



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOVIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Modelación de cargas eléctricas

Autor: Nelson León Valencia

Tutor: Dr. Leonardo Casas Fernández

Tutor: Msc. Alberto Limonte Ruiz

Santa Clara

2009

"Año del 50 aniversario del triunfo de la Revolución"

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA





UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOVIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Modelación de cargas eléctricas

Autor: Nelson León Valencia

E-mail: nleon@uclv.edu.cu

Tutores: Dr. Leonardo Casas

E-mail: lcasas@uclv.edu.cu

Msc. Alberto Limonte Ruiz

E-mail: Limonte@uclv.edu.cu

Departamento de electroenergética.

Facultad de ingeniería eléctrica.

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Santa Clara

2009

"Año del 50 aniversario del triunfo de la Revolución"

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA





Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica



PENSAMIENTO

“ Años hace, la electricidad era fuerza rebelde, destructora y confusa.

Hoy obedece al hombre, como caballo domado. ”

José Martí.

DEDICATORIA

A mis padres,

*A mi novia Anabel que tantas veces supo comprenderme y darme
aliento,*

A mis amigos,

A todos aquellos que quisieron verme ingeniero.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores muy especial a Limonte por la ayuda,

A mis compañeros de aula,

A mi familia,

A mi tropa.

TAREA TÉCNICA

1. Recopilación y análisis crítico de la bibliografía referente al tema de Modelación de cargas.
2. Estudio y auto preparación en aplicaciones del Matlab/Simulink, en específico la librería Simpower System tool Box del Matlab ver 6.5
3. Implementación de modelos encontrados en la bibliografía consultada a partir de posibles configuraciones de redes reales existentes en alguna subestación de la región central.
4. Implementación de un modelo que permita evaluar valores de parámetros del mismo mediante comparación con mediciones de campo en función del conocimiento de la composición de la carga.
5. Escritura del trabajo

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En el presente trabajo se aborda la temática de la modelación de carga. Este aspecto; de gran importancia para la simulación adecuada de los Sistemas Eléctricos, ha sido menos estudiado que los demás componentes del mismo como es el caso de generadores y las líneas de transmisión. Esto está dado por la alta complejidad de la modelación de las cargas, pues los parámetros de esta varían con muchos factores aleatorios como variables climáticas y culturales, por solo mencionar dos ejemplos.

Se presentan los resultados de una amplia revisión bibliográfica sobre el tema y se justifican las bases a tener en cuenta en la modelación. Se explica en qué consiste la modelación de carga y cuáles son sus tendencias actuales. Se presentan los resultados de la implementación de diferentes esquemas para la obtención de los parámetros de dichos modelos con la ayuda de la biblioteca Simpower System toolbox del Matlab 6.5

Debido a limitaciones reales de instrumentación para la realización de mediciones de campo el aporte fundamental del trabajo es dejar listas las herramientas para poder evaluar mediante comparación (tal y como se propone en buena parte de la bibliografía) los parámetros de los modelos de carga dinámicos a pequeña señal.

INDICE

<i>PENSAMIENTO</i>	i
<i>DEDICATORIA</i>	ii
TAREA TÉCNICA	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Modelación de cargas eléctricas.	5
1.1 Conceptos básicos.....	5
1.2 Proceso de modelación de las cargas.....	6
1.2.1 Enfoque basado en el conocimiento de la composición de las cargas.....	7
1.2.2 Enfoque basado en las mediciones.	9
1.3 Representación de modelos de carga.	13
1.3.1 Representación de modelos estáticos.....	14
1.3.2 Representación de modelos dinámicos.	16
1.4 Conclusiones del capítulo.....	22
CAPÍTULO 2. Herramientas para la modelación de cargas.	23
2.1 Selección del modelo	23
2.2 Modelo de dinámico de carga del Matlab Simulink Simpower System Toolbox.	26
2.3 Implementación de un modelo basado en el conocimiento de la composición de las cargas.....	30

2.4	Conclusiones parciales del Segundo Capitulo.....	35
CAPÍTULO 3.	Modelación de cargas a partir de datos reflejados en la bibliografía consultada.	36
3.1	Modelación de cargas a partir del modelo desarrollado en el Simpower System Toolbox.....	36
3.1.1	Simulación de la desconexión de un banco de capacitores.	40
3.1.2	Simulación de una carga utilizando exponentes propuestos como los más comunes en una carga compuesta normal.....	42
3.2	Modelación de cargas siguiendo un enfoque basado en el conocimiento de la composición de las cargas.	44
3.3	Conclusiones Parciales del capítulo.....	51
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		52
Conclusiones.....		52
Recomendaciones		53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		54

INTRODUCCIÓN

La operación estable de los Sistemas Eléctricos de Potencia depende de su habilidad para mantener un equilibrio continuo entre la salida eléctrica de las unidades generadoras (fuentes) y la carga eléctrica presente en el mismo. Consecuentemente, las características de la carga tienen una influencia importante en su estabilidad.

Con el aumento constante de cargas eléctricas, los sistemas con dificultades en reforzar sus líneas y plantas empiezan a sufrir problemas de estabilidad de voltaje, ángulo y frecuencia. Es por esto y; ante la casi imposibilidad técnico-económica de efectuar experimentos reales en los mismos, que se recurre a programas computacionales o experimentos de laboratorio para reproducir las condiciones de operación real del sistema con el objetivo de tomar las decisiones concernientes al reforzamiento y operación del Sistema. En esta dirección, los elementos de la Generación y las líneas de transmisión y distribución han gozado de un mayor estudio, desde los inicios de los Sistemas Eléctricos, y ya se dispone de modelos suficientemente exactos y probados de los diferentes elementos de esta parte de los mismos, sin embargo, debido a su complejidad, la modelación de carga es aún un problema abierto y bien difícil debido a que una barra de carga típica representada en estudios de estabilidad está compuesta por un gran número de dispositivos tales como lámparas fluorescentes e incandescentes, refrigeradores, calentadores, compresores, motores, hornos y otros más. La composición exacta de la carga es difícil de estimar [3].

Aún si la composición de la carga fuese conocida exactamente, no resultará práctico representar cada componente individual debido a que existen

normalmente millones de tales componentes en la carga total suministrada por un Sistema de potencia. Por lo tanto, la representación de carga en estudios del sistema está basada en una cantidad considerable de simplificación.

Si se utilizan representaciones inadecuadas de los elementos pertenecientes al sistema se puede incurrir en diseños pobres y decisiones inadecuadas en la operación, que pueden provocar costos excesivos y reducción en la confiabilidad.

Desde la aparición de los primeros sistemas de potencia, se ha empleado gran cantidad de tiempo y recursos en obtener modelos de los sistemas de generación y transmisión. Sin embargo, la parte más importante de dichos sistemas: los consumidores, han recibido una menor atención. Incluso, en la actualidad, las cargas constituyen un tema incierto para muchas empresas de electrificación, tal es así que importantes centros de investigación como el EPRI [6] están desarrollando Proyectos relacionados con esta temática.

Estos modelos de carga son una representación matemática de la relación entre un voltaje de barra (magnitud y frecuencia) y la potencia (activa y reactiva) o la corriente que entra a dicha barra de carga [5]. La modelación de carga es esencial para brindar una planificación y operación segura y económica de un sistema de potencia. Mucho progreso se ha logrado en la modelación de carga durante las tres últimas décadas.

Los modelos de carga son clasificados tradicionalmente en dos amplias categorías: modelos estáticos y modelos dinámicos.

Un modelo de carga estático expresa las características de la carga en cualquier instante de tiempo como funciones algebraicas de la magnitud del voltaje y la frecuencia de la barra en ese instante [5]. Las componentes activa P y reactiva Q son consideradas separadamente.

La mayoría de las respuestas de las cargas compuestas a los cambios de voltaje y frecuencia, son rápidas y la respuesta de estado estable se alcanza rápidamente. Esto es cierto al menos para amplitudes modestas de cambios de voltaje (V) y frecuencia (f).

Hay sin embargo muchos casos dónde es necesario una respuesta para la dinámica de las componentes de carga. Los estudios de oscilaciones del área, estabilidad de V , y la estabilidad a largo plazo exigen a menudo que la carga dinámica sea modelada. El estudio de sistemas con las concentraciones grandes de motores también requirió representación de dinámica de carga, estos modelos dinámicos se representan matemáticamente a través de ecuaciones diferenciales.

Varios modelos estáticos y dinámicos basados en representaciones matemáticas y físicas han sido estudiados para la descripción de las características generales de las cargas [5].

Las técnicas de identificación de parámetros de sistemas han sido ampliamente estudiadas para la modelación del sistema. Los datos de estímulos-respuestas son normalmente usados para identificar los parámetros de los modelos.

Para lograr que los resultados de simulación sean confiables, se debe conocer el comportamiento de la carga de acuerdo con su composición, la cual está determinada por factores como la hora, el día, la semana, época del año y condiciones climáticas. Es aquí donde cobra verdadera importancia el modelo de carga a utilizar y el procedimiento que se siga para obtenerlo.

El trabajo que se presenta esta estructurado en tres Capítulos.

El primer Capítulo, denominado Modelos de Carga recoge los resultados fundamentales de la revisión crítica de la bibliografía consultada por el autor acerca de la temática de la modelación de carga, para justificar la necesidad de la modelación de los motores de inducción como componentes de aporte significativo al comportamiento dinámico de las cargas de los Sistemas Eléctricos de potencia.

El Segundo Capítulo se dedica a exponer los modelos y herramientas utilizadas para su implementación, en este caso fundamentalmente los modelos disponibles en la librería SimPower System del Matlab/Simulink 6.5. Se implementan modelos a partir de los bloques disponibles en dicha librería para simular el comportamiento de la Potencia Activa y Reactiva con diferentes composiciones de carga ante variaciones del voltaje de alimentación.

En el Tercer Capítulo se exponen los resultados obtenidos de las corridas de los modelos implementados para datos cargas compuestas de sistemas reales además se utilizan varias composiciones de carga asumidas debido a la ausencia de composiciones típicas conocidas.

CAPÍTULO 1. Modelación de cargas eléctricas.

En este capítulo se presentan los resultados del análisis de la bibliografía correspondiente al tema de modelación de las Cargas, sobre la base de la necesidad de la modelación para los estudios de estabilidad. Se discuten los diferentes enfoques en la modelación reportados en la literatura consultada. Se caracterizan los diferentes modelos desarrollados, las formas (expresiones o ecuaciones) a las cuales responden además de sus alcances y deficiencias en cuanto a exactitud y complejidad.

1.1 Conceptos básicos.

Para comprender mejor cuales son las consideraciones a tomar en cuenta en un proceso de modelación de cargas se hace necesario establecer algunas definiciones en las que se debe expresar por ejemplo como se clasifica cada elemento conectado a una barra para ello se establecen las definiciones siguientes.

Carga: El término carga puede definirse de formas diferentes. La definición más simple es la que dice que carga es todo dispositivo que conectado al sistema, consume potencia. Sin embargo, la más completa es la que dice que carga es aquella porción del sistema que no está explícitamente representada en el modelo del mismo, pero que es tratada como si fuera un solo dispositivo conectado a una barra, de la cual consume potencia [1].

Esta definición incluye no solo a los elementos que únicamente consumen potencia, sino a aquellos que influyen directa o indirectamente en el

comportamiento del sistema, como los bancos de condensadores, reguladores de voltaje y transformadores reductores de distribución.

Existen otras formas de clasificar las cargas, pero que no son tan relevantes como las anteriores cuando se habla de modelado de cargas.

Modelo de Carga: Un modelo de carga se puede definir como la representación matemática de la relación entre la potencia consumida por una carga y la magnitud y frecuencia del voltaje de la barra asociada [1].

1.2 Proceso de modelación de las cargas.

Para simular el comportamiento del sistema de potencia, es necesario tener modelos adecuados de cada uno de sus elementos [2]. Esto es relativamente fácil en el caso de generadores, transformadores o líneas, dado que estos pueden ser modelados adecuadamente usando modelos de basamento físico, pero es diferente cuando se trata con cargas. En un caso general, la carga compuesta (carga de una barra), está constituida por una mezcla de componentes diferentes de carga, tales como lámparas, aires acondicionados, refrigeradores, etc. [3], los cuales presentan comportamientos eléctricos heterogéneos. Más aun, la mezcla o combinación varía a lo largo del día y por tanto, obtener un modelo de la carga compuesta es una tarea difícil, dado que esta composición de carga no es fácil de estimar y aun si fuese conocida, no será práctico representar cada componente de carga individual [4].

De acuerdo con la bibliografía, existen dos enfoques básicos para tratar de modelar el comportamiento estático y dinámico de la carga [3, 4]. El primero esta basado en obtener una representación del modelo de carga compuesta a partir del conocimiento de la mezcla de clases de carga. El segundo enfoque es medir directamente la sensibilidad de la potencia activa y la potencia reactiva de la carga de barra al voltaje y la frecuencia en subestaciones representativas.

