	-10.2820
Aire acondicionado 1φ	P	1.0000	0.2016	1.6598	-9.1079	0.0000	0.9015	-2.1680
	Q	0.2427	0.5581	7.0228	-6.5456	0.0000	-0.6473	-9.4606
Aire acondicionado (tipo ventana)	P	1.0000	0.4675	1.9601	0.0000	0.0000	0.5628	-2.8865
	Q	0.6896	1.6993	3.8889	7.6570	53.7198	-1.9372	-14.1787
Calentamiento tipo ducto (Incluido ventiladores)	P	1.0000	1.5655	0.8548	0.0000	0.0000	0.5121	-0.7530
	Q	0.1472	0.3518	1.1825	0.0000	0.0000	-0.1715	-3.4677
Calentador de agua	P	1.0000	2.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Q	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Secadora de ropa	P	1.0000	2.0400	0.9950	-0.5930	0.0000	0.0000	0.0000
	Q	0.1307	0.4271	0.6274	0.4690	0.0000	-0.3437	-0.6734
Refrigerador	P	1.0000	0.7594	1.4361	0.0000	0.0000	0.5238	-3.3710
	Q	0.7820	1.9298	4.2231	0.0000	0.0000	-1.1266	-9.2356
Iluminación incandescente	P	1.0000	1.5520	0.4590	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Q	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Iluminación fluorescente	P	1.0000	0.6534	-1.6500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Q	-0.1535	-0.0403	2.7340	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Computador (Monitor, C.P.U)	P	0.7154	0.3759	-0.0868	0.0607	0.0000	0.0152	-0.9720
	Q	0.6935	0.3383	-0.1727	1.0971	0.0000	0.1095	-0.8037
Fuente	P	0.5903	1.1747	0.7341	0.6140	0.0000	-0.3286	-1.1178
	Q	0.8099	2.8552	4.5604	3.9528	0.0000	-2.1569	-8.3109
Osciloscopio	P	0.7728	0.8981	-0.0389	1.1215	0.0000	-0.0326	-0.5739
	Q	0.6166	0.8801	0.7105	3.7325	0.0000	-0.0615	-0.2362
Proyector	P	0.9809	1.5526	0.2629	-0.9225	0.0000	-0.0458	-0.2007
	Q	0.1758	0.5479	0.9663	2.5478	0.0000	-0.0839	0.7580
Televisor	P	0.8482	1.8482	1.5478	1.0818	0.0000	-0.1177	-0.3312
	Q	0.5060	1.1269	1.9114	2.5380	0.0000	-0.1458	0.2357

Tabla 3 Parámetros de Motores de Inducción

MOTORES DE INDUCCION										
Nº	R1 (Ω)	R1 p.u	R2 (Ω)	R2 (p.u)	X1=X2 (Ω)	X1=X2 (p.u)	Xm (Ω)	Xm (p.u)	Tdo'(s)	H (W.s/VA)
MI1	0,09428	0,0298	0,1855	0,0586	0,3938	0,12437	9,26673	2,92635	0,005713	0,105735
MI2	0,16495	0,1026	0,5309	0,3302	0,5476	0,34056	9,27951	5,77152	0,005444	0,037098
MI3	2,02488	0,2511	2,3032	0,2956	2,8513	0,3659	56,94191	7,30731	0,001553	0,021438
MI4	2,30629	0,1636	2,7144	0,2351	4,9263	0,42662	92,15908	7,98121	0,001336	0,011111
MI5	2,31044	0,1435	2,9006	0,1827	5,8526	0,36862	109,5015	6,89681	0,000231	0,007513
MI6	1,90144	0,1048	2,7142	0,2746	6,1738	0,34023	101,1405	5,57393	0,001958	0,007535

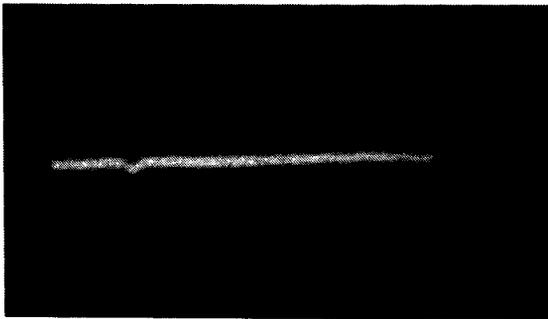
Tabla 4 Parámetros de Motores Síncrónicos

MOTORES SINCRONICOS																						
Nº	ra (pu)	Xd(pu)	Xd'(pu)	Xd''(pu)	Xq(pu)	Xq'(pu)	Xq''(pu)	X2(pu)	Xl(pu)	Td(ms)	Td'(ms)	Tq(ms)	Tq'(ms)	Tdo(ms)	Tdo'(ms)	Tqo(s)	Tqo'(s)	Ta(ms)	SE(1 2)	SE(1 0)	H(W s/VA)	D(p.u)
Gen	0,009	0,08	0,14640	0,0765	0,7168	0,1464	0,0795	0,078	0,026	185	30	185	30	1075,14	57,43	906,045	55,24	21,7	0,2737	0,5405	0,00054	0,5
MS1	0,0994	2,746	0,702	0,438	1,569	0,702	0,049	0,256	0,103	40,07	22,068	40,07	22,068	2,5	141,667	0,896	0,207	6,83	0,358	0,052	1,359	0,16
MS2	0,1579	3,571	0,179	0,161	2,359	0,179	0,126	0,141	0,1	102,5	132,5	102,5	131,5	551,85	103,7	1,353	0,188	2,37	0,722	0,034	0,844	0,175
MS3	0,0996	2,675	0,132	0,096	0,886	0,132	0,197	0,152	0,101	102,4	61,905	102,4	61,905	381,57	123,68	0,689	0,039	4,04	0,255	0,034	0,338	0,101

a) Arranque del Motor de Inducción MI2

Esta situación se logra cuando el generador provee de energía a los motores de inducción MI3, MI4, MI5, MI6 más iluminación, y se arranca el MI2. Se presentan a continuación oscilogramas de velocidad, figuras 2 y 3, voltaje y corriente rectificadas que se obtuvieron en el instante de arranque del MI2.

En la figura 4 se encuentra el oscilograma de la variación del voltaje en los terminales fase-neutro del generador.



Esc: Volt=0.1V/div, Tiempo=5s/div

Figura 2 Velocidad del Rotor del Generador del Grupo Diesel

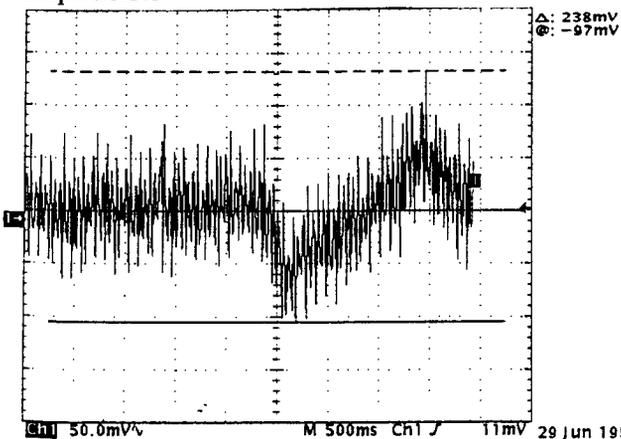


Figura 3 Velocidad del Rotor del Generador del Grupo Diesel durante el Arranque del MI2.

