

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO DEL SISTEMA  
DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE LA UCV ANTE LA  
OPERACIÓN DE BANCO DE CONDENSADORES**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Rafael José Malpica Borges  
para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas 2011

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO DEL SISTEMA  
DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE LA UCV ANTE LA  
OPERACIÓN DE BANCO DE CONDENSADORES**

Tutor Académico: Ing. Nerio Ojeda

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Rafael José Malpica Borges  
para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas 2011

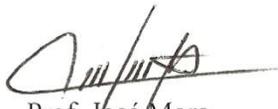
## CONSTANCIA DE APROBACIÓN

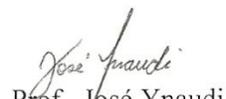
Caracas, 09 de noviembre de 2011

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Rafael J. Malpica B., titulado:

**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE LA UCV ANTE LA OPERACIÓN DE BANCO DE CONDENSADORES”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

  
Prof. José Mora  
Jurado

  
Prof. José Ynaudi  
Jurado

  
Prof. Nerio Ojeda  
Prof. Guía

## CONTENIDO

<i>CONSTANCIA DE APROBACIÓN</i> .....	<i>iii</i>
<i>INDICE GENERAL</i> .....	<i>iv</i>
<i>LISTA DE TABLAS</i> .....	<i>v</i>
<i>LISTA DE FIGURAS Y GRÁFICOS</i> .....	<i>vi</i>
<i>LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS</i> .....	<i>vii</i>
<i>RESUMEN</i> .....	<i>viii</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i> .....	<i>1</i>
<i>CAPÍTULO I</i> .....	<i>3</i>
1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EN ESTUDIO .....	3
1.1. Presentación del problema .....	3
1.2. Metodología.....	4
1.3. Objetivos .....	5
1.4. Red de Distribución (CUC).....	6
1.4.1. Descripción de los elementos .....	7
1.4.2. Transitorios debido a la energización de los bancos de condensadores.	10
1.5. Sensibilidad de equipos asociados a la red.....	12
<i>CAPÍTULO II</i> .....	<i>16</i>
2. MODELO.....	16
2.1. Escenarios de Simulación.....	17
2.2. Resultados.....	18
<i>CAPÍTULO III</i> .....	<i>23</i>
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	23
<i>CONCLUSIONES</i> .....	<i>25</i>
<i>RECOMENDACIONES</i> .....	<i>26</i>
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> .....	<i>27</i>
<i>BIBLIOGRAFÍAS</i> .....	<i>29</i>
<i>ANEXOS</i> .....	<i>31</i>

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1 Alimentadores, circuitos y dependencias.....	7
Tabla 2. Duración y magnitud de eventos electromagnéticos.....	14
Tabla 3. Duración y frecuencia de las perturbaciones ocasionadas por los bancos en el alimentador A4y A5-C2 .....	22
Tabla 4. Duración y frecuencia de las perturbaciones ocasionadas .....	74

## LISTA DE FIGURAS Y GRÁFICOS

Figura 1. Diagrama Unifilar Red de Distribución Interna de la CUC .....	6
Figura 2. Meta típica del diseño de fabricantes (IEEE 1100) .....	13
Figura 3. Alimentador A4 y A5-C2. ....	18
Gráfico 1. Perturbación en la Barra Principal .....	19
Gráfico 2. Perturbación en punto de transformación H. Clínico .....	20
Gráfico 3. Perturbación en punto de transformación H. Clínico .....	20
Gráfico 4. Perturbación en punto de transformación H. Clínico .....	21
Gráfico 5. Perturbación en punto de transformación H. Clínico .....	21
Gráfico 6. Perturbación en punto de transformación Dec. Medicina.....	22
Anexo A. Alimentador A5-C1 .....	31
Anexo B. Alimentador A6 .....	37
Anexo C. Alimentador A7 .....	43
Anexo D. Alimentador A8 .....	51
Anexo E. Resultados obtenidos mediante mediciones físicas (Antropología) .....	81
Anexo F. Resultados obtenidos mediante mediciones físicas (Estadística).....	84

## **LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS**

kV: Kilovolt

kVA: Kilovolt-Amper

m: Metro

S/E: Subestación

TAP: Cambiador de toma

CUC: Ciudad Universitaria de Caracas

UCV: Universidad Central de Venezuela

COPRED: Consejo de Preservación y Desarrollo

EMTP: ElectroMagnetic Transient Program

Malpica B., Rafael J.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TRANSITORIO DEL SISTEMA DE  
DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE LA UCV ANTE LA OPERACIÓN DE  
BANCO DE CONDENSADORES.

Prof. Guía Ing. Nerio Ojeda. Tesis. Caracas U.C.V. Facultad de Ingeniería.  
Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Mención: Potencia.  
Caracas.

**Palabras claves:** Banco de Condensadores; Compensación Reactiva; Calidad de  
Energía; Efectos Transitorios; DIGSilent Power Factory; Red CUC. 2011. 28 h. +  
anexos

**Resumen.** La Universidad Central de Venezuela cuenta con dos sistemas de distribución eléctrica los cuales son alimentados por dos (2) S/E, las mismas proveen de energía eléctrica a todas las dependencias en dos (2) posibles niveles de tensión (4,8kV y 12,47kV). [9]. La S/E Los Chaguaramos alimenta la red de 4,8kV y la misma es la que permite a la mayoría de las dependencias funcionar. Para mantener la calidad de servicio a lo largo del día es necesario que entren en funcionamiento unos bancos de capacitores, los mismos permiten elevar el nivel de tensión y de potencia para así poder tener una calidad de servicio óptima en la red CUC. La incorporación de estos bancos también trae como consecuencia ciertas perturbaciones que se transmiten por la red y llegan a la dependencia los cuales podrían afectar de forma significativa los equipos conectados a la red al momento de esta maniobra, es por ello que se decidió estudiar toda la red de 4,8kV. Dicho estudio se realizó con ayuda del simulador DIGSilent Power Factory, el mismo se realizó bajo los peores escenarios posibles, es decir a máxima carga y a mínima carga, y de esta forma estudiar las ventajas y desventajas de la incorporación de dichos bancos a la red. Con todos los datos, simulaciones y normas empleados en este trabajo de grado se obtuvo una conclusión ante este evento.

## INTRODUCCIÓN

La Universidad Central de Venezuela está ubicada en la ciudad de Caracas. Las edificaciones e instalaciones existentes en la Universitaria de Caracas, se encuentra alimentadas por dos sistemas de distribución de energía eléctrica uno en un nivel de tensión de 4,8kV y el otro de 12,47kV [9]. En sus edificios, principalmente en la Facultad de Ingeniería y los de residencias el cual trabaja con el nivel de tensión de 4,8kV, se han realizado mediciones de calidad de servicio eléctrico. En los registros obtenidos se han observado perturbaciones en las ondas de tensión las cuales pueden estar relacionadas con la operación del banco de condensadores instalado en la S/E Los Chaguaramos. Estas perturbaciones presentan como principales características un cambio repentino en las condiciones del circuito que se amortigua rápidamente y que excede los valores de tensión permitidos. Debido a ello se plantea este trabajo para realizar el estudio transitorio asociado a la operación del banco de condensadores de la S/E Los Chaguaramos en el sistema de distribución de la Ciudad Universitaria.