La figura 1 resume el proceso de desarrollo de modelos de carga. Idealmente el proceso debiera comenzar con información sobre la composición para diferentes tipos de carga, horas del día y estaciones. Este conocimiento pudiera ser obtenido

de encuestas de uso-final, o a partir de mediciones. Luego es seleccionado, un modelo apropiado, el cual puede incluir un modelo del alimentador de distribución. Los parámetros para la representación de carga seleccionada pueden entonces ser derivados del inventario físico conocido. Es posible obtener directamente los parámetros a partir de las mediciones, evitando la necesidad de conocer el inventario físico.

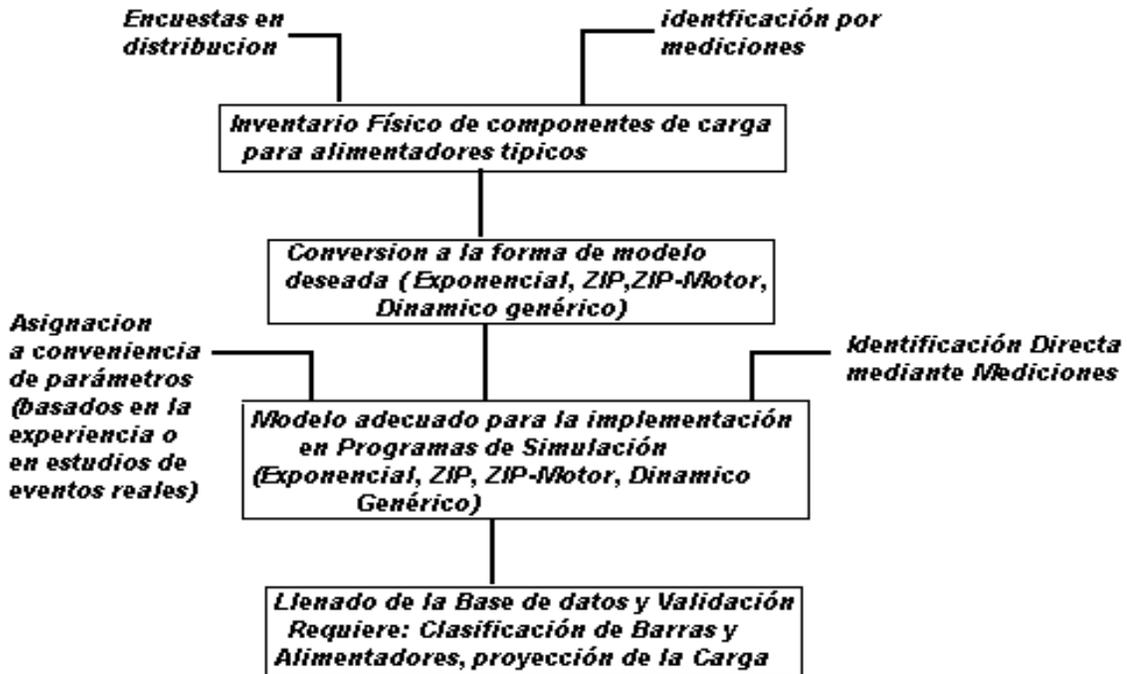


Figura 1.1 Desarrollo del Proceso de Modelación de la Carga.

1.2.1 Enfoque basado en el conocimiento de la composición de las cargas.

El caso del enfoque basado en mezcla de clases de carga, requiere para su pronóstico composiciones de carga típicas de cada una de múltiples clases de carga (residencial, comercial e industrial), y la mezcla o composición de dichas clases en cada barra [4].

Estas componentes de carga se han analizado con anterioridad en estudios realizados y se han podido caracterizar sus comportamientos, por lo que en algunas bibliografías como es el caso de la referencia [3] en la cual se exponen las

constantes necesarias para representar cada componente de carga en un modelo exponencial, como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 1.1 Constantes de cada elemento de carga tomadas de la referencia.

Componente de carga	N_p	N_q
Aire acondicionado	0.5	2.5
Calentador por resistencia	2.0	0
Lámpara fluorescente	1.0	3.0
Bombas ventiladores y otros motores	0.08	1.6
Grandes motores	0.05	0.5
Pequeños motores	0.1	0.6

Normalmente, la composición de la carga es difícil de obtener, empleando como fuentes de información la composición de carga registrada por las empresas eléctricas para propósitos diferentes o de los datos registrados para la facturación de los consumidores. Por tanto, el principal problema de esta aproximación es que la misma no refleja el comportamiento real de la carga en una barra.

En un caso general, la carga compuesta (carga de una barra), figura 1.2 está constituida por una mezcla de componentes diferentes de carga, tales como lámparas, aires acondicionados, refrigeradores, etc., [3] los cuales presentan comportamientos eléctricos heterogéneos. Más aun, la mezcla o combinación varía a lo largo del día y por tanto, obtener un modelo de la carga compuesta es una tarea difícil, dado que esta composición de carga no es fácil de estimar y aun si fuese conocida, no será práctico representar cada componente de carga individual.

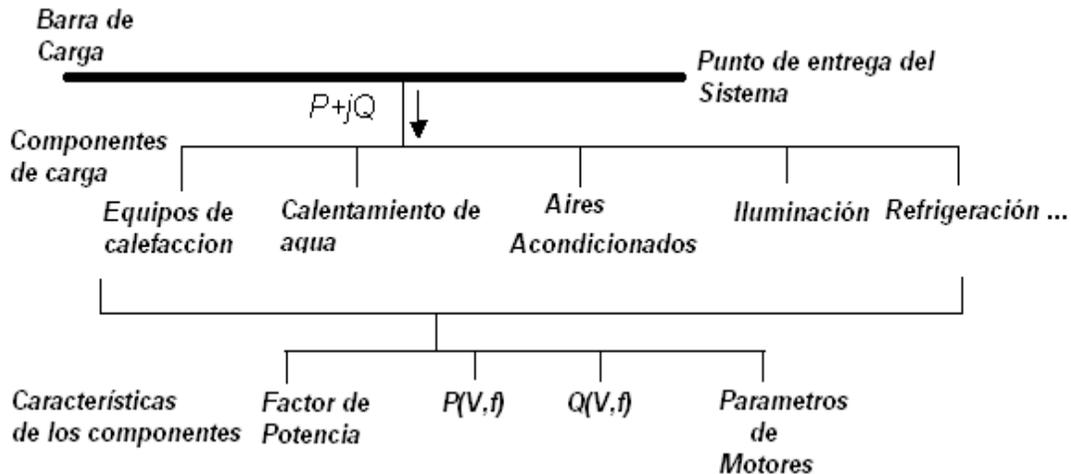


Figura 1.2 Descomposición de la carga compuesta.

1.2.2 Enfoque basado en las mediciones.

Siguiendo el enfoque basado en la medición del voltaje y la corriente en un punto y aplicando entonces una técnica de identificación de parámetros para obtener un equivalente dinámico y/o estático de la carga compleja, el problema es que es necesario un disturbio intencional o natural para obtener el modelo [5] [3]. Por lo tanto, esto solo puede conocerse cuando ocurren esos disturbios.

El enfoque propuesto por EPRI [6] generalmente se basa en el conocimiento de la mezcla de las clases de carga pero se propone una metodología la cual se pudiera considerar que abarca ambos enfoques [4]. Los dos enfoques son complementarios, según se plantea en este artículo, por tanto, ellos deben ser utilizados juntos para predecir las características de la carga bajo condiciones variables. No obstante, estos presentan desventajas significativas. El caso del enfoque basado en componentes, sugerido por EPRI, a través del programa LOADSYN, requiere para su pronóstico composiciones de carga típicas de cada una de múltiples clases de carga (residencial, comercial e industrial) y la mezcla o composición de dichas clases en cada barra.

Este proceso comienza con las mediciones de las formas de onda del voltaje y la corriente en todas las fases. Luego, esas formas de onda del voltaje son usadas como entradas para los modelos de predicción de corriente individuales para

estimar las formas de ondas de las corrientes consumidas por cada componente de carga.

Estas formas de onda estimadas de las corrientes y las corrientes de fase medidas son usadas para resolver un problema de optimización no lineal con restricciones, cuya solución es la mejor combinación lineal de las corrientes individuales estimadas que aproxima a la corriente total medida. Este proceso es análogo a un análisis de Fourier, donde las corrientes individuales estimadas de un conjunto de componentes de carga toman el lugar de las formas de ondas sinusoidales [4].

El uso de los programas computacionales como se puede ver anteriormente simplifica el proceso de modelación para ello se puede consultar las referencias las cuales brindan una visión del uso de estas técnicas [2, 7].

En el libro referenciado como [5] se propone un proceso mediante el cual se puede determinar las características dinámicas de una pequeña señal de cargas compuestas relativamente fácil mediante pruebas de sistemas sencillos. La figura 1.3 muestra una configuración de prueba que pudiera ser empleada cuando las cargas son alimentadas mediante dos transformadores con cambia-taps.

Inicialmente, un transformador con cambia-taps es ajustado elevando el voltaje por unos pocos taps y el otro reduciendo el voltaje también por unos pocos taps, manteniendo el voltaje constante. Entonces uno de los transformadores es conmutado, esto produce no solo un cambio de magnitud de voltaje sino también un cambio instantáneo en el ángulo de la barra de carga. Mediante variaciones de las posiciones iniciales de los taps, es posible obtener un rango de cambios de voltaje, tanto en la dirección positiva como en la negativa. Seleccionando apropiadamente las posiciones de los taps también es posible producir un cambio de ángulo con solo un muy pequeño cambio de voltaje.

Esto es útil en la separación de los efectos de los cambios de voltaje en magnitud y ángulo.

Si existe un banco de capacitores conmutados en la barra de carga, este debe ser conectado y desconectado para producir un cambio de magnitud del voltaje en la

carga sin cambio en el ángulo. Las respuestas obtenidas en esta forma son esencialmente de pequeña señal.

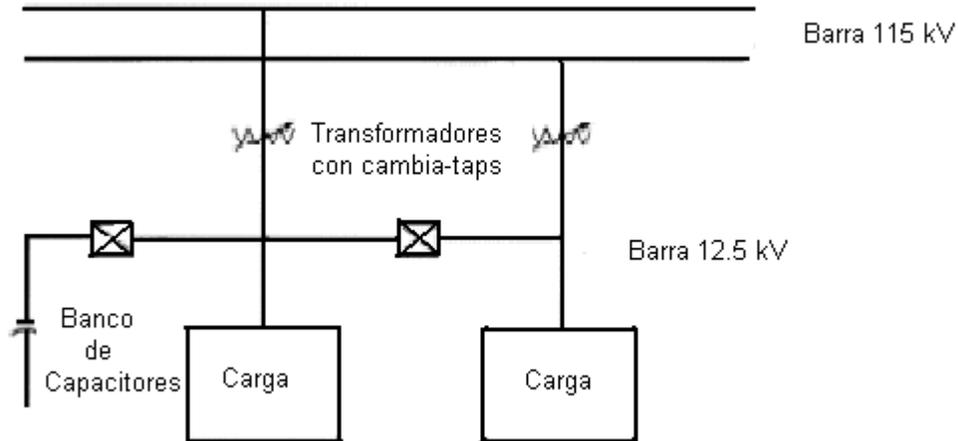


Figura 1.3 Esquema mediante el cual se puede obtener un disturbio intencional [5].

Otras bibliografías como es el caso de la tesis doctoral de la referencia [3] proponen pruebas de campo de una naturaleza algo parecida a la propuesta por Kundur solo que esta propone una variación manual y simultánea de los cambia-taps de los transformadores operando estos en el orden de 1, 2 y 3 pasos teniendo en cuenta que cada paso debe representar un cambio de aproximadamente 1.67% por lo que la variación se encuentra en el orden de $\pm 1.7\%$, $\pm 3.45\%$, $\pm 5\%$ en ambas direcciones de forma tal que los cambios en el voltaje no se encuentre por encima del $\pm 5\%$. El esquema de la prueba propuesta por Inés Romero se muestra a continuación en la figura 1.4.