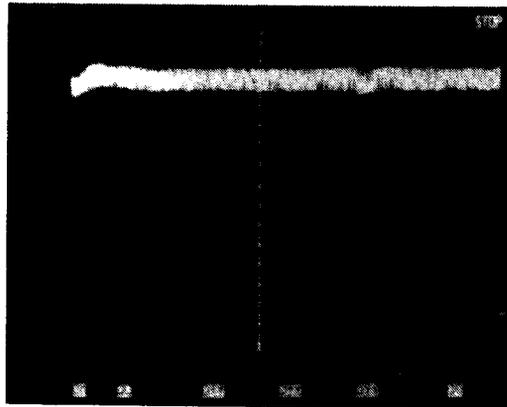
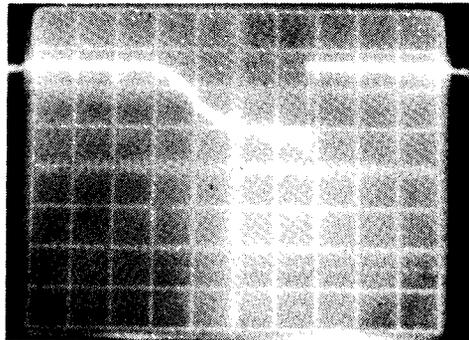


Figura 4 Voltaje Generado Fase-Neutro

En la figura 5 se muestra el oscilograma de la variación de la corriente en función del tiempo de una de las fases.



Esc: Volt=0.1V/div, Tiempo=0.5s/div, Rel.Transf=600/5

Figura 5 Corriente de Armadura en una Fase del Generador del Grupo Diesel

De los gráficos presentados se observa que en el arranque del motor de inducción MI2: a) la velocidad del rotor sufre un pequeño decrecimiento, recuperándose inmediatamente debido a la actuación del regulador de velocidad, b) el voltaje a los terminales del generador baja en el instante del arranque desde 122.8 VRMS a 92 VRMS recuperándose debido a la rápida actuación del regulador de voltaje, c) la corriente en el instante del transitorio del arranque se incrementa desde un valor de estado estable de 33.3 ARMS a su valor máximo de 180 ARMS y su duración es de 1.5 segundos.

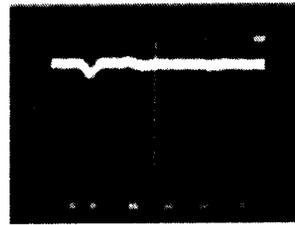
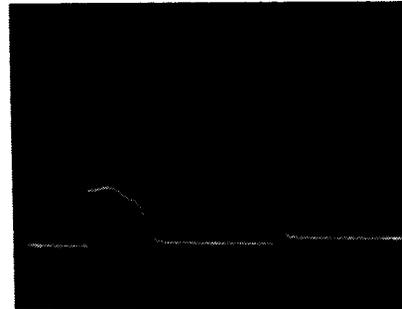


Figura 8 Voltaje Fase-Neutro del Generador del Grupo Diesel



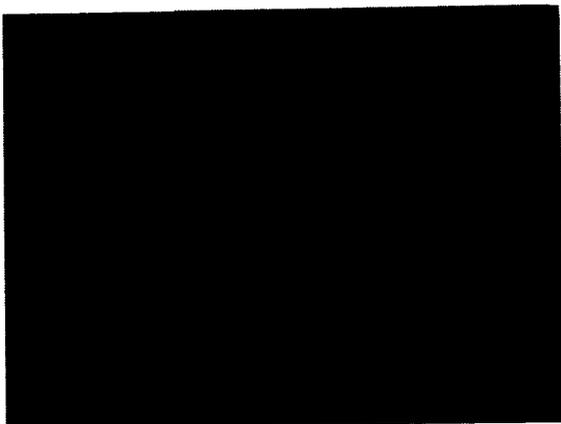
Esc: Volt=0.2V/div, Tiempo=1s/div  
Rel.Transf=600/5

Figura 9 Corriente Armadura en una Fase del Generador del Grupo Diesel

b) Arranque del Motor de Inducción MI1

Al provocar esta condición el generador alimenta a los motores de inducción MI2, MI3, MI4, MI5, MI6 más iluminación, obteniéndose las ondas de velocidad, voltaje y frecuencia rectificadas.

En las figuras 6 y 7 se encuentran una fotografía y un gráfico planteado por un osciloscopio de la variación de la velocidad del rotor del grupo de emergencia.



Esc: Volt=0.1V/div, Tiempo=5s/div

Figura 6 Velocidad del Rotor del Generador del Grupo Diesel

Observando los gráficos se tiene que en el momento del arranque del motor inducción MI1: a) la velocidad del rotor decrece en ese instante logrando el regulador de velocidad controlar este incremento de carga, b) el voltaje a los terminales del grupo de emergencia, ante la presencia de esta carga sufre un descenso desde 122.8 VRMS a 85.4 VRMS, lo que es sentido por el regulador de voltaje para que el voltaje generado sea estabilizado rápidamente, c) la corriente en el instante del arranque del motor sufre un incremento desde estado estable de 71.1 ARMS y su valor máximo de 264 ARMS con una duración de 2 s y un pico adicional con una duración de 0.3 s correspondientes al arranque Y-Δ de la máquina, observándose que el transitorio más largo afecta la velocidad del rotor y el voltaje del generador.

c) Arranque Simultáneo de los Motores de Inducción MI1, MI2

El arranque de los dos motores se lo realiza cuando los motores de inducción MI3, MI4, MI5, MI6 más iluminación son alimentados por el generador. En las figuras 10 y 11 se muestran una fotografía y un gráfico planteado por un osciloscopio de la variación de la velocidad del rotor del grupo de emergencia.

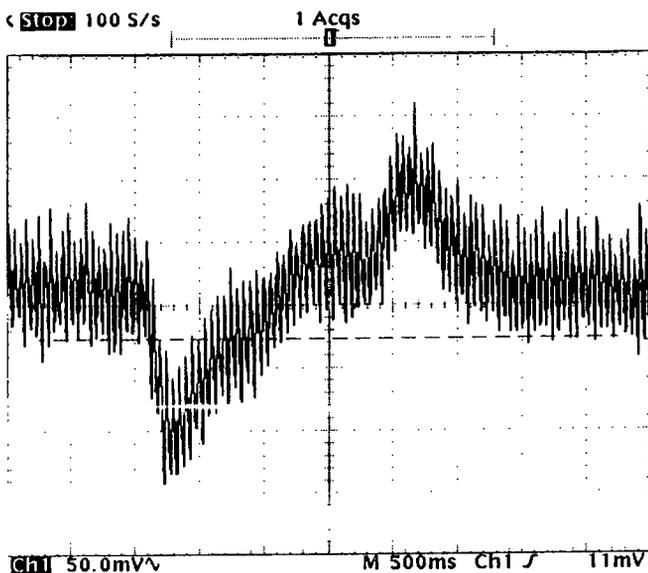
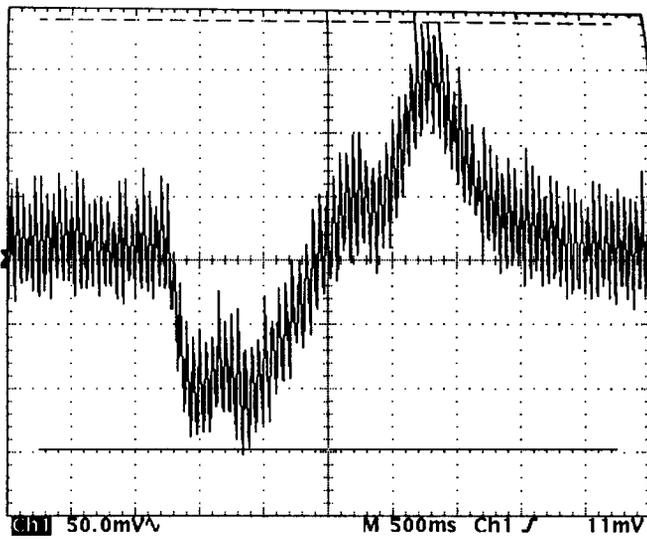


Figura 7 Velocidad del Rotor del Generador del Grupo Diesel en el Instante del Arranque de MI1.