Al incorporar o retirar un banco de condensadores en una subestación eléctrica se presentan perturbaciones o transitorios sencillos ocasionados por la maniobra del interruptor asociado al banco de condensador, que dependiendo del nivel de estas perturbaciones pueden ocasionar daños a los equipos asociados al sistema debido a las oscilaciones que se incorporan a la red por esta maniobra. Por esta razón, se realizó el siguiente estudio que involucra todos los elementos presentes en el sistema de distribución de la red CUC y se evaluarán mediante una simulación si las perturbaciones generadas por la incorporación de dicho banco pueden ocasionar o no averías en los elementos asociados a la red. En el caso de la Ciudad Universitaria de Caracas (CUC) este estudio no se ha realizado, y se

tiene evidencia de sobretensiones en diversos puntos de las dependencias en la ciudad [2].

Para realizar este estudio se separó el trabajo de grado en 3 capítulos. El primero de ellos busca orientar al lector a entender todos los aspectos relacionados al Sistema de Distribución de la UCV. Allí se podrá leer todas las características de los equipos asociados a la red y los aspectos generales que se buscan en un sistema de distribución. El capítulo II tratará sobre el programa de simulación empleado, el escenario de simulación y la metodología utilizada para interpretar los resultados. Y por último el capítulo III donde se encontrarán plasmados los resultados derivados del desarrollo del trabajo de grado. En el apartado de anexos se hallarán todos los resultados gráficos siguiendo la misma metodología empleada en el capítulo II.

# CAPÍTULO I

## *DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EN ESTUDIO*

### *1.1. Presentación del problema*

La calidad del servicio eléctrico puede cuantificarse a través de varios parámetros como es la continuidad del servicio, las fluctuaciones de tensión, la cantidad de armónicos presentes en la red, entre otros aspectos. Mantener todos estos aspectos es responsabilidad del ente que suministra el servicio eléctrico, en este caso es una filial de CORPOELEC (EDC). De acuerdo a los datos recopilados de la COPRED, la Universidad Central de Venezuela cuenta con un sistema eléctrico de distribución, llamado Red CUC (Ciudad Universitaria de Caracas) que corresponde a una red secundaria de distribución de la filial de CORPOELEC, la cual está conformada por unos subsistemas llamados “Alimentadores” y cuya función es dar camino al suministro de energía a todas las cargas finales del sistema.

Cuatro (4) de estos Alimentadores son suplidos directamente de la S/E Los Chaguaramos y el resto de los Alimentadores son suplidos de la S/E UCV, esta S/E que se encuentra en las cercanías del edificio de Medicina Tropical dentro de la Ciudad Universitaria y la misma es alimentada de la S/E Los Chaguaramos. La red actual de distribución CUC trabaja a un nivel de 4,8kV la cual es canalizada hasta los transformadores a través de los Alimentadores para cambiar esta tensión a un nivel de tensión adecuado a la carga.

En Agosto del año 2002 el COPRED en conjunto con el Departamento de Potencia de la Escuela de Eléctrica y motivado al crecimiento en lo que respecta al consumo eléctrico por parte de las dependencias de la Red CUC se procedió a realizar registros de eventos para determinar si la calidad de servicio era continuo, sin interrupciones, con un valor de tensión adecuado y con una forma sinodal pura, es decir libre de armónicos. De estos registros se obtuvo como resultado que existen perturbaciones en el sistema que incorporan a la red armónicos de muy corta duración cónsona con perturbaciones producidas por la incorporación de bancos de condensadores a la red. Es por esta razón, que se plantea realizar el siguiente estudio tomando en cuenta todos los elementos importantes del sistema (cables, transformadores, banco de condensadores e interruptores) bajo diversas cargas de acuerdo al estudio realizado para determinar si estas perturbaciones pueden o no afectar los equipos conectados a la red.

## ***1.2. Metodología***

- Obtener por medio de la revisión de la documentación existente en la Escuela de Ingeniería Eléctrica y en el COPRED la información de las características más representativas del sistema de distribución de la Ciudad Universitaria.
- A través de libros y búsquedas por internet se documentarán las perturbaciones que se generan en un sistema de distribución subterráneo.
- Utilizando los reportes e informes técnicos generados en el departamento de potencia se obtendrá información de las perturbaciones registradas en el sistema. [2].

- Por medio de la utilización del programa de simulación DIGSilent, se deberá obtener los valores de tensión producto de la operación de los bancos de condensadores.
- Analizando normativas nacionales e internacionales se evaluará el nivel de aislamiento de los equipos existentes en la red de 4,8kV de la CUC.
- Se documentará todos los aspectos importantes del estudio en el informe del trabajo de grado.

### ***1.3. Objetivos***

#### **OBJETIVO GENERAL.**

Estudiar el comportamiento transitorio del Sistema de Distribución Eléctrica de la UCV ante la operación de banco de condensadores.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Identificar las características del sistema de distribución de la Ciudad Universitaria. [9]
- Documentar las perturbaciones que se generan en un sistema de distribución subterráneo. [4]
- Levantar información de las perturbaciones registradas en el sistema.
- Realizar simulaciones tomando en cuenta la operación de los bancos condensadores de la S/E Los Chaguaramos en el nivel de tensión de 4,8kV.
- Analizar los resultados obtenidos.

### 1.4. Red de Distribución (CUC)

Para realizar la caracterización de la red de distribución se emplearon los datos suministrados por el COPRED. La red es alimentada por la S/E Los Chaguaramos la cual es propiedad de la EDC. La misma cuenta con una distribución interna que consta principalmente de una S/E llamada UCV, transformadores, conductores, sistemas de protección, barras, seccionadores y las dependencias que vienen a ser las cargas del sistema. La red completa se muestra en la figura 1.

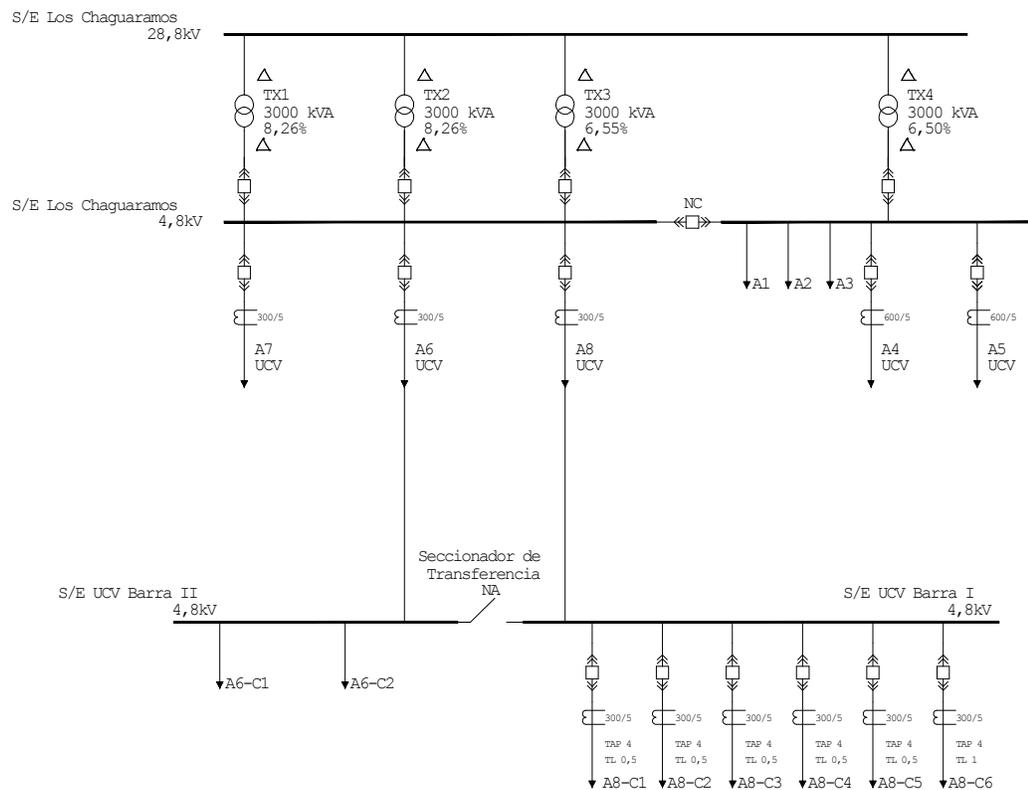


Figura 1. Modelo unifilar de la red CUC [9]