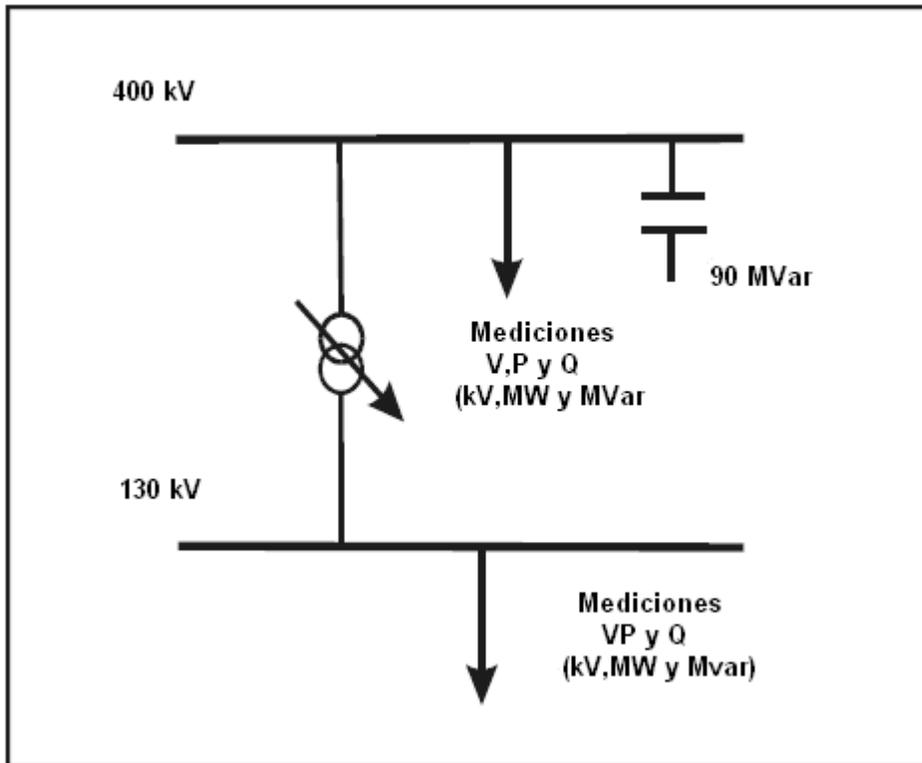


Figura 1.4 Diagrama propuesto en la tesis doctoral de Inés Romero [3].

Esta tesis también valora la posibilidad de aplicarle una desconexión y conexión de bancos de capacitores en caso de existir estos en la subestación en sometida a estudio, esto provocaría una variación instantánea del voltaje en la barra del sistema donde se encuentre.

También propone otra variante para la obtención de parámetros la cual consiste en el monitoreo de señales propias de la operación del sistema pero que puede ser un tanto más compleja en cuanto al consumo de tiempo y la disponibilidad de instrumentos pues esta supone como instrumento de medición una computadora la cual debe contar con una tarjeta de entrada analógica, además se le debe instalar el software LABVIEW [3].

Durante la adquisición de datos se utilizarían 13 canales de entrada a la computadora. En el proceso de medición se utilizan 4 señales para medir la potencia activa y reactiva en el secundario de un transformador trifásico pero es de destacar que como se pretende obtener datos de una operación normal del sistema se puede chequear este en diferentes estaciones del año, por ejemplo en

la subestación donde se aplicó esta prueba durante el verano se desconecta un transformador por lo que se hacen nulas las señales referentes a este, pero durante el invierno debido al incremento del uso de los equipos de calefacción existe un incremento de la carga y se hace necesario la puesta en servicio del otro transformador disponible.

1.3 Representación de modelos de carga.

Un modelo debe representar el sistema de acuerdo con lo que se desea estudiar, no más. Un modelo muy simplificado puede dar resultados erróneos, mientras que uno muy detallado revela resultados innecesarios y hace la investigación más lenta y costosa. En este sentido es recomendable probar varios modelos para definir cuál es el que cumple con los requisitos de precisión y complejidad [2].

Los modelos de carga se dividen en dos grandes grupos: los Modelos Estáticos y los Modelos Dinámicos. Esta clasificación se basa en el tipo de datos que son considerados para calcular el modelo final [5].

Para obtener dichos modelos son esenciales los estudios basados en pruebas de campo, en conjunto con el análisis matemático y estadístico.

En general, el objetivo de un modelo de carga es reproducir el comportamiento de la carga real a través de una correcta definición de los parámetros que conforman las ecuaciones del modelo, de acuerdo con su comportamiento durante situaciones anormales como cambios bruscos en el voltaje o la corriente. Para ello, se recomienda que un buen modelo tenga 2 características:

1. El modelo debe corresponder físicamente a la carga, es decir, el modelo no debe violar las características reales de la carga
2. El modelo debe ser flexible. En general, los modelos deben aproximar el efecto de los dispositivos de compensación, transformadores con cambiadores de taps, reguladores de voltaje y generadores sincrónicos y de inducción, que estén conectados en los sistemas de subtransmisión y distribución en estudio.

1.3.1 Representación de modelos estáticos.

Estos modelos expresan las potencias activa y reactiva en cualquier instante del tiempo, como función de la magnitud y frecuencia del voltaje de la barra en ese mismo instante. En algunas ocasiones el efecto de la frecuencia puede despreciarse para hacer el modelo más sencillo porque se ha visto que su efecto en el sistema es despreciable. Por eso, los modelos estáticos se han clasificado como independientes de la frecuencia y dependientes de la frecuencia.

Dentro de los primeros, se puede mencionar los de potencia, corriente e impedancia constante, así como el ZIP [3, 5, 8] y el potencial [9]. Los segundos son modelos considerados como los más generales y complejos. Tiene la ventaja de que presentan un comportamiento más real durante simulaciones ya que toman en cuenta el efecto combinado de cambios de voltaje y frecuencia.

En general, se ha demostrado que los modelos estáticos no son recomendables para modelar circuitos de distribución o cargas completas de subestación ya que, en la mayoría de los casos, éstas presentan características dinámicas que no son representadas correctamente.

Tradicionalmente, la dependencia de las características de la carga con el voltaje ha sido representada mediante el modelo exponencial [3, 8, 9]:

$$P = P_0 (\bar{V})^a \quad 1.1$$

$$Q = Q_0 (\bar{V})^b \quad 1.2$$

En este y otros modelos de carga

$$\bar{V} = \frac{V}{V_0} \quad 1.3$$

Donde P y Q son las componentes activa y reactiva de la carga cuando la magnitud del voltaje de barra es V. El subíndice 0 indica la condición inicial de operación.

Los parámetros de este modelo son los exponentes a y b [5] en algunas bibliografías también representados como N_p y N_q [3]. Con estos exponentes igual a 0, 1, o 2, el modelo representa características de potencia constante, corriente constante, o impedancia constante, respectivamente. Para cargas compuestas, sus valores dependen de las características agregadas de los componentes de carga.

El exponente “ a ” (o el “ b ”) en algunas bibliografías expuestos como N_p y N_q es casi igual a la pendiente dP/dV (o dQ/dV) en $V=V_0$. Para sistemas de carga compuestos, el exponente a usualmente está entre 0.5 y 1.8 [5]; el exponente b esta típicamente entre 1.5 y 1.6 [5]. Una característica significativa del exponente b es que este varía como una función no lineal del voltaje. Esto es causado por la saturación magnética en transformadores de distribución y motores. A los voltajes más altos, Q tiende a ser significativamente mayor.

En la ausencia de información específica, el modelo estático de carga mas aceptado es representar la potencia activa como una carga de corriente constante (esto es, $a=1$) y la potencia reactiva como impedancia constante (esto es, $b=2$)[5].

Un modelo alternativo que ha sido ampliamente usado para representar la dependencia del voltaje de las cargas es el modelo polinomial:

$$P = P_0 \left[p_1 \bar{V}^2 + p_2 \bar{V} + p_3 \right] \quad 1.4$$

$$Q = Q_0 \left[q_1 \bar{V}^2 + q_2 \bar{V} + q_3 \right] \quad 1.5$$

Este modelo es comúnmente referido como modelo ZIP, debido a que esta compuesto por Impedancia constante (Z), corriente constante (I) y potencia constante (P) [3, 5]. Los parámetros de este modelo son los coeficientes p_1 a p_3 y q_1 a q_3 , los cuales definen la proporción de cada componente.

La dependencia de las características de la carga con la frecuencia es usualmente representada multiplicando el modelo exponencial o el de polinomios por un factor como se muestra a continuación:

$$P = P_0 (\bar{V})^a (1 + K_{pf} \Delta f) \quad 1.6$$

$$Q = Q_0 (\bar{V})^a (1 + K_{qf} \Delta f) \quad 1.7$$

o

$$P = P_0 [p_1 \bar{V}^2 + p_2 \bar{V} + p_3] (1 + K_{pf} \Delta f) \quad 1.8$$

$$Q = Q_0 [q_1 \bar{V}^2 + q_2 \bar{V} + q_3] (1 + K_{qf} \Delta f) \quad 1.9$$

Donde Δf es la desviación de la frecuencia ($f-f_0$). K_{pf} está típicamente entre 0 y 3.0, y K_{qf} entre -2.0 y 0. La frecuencia de barra f no es usualmente una variable de estado en el modelo de sistema utilizado para análisis de estabilidad. Por lo tanto, esto es evaluado calculando la derivada con respecto al tiempo del ángulo del voltaje de barra.

Un modelo comprensible que ofrece la flexibilidad de acomodar muchas formas de representación de carga es como sigue:

$$P = P_0 [P_{ZIP} + P_{EX1} + P_{EX2}] \quad 1.10$$

Donde

$$P_{ZIP} = p_1 \bar{V}^2 + p_2 \bar{V} + p_3 \quad 1.11$$

$$P_{EX1} = p_4 (\bar{V})^{a_1} (1 + K_{pf1} \Delta f) \quad 1.12$$

$$P_{EX2} = p_5 (\bar{V})^{a_2} (1 + K_{pf2} \Delta f) \quad 1.13$$

La expresión para la componente reactiva de la carga tiene una estructura similar. La compensación de potencia reactiva asociada con la carga es representada separadamente.

1.3.2 Representación de modelos dinámicos.

Estos modelos expresan las potencias activa y reactiva en cualquier instante del tiempo como función de la magnitud y la frecuencia del voltaje de la barra en el mismo instante de tiempo así como en anteriores. Esencialmente se utilizan ecuaciones diferenciales para representarlos. Presentan una mayor fidelidad y los

resultados son más confiables que los obtenidos con los modelos estáticos. Los modelos más utilizados en la actualidad son el de motor de inducción [10] y otro modelo en el cual se implementa una función de transferencia [1]. Estos modelos tienen la ventaja de reproducir comportamientos como la recuperación de carga que da un salto de potencia en el momento que se produce uno en el voltaje. Mientras la tensión se mantiene, la carga tiende a recuperarse a un valor determinado dado a través de un comportamiento de primer orden, segundo orden o superior.

Si las características de la carga son afectadas por la entrada de voltaje como un todo, estas solo pueden ser descritas mediante el modelo dinámico de carga. Debido al hecho de que la carga consiste de varios componentes con características diferentes, un modelo de carga compuesto ha sido propuesto y ampliamente aplicado en los centros de control o despachos de carga recientemente. Este es un modelo físico que incorpora tanto las características estáticas como las dinámicas de las cargas, la estructura del cual es mostrada en la figura 5.

De dicha figura puede ser observado que esta estructura de modelo combina el modelo ZIP [3, 5, 11] y el modelo de un motor de inducción [10]. La carga real de una barra puede ser clasificada generalmente como una carga industrial, una carga agrícola, una carga comercial o una carga residencial [3]. Las cargas industriales y agrícolas consisten fundamentalmente de grandes motores, mientras que las cargas comerciales y residenciales consisten fundamentalmente de pequeños motores, dispositivos de producción de calor así como de iluminación. Así el uso del modelo del motor [10] en paralelo con las características de impedancia, corriente y potencia constante es muy representativo en la sumatoria de las características de las cargas presentes en una barra.

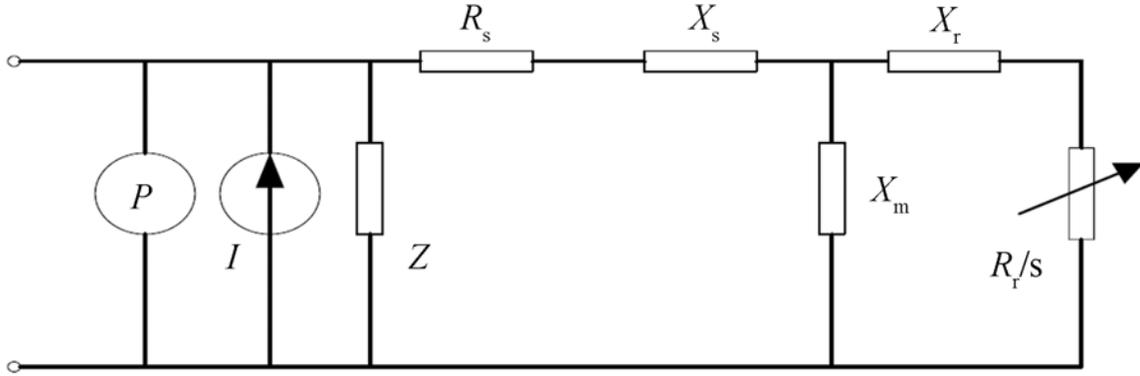


Figura 1.5 Estructura propuesta del modelo ZIP.