Esc: Volt=0.1V/div, Tiempo=5s/div

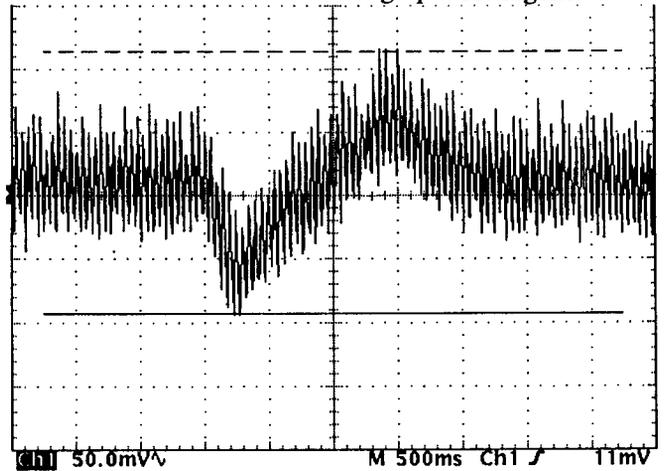
Figuras 10 Velocidad del Rotor del Generador



Figuras 11 Velocidad del Rotor del Generador del Grupo Diesel cuando Arrancan MI1 y MI2.

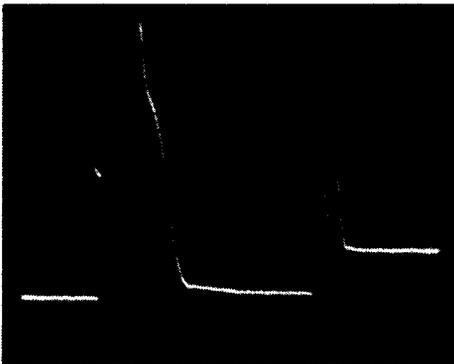
oscilogramas de velocidad, voltaje y frecuencia rectificadas obtenidos.

En la figura 14 se encuentra ploteada la onda de variación de la frecuencia rotor del grupo electrógeno.



Figuras 14 Velocidad del Rotor del Generador del Grupo Diesel durante el Arranque de MS1

Figura 12 Voltaje Fase-Neutro del Generador del Grupo Diesel



Esc: Volt=50 mV/div, Tiempo=1s/div, Rel.Transf=600/5

Figura 13 Corriente de Armadura de Fase del Generador del Grupo Diesel

En los gráficos se observa que en el arranque simultáneo de los dos motores de inducción MI1, MI2: a) la velocidad del rotor decrece en mayor proporción que las dos anteriores, pero por la actuación del regulador de velocidad, ésta logra recuperarse, b) el voltaje en este instante desciende de 122.8 VRMS a 76 VRMS, por la intervención del regulador de voltaje este se restablece, c) la corriente se incrementa de un valor de estado estable de 33.8 ARMS a aproximadamente 900 ARMS, el tiempo de duración del transitorio es de 6 segundos, tiempo en el cual se observa la actuación de los contactores de arranque.

d) Arranque del Motor Síncrono MS1

Para el arranque de MS1 los motores de inducción MI2, MI3, MI4, MI5, MI6 más iluminación son alimentados por el generador. Se indica los

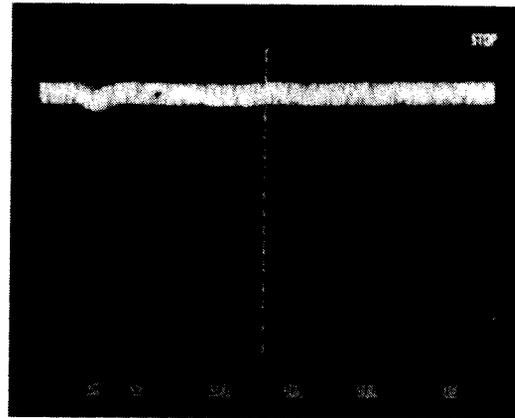
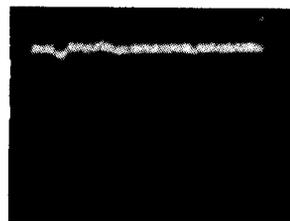


Figura 15 Voltaje Fase-Neutro



Esc: Volt=50 mV/div, Tiempo=1s/div, Rel.Transf=600/5

Figura 16 Corriente de Armadura de una Fase en Función del Tiempo del Grupo Electrónico

De las figuras se extrae: a) la velocidad del rotor disminuye frente a la presencia de la carga motor síncrono MS1, pero debido a que el regulador de velocidad actúa, esta variable se estabiliza, b) el voltaje frente al arranque del motor, éste decrece desde 122.0 VRMS a 107.5 VRMS, luego de la actuación del regulador de voltaje éste se restablece, c) la corriente sufre un incremento desde un valor de 70 ARMS a 150 ARMS, corriente que corresponde al arranque de este motor como de inducción durante un

tiempo de 1.2 segundos, adicionalmente se observa que al pasar a funcionamiento como motor sincrónico la variación en la corriente no es significativa.

#### 4. PERDIDAS DE CARGA ELECTRICA

Se entiende por pérdida o rechazo de carga eléctrica cuando un generador de energía eléctrica estando funcionando con carga sufre repentinamente una desconexión de la carga alimentada, de tal forma que, el funcionamiento del generador es en vacío. De las pérdidas o rechazos de carga que se realizan experimentalmente se obtienen oscilogramas de velocidad del rotor, voltaje en los terminales y corriente de carga del generador.

a) Rechazo de carga estática y motores de inducción (MI1,MI2,MI3,MI4,MI5,MI6)

Previo al rechazo de la carga eléctrica, el generador alimenta a la carga estática compuesta por iluminación (incandescente y fluorescente) y los motores de inducción MI1, MI2, MI3, MI4, MI5, MI6. Los oscilogramas de velocidad, voltaje y corriente rectificadas obtenidos son:

En las figura 17 y 18 se detallan la variación de la frecuencia del generador en función del tiempo.