La S/E Los Chaguaramos tiene dos bancos de capacitores (Uno de 3MVAR y el otro de 2,4MVAR)[1] y la EDC incorpora esta carga reactiva para compensar el factor de potencia y mejorar el soporte de tensión necesarios para la óptima operación de la red.

La red de distribución interna comprende tramos llamados Alimentadores identificados en la figura 1 con la letra A seguido de un número que corresponde al circuito. Cada circuito alimenta una o varias dependencias. Estos alimentadores inicialmente fueron instalados colocando un calibre grande como troncal principal y a medida que se acercada a la carga o se ramificaba para otras cargas se disminuye el calibre del mismo, esto ocurre para cada alimentador.

#### *1.4.1. Descripción de los elementos*

Como ya se mencionó, la red está conformada por varios alimentadores, cinco (5) en total, y estos circuitos están conformados por elementos de protección, transformadores, barras, seccionadores, dependencias o cargas y por supuesto dos bancos de condensadores. Cada circuito está destinado a alimentar una o varias dependencias. Los conductores existentes tienen una capacidad de aislamiento de 5kV o de 15kV dependiendo del tramo. La tabla 1 muestra los alimentadores asociados a la red y sus diferentes circuitos.

*Tabla 1. Alimentadores, circuitos y dependencias [9]*

<i>Alimentador</i>	<i>Circuito</i>	<i>Dependencia</i>
A4	A4	Decanato de Medicina Hospital Clínico

A5	C2	Hospital Clínico
	C1	Química Sur Escuela de Computación Química Norte Física y Matemática Taller de Vidrio Decanato, A/A, Edif. de Aulas, Criogénico Zoología Tropical
A6	C1	Sala de Bombas Administración y Educación
	C2	Economía Dirección de Deportes Casona y Gimnasio Cubierto
A7	A7	Parroquia Universitaria Aula Magna Química Petróleo Geología Eléctrica Hidráulica Eléctrica Lab. Química Laboratorio de Química I.M.M.E. Arquitectura y Urbanismo Ingeniería Básica C.P.D. Decanato Auditorium y Biblioteca de Ingeniería
A8	C2	Instituto de Medicina Tropical Inmunología Lavandería y Calderas Alumbrado Público, OBE, Vigilancia, Sierra Maestra Escuela de Medicina Odontología Instituto de Investigaciones Oncológicas
A8	C3	Jardín Botánico Canchas de Tenis Trabajo Social y Comunicación Social Alumbrado Público Estadística, Artes, Comedor Bioanálisis

A8		Facultad de Humanidades Facultad de Ciencias Políticas y Jurídicas Galpones de Química Aplicada
	C4	Aula Magna Instituto de Medicina Experimental Farmacia Iluminación Pasillo de Ingeniería Ingeniería Sanitaria Ingeniería Hidráulica
	C5	Sala de Bombas
	C6	Museo Rectorado Comunicaciones DTIC Aula Magna Instituto Anatómico Galpones de Farmacia Ingeniería Mecánica Laboratorio de Operaciones Unitarias Biblioteca Central

El banco de condensadores se encuentra ubicado en la S/E Los Chaguaramos y su incorporación a la red se hace de forma automática para optimizar la calidad del servicio mediante interruptores mecánicos. El aporte de cada banco es de 3MVAR y 2,4MVAR. El interruptor asociado a estos bancos de condensadores es accionado por medio de un secuenciador que ordena al interruptor la conexión del banco de condensadores a la red cuando la tensión instantánea en la barra de acople es cero, de tal manera de disminuir los transientes producidos al energizar estas unidades. Estos bancos cumplen con el capítulo 5 de la especificación No. E-280-T-1090 del Departamento de Normas de Ingeniería, División Normas de Materiales, Sección Materiales y Equipos de Transmisión que trata sobre las subestaciones de 28,8/4,8 kV. [5].

### *1.4.2. Transitorios debido a la energización de los bancos de condensadores*

La factibilidad y grado de ocurrencia del fenómeno de magnificación de la tensión en la red CUC es alta motivado a que cada banco de condensadores es conmutado 2 veces al día durante toda la semana. El interruptor asociado al banco de condensadores debe cerrar los 3 polos de forma mecánica y de manera simultánea para evitar desbalance en la red y debido al flujo de la corriente Inrush se produce una tensión transitoria asociada a esa corriente a través de la impedancia del sistema, la cual es :  $Z = \sqrt{\frac{L_{eq}}{C_{eq}}}$  , si despreciamos el amortiguamiento. [3]

La tensión en los terminales de cada banco de condensadores se puede calcular partiendo de:

$$E_C = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i(t) \cdot dt$$
$$E_C = \frac{E \cdot X_C}{Z} \cdot \left[ \sin(\omega \cdot t - \varphi) - \frac{\omega_0}{\omega_1} \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t - \varphi_1) \right]$$

Dónde:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$
$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{\omega_1 \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)}{\alpha \cdot (\omega^2 + \omega_0^2)} \right)$$

Pero despreciando el amortiguamiento  $\omega_0 = \omega_1$  y en  $t=0$ s la máxima tensión en el condensador sería:

$$E_{Cmax} = \frac{2 \cdot E \cdot X_C}{Z}$$

Lo cual corresponde al doble de tensión de operación del condensador. Así mismo, una vez energizado el primer banco de condensadores la tensión en la barra cuando entra el segundo banco de condensador sería:

$$E_C = \frac{E \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2}{\omega_3^2} \cdot \left[ \frac{(\omega_3^2 - \omega^2)}{(\omega_1^2 - \omega^2) \cdot (\omega_2^2 - \omega^2)} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{(\omega_3^2 - \omega_1^2)}{(\omega^2 - \omega_1^2) \cdot (\omega_2^2 - \omega_1^2)} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + \frac{(\omega_3^2 - \omega_2^2)}{(\omega^2 - \omega_2^2) \cdot (\omega_1^2 - \omega_2^2)} \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) \right]$$

Dónde:

$$E_{Cmax} = \frac{2 \cdot E \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2 \cdot (\omega_3^2 - \omega_2^2)}{\omega_3^2 \cdot (\omega_1^2 - \omega^2) \cdot (\omega_2^2 - \omega^2)}$$

Pero con  $\omega_1^2, \omega_2^2, \omega_3^2$  mucho mayores que  $\omega^2$  se reduce esta ecuación a  $E_{Cmax} \cong 2 \cdot E$ , siendo E la tensión de la barra.