Bajo el voltaje de barra, la dinámica del motor puede ser descrita mediante las ecuaciones diferenciales algebraicas siguientes como se observa en la referencia [12]:

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_d] - (\omega - 1)E'_d \quad 1.14$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_q + (X - X')I_q] - (\omega - 1)E'_q \quad 1.15$$

$$\frac{d\omega}{dx} = -\frac{1}{2H} [(A\omega^2 + B\omega + C)T_0 - (E'_d I_d + E'_q I_q)] \quad 1.16$$

$$I_d = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_d - E'_d) + X'(U_q - E'_q)] \quad 1.17$$

$$I_q = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_q - E'_q) + X'(U_d - E'_d)] \quad 1.18$$

Con

$$T' = \frac{X_r + X_m}{R_r}, X = X_s + X_m, X' = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}, A + B + C = 1 \quad 1.19$$

Donde R_s es la resistencia del enrollado del estator, X_s es la reactancia de dispersión del estator; X_r es la reactancia de dispersión del rotor, X_m es la reactancia de magnetización, R_r es la resistencia del rotor; H es la constante de inercia del rotor; A , B y C denotan los coeficientes de proporcionalidad con: el cuadrado de la velocidad, la velocidad y el término independiente de la velocidad

(cargas mecánicas Tipo ventilador, de Potencia constante y de Momento Constante). E_d , E_q y ω son estados dinámicos referidos a las fems transcientes de los ejes directo eje-d y eje en cuadratura eje-q, y la velocidad del rotor; U_d , U_q , I_d , I_q son estados algebraicos referidos a los voltajes de barra y corrientes de estator de eje directo eje-d y eje en cuadratura eje-q respectivamente.

Las características ZIP de la carga bajo el voltaje de barra de entrada pueden ser descritas mediante las ecuaciones algebraicas siguientes tal como un modelo ZIP anteriormente referenciado:

$$P_S^* = P_Z^* \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + P_I^* \left(\frac{V}{V_0} \right) + P_P^* \quad 1.20$$

$$Q_S^* = Q_Z^* \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + Q_I^* \left(\frac{V}{V_0} \right) + Q_P^* \quad 1.21$$

En la ecuación anterior, P_Z^* , P_I^* , P_P^* representan los coeficientes de proporcionalidad de las componentes de impedancia, corriente y potencia constante de la carga estática activa y Q_Z^* , Q_I^* , Q_Q^* de la carga estática reactiva respectivamente o sea son los exponentes N_p y N_q o a y b como se muestran en las diferentes bibliografías. Ellos satisfacen:

$$P_Z^* + P_I^* + P_P^* = 1 - K_{pm} \quad 1.22$$

$$Q_Z^* + Q_I^* + Q_P^* = 1 - \frac{Q_{motor}}{Q_0} \quad 1.23$$

Donde Q_0 es la carga reactiva en estado estable antes del disturbio, mientras que Q_{motor} es la potencia reactiva inicial del motor equivalente, y K_{pm} es definido como

$$K_{pm} = \frac{P_{motor}}{P_0} \quad 1.24$$

Con P_0 como la potencia activa de la carga en estado estable, y P_{motor} la potencia activa inicial del motor equivalente. Todos los parámetros están en por unidad. La potencia base es escogida aquí como:

$$S_{base} = \sqrt{P_0^2 + Q_0^2} \quad 1.25$$

Basados en esta estructura de modelo, existen trece parámetros a ser definidos en total, esto es [Rs, Xs, Xm, Rr, Xr, H, A, B, Kpm, P*_Z, P*_P, Q*_Z, Q*_Q] [12] aunque se propone en otros estudios una variante que alcanza quince parámetros [13]. Entonces, el trabajo de modelación de carga basado en mediciones es encontrar los valores numéricos de este conjunto de parámetros, basándonos en las mediciones de campo [11].

En el caso de los modelos dinámicos en los cuales se implementa una función transferencia [1] con el objetivo que este una vez que reciba los datos de la variación de voltaje a su entrada represente la potencia de la carga de forma tal que el resultado ofrecido tenga respecto al real de la carga un error mínimo aceptable, tal es el caso de la función transferencia mostrada en la ecuación 1.1 utilizado en la modelación de las cargas en el SEP de Costa Rica, se puede apreciar que en esta modelación se utiliza el modelo exponencial acompañado de un función transferencia que representa la parte dinámica de la carga presente en cada sistema de potencia.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{N_p} \left[\left[\frac{1 + T_{P1}S}{1 + T_{P2}S} \right] \right] \quad 1.26$$

Donde:

P: Potencia activa consumida por la carga.

V: Voltaje de la carga.

P0: Potencia activa que consume la carga a voltaje

Y frecuencia nominal.

V0: Voltaje nominal de la carga.

TP1, TP2: Constantes de tiempo.

NP: Exponente de la relación entre la potencia

Activa y el voltaje.

El cálculo de los parámetros NP, TP 1 y TP 2 se puede realizar mediante el uso de las ecuaciones (3), (4) y (5).

$$N_p = \frac{\ln\left(\frac{P_{final}}{P_{inicial}}\right)}{\ln\left(\frac{V_{final}}{V_{inicial}}\right)} \quad 1.27$$

$$\frac{T_{P1}}{T_{P2}} = \frac{P_{inicial} - P(t_0)}{P_{inicial} - P_{final}} \quad 1.28$$

$$T_{P2} = \frac{T_{\Delta}}{\ln\left(\frac{P_{final} - P(t_0)}{bP_{final}}\right)} \quad 1.29$$

El modelo de potencia reactiva es muy similar y queda como se muestra a continuación.

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{N_q} \left[\left(\frac{1 + T_{P1}S}{1 + T_{P2}S} \right) \right] \quad 1.30$$

Esta estructura garantiza modelar la dependencia del consumo de potencia con el voltaje, así como comportamientos dinámicos de primer orden. El efecto de las variaciones de frecuencia se desprecia, ya que, en general, la mayoría de las cargas son independientes de ella y es difícil generar variaciones controladas de frecuencia en el sistema además que en un sistema real las variaciones de frecuencia son bastante pequeñas.

Esta función transferencia además de presentar buena fiabilidad presenta una considerable ventaja y esta radica en que se tiene una menor cantidad de constantes lo que puede ahorrarnos trabajo y complejidad a la hora de manejar los resultados de la modelación.

1.4 Conclusiones del capítulo.

1. La modelación de la carga es un tema complejo y aun abierto a la investigación, lo que a criterio del autor esta dado por la complejidad de esta componente esencial de los Sistema Eléctricos de Potencia, de hecho parece ser un consenso generalizado el criterio de que no es posible, desde el punto de vista práctico obtener un modelo único de carga aplicable para diferentes composiciones, horas del día, estaciones climáticas, diferentes niveles de voltaje, etc.
2. De acuerdo con los resultados de la bibliografía consultada existen dos enfoques fundamentales en la modelación de las cargas; estos son: Enfoque basado en el conocimiento de la composición de la carga y el enfoque basado Mediciones; el más desarrollado ha sido el enfoque basado en la medición directa del comportamiento de la potencia ante una variación de voltaje. A criterio del autor cada uno tiene sus ventajas y limitaciones y por tanto se coincide con aquellos que plantean que se complementan.
3. Aunque para la modelación de cargas han existido varias formas de modelos (exponenciales, de polinomios, etc.) una clasificación mas general de acuerdo con la variación de P y Q como función del voltaje de acuerdo con el tipo de respuesta que se desea investigar los divide en: modelos estáticos y modelos dinámicos. En el caso de los primeros han sido utilizados y reportados desde el comienzo de los estudios de comportamiento de Sistemas Eléctricos para condiciones estables, sin embargo su aplicación en análisis de estabilidad a pequeña y gran señal han demostrado la necesidad de modelos dinámicos destacándose entre ellos los que utilizan una función transferencia y el denominado ampliamente como modelo ZIP-motor.

CAPÍTULO 2. Herramientas para la modelación de cargas.

En el Capítulo que se presenta a continuación se exponen algunos criterios acerca de algunos modelos de carga implementados mediante el empleo del paquete de Software Matlab y en específico el Toolbox Simpower System del Simulink. Se describen las ecuaciones de los modelos así como la implementación paso a paso de los mismos, mediante la descripción de cada uno de los bloques empleados. Además se implementa un modelo para evaluar la respuesta dinámica de la carga en un esquema de una subestación con dos transformadores; como el mencionado en [3] ya referenciado en el Capítulo I, y otro desarrollado a partir de suponer conocida la composición de la carga, en el cual se emplean los coeficientes para diferentes cargas o componentes de las mismas encontrados en la literatura

2.1 Selección del modelo

En la modelación de cargas se ha extendido el uso de ecuaciones como función transferencia en un bloque al cual se le suministra como datos de entrada una señal de un disturbio de voltaje con el objetivo de obtener una modelación lo mas real posible del comportamiento de la carga en cuanto a lo que es la variación de u potencia activa y reactiva como función de la variación de voltaje provocada por el disturbio.

Esta función no necesariamente tiene que ser siempre la misma, solo es necesario asegurarse que la ecuación utilizada puede constituir un modelo adecuado para unas condiciones dadas. Existen varias formulaciones; pero dentro de estas existe una que presenta una característica importante, y es que se necesite una pequeña

cantidad de parámetros a manejar, por lo que el resultado de esta puede ser más sencillo de comprender así como la influencia de cada parámetro en el comportamiento del modelo de carga.

Si se toma en cuenta que una función con esas características se encuentra implementada en el Software Matlab para la modelación de cargas con comportamiento dinámico esto ahorra tiempo y esfuerzo. Dicho bloque; está disponible en la librería Simpower System toolbox desde la versión 6.5

Un modelo similar ya ha sido reportado anteriormente en la literatura consultada en el Capítulo I [1] para modelar cargas en Costa Rica, y esta dado por las expresiones 1.26 para la representación del modelo de potencia activa y la 1.30 para el modelo de potencia reactiva.

Las variables de la formulación que como se ha dicho y se puede observar en la sección 1.3.2 no son muchas se presentan también en el análisis previo realizado en el Capítulo I donde se analiza el significado de cada una de ellas.

Los parámetros señalados como constantes de tiempo así como los exponentes NP y NQ se pueden determinar mediante las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3.

$$N_p = \frac{\ln\left(\frac{P_{final}}{P_{inicial}}\right)}{\ln\left(\frac{V_{final}}{V_{inicial}}\right)} \quad (2.1)$$

En esta ecuación se tienen cuatro incógnitas que se pueden determinar fácilmente del análisis del disturbio (siempre y cuando se disponga de las mediciones de campo adecuadas) en el cual se basaría la modelación pues coinciden con los valores de la potencia y el voltaje antes y después del evento. Esto concuerda con las conclusiones planteadas en el Capítulo I acerca de la necesidad de la interacción o complementariedad de los dos enfoques generalizados en la modelación de carga

La ecuación 2.2 representa una dependencia entre las constantes de tiempo TP1 y TP2 en la cual solo aparece un nuevo parámetro, además de los anteriormente

mencionados, este parámetro es $P(t_0)$ el cual se encuentra definido en la figura 2.1.

$$\frac{T_{P1}}{T_{P2}} = \frac{P_{inicial} - P(t_0)}{P_{inicial} - P_{final}} \quad (2.2)$$

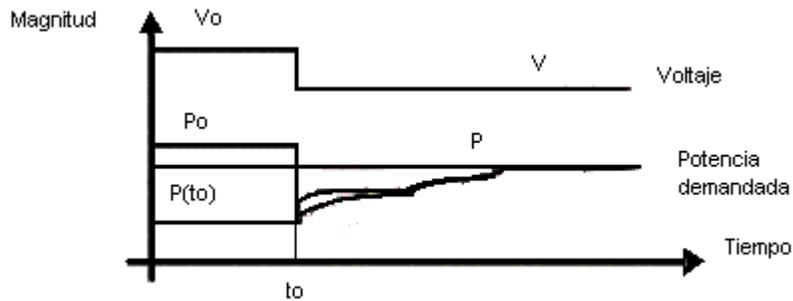


Figura 2.1 Respuesta típica de una carga al ser sometida a un cambio brusco de voltaje y su recuperación. Tomado de [1]

Como se puede observar $P(t_0)$ es el valor de la potencia al cual desciende esta una vez que se produce el disturbio de voltaje al que se somete la carga.