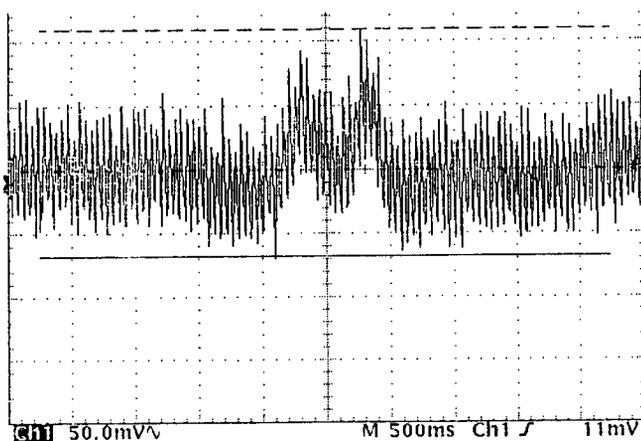
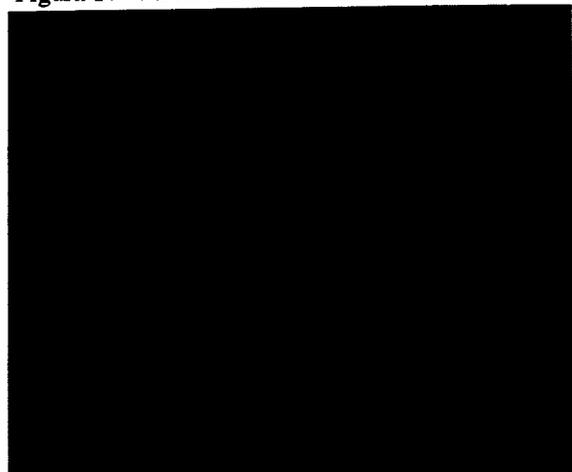


Figura 17 Velocidad del Rotor del Generador



Esc: Volt=0.1V/div, Tiempo=5s/div

Figura 18 Velocidad del Rotor del Generador del Grupo Diesel

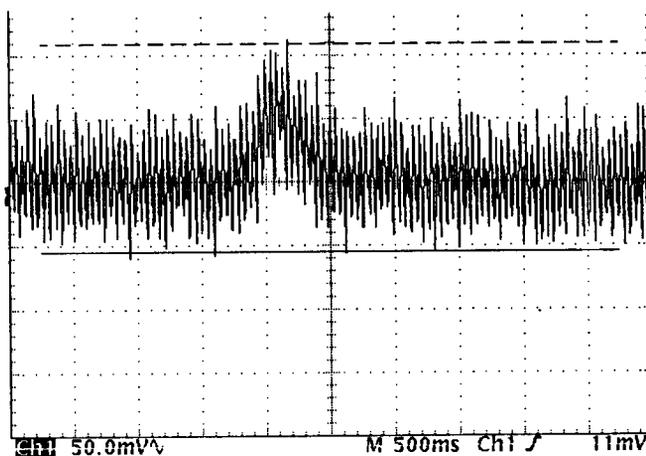


Figura 19 Velocidad del Rotor del Generador del Grupo Diesel durante el Rechazo de Carga Estática y Dinámica.

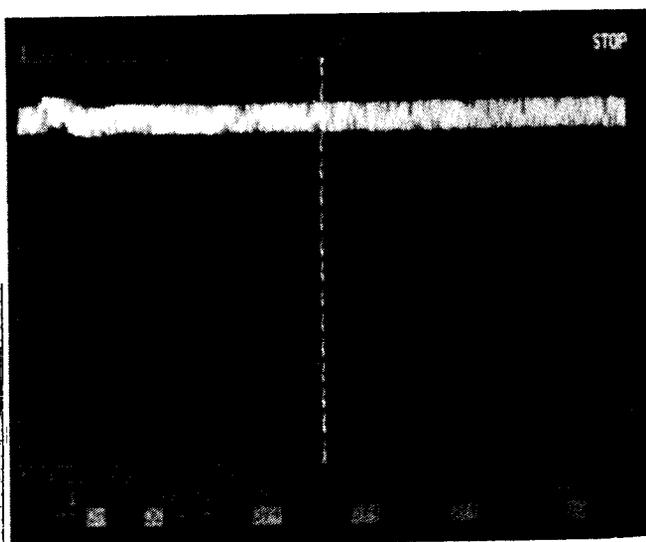
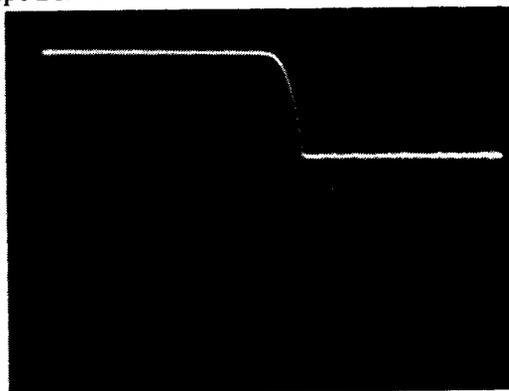


Figura 20 Voltaje Fase-Neutro del Generador del Grupo Diesel



Esc: Volt=50 mV/div, Tiempo=1s/div, Rel.Transf=600/5

Figura 21 Corriente de Armadura de una Fase del Generador del Grupo Diesel

De los gráficos presentados se observa que la velocidad del rotor del grupo de emergencia se mantiene estable, sufriendo un ligero incremento en el instante del rechazo para luego estabilizarse por la actuación del regulador de velocidad, b) el voltaje en el instante del rechazo se incrementa desde un valor de

estado estable de 122 VRMS a 125,5 VRMS restableciéndose inmediatamente el voltaje generado por la intervención del regulador de voltaje, c) la corriente en este instante decrece desde estado estable de 107 ARMS a condición de vacío.

b) Rechazo de carga estática y motores de inducción y sincrónicos

Antes de producirse la desconexión, el generador alimenta a la carga estática compuesta por iluminación (incandescente y fluorescente) y motores de inducción MI1, MI2, MI3, MI4, MI5, MI6 y sincrónicos MS1, MS2, MS2. Se obtienen las formas de ondas de velocidad, voltaje y corriente.

En la Figura 22 se encuentra la variación de la frecuencia del generador en función del tiempo.

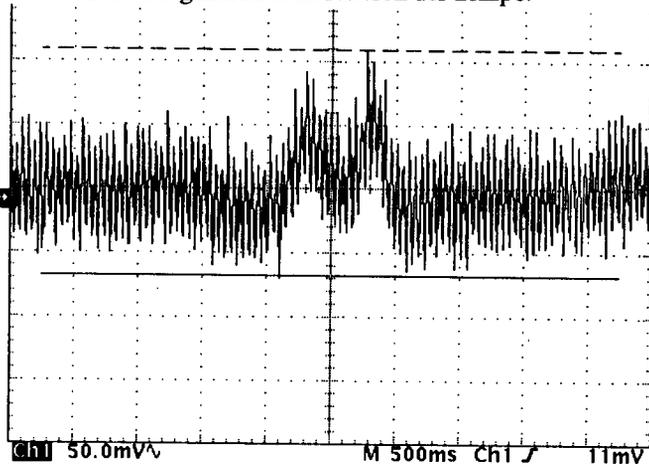


Figura 22 Velocidad del Rotor del Generador del Grupo Diesel durante el Rechazo de Carga Estática y Dinámica