De manera teórica y de acuerdo a la referencia [3] se concluye que cada vez que entra en funcionamiento uno o los dos bancos de condensadores se presentará una sobretensión transitoria cuyo primer pico será de aproximadamente 9kV en el lado de alta, sin embargo esta demostración no explica la duración de dicha perturbación, es por ello que se empleará un simulador para estudiar más a fondo dichas perturbaciones introducidas a la forma de onda sinodal y así determinar si la onda sinodal que llega a las dependencias con estas

perturbaciones puedan crear situaciones que afecten o puedan ser dañinas para los equipos y personas que estén empleando en ese momento a la red.

### ***1.5. Sensibilidad de equipos asociados a la red***

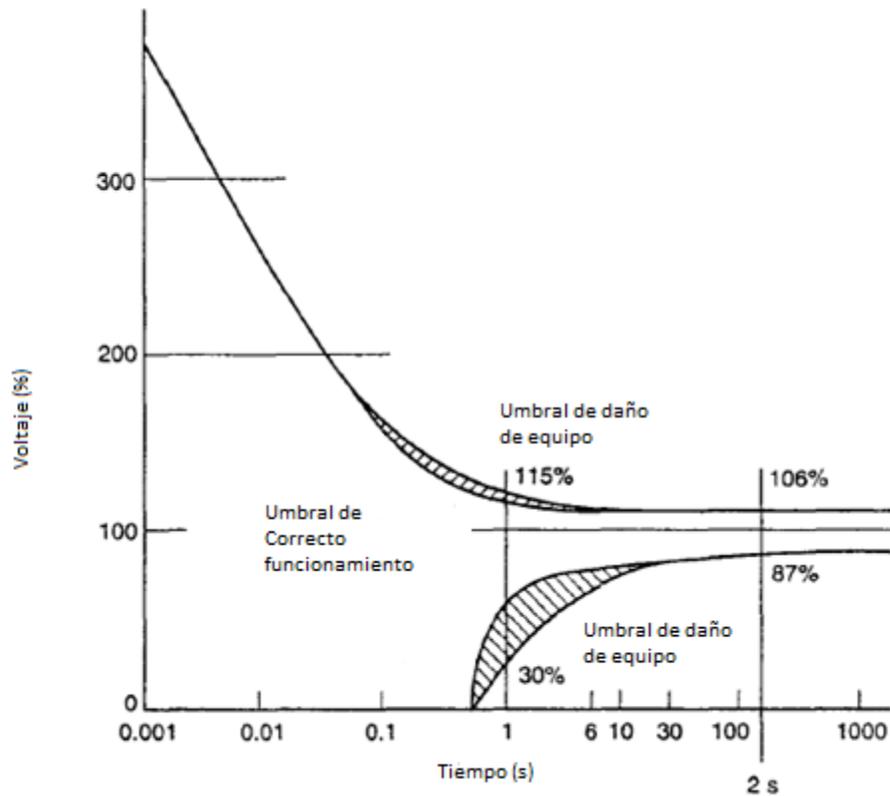
Existen dos tipos de cargas, las cargas críticas y las cargas sensibles. Las primeras son aquellas que al dejar de funcionar o si funcionan de forma inapropiada pueden poner en peligro la seguridad del personal, ocasionando situaciones no deseables. Y la segunda son aquellas que requieren un suministro de energía de alta calidad, libre de disturbios.

La Universidad, en sus distintas dependencias, tiene laboratorios y salas especializadas como por ejemplo los asociados a fundiciones como es el caso de la Escuela de Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería o el laboratorio de Bioanálisis que trabaja con muestras de sangre o el sistema vital de diagnóstico de la sala de cuidados intensivos del Hospital Clínico. En cualquier caso estas cargas son críticas, porque simplemente si alguno de los equipos de la cadena de trabajo falla a consecuencia de una mala calidad de energía eléctrica esto puede acarrear tanto problemas económicos como fatales. Es por ello que la protección de estos equipos es vital para evitar cualquier situación no deseada y la incorporación de las cargas capacitivas afectan directamente a estas cargas por las sobretensiones generadas. Los efectos de una mala calidad de la energía eléctrica son:

- Operación incorrecta de equipos
- Daño parcial o permanente en dichos equipos que acarrear una incorrecta operación de los controles asociados a dichos equipos

- Pérdida de información en centros de computo
- Paros en las líneas de trabajo

Según la norma IEEE 1100 “Powering and Grounding Electronic Equipment” (página 47) determinar el nivel de sensibilidad de un equipo es un aspecto difícil de cuantificar ya que se requiere de precisa información de los fabricantes, sin embargo un proceso de consenso ha producido una gráfica útil de los niveles típicos de sensibilidad que se muestra a continuación:



*Figura 2. Meta típica del diseño de fabricantes*

La figura 2 solo señala la magnitud del voltaje con la correspondiente duración de la perturbación. Allí se aprecia que una razón rápida de cambio tiene

mayor capacidad de producir un disturbio en circuitos adyacentes por el acoplamiento del banco de capacitores. Sin embargo esta norma no muestra la periodicidad de ocurrencia de dicho evento, así que consideraremos que mientras cumpla con la norma los equipos conectados a la red nunca se verán afectados por este evento.

*Tabla 2. Norma IEEE 1159 la duración de los eventos o fenómenos electromagnéticos*

Tabla 2 IEEE 1159. Categorías y características de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia			
Categoría	Contenido Típico Espectral	Duración Típica	Magnitud Típica del Voltaje
1.0 Transitorios			
1.1 Impulsos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns de elevación	<50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1 $\mu$ s de elevación	50 ns - 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Baja Frecuencia	< 5kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
1.2.2 Frecuencia Media	5 - 500 kHz	20 $\mu$ s	0 - 8 pu
1.2.3 Alta Frecuencia	0.5 - 5MHz	5 $\mu$ s	0 - 4 pu
2.0 Variaciones de Corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Sag		0.5 - 30 ciclos	0.1 -0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupción		0.5 ciclos - 3 seg	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 ciclos - 3 seg	0.1 -0.9 pu
2.2.3 Swell		30 ciclos - 3 seg	1.1 - 1.4 pu
2.3 Temporal			
2.3.1 Interrupción		3 seg - 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		3 seg - 1 min	0.1 -0.9 pu
2.3.3 Swell		3 seg - 1 min	1.1 - 1.2 pu
3.0 Vanaciones de larga duración			
3.1 Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 pu
3.2 Bajo voltaje		> 1 min	0.8 -0.9 pu
3.3 Sobre voltaje		> 1 min	1.1 - 1.2 pu
4.0 Desbalance en voltaje		Estado Estable	0.5 - 2%
5.0 Distorsión de Forma de Onda			
5.1 Componente de directa		Estado Estable	0 - 0.1%
5.2 Contenido armónico	0 -100th H	Estado Estable	0 - 20%
5.3 Interarmónicas	0 - 6 kHz	Estado Estable	0 - 2%
5.4 Muecas en el voltaje		Estado Estable	
5.5 Ruido	Banda amplia	Estado Estable	0 - 1%
6.0 Fluctuaciones de Voltaje	< 25 Hz	Intermitente	0.1 - 7%
7.0 Variaciones en la Frecuencia		<10 seg	

La tabla 2 sirve para identificar el tipo de perturbación, en ella se muestra el rango de duración típica y la magnitud posible de dicho fenómeno en todas las posibles perturbaciones que se pueden presentar en la red de alimentación. Es por ello que una vez identificado la categoría de dicho fenómeno se procederá según la norma IEEE 1159 para determinar si este fenómeno se encuentra dentro de un evento catalogado como normal de acuerdo a esta norma.