La expresión 2.3 expresa la forma de obtener el valor de T_{P2} el cual es necesario para calcular T_{P1} ,

$$T_{P2} = \frac{T_{\Delta}}{\ln\left(\frac{P_{final} - P(t_0)}{bP_{final}}\right)} \quad (2.3)$$

En esta expresión que depende de la potencia antes y después del disturbio además se puede apreciar que aparecen dos nuevos parámetros que son T_{Δ} y b los cuales se definen en la figura 2.2

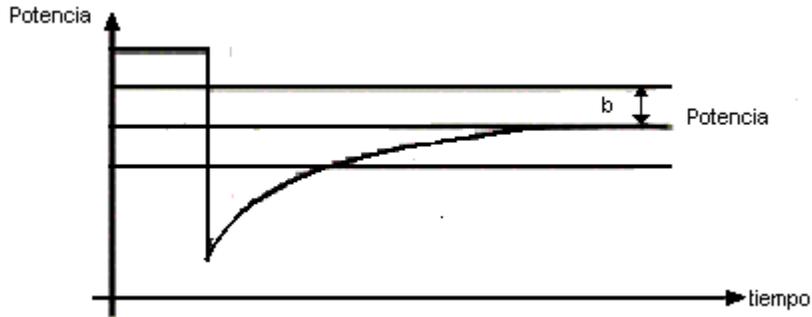


Figura 2.2 Definición de la banda de asentamiento de la potencia. Tomado de [1]

En la figura se define que TA es el tiempo de asentamiento o sea el tiempo que la potencia se encuentra dentro de una banda de ancho 2b.

2.2 Modelo de dinámico de carga del Matlab Simulink Simpower System Toolbox.

El Simpower System toolbox [Simpower System User' Guide. Math Works, Inc] es una poderosa librería desarrollada a partir de las versiones más recientes de Matlab Simulink. Esta es invocada desde el Matlab mediante el comando "powerlib", apareciendo la ventana que se muestra en la figura 2.3 debajo. Como se puede apreciar en la ventana mostrada esta herramienta cuenta con una serie de elementos equivalentes a partes de sistemas eléctricos concebidos para la modelación de sus comportamientos.

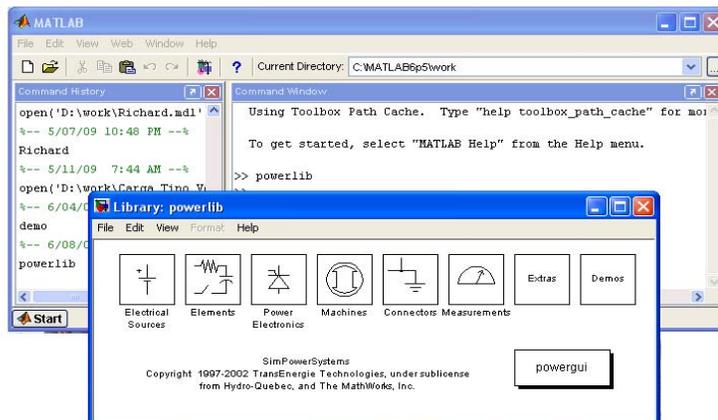
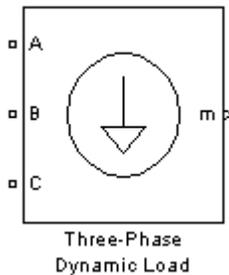


Figura 2.3 Pantalla inicial de la librería Simpower System toolbox

En esta librería se puede encontrar un bloque presentado como una carga dinámica trifásica (3-Phase Dynamic Load) (figura 2.4), que significa una gran ayuda para la modelación de las cargas pues permite simular el comportamiento de la carga combinada en una barra de forma sencilla.



a)

Block Parameters: Three-Phase Dynamic Load

Three-Phase Dynamic Load (mask) (link)

Implements a three-phase, three-wire dynamic load. Active power P and reactive power Q absorbed by the load vary as function of positive-sequence voltage V according to following equations:

If $V > V_{min}$, P and Q vary as follows:

$$P = P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{n_p} \frac{1 + T_{p1}.s}{1 + T_{p2}.s}$$

$$Q = Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{n_q} \frac{1 + T_{q1}.s}{1 + T_{q2}.s}$$

if $V < V_{min}$
Same equations with $n_p = n_q = 2$ (constant impedance load)

Check 'External control of PQ' to control power from a vectorized Simulink signal [P Q].

Parameters

Nominal L-L voltage and frequency [Vn(Vrms) fn(Hz)]:
[500e3 60]

Active _reactive power at initial voltage [Po(W) Qo(var)]:
[50e6 25e6]

Initial positive-sequence voltage Vo [Mag(pu) Phase (deg.)]:
[0.994 -11.8]

External control of PQ

Parameters [np nq]:
[1.3 2]

Time constants [Tp1 Tp2 Tq1 Tq2] (s):
[0 0 0 0]

Minimum voltage Vmin (pu):
[0.7]

OK Cancel Help Apply

b)

Figura 2.4 Modelo del bloque de carga dinámica del Simpower System toolbox. a) Subsistema utilizado, b) Máscara desplegada para suministrar los datos al bloque.

Como puede apreciarse dicho bloque modela una carga dinámica mediante la evaluación de las ecuaciones 1.26 y 1.30 del Capítulo I y analizadas en la sección 2.2 ver figura 2.4 b) de la máscara del subsistema.

A través de esta máscara es posible pasar una serie de datos al bloque, los que (ver figura 2.4 b) se corresponden con los valores de una carga normal; en este caso: la potencias activa y la reactiva, el voltaje de línea a línea y su frecuencia, Debe tenerse en cuenta que estos son los datos nominales de la carga a modelar.

Como se sabe que este bloque responde las ecuaciones 1.26 y 1.30 y se conoce que estas presentan una serie de exponentes y constantes para su evaluación el bloque presenta dos vectores de entrada a través de los cuales se brindan al subsistema las constantes de tiempo de la parte dinámica de la carga y los exponentes de dependencia de la potencia con el voltaje.

Además en la máscara de la carga se dispone de una opción (que se identifica como: control externo de P y Q), la cual brinda la oportunidad de modelar la carga de forma tal que se pueda controlar el consumo de potencia desde el exterior del modelo, pasándole un vector de valores de P y Q. Por último es necesario establecer un valor mínimo de voltaje (al final de la máscara) que establece que cuando el voltaje aplicado cae por debajo del mínimo especificado la modelación pasa a ser evaluada con $N_p=2$ y $N_q=2$, lo que según las bibliografías estudiadas sería equivalente a considerar la carga como una carga de impedancia constante. Esto también lo hacen algunos modelos implementados en el software PSX desarrollado por el CEE de la Facultad de Ingeniería Eléctrica del UCLV y que es utilizado por el Despacho Nacional

Utilizando como plataforma de trabajo esta biblioteca; se implementó un sistema de prueba como el recomendado en [5], para ello se seleccionó una fuente de voltaje trifásica (bloque disponible en la librería 'powerlib") que unida una rama R-L serie (empleada para representar el sistema eléctrico), los bloques que modelan transformadores, interruptores (breakers), Barras y elementos de medición, así como el ya mencionado bloque de carga trifásica dinámica, además de osciloscopios como elementos de registro y visualización del comportamiento del sistema propuesto para la realización de experimentos que permitan medir el comportamiento real de la carga ante variaciones del voltaje En los bloques correspondientes a los transformadores se ajustan sus voltajes de salida por

encima y por debajo del nominal; para simular el ajuste propuesto de los cambiataps. Como dichos equipos deben ser conmutados; para obtener un disturbio de voltaje, se inserta en su secundarios Interruptores (otro bloque disponible en la librería mencionada), en los cuales pueden ser programados sus tiempos de apretura o cierre, Una vez implementado todo esto en un modelo de Matlab/Simulink, mediante el empleo de una barra de medición que brinda una señal de voltaje y una de corriente se puede además obtener los valores de potencia activa y reactiva mediante un bloque de potencia activa y reactiva que recibe estas señales y las convierte en potencia.

Ya se ha conectado todo lo que se pudiera denominar como sistema pues solo falta la conexión de la carga que como se definió en el epigrafe 1.1 también incluye a los capacitores, para ello se conecta el bloque de carga dinámica a la salida de la barra de mediciones y se conecta en paralelo una carga capacitiva controlada por un Breaker que se encargará de provocar un disturbio mediante la manipulación del capacitor.

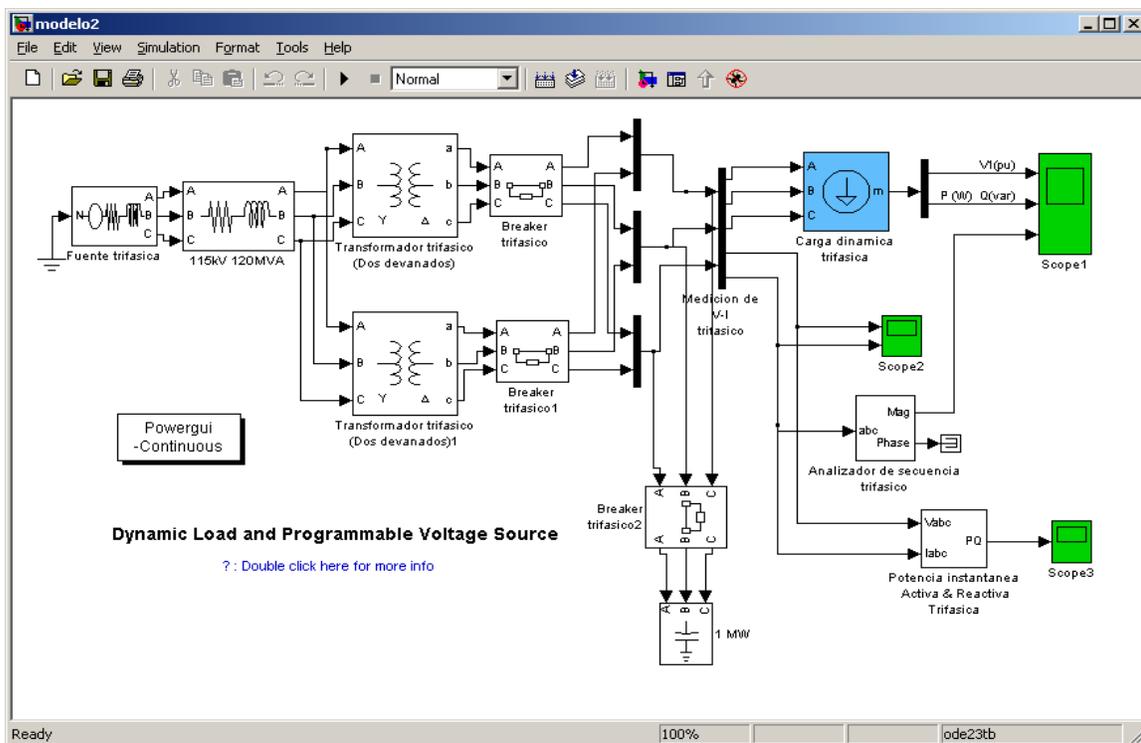


Figura 2.5 Modelo de carga dinámica construido a partir de la utilización de la biblioteca Simpower System toolbox.

Una vez terminado el modelo de carga este queda como se muestra en la figura 2.5 en la que se pueden observar todos los elementos del modelo de carga dinámica construido con la utilización de la biblioteca Simpower System toolbox del software matlab muy importante apreciar la conexión de los osciloscopios mediante los cuales se podrá determinar de forma visual el comportamiento de la carga.

2.3 Implementación de un modelo basado en el conocimiento de la composición de las cargas.

La modelación de las cargas puede tener basamento en el conocimiento de la composición de esta, para ello se hace necesario representar la carga combinada de forma tal que se pueda ofrecer al modelo de carga qué parte de la carga total demandada pertenece a cada componente.

Para implementar el modelo se supone un sistema el cual se representa a partir de una fuente programable (Figura 2.7 a) que será la encargada de provocar el disturbio necesario a través del cual se podrá analizar el comportamiento de la potencia activa y reactiva de la carga, es importante destacar que dicha fuente además de los parámetros de operación como son el voltaje y la frecuencia presenta la opción de variar la señal de salida en cuanto a amplitud fase y velocidad, también ofrece la posibilidad de que esta variación se produzca de diferentes formas (Paso, Rampa, Modulación, Tabla de parejas de tiempo-amplitud) como se muestra en la figura 2.6.