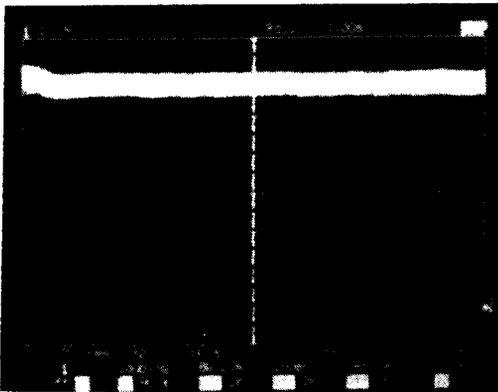
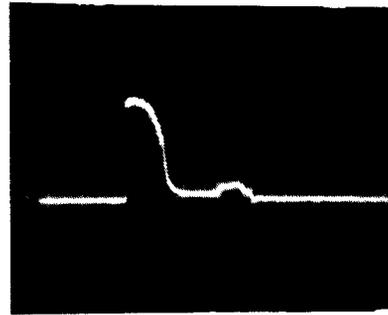


Figura 23 Voltaje Fase-Neutro del Generador del Grupo Diesel



Esc: Volt=50 mV/div, Tiempo=1s/div, Rel.Transf=600/5

Figura 24 Corriente de Armadura de Fase del Generador del Grupo Diesel

Observando los gráficos se encuentra que en el rechazo de carga estática y dinámica: a) la velocidad del rotor de igual forma que la condición anterior se mantiene estable sufriendo un pequeño incremento en este instante, el cual logra ser estabilizado por la actuación del regulador de velocidad, b) el voltaje se incrementa por la desconexión, desde 122 VRMS y 126.5 VRMS estabilizando inmediatamente por la actuación del regulador de voltaje, c) en cuanto a la corriente esta decrece de su valor en estado estable de 112 ARMS al funcionamiento en vacío.

Las pérdidas de carga eléctrica que se realizan experimentalmente son en base de considerar con la condición de carga establecida se puede observar ligeras variaciones. Los datos de los valores obtenidos son aproximados debido a la rapidez del fenómeno transitorio.

5. SIMULACION DINAMICA

Una vez corrido el flujo de potencia del sistema eléctrico de la Facultad de Ingeniería Eléctrica se simula el rechazo a  $t=0.2$  s en la barra que corresponde al tablero de transferencia, obteniéndose los siguientes resultados:

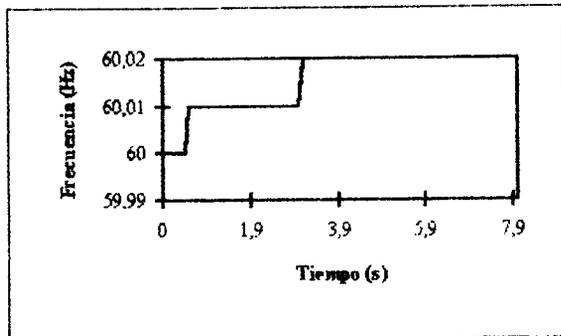


Figura 25 Velocidad del Generador Durante Rechazo de Carga Estática y Motores de Inducción ( MI1 MI2, MI3, MI4, MI5, MI6).

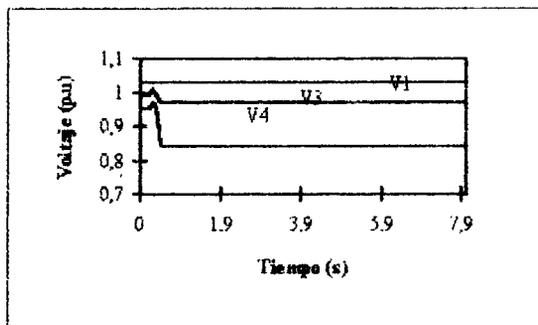


Figura 26 Voltaje en Barras: V1 Generación, V3 Tablero de Distribución, V4 Laboratorio de Máquinas Eléctricas Durante Rechazo de Carga Estática y Motores de Inducción (MI1, MI2, MI3, MI4, MI5, MI6)

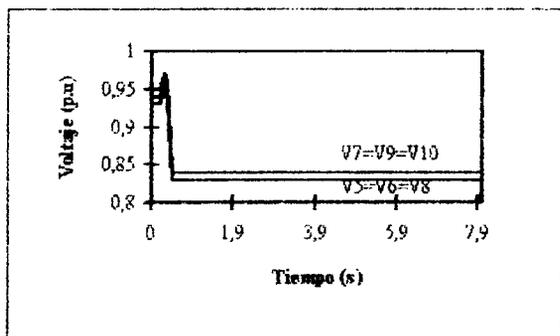


Figura 27 Voltaje en Barras de Motores de Inducción: V5 MI1, V6 MI2, V7 MI4, V8 MI5, V9 MI6, V10 MI3 Durante Rechazo de Carga Estática y Motores de Inducción ( MI1, MI2, MI3, MI4, MI5, MI6).

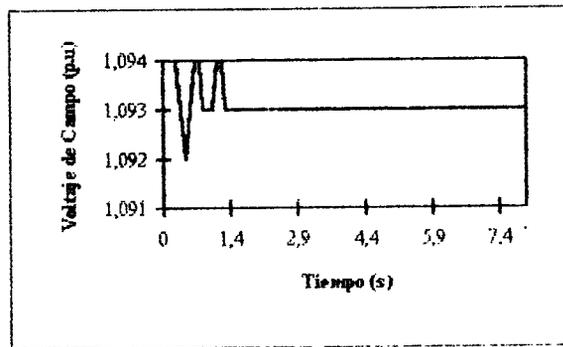


Figura 28 Voltaje del Campo del Generador Durante Rechazo de Carga Estática y Motores de Inducción (MI1, MI2, MI3, MI4, MI5, MI6)

El voltaje de la barra de generación no incrementa su valor por la actuación del regulador de voltaje, que lo hace inmediatamente, como se observa en las figuras anteriores, en cambio, la variación del voltaje de campo de la exitatriz lo hace desde 1.094 a 1.093 durante un tiempo de 0.47 s. Durante este rechazo conseguido con la mayor carga, se observa que: a) por la actuación del regulador de velocidad y la fricción de las partes mecánicas, la frecuencia se estabiliza en un tiempo de  $t=0.3$  s sin que se produzca sobrevoluntad, b) el voltaje al producirse el rechazo de la carga, el sistema queda en vacío por lo que el voltaje de la barra de generación se mantiene en 1.03 p.u., en cambio el voltaje de las barras V2 se estabiliza en 0.96 p.u. y el de la V4 se estabiliza en 0.95 p.u.

De los resultados obtenidos experimentalmente para el rechazo de carga y los obtenidos en simulación en cuanto a velocidad son semejantes, en cuanto al voltaje obtenido se observa que existe la misma tendencia.

6. SIMULACION DE CORTOCIRCUITOS

Se analizarán específicamente cortocircuitos trifásicos en las barras donde se encuentra los motores de inducción de mayor potencia (V5, V6).

Cortocircuito en Barras Sin Apertura de Línea

**Análisis del comportamiento de la frecuencia:** La falla trifásica se produce a  $t=2$ s en la barra de alimentación de los motores MI2, MI1. En el instante que el cortocircuito se presenta la potencia eléctrica es mucho mayor que la potencia mecánica que entrega la máquina motriz, como consecuencia la potencia de aceleración llega a ser negativa y por ende la frecuencia disminuye.