## CAPÍTULO II

Para la realización del análisis de esta red se empleó una herramienta computacional especializada llamada DIGSilent. Este programa está basado para trabajar en la plataforma de Windows y es una herramienta de simulación para sistemas de potencia. Con este programa se pueden determinar el flujo de carga, los niveles de cortocircuito, transitorios electromagnéticos, coordinación automática de protecciones, análisis de armónicos y análisis de confiabilidad. También con esta herramienta se pueden simular eventos y fallas a la red de tal forma de obtener todos los parámetros de la red estudiada.

### *2. Modelo*

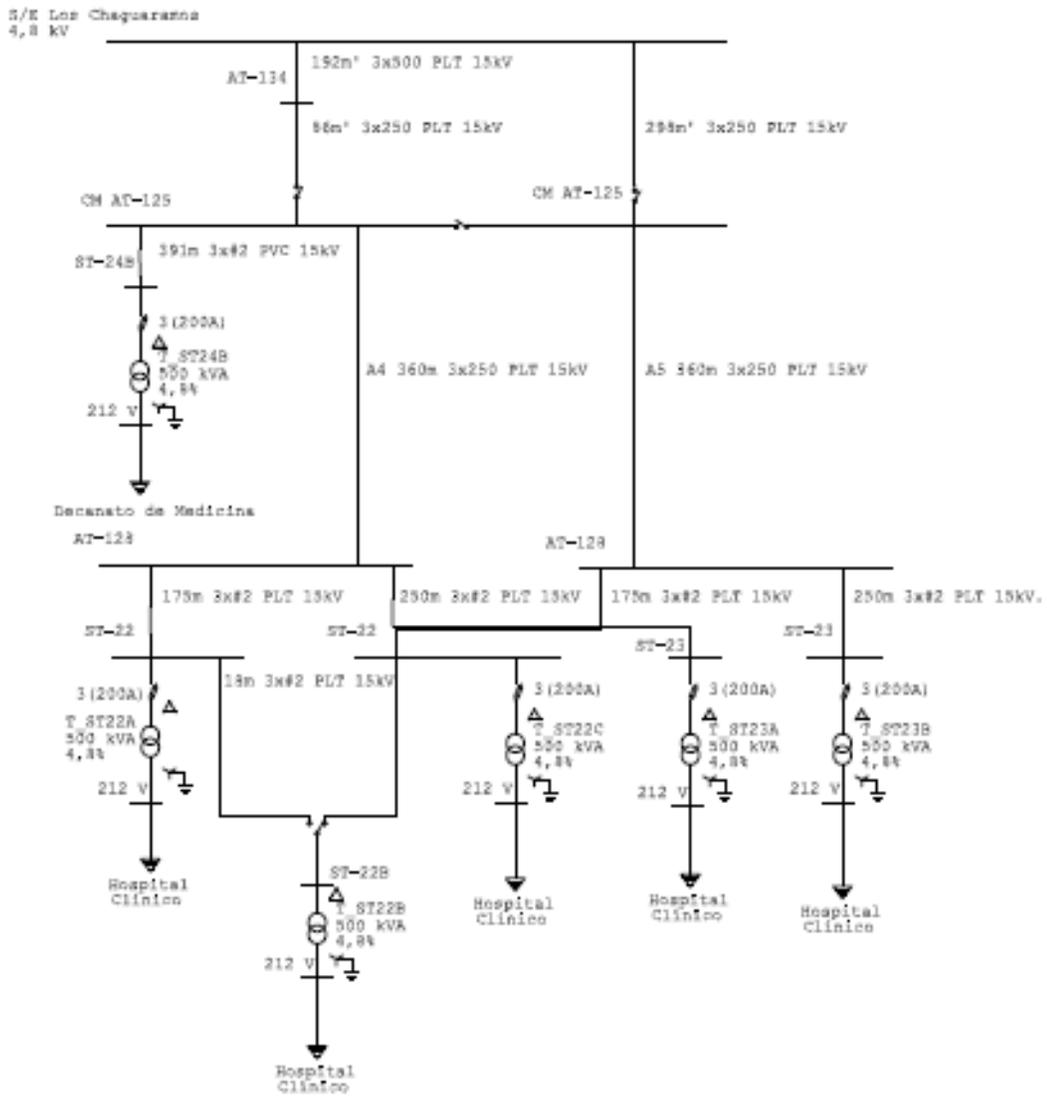
Se implementó en el programa toda la red CUC de acuerdo a los datos suministrados por el COPRED y con los datos de carga de acuerdo al estudio realizado por el Departamento de Potencia se procedió a realizar la simulación a través del módulo EMTP (ElectroMagnetic Transient Program) del DIGSilent, se analizaron tanto la operación de cierre como el de apertura de cada banco de condensador.

El EMTP es una herramienta de cálculo para la simulación de comportamientos transitorios de sistemas eléctricos. Esta simulación cubre valores de milésimas de segundos hasta segundos.

## *2.1. Escenarios de Simulación*

Se planteó la condición de mayor demanda, los equipos y conductores asociados a la red CUC según los datos presentados en el Informe de Demanda elaborado por el Departamento de Potencia de la Escuela de Eléctrica de la UCV en conjunto con el COPRED y se conectaron a la red ambos bancos de capacitores de forma individual. Al conectar el primer banco de capacitores se esperó a que pasara el tiempo transitorio para conectar el segundo banco de capacitores. La carga conectada al momento de energizar los bancos no afecta la sobretensión a estudiar, demostrado en el apartado 1.4.2. Y para el caso de desenergización se le indicó al simulador que se desconectara cuando la onda sinusoidal estuviese en estado permanente.

En la siguiente figura 4 se muestra el alimentador A4 y A5 circuito 2 (A5-C2). En ella se puede detallar la barra ubicada en la S/E Los Chaguaramos con un nivel de tensión de 4,8kV. A esta barra están conectados los bancos de condensadores como se muestra en la figura 1 del capítulo I. Aguas abajo de esta barra está conectado un sistema de distribución que alimenta a varios puntos de la misma dependencia que en este caso es el hospital clínico. Al simulador se le indicó que midiera la tensión en la barra de 4,8kV y en cada uno de los puntos de la dependencia.