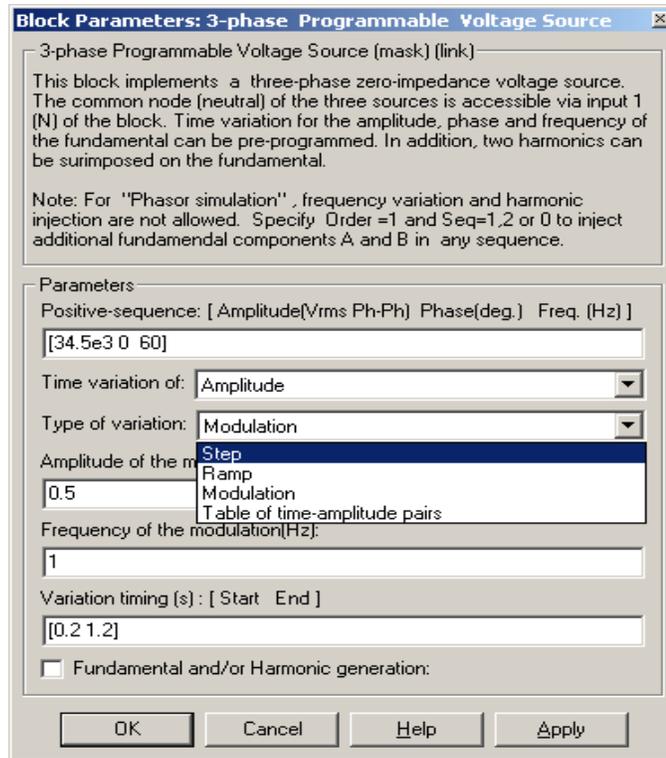
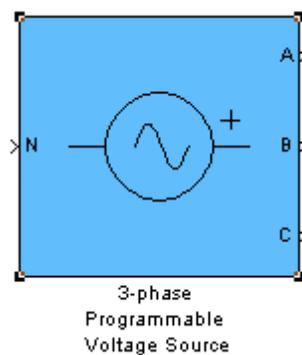
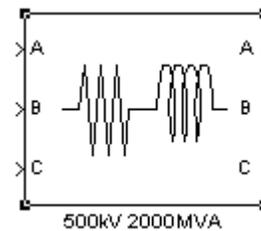


Figura 2.6 Máscara desplegada por la fuente programable.

Para representar mejor un sistema la fuente se encuentra seguida de una rama serie (Figura 2.7 b) que tomara el papel de la impedancia del sistema teniendo en cuenta el voltaje de la barra donde se procederá a modelar la carga y el nivel de cortocircuito presente en dicho punto del sistema.



a)



b)

Figura 2.7 Elementos que conforman el sistema supuesto en la confección del modelo de carga.

En la biblioteca Simpower System toolbox del software Matlab se dispone de un modelo de carga analizado en la sección anterior el cual puede ser utilizado para la representación de la carga individual un vez que se disponga de los exponentes que caracterizan a cada elemento consumidor.

Para la implementación del modelo de carga compuesta se consideran seis principales clasificaciones de la carga considerados como los más generales en los sistemas de potencia (Aire acondicionado, Calentadores, Lámparas fluorescentes, Bombas ventiladores y otros, Grandes motores, Pequeños motores).

En la modelación de cada elemento por separado se obtiene una representación solo del comportamiento de la potencia demanda por cada componente por lo que se necesita sumar las respuestas de todas estas clase de consumidores, no solo es importante conocer el comportamiento de la potencia activa sino que también se debe conocer como varia la potencia reactiva, para ello se hace necesario aplicar el mismo algoritmo para la potencia activa que para la reactiva, obtener esta representación completa de la potencia de la carga compleja es fácil si se utiliza un bloque denominado sum (Figura2.8) que puede tener varias entradas según sea la cantidad de elementos que se deseen sumar a las cuales se conectan los diferentes elementos de carga, en este caso son seis las entradas habilitadas.

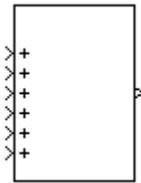


Figura 2.7 Bloque suma usado para obtener un a respuesta compleja de la potencia.

Un importante parámetro en el análisis de los sistemas de potencia es el voltaje, el bloque de carga utilizado presenta una salida que brinda el comportamiento del voltaje registrado por este, pero como lo importante es procesar el voltaje

existente en la barra de donde se alimentan toda una serie de consumidores se hace necesario la implementación de un sistema de medición.

Una parte importante del modelo a implementar está constituido por el sistema desarrollado a partir de una barra de medición (Figura 2.9 a) la cual es la encargada de chequear el comportamiento de la corriente y el voltaje, enviando las señales de estos parámetros mediante un bloque RMS (figura 2.8 b) y un analizador de secuencia (Figura 2.8 c) encargados de entregar valores comprensibles que son mostrados en osciloscopios.

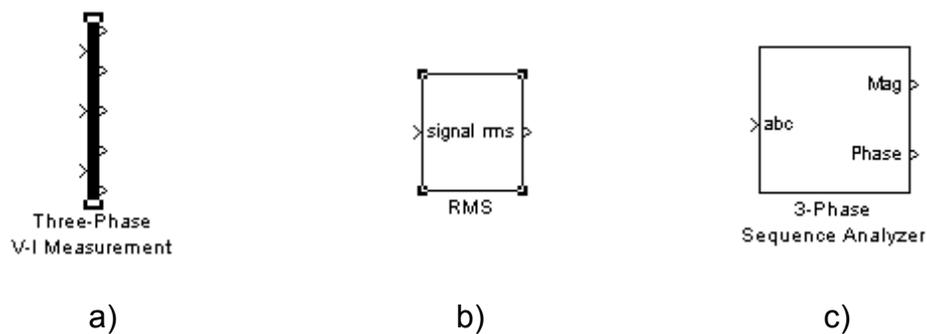


Figura 2.9 Bloques utilizados para implementar el sistema de mediciones del modelo deseado.

Dentro del sistema de medición a desarrollar es necesario disponer de un medio que sea capaz de brindar el comportamiento de la potencia en la barra de donde se alimentan las cargas, esto permite la evaluación de la influencia del voltaje en el comportamiento de la potencia.

Utilizando las señales que brinda la barra de mediciones se coloca el bloque 3-phase Instantaneous Active & Reactive Power (Figura 2.9 a) que es encargado de chequear la potencia instantánea, es importante que se note que cada instrumento de medición es conectado a un osciloscopio (Figura 2.9 b) que es el elemento principal para visualizar los parámetros medidos.



Figura 2.10 Elementos terminales usados en el sistema de mediciones.

En el diagrama del modelo se advierte la presencia de una pequeña carga conectada inmediatamente después de la impedancia del sistema, esta carga es de gran importancia para el funcionamiento de la modelación debido a que el bloque de carga dinámica es un elemento no lineal y este no puede ser conectado a una red inductiva que en este caso esta concebida por la rama R-L encargada de simular la impedancia del sistema, aunque se puede utilizar este inconveniente de forma favorable al identificar esta carga como un bloque capacitivo y sería considerado como un banco de capacitores.

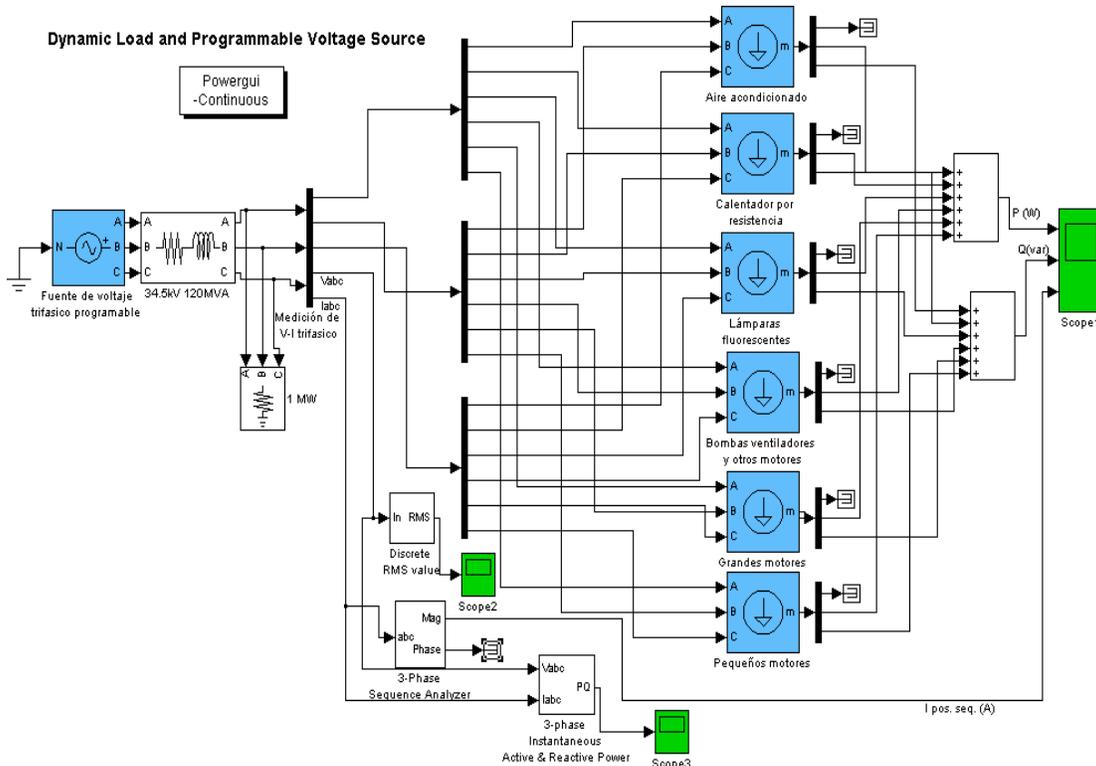


Figura 2.11 Modelo de carga con diferentes componentes de carga.

Una vez que se termina la interconexión de los bloques del sistema se puede observar como en este existen una serie de terminales que no se utilizan, estos no deben quedar desconectados para ello se les conecta al bloque denominado Terminator (figura 2.10 c) el cual es el encargado de determinar que no se tenga en cuenta la señal de estos, en la figura 2.11 se muestra el diagrama terminado.

2.4 Conclusiones parciales del Segundo Capitulo.

1. El Simpower System toolbox es una biblioteca de mucha utilidad y relativa simplicidad para la para la simulación de diferentes procesos en los sistemas de potencia y dentro de esto, para la simulación de los efectos de variaciones del voltaje sobre la potencia activa y reactiva.
2. Se han implementado modelos con los bloques de diferentes elementos del Matlab que implementan de forma virtual pruebas de campo reales propuestas para; a partir del enfoque de modelación de carga basado en mediciones, tratar de obtener los valores de los parámetros (mediante la comparación de los resultados de las mediciones con los de la simulación) aspecto que a partir de la estructura del modelo propuesta permitiría su generalización en otros softwares y hasta la modelación de cargas de barras específicas del SEN mediante la identificación de los parámetros del modelo propuesto.

CAPÍTULO 3. Modelación de cargas a partir de datos reflejados en la bibliografía consultada.

En el capítulo se procede a modelar las cargas utilizando los diferentes esquemas implementados anteriormente, esta modelación de las cargas se desarrolla a partir de la evaluación de constantes de carga compleja obtenidas en estudios anteriores mediante los modelos implementados en el capítulo anterior.

Para una buena comprensión de los comportamientos se realizan varias modelaciones a fin de definir como influyen las diferentes variables en el comportamiento de la carga, además se completa una tabla en la cual se exponen los valores de voltaje y potencia máximos y mínimos obtenidos durante la modelación.

3.1 Modelación de cargas a partir del modelo desarrollado en el Simpower System Toolbox.

Para la modelación de las cargas se requiere de una serie de datos que según sea el enfoque a seguir y el modelo disponible será la naturaleza de estos datos, en las secciones anteriores se desarrolló un modelo el cual presenta una serie de constantes las cuales tienen el objetivo de caracterizar el comportamiento de la carga, estas constantes han sido valoradas en investigaciones previas desarrolladas por diferentes autores y que se pueden utilizar como fuente de análisis a la hora de complementar la modelación deseada.

Con el desarrollo de una modelación de cargas a partir de los datos brindados en estudios anteriores se pretende establecer una dependencia de cada variable con el comportamiento de la carga en caso de ocurrir una perturbación de cualquier

naturaleza la cual pueda representar un paso de voltaje en una barra del sistema donde puedan estar los consumidores.

El desarrollo del proceso deseado se tiene la tabla 3.1 en la cual se representan los parámetros del modelo seleccionado en el epígrafe 2.1, estos se obtienen a partir del estudio de la modelación de cargas en Costa Rica.

Tabla 3.1. Valores de constantes de tiempo y exponentes para modelo exponencial determinados a partir de modelos dinámicos desarrollados en el SEP de Costa Rica.

Np	Nq	Tp1	Tp2	Tq1	Tq2
0.7344	3.6169	126.3	126.3	121.0	91.9
0.6854	3.4191	449.9	129.3	66.5	71.2

Para comenzar la representación del comportamiento de la carga se supone una barra en un sistema de 110kV con un nivel de cortocircuito de 120MVA en dicha barra se encuentran conectados dos transformadores de 15MVA que alimentan una carga de 8 MW y 6 MVar a un voltaje de 34.5kV esta potencia se fija a un valor por debajo del nominal de los transformadores debido a que estos por un corto periodo de tiempo alimentarían toda la carga y esto puede suponer una interrupción del proceso de simulación que sería el equivalente a una falta de estabilidad en un sistema real.

Para provocar el desbalance de voltaje primero se ajustan los transformadores uno por encima y otro por debajo tal como propone Kundur, este ajuste se realiza en el orden de 1 kV, además cuenta con la presencia de un capacitor de 3 Mvar que puede ser considerada como parte de la carga según la definición propuesta en secciones anteriores.