**Análisis del comportamiento del voltaje:** Se observa que al producirse el cortocircuito existe un descenso de voltaje desde sus valores iniciales hasta un valor de 0.35 p.u. El voltaje en la barra que se produjo el cortocircuito es de 0 p.u. durante el intervalo de falla.

**Análisis del comportamiento del voltaje de campo:** En el transcurso de la falla trifásica la corriente de armadura del generador es alta, lo que ocasiona que la

corriente de campo se incrementa, pero debido a que la corriente de cortocircuito se estabiliza, la corriente del campo también lo hace como se puede observar en las figuras.

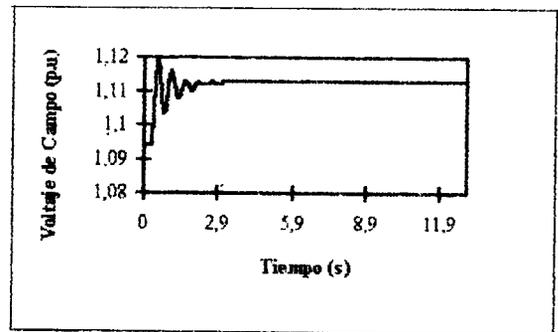
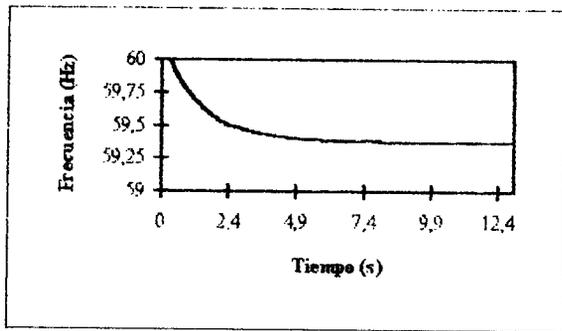


Figura 29 Frecuencia del Generador Cuando se Produce un Cortocircuito 3φ en Barra 5 sin Despeje en la Línea.

Figura 32 Voltaje de Campo del Generador cuando se produce un Cortocircuito 3φ en Barra 5 sin Despeje en la Línea.

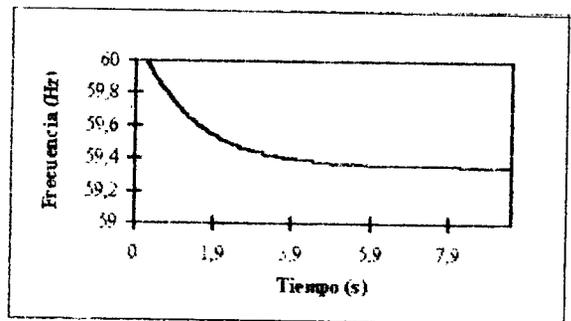
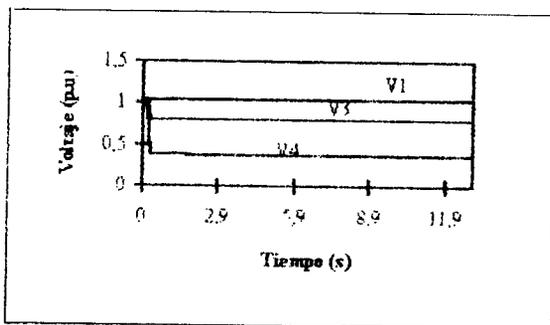


Figura 30 Voltaje en barras: V1 Generación, V3 Tablero de Distribución, V4 Laboratorio de Máquinas Eléctricas, Cuando se Produce un Cortocircuito 3φ en Barra 5 sin Despeje en la Línea.

Figura 33 Frecuencia del Generador Cuando se Produce un Cortocircuito 3φ en Barra 6 sin Despeje de la Línea.

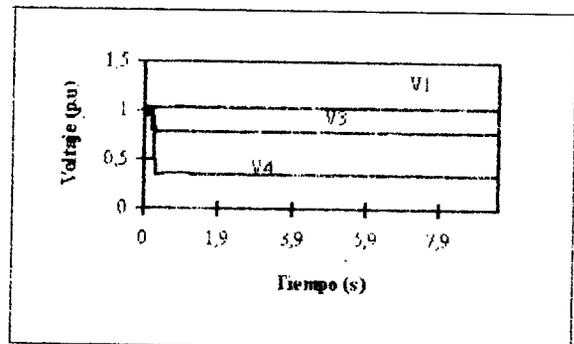
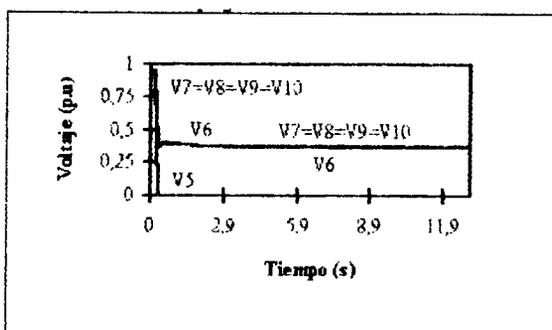


Figura 31 Voltaje en Terminales de Motores de Inducción Barras: V5 MI2, V6 MI1, V7 MI4, V8 MI5, V9 MI6, V10 MI3, Cuando se Produce un Cortocircuito 3φ en Barra 5 sin Despeje en la Línea.

Figura 34 Voltaje en Barras: V1 Generación, V3 Tablero de Distribución, V4 Laboratorio de Máquinas Eléctricas, Cuando se Produce un Cortocircuito 3φ en Barra 6 sin Despeje de la Línea.

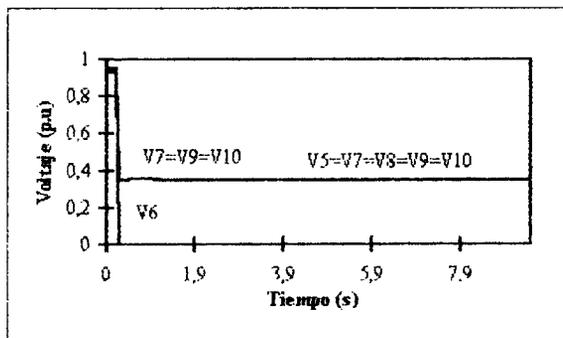


Figura 35 Voltaje en terminales de Motores de Inducción Barras: V5 MI2, V6 MI1, V7 MI4, V8 MI5, V9 MI6, V10 MI3, Cuando se Produce un Cortocircuito 3 $\phi$  en Barra 6 sin Despeje de la Línea.

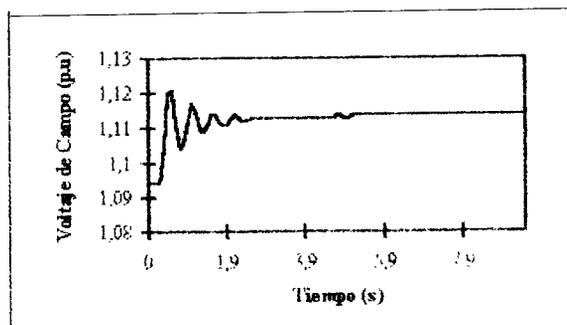


Figura 36 Voltaje de Campo del Generador Cuando se Produce un Cortocircuito 3 $\phi$  en Barra 6 sin Despeje de la Línea.