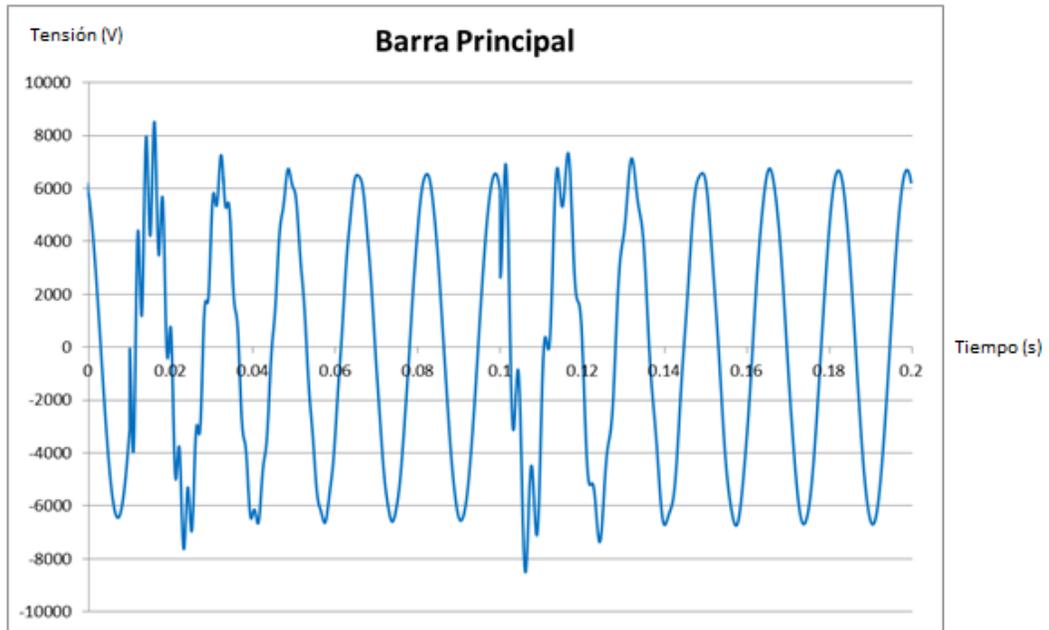


*Figura 3. Alimentador A4 y A5-C2*

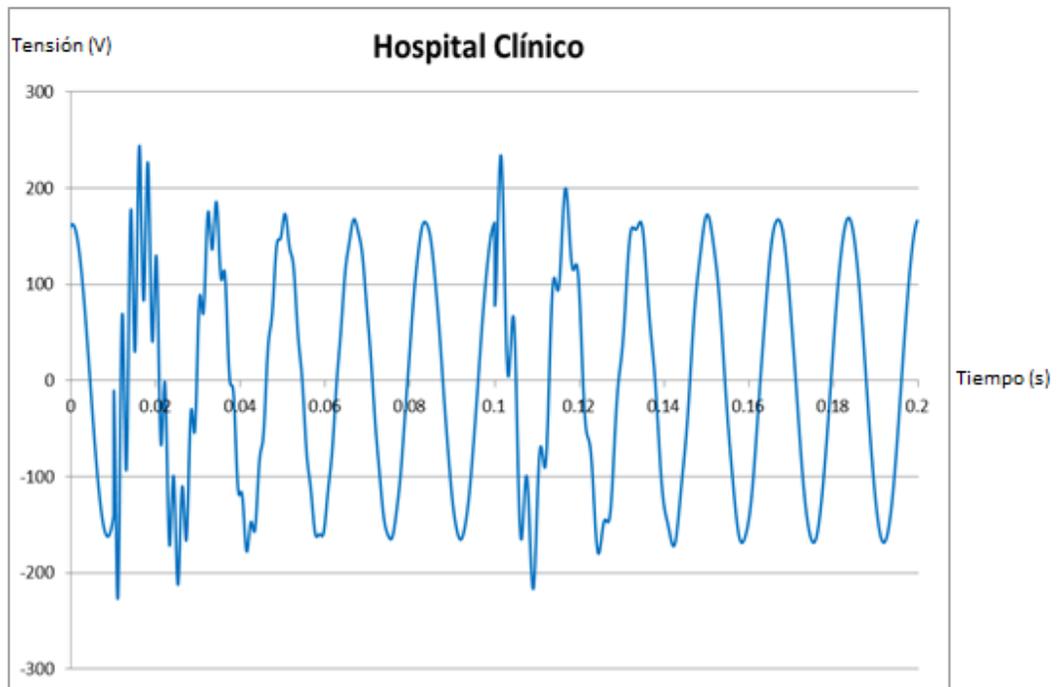
## 2.2. Resultados

Los resultados obtenidos en el simulador DIGSilent corresponden a los puntos de medición anteriormente descrito, siendo la gráfica 1 la tensión en la

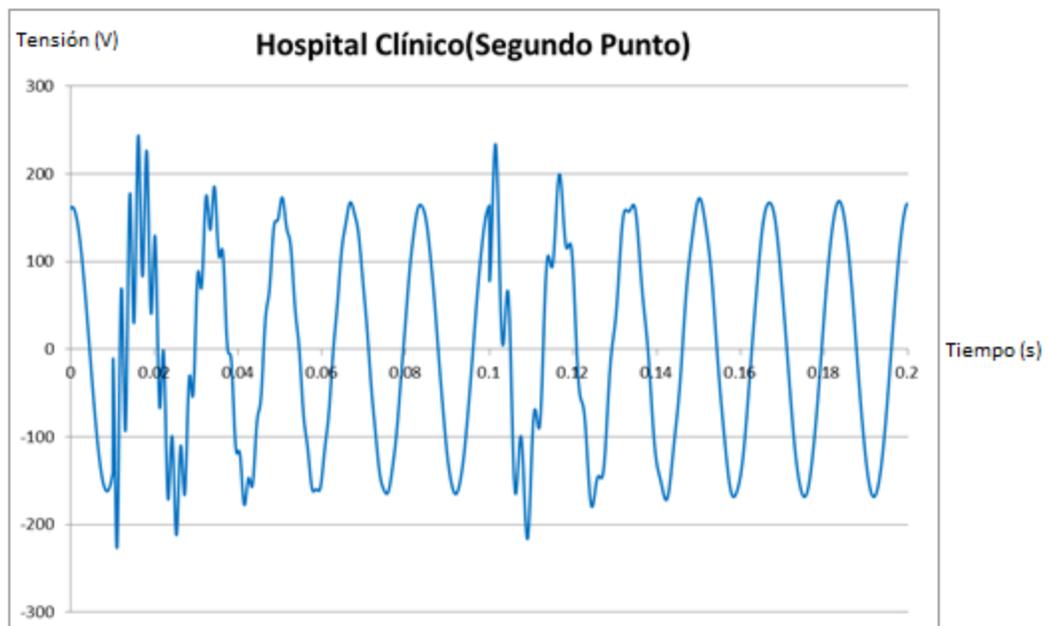
barra de 4,8kv, la gráfica 2 el punto de hospital clínico más a la izquierda y así sucesivamente hasta llegar al quinto punto ubicado más a la derecha y la gráfica 6 corresponde al Decanato de Medicina.