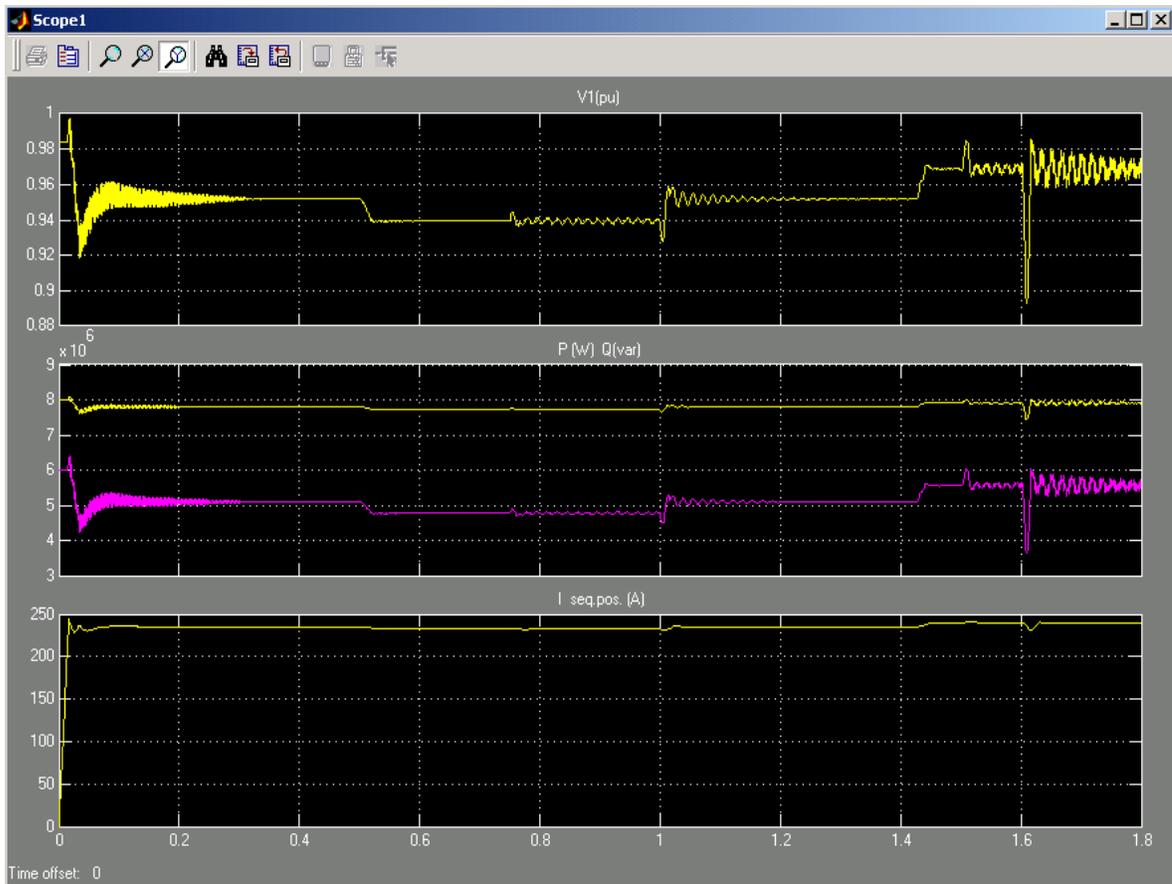


Figura 3.1 Comportamiento de la carga ante el disturbio de voltaje provocado.

Se desea evaluar la influencia de las constantes en el desarrollo de la modelación para ello se desarrollan dos modelaciones distintas con cada una de las filas de datos de la tabla disponible. Asumiendo la primera serie de datos se realiza una prueba (Figura 3.1) en la cual se programan en los breakers un disparo en el transformador que se encuentra elevando el voltaje lo que provoca una caída de este un tiempo después ya se ha estabilizado la respuesta de la carga ante el disturbio y se produzca otro disparo en el otro transformador lo que provoca una subida del voltaje para finalmente retornar los dos transformadores a su posición inicial.

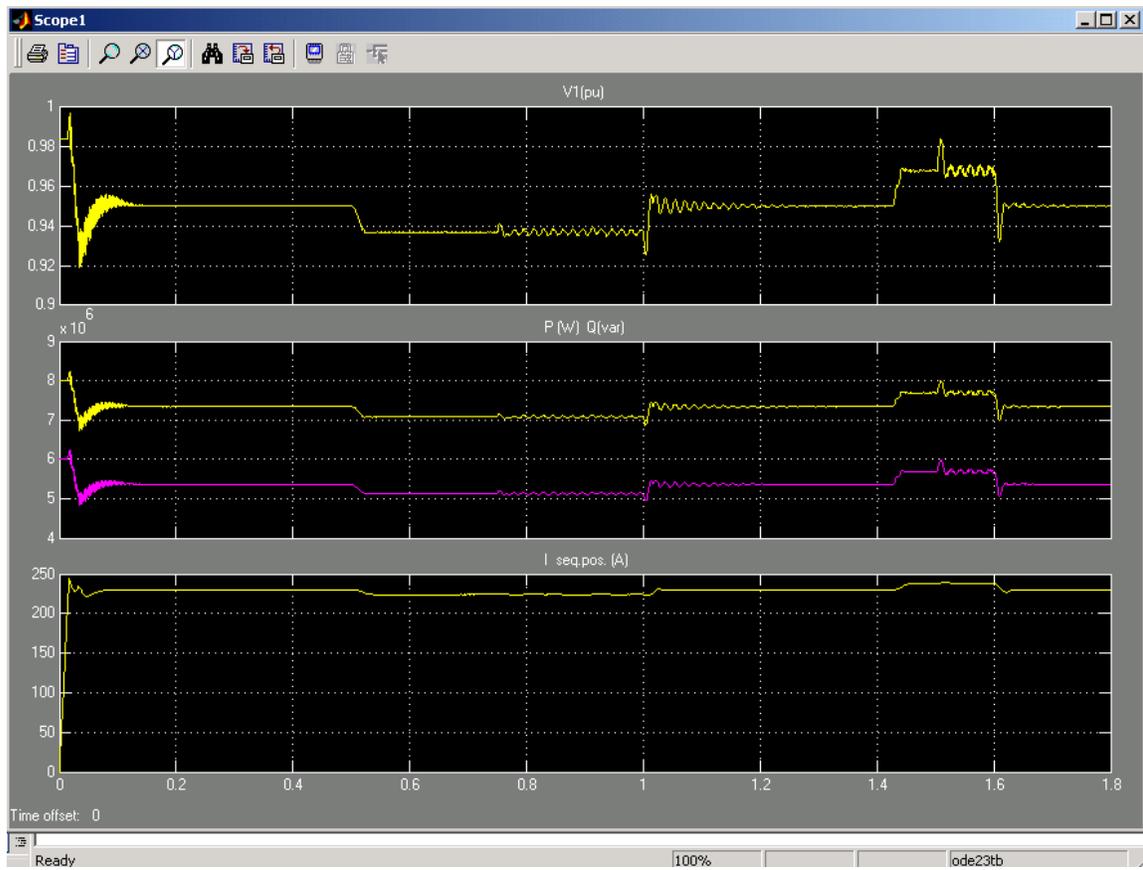


Figura 3.2 Respuesta de la carga ante un disturbio provocado pero evaluando otros datos.

Con vista a obtener datos que faciliten un poco la comparación del efecto de las constantes del modelo en el comportamiento de la carga simulada se repite la modelación anterior esta vez con la segunda serie de datos de la tabla 3.1.

Durante el análisis de la respuesta ofrecida por esta modelación (figura 3.2) se puede apreciar como varía el comportamiento del voltaje antes y después del evento provocado siendo fácilmente notable que la respuesta amortiguada es mayor en el primer caso que en el segundo.

Si se sigue de cerca el comportamiento de la carga en el ultimo recierre del transformador que esta ajustado por debajo del voltaje nominal de la carga se tiene que en ese instante la primera modelación provoca un pico de caída de voltaje que en el segundo caso es menor esto puede estar relacionado con la constante $Tp1$ que varia considerablemente.

Una observación importante a tener en cuenta es el comportamiento de las potencias activa y reactiva que como se puede ver presentan comportamientos diferentes pues la potencia activa no obedece en gran medida el comportamiento del voltaje mientras que se puede determinar que la potencia reactiva si depende en mayor medida del comportamiento del voltaje esto se debe a que el exponente N_p es Menor que el exponente N_q .

3.1.1 Simulación de la desconexión de un banco de capacitores.

Un elemento importante en el sistema es el banco de capacitores que por ser capaces de modificar el ángulo de fase del voltaje en la barra merece cierta atención más aun cuando se sabe que estos elementos se utilizan para la generación de reactivo y por ello operan de forma discontinua según sea necesario.

Para la simulación de la desconexión de un banco de capacitores como los dos transformadores estarán en servicio se puede operar a una carga mayor, para este caso se tomó una carga de 10 MW y 8 MVar y se procedió a bloquear los disparos programados en interruptores por el lado de baja de los transformadores operando solo el banco de capacitores existente en el esquema representado.

En este caso se procederá de forma similar a la desarrollada en el caso de los dos transformadores pues se modelara la carga a partir de las dos secciones de constantes ya especificadas anteriormente de forma tal que se puede pueda apreciar el comportamiento dinámico de la carga en la figura 3.3.

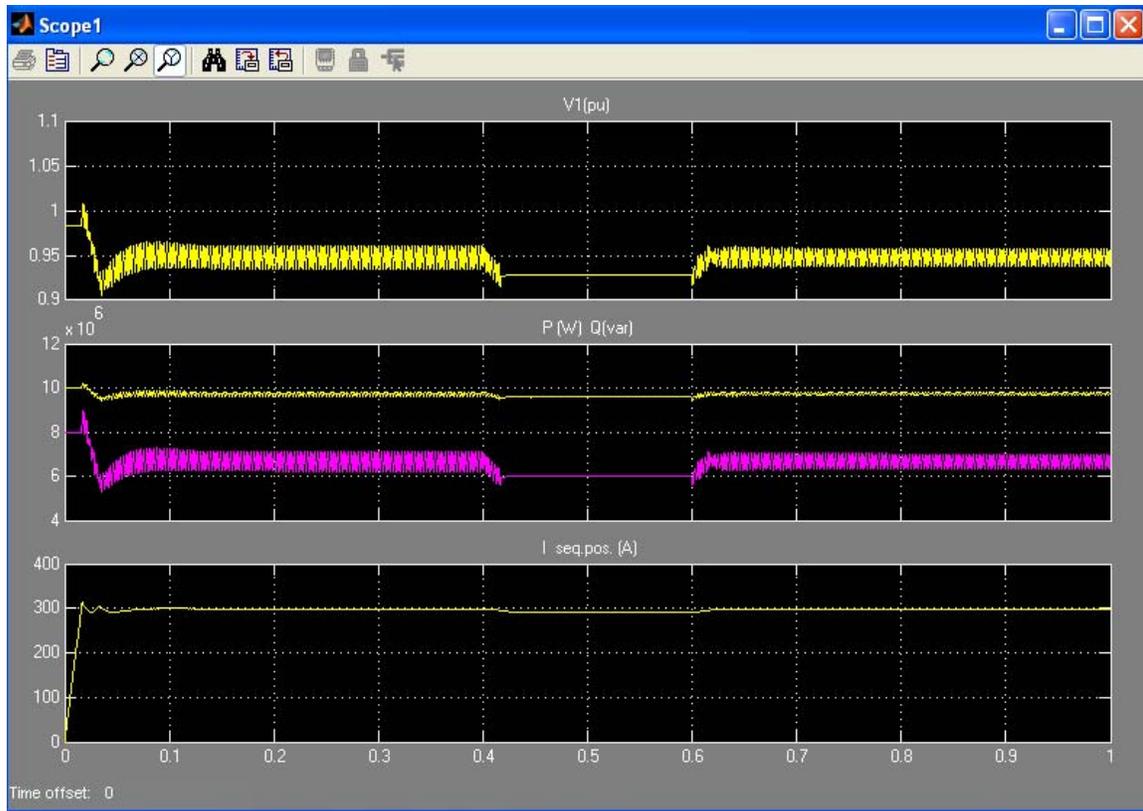


Figura 3.3 Comportamiento de los parámetros de la carga durante la operación del capacitor.

Un capacitor que se desconecta y se conecta también puede provocar una respuesta que se vea afectada por las características dinámicas de la carga para poder determinar esta diferencia se desarrolla otra modelación con datos diferentes para evaluar la respuesta obtenida (figura3.4) anteriormente respecto a la ya existente.