#### Cortocircuito en Barras con Apertura de Línea

Análisis del comportamiento de la frecuencia: En los primeros instantes de ocurrir la falla la frecuencia cae hasta un valor que depende de la importancia (magnitud de la carga conectada) de la barra y de la impedancia de cortocircuito en el punto de interés. Puesto que la falla se despeja después de un cierto intervalo de tiempo de ocurrir la falla, la frecuencia baja en todo ese intervalo, cuando desaparece la falla desconectando la línea la frecuencia del generador tiende a subir por la acción del regulador de velocidad.

El tiempo que demora el sistema en alcanzar la frecuencia nominal esta en el orden de los 5 segundos.

Cualquiera que fuese la barra en cortocircuito la frecuencia nunca baja más del 0.27% del valor nominal de manera que es relativamente sencillo para el regulador de velocidad llevar al sistema a la frecuencia de régimen.

Análisis del comportamiento del voltaje: Los voltajes en la barra 3 y en la barra 4 tienen la misma variación o la misma tendencia de variación, como se observa en las figuras. El transitorio consiste en una caída brusca de voltaje permaneciendo en un límite mínimo la mayor parte del tiempo del transitorio para luego ascender hasta un valor superior al que tenían antes de la falla, esto ocurre en un intervalo de tiempo muy corto para finalmente estabilizar su valor en un nivel constante, luego del despeje de la falla. El valor de

voltaje que se consigue después de la falla es algo menor que el que se tenía antes de la falla. Este comportamiento se explica si se considera que ahora el sistema tiene otra configuración y el nuevo equilibrio arroja estos voltajes.

El voltaje en todas las barras del sistema baja en el instante de falla para, luego de un corto periodo de oscilación, estabilizarse en un valor fijo luego de que ha sido despejado el cortocircuito.

Hay que mencionar que el intervalo de tiempo hasta alcanzar un nuevo estado estable en voltaje es mucho menor que el tiempo que le toma al sistema alcanzar nuevamente la frecuencia normal.

Análisis del comportamiento del voltaje de campo: Ya se ha mencionado en el análisis del caso de falla sin apertura de la línea las razones por las cuales la corriente de campo sufre variaciones en el instante de producirse el cortocircuito. Esto se puede aplicar también a este caso de falla, como se muestra en las figuras que relacionan a la corriente de campo con el tiempo en el instante del cortocircuito de las distintas barras. La principal diferencia radica en el tiempo de estabilización del voltaje, que llega a ser menor en el caso de despeje de la falla por apertura de la línea.

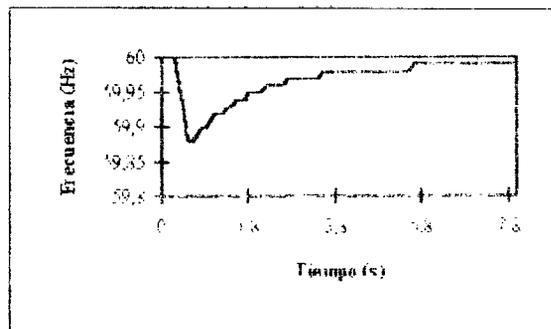


Figura 37 Frecuencia del Generador Cuando se Produce un Cortocircuito 3 $\phi$  en Barra 5 con Despeje de la Línea.

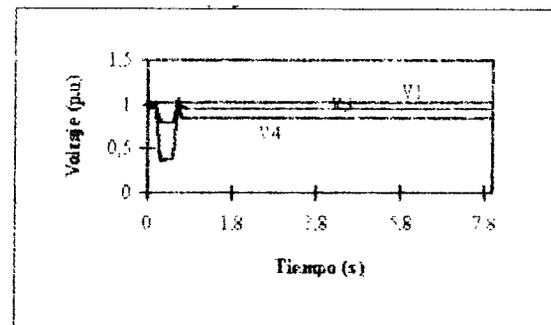


Figura 38 Voltaje en barras: V1 Generación, V3 Tablero de Distribución, V4 Laboratorio de Máquinas Eléctricas, Cuando se Produce un Cortocircuito 3 $\phi$  en Barra 5 con Despeje de la Línea.

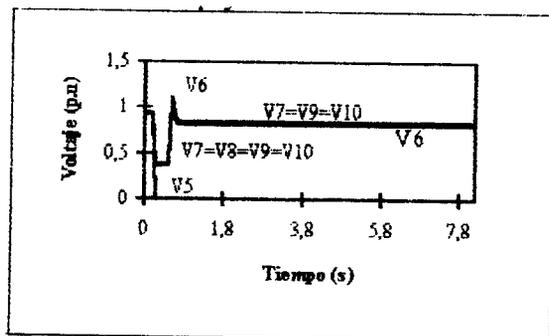


Figura 39 Voltaje en Terminales de Motores de Inducción Barras: V5 MI2, V6 MI1, V7 MI4, V8 MI5, V9 MI6, V10 MI3, Cuando se Produce un Cortocircuito 3 $\phi$  en Barra 5 con Despeje de la Línea.

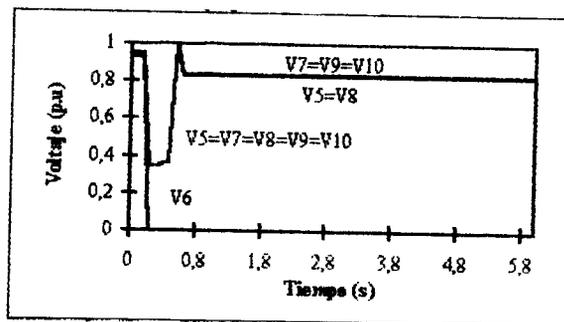


Figura 43 Voltaje en terminales de motores de inducción barras: V5 MI2, V6 MI1, V7 MI4, V8 MI5, V9 MI6, V10 MI3, cuando se produce un Cortocircuito 3 $\phi$  (en Barra 6 con despeje de la línea.

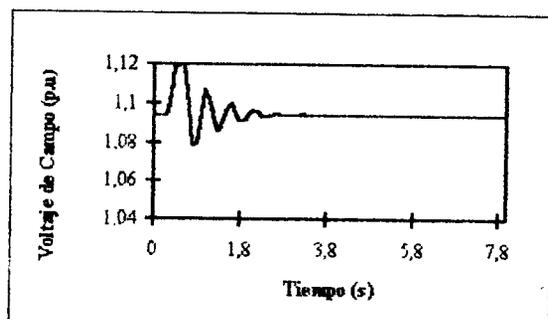


Figura 40 Voltaje de Campo del Generador cuando se produce un Cortocircuito 3 $\phi$  en Barra 5 con Despeje de la Línea.