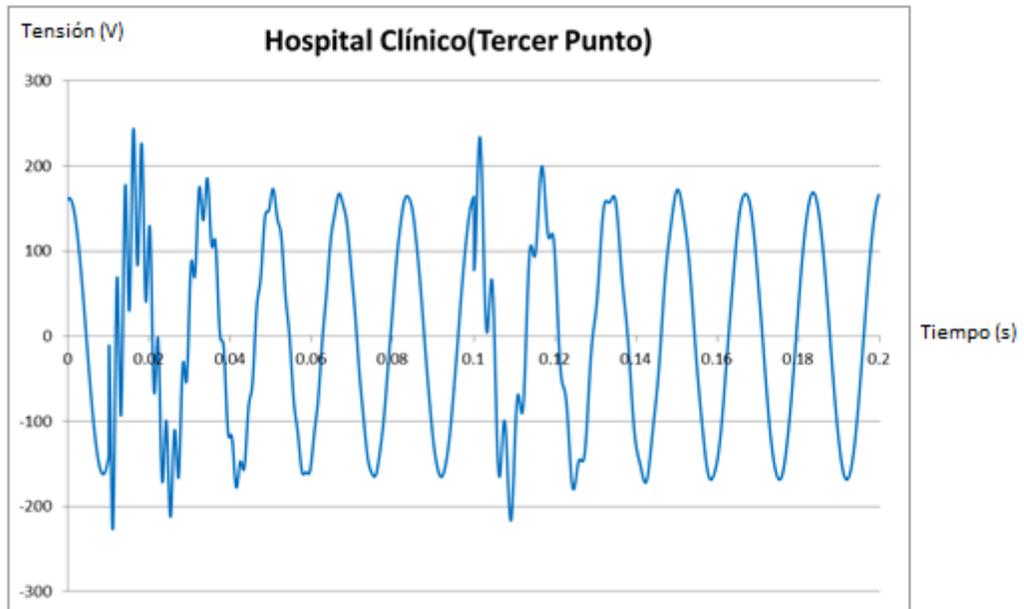
*Gráfica 1*



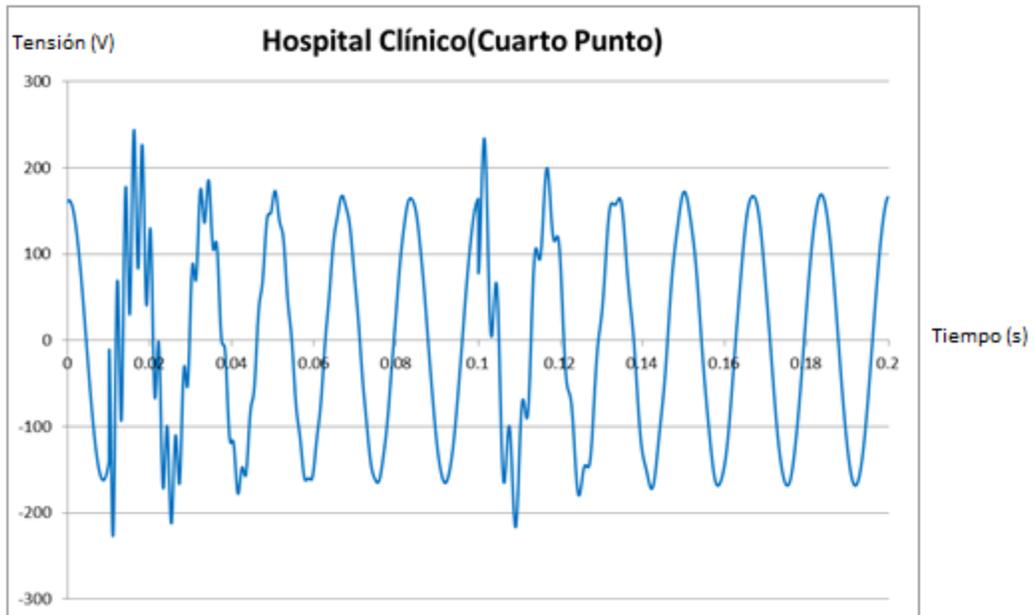
*Gráfica 2*



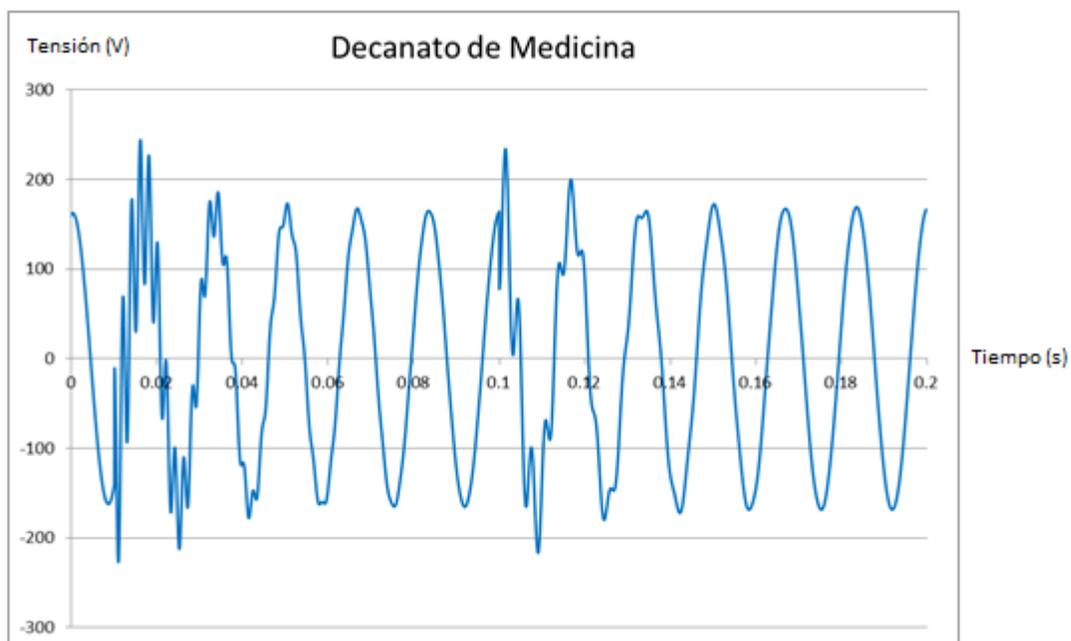
*Gráfica 3*



*Gráfica 4*



*Gráfica 5*



*Gráfica 6*

De este escenario de simulación se obtienen los datos de la tabla 3, donde “evento 1” corresponde al accionar del primer banco y “evento 2” corresponde al accionar del segundo banco:

*Tabla 3. Duración y frecuencia de las perturbaciones ocasionadas por los bancos en el alimentador A4 y A5-C2.*

Punto de Medición	Evento 1		Evento 2	
	Duración [s]	Frecuencia [Hz]	Duración [s]	Frecuencia [Hz]
Barra Principal	0.034	566.91	0.035	566.9
H. Clínico(1)	0.034	311.2	0.035	306.11
H. Clínico(2)	0.034	311.2	0.035	306.11
H. Clínico(3)	0.034	311.2	0.035	306.11
H. Clínico(4)	0.034	311.2	0.035	306.11
H. Clínico(5)	0.034	311.2	0.035	306.11

## CAPÍTULO III

### *Análisis de Resultados*

Según lo obtenido en la tabla 3 y de la gráfica 1 (del capítulo 2) la perturbación en el lado de alta alcanza casi el doble de la misma cuando se incorporan los bancos, tal como se había previsto en el Capítulo I, y la duración del mismo tiene como máximo tiempo 35ms con una frecuencia de oscilación menor a los 600Hz. Si detallamos la figura 2 en el Capítulo I cualquier equipo cuyo funcionamiento sea considerada crítico o sensible y esté conectado a esta red deberá operar sin fallas ante la maniobra de dichos bancos puesto la tensión alcanza el 200% durante un máximo de 35ms y según la gráfica está dentro de los parámetros de tolerancia. Si visualizamos la tabla 2 del Capítulo I en el parámetro 1.2 se puede detallar que para frecuencias bajas la duración de dicho evento no deberá ser mayor a 50ms ni superar la tensión de 4 p.u. Por esta razón el alimentador A4 y A5-C2 son alimentados con una óptima calidad de servicio puesto que cumple con lo estipulado en la norma IEEE 1100 y IEEE 1159, es decir la perturbación ocasionada por el accionar de los bancos de condensadores no afectará los equipos conectados a la red.

En los anexos se encuentran el resto de los alimentadores pertenecientes a esta red, analizados bajo la misma condición anterior y de acuerdo a la tabla 4 de los anexos la duración del evento de perturbación nunca es mayor a 35ms, el primer pico de sobretensión es casi el doble de la tensión nominal y la frecuencia de oscilación es menor a 600Hz, por la misma razón anterior se concluye que todos los equipos conectados a la red al momento de ocurrir la perturbación no se verán afectados debido a que cumple con la norma IEEE 1100 y IEEE 1159, haciendo la salvedad como se indicó en el capítulo I que en esta norma no indica

el número de ocurrencias o de periodicidad para este tipo de eventos a este nivel de tensión. Por tanto a pesar que cumple con la norma IEEE 1100 y con la norma IEEE 1159 pero se desconoce si ante eventos periódicos los equipos podrían sufrir daños.

En el caso de los conductores con capacidad de aislamiento de 15kV esta sobretensión no representa mayor inconveniente, sin embargo para los conductores con capacidad de aislamiento de 5kV aun presentes en la red CUC y suponiendo que estén en óptimas condiciones estos no se verán afectados por el transitorio si nos apegamos a la norma IEEE 1100 y IEEE 1159, debido que la duración del mismo es muy corto como para que afecte o deteriore de forma significativa los conductores o genere situaciones de disparo de sistemas de protecciones asociados a estos conductores que afecten el servicio eléctrico, sin embargo estos conductores tienen en su mayoría más de 30 años en funcionamiento continuo, aunado a estas repetidas sobretensiones que sobrepasan su capacidad de aislamiento y a la falta de mantenimiento probablemente han permitido que dichos conductores ya no estén operando de forma eficiente. Una falla que probablemente ocurra es que motivado a que a estos niveles de tensión las chaquetas de los conductores subterráneos deben ir correctamente aterrados, y por el pasar de los años el aislamiento ya debe estar muy dañado así que las fallas por arcos entre la fase y la chaqueta de blindaje pueden ser comunes provocando repetidas fallas del servicio eléctrico en diversas dependencias. Por tanto la calidad de servicio prestada a través de esta red es óptima en lo que respecta a la sobretensión ocasionada por la incorporación de los bancos de capacitores apegándonos a las normas IEEE 1100 y IEEE 1159.

## CONCLUSIONES

- En función de los objetivos buscados, se concluye que se alcanzaron todas las metas planteadas. El resultado es que si nos adherimos a la norma IEEE 1100 y IEEE 1159 cualquier equipo conectado a la red en cualquier punto de la misma no sufrirá ningún desperfecto o falla ocasionada por la sobretensión que introducen los bancos de condensadores, puesto que esta sobretensión cumple con los parámetros impuestos por las normas anteriormente indicadas. Sin embargo hay que destacar que la periodicidad o incidencia a la que son sometidos a diarios los equipos permanentemente conectados a la red no está documentado ni está contemplado en las normas, por tanto se desconoce si el exceso de sobretensiones consecutivas pueda generar algún daño.
- Existen conductores cuya capacidad de aislamiento es de 5kV, por dichos conductores la sobretensión que soportan alcanzan los 9kV. Si aplicamos las normas IEEE 1100 y IEEE 1159 considerando los conductores como equipos conectados a la red y motivado a que no existe documentación en la escuela o con algunos de los fabricantes investigados referente a ensayos destructivos donde incluyan el estudio de conductores sobrepasando su capacidad de aislamiento se concluye que la sobretensión tampoco afectaría dichos conductores porque la duración es lo suficientemente corta como para que ocurra algún evento no deseado.
- Cuando sale de operación el banco de capacitores ocurre una pequeña sobretensión, pero la misma es poco significativa y esto es debido a que cuando el equipo es desacoplado de la red no existe ningún elemento que resuene con la red por tanto la sobretensión ante ese evento es despreciable.

## RECOMENDACIONES

- Existen muchos conductores cuyo tiempo de vida útil ya terminó y como estos conductores subterráneos deben tener la chaqueta aterrada es muy probable que cuando ocurren estas sobretensiones se cree un arco entre la fase y la chaqueta haciendo que se disparen los sistemas de protección. Dichos conductores deberían ser reemplazados para evitar futuros problemas.
- Se sugiere realizar ensayos destructivos con diversos equipos para someterlo de forma periódica a las sobretensiones y así determinar si la periodicidad de estas perturbaciones afecta o no el funcionamiento de los equipos.
- A pesar que los bancos de capacitores no afectan los equipos conectados a esta red se sugiere buscar nuevas alternativas para mejorar la calidad de servicio que eviten estas perturbaciones.
- Se empleó el programa DIGSilent de Power Factory motivado a que la escuela posee una licencia del mismo y es un programa mundialmente reconocido, por tanto se sugiere que la escuela guarde la base de datos de este Trabajo de Grado para futuros ensayos.
- De los resultados obtenidos por el programa se determinó que existe una armónica predominante en el lado de alta y una armónica predominante en el lado de baja, es por ello que se sugiere la idea de estudiar el comportamiento de dicha perturbación si se filtrase una o ambas armónicas predominantes para determinar si mejoraría la calidad de servicio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ARCIA S., Héctor L. “ACTUALIZACIÓN, ANÁLISIS Y DIGITALIZACIÓN DE LA RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN PRIMARIA EN 4,8KV DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA” ARCIA S., Héctor L. (Tesis) – Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2001.

[2] “ESTUDIO DE MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN A MEDIANO PLAZO DE LA DEMANDA ELÉCTRICA DE LA CUC DE LA UCV. (DOCUMENTO NO. 010209-P-R0802)”- Departamento de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica. UCV.

[3] GREENWOOD., Allan. ELECTRICAL TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS. Segunda Edición.

[4] ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION, Reference Book. Westinghouse. 1964.

[5] Norma IEEE C37.012 “Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis”

[6] Norma IEEE 519-1992

[7] Norma IEEE 1100 “Powering and Grounding Electronic Equipment”

[8] Norma IEEE C.57.12.10-1999

[9] Datos del COPRED

## BIBLIOGRAFÍAS

ARCIA S., Héctor L. “ACTUALIZACIÓN, ANÁLISIS Y DIGITALIZACIÓN DE LA RED ELÉCTRICA DE DISTRIBUCIÓN PRIMARIA EN 4,8KV DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA” ARCIA S., Héctor L. (Tesis) – Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2001.

“ESTUDIO DE MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN A MEDIANO PLAZO DE LA DEMANDA ELÉCTRICA DE LA CUC DE LA UCV. (DOCUMENTO NO. 010209-P-R0802)”- Departamento de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica. UCV.

GREENWOOD., Allan. ELECTRICAL TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS. Segunda Edición.

ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION, Reference Book. Westinghouse. 1964.

Norma IEEE C37.012 “Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis”

Norma IEEE 1100 “Powering and Grounding Electronic Equipment”

Norma IEEE C.57.12.10-1999