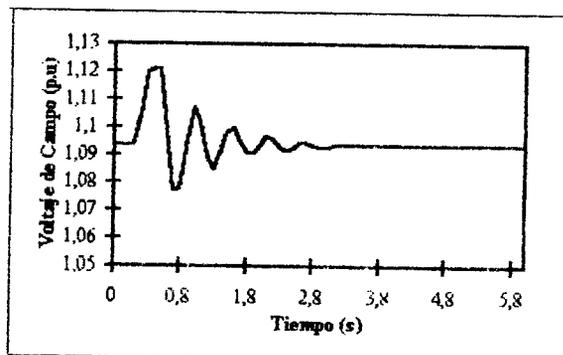


Figura 44 Voltaje de Campo del Generador Cuando se Produce un Cortocircuito 3 $\phi$  en Barra 6 con Despeje de la Línea

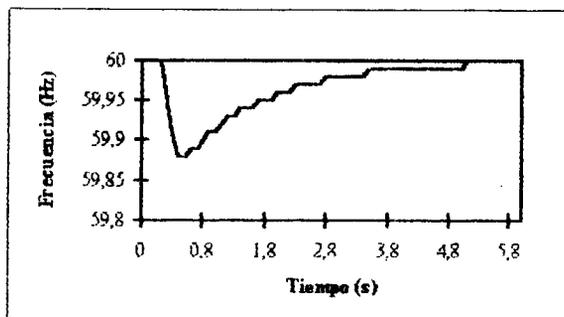


Figura 41 Frecuencia del Generador cuando se produce un Cortocircuito 3 $\phi$  en Barra 6 con Despeje de la Línea.

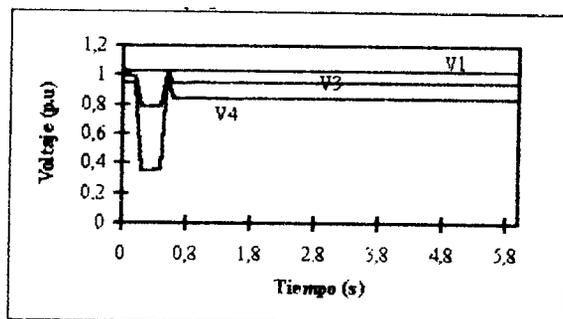


Figura 42 Voltaje en Barras: V1 Generación, V3 Tablero de Distribución, V4 Laboratorio de Máquinas Eléctricas, Cuando se Produce un Cortocircuito 3 $\phi$  en Barra 6 con Despeje de la Línea

## 7. CONCLUSIONES

Del conjunto de pruebas experimentales realizadas en los terminales del grupo de emergencia en cuanto a voltaje fase-neutro se observa que cuando se produce el ingreso de una carga, el voltaje decrece siendo uno de las mayores descensos cuando arrancan los motores de inducción de mayor potencia simultáneamente, y el descenso es menor cuando se arrancan los motores sincrónicos, pero debido a la actuación del regulador de voltaje este se recupera rápidamente.

Los rechazos de carga eléctrica influyen en el aumento del voltaje fase-neutro en el momento de la desconexión de la carga, siendo este fenómeno apreciable cuando el rechazo se realiza con toda la carga estática y dinámica disponible en el momento de las pruebas, se observa además que el voltaje se estabiliza por la actuación rápida del regulador de voltaje.

La velocidad del rotor del grupo de emergencia desciende ante el ingreso de carga especialmente cuando se produce el arranque simultáneo de las máquinas de inducción de mayor potencia, a pesar de que en el arranque individual de cada una de estas se puede observar variaciones, en cambio que en el arranque conjunto de los motores de inducción de menor potencia esta variación es imperceptible. Se observa que la recuperación de la velocidad en

cualquiera de las condiciones es rápida debida a la actuación del regulador de velocidad.

Al producirse rechazos de carga eléctrica, la frecuencia del generador sufre un incremento observándose un mayor variación cuando el rechazo es realizado con toda la carga dinámica y con la carga estática disponible en el momento de realizar las pruebas, en cambio cuando el rechazo de carga se produce cuando todos los motores de inducción de menor potencia más carga estática sufre una ligera variación de la velocidad del rotor. Se observa que la velocidad se estabiliza porque el regulador de velocidad actúa rápidamente.

En cuanto a la corriente de carga se observa que existe picos máximos cuando se realizan los arranque de los motores de inducción en especial de los motores de gran potencia, en los cuales se observa además la influencia del sistema de arranque Y- $\Delta$  y la corriente en el momento del rechazo de carga decrece de su valor de estado estable a condición en vacío.

Al transferir carga al generador de emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica desde una condición de vacío a una condición con carga, se provoca que el pico del transitorio sea elevado de acuerdo a la condición de carga que se desea transferir, especialmente cuando es del tipo dinámica.

Los resultados arrojados por simulación del sistema eléctrico de la Facultad de Ingeniería Eléctrica en cuanto a rechazo de carga estática y dinámica son satisfactorios por cuanto las variables de frecuencia y voltaje poseen el mismo comportamiento que los datos experimentales.

Del análisis de cortocircuitos se observa que al producirse cualquier falla en las barras de los motores de inducción el voltaje del generador en bornes no sufre ninguna variación. Esto se comprueba tanto experimentalmente como mediante el programa de simulación. De lo anterior se concluye que el generador puede soportar la potencia de cortocircuito que se desarrolla en cualquier barra bajo las condiciones analizadas: apertura de la línea, reconexión de la línea en una barra a la vez.

En vista de que la carga del edificio antiguo de la Facultad de Ingeniería Eléctrica no ocasionan grandes perturbaciones, el grupo de emergencia no ha sufrido deterioro significativo en su vida útil.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] "Load Representation in Power System Stability Studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-101, No 4, April 1982.
- [2] Armas Brito Galo, "Características de Frecuencia y Voltaje de para Estudios de Sistemas Eléctricos de Potencia" Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1995.

- [3] "Determining Load Characteristics for Transient Performances, Volume 2: Testing and Modeling of Load Component", EPRI EL-849, Mayo 1979.
- [4] Farinango Cisneros Lourdes, "Estudio dinámico del Grupo de Emergencia a Diesel de la Facultad de Ingeniería Eléctrica", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Agosto 1996.
- [5] Huang, Chin-Chiang and Wen-Chen, "Manual of Power System Transient Stability Program (PC Version)", The University of Texas at Arlington, Junio 1991.
- [6] Pacheco Toscano Adriana Janet, "Estudio del Efecto de la Carga en el Comportamiento Dinámico del Grupo de Emergencia a Diesel de la Facultad de Ingeniería Eléctrica", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Diciembre 1996.

## BIOGRAFIAS

### Adriana Pacheco Toscano



Nació en Quito, el 22 de Mayo de 1969. Sus estudios secundarios los realizó en el Colegio Manuela Cañizares. Recibió el título de Ingeniera Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional en Diciembre de 1996. Trabaja en el Departamento de Investigación y Desarrollo de la compañía Ecuatran S.A.

### Jesús Játiva Ibarra

Recibió los títulos de Ingeniero Eléctrico (1981) de la Escuela Politécnica Nacional, Master of Science in Electrical Engineering (1988) y Doctor de Philosophy (1991) de la University of Texas at Arlington (UTA).

Sus estudios de postgrado los realizó con el auspicio de Becas Fulbright y OEA. Trabajó como Asistente de Investigación y de Cátedra, y Miembro Postdoctoral en el Energy Systems Research Center de UTA.

El Dr. Játiva es coautor del libro "Analysis and Control System Techniques for Electric Power System" editado por Academic Press Inc. en 1991 y ha escrito para la PES del IEEE. Fue asesor del SSC del INECEL. Ha realizado cursos de postgrado en Conservación de Energía en la Industria, en Suecia en 1995, y de Inteligencia Artificial Aplicada a Sistemas Eléctricos de Potencia, en Colombia en 1996. Actualmente es Profesor Principal de la FIE y Jefe de Departamento de Potencia.