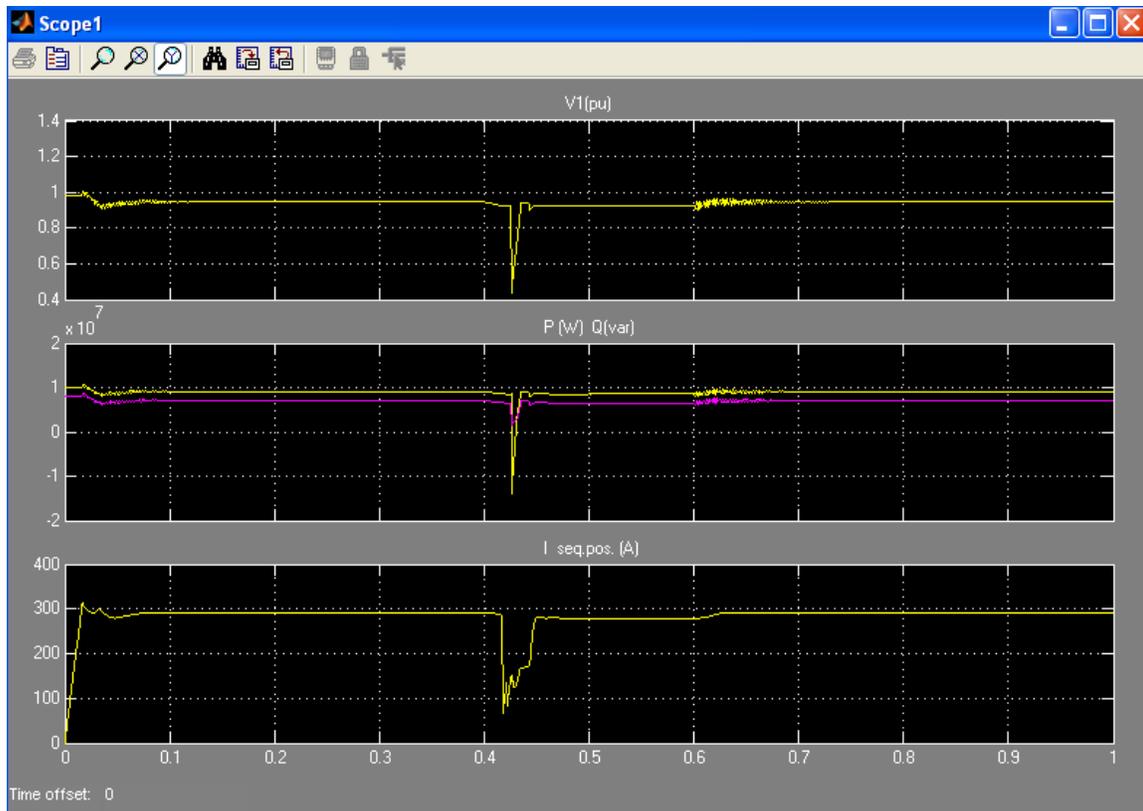


Figura 3.4 Proceso de Conexión y desconexión del capacitor con otros datos.

Analizando las graficas resultantes de la modelación de las cargas ante una manipulación de un banco de capacitores se puede apreciar como varían estas con respecto a las constantes de tiempo, es apreciable como en el primer caso el escalón de voltaje es menor que en el segundo lo que puede dar una idea de lo variado de los comportamientos de las cargas, además se comprueba; como en el caso anterior, una dependencia de la potencia reactiva con el comportamiento del voltaje.

3.1.2 Simulación de una carga utilizando exponentes propuestos como los más comunes en una carga compuesta normal.

En caso de utilizar el modelo de potencia exponencial que responde a una modelación estática se plantea que los valores típicos de N_p y N_q oscilan entre 0.5-1.8 y 1.5-1.6 respectivamente utilizando estos datos se puede modelar la carga y determinar respecto a los casos anteriores como se muestran las características dinámicas de la carga (figura 3.5).

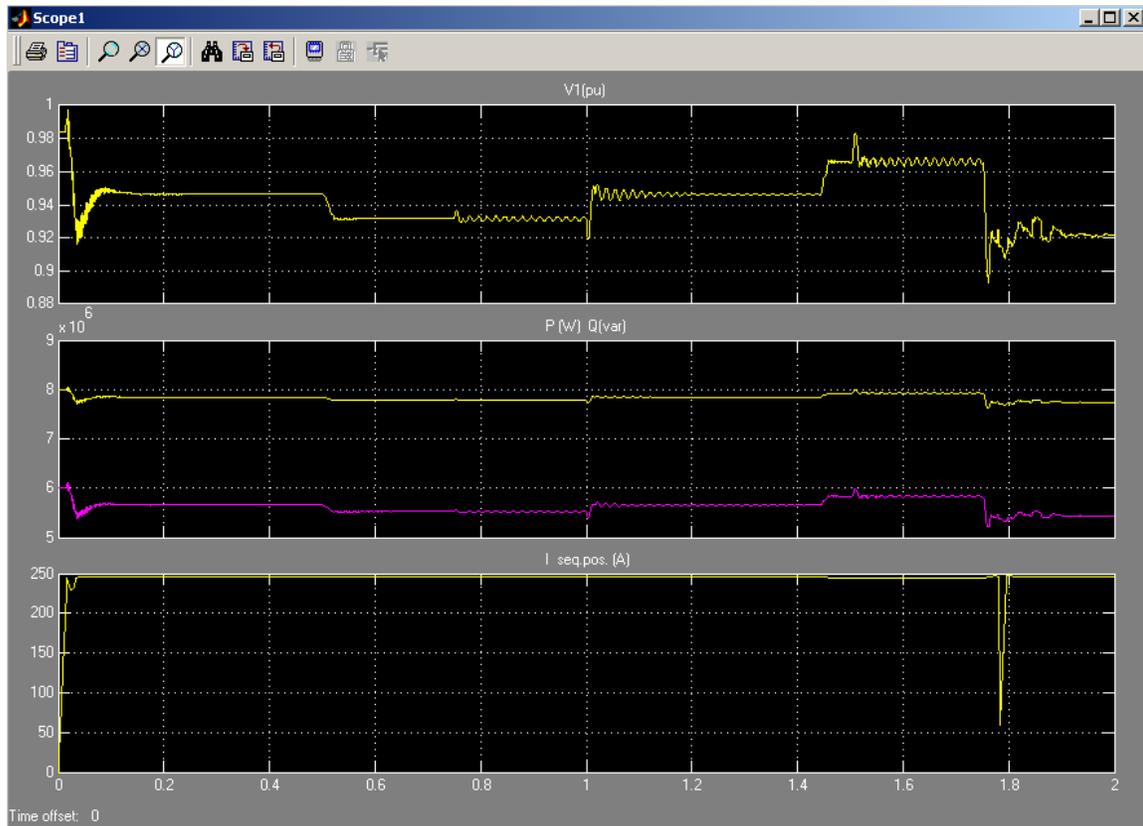


Figura 3.5 Modelación de la carga de forma estática utilizando $N_p=0.5$ y $N_q=1.5$

Con el análisis de la característica de las figuras 3.6 y 3.7 se puede concluir que la influencia de las constantes de tiempo usadas anteriormente en las simulaciones de las secciones 3.1 y 3.1.1 no son de gran significación pues no se observan grandes diferencias en cuanto a la modelación sin considerar estas constantes.

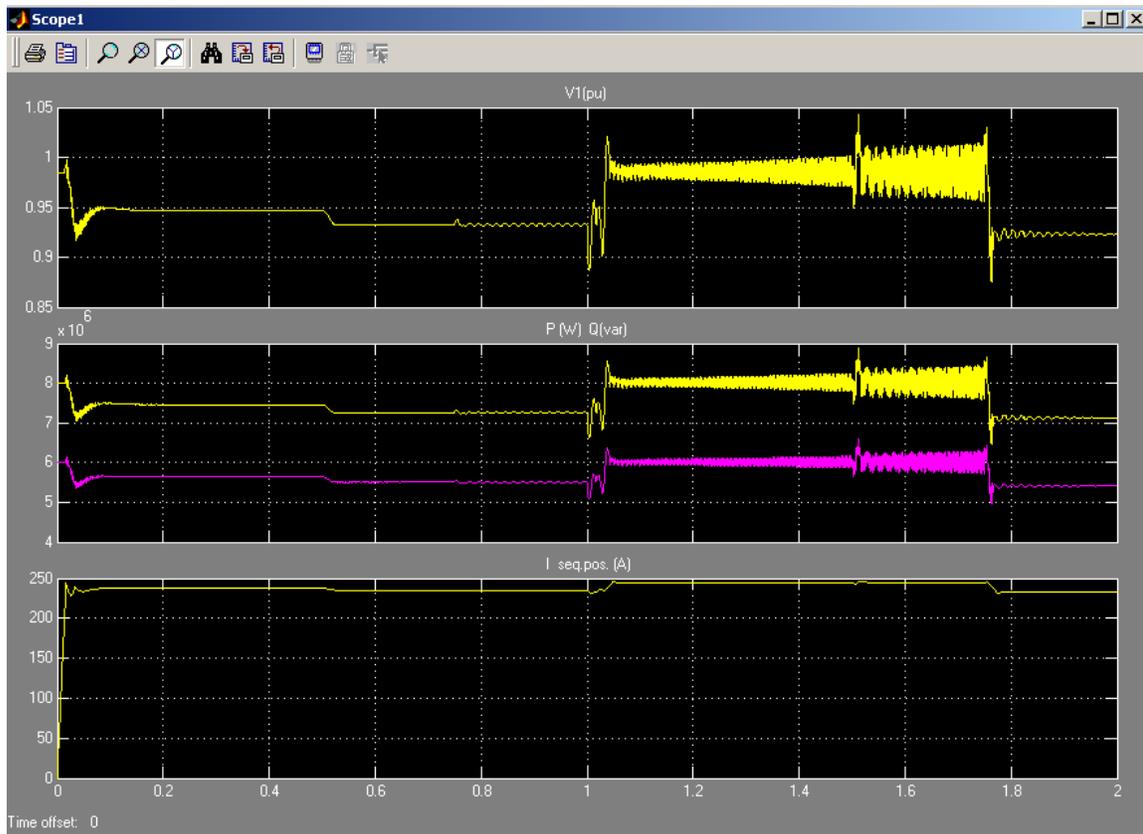


Figura 3.6 Modelación de la carga de forma estática utilizando $N_p=1.8$ y $N_q=1.6$

La modelación desarrollada para los exponentes citados en la figura 3.6 arroja resultados en los que se pueden valorar la aparición de oscilaciones en la señal de voltaje que varían como función de los valores de los exponentes tomados.

También se tiene una mayor similitud entre las ondas de voltaje y las de potencia tanto de reactiva como de activa; comportamiento que está marcado por la similitud de N_p y N_q .

3.2 Modelación de cargas siguiendo un enfoque basado en el conocimiento de la composición de las cargas.

Las cargas en una determinada barra del sistema se pueden modelar utilizando para ello el conocimiento de la composición de esta como se ha citado anteriormente, para esto se podrá utilizar el modelo desarrollado en la sección 2.3 adoptando las características de las diferentes componentes de carga que se

presentan en la tabla 1.1 a través de las cuales se puede representar una carga combinada partiendo de un modelo exponencial.

Es bastante aceptado considerar que en un sistema de potencia los motores de inducción consumen alrededor de un 60 a un 70 por ciento de la carga total de este. Sin embargo los modelos implementados no responden a una configuración donde se pueda representar toda la carga de un sistema mediante una sola “carga Equivalente”. Partiendo de esta consideración y tomando como base la experiencia práctica de algunos especialistas se pudiera elaborar una composición de la carga asumida que represente que proporción de la potencia demandada en la barra pertenece a cada componente (lo que también esta signado porque no se tienen referencias de valores de las constantes de tiempo T_{p1} , T_{p2} , T_{q1} y T_{q2} que emplea el modelo utilizado para cada componente, esto es aires acondicionados, cargas de calentamiento, etc. y mucho menos de las mas estudiadas y generales cargas residenciales, comerciales, etc y posteriormente variar esta composición para poder apreciar el comportamiento de esta, para tratar de encontrar algunas diferencias o rasgos comunes entre diferentes composiciones. Las composiciones probadas en este epígrafe son las mostradas en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Composiciones asumidas de las cargas a modelar.

Composición	I	II	III	IV	V
Componente de carga	Por ciento de carga	Por ciento de carga	Por ciento de carga	Por ciento de carga	Por ciento de carga
Aire acondicionado	10	10	10	20	20
Calentadores	10	30	30	40	30
Lámparas fluorescentes	5	10	20	10	10
Bombas ventiladores y otros	5	30	10	10	10
Grandes motores	30	10	10	10	10
Pequeños motores	40	10	10	10	20

Tomando como patrón para establecer un comportamiento de la carga las clases de composición que están determinadas en la tabla anterior se puede observar el comportamiento de una carga combinada,

En la figura 3.7 se puede apreciar cómo se muestra la potencia ante la presencia de una anomalía en la señal de voltaje y como varia esta con la diferente composición de carga al compararla con la respuesta ofrecida por la composición de la carga identificada en la tabla 3. (Figura 3.8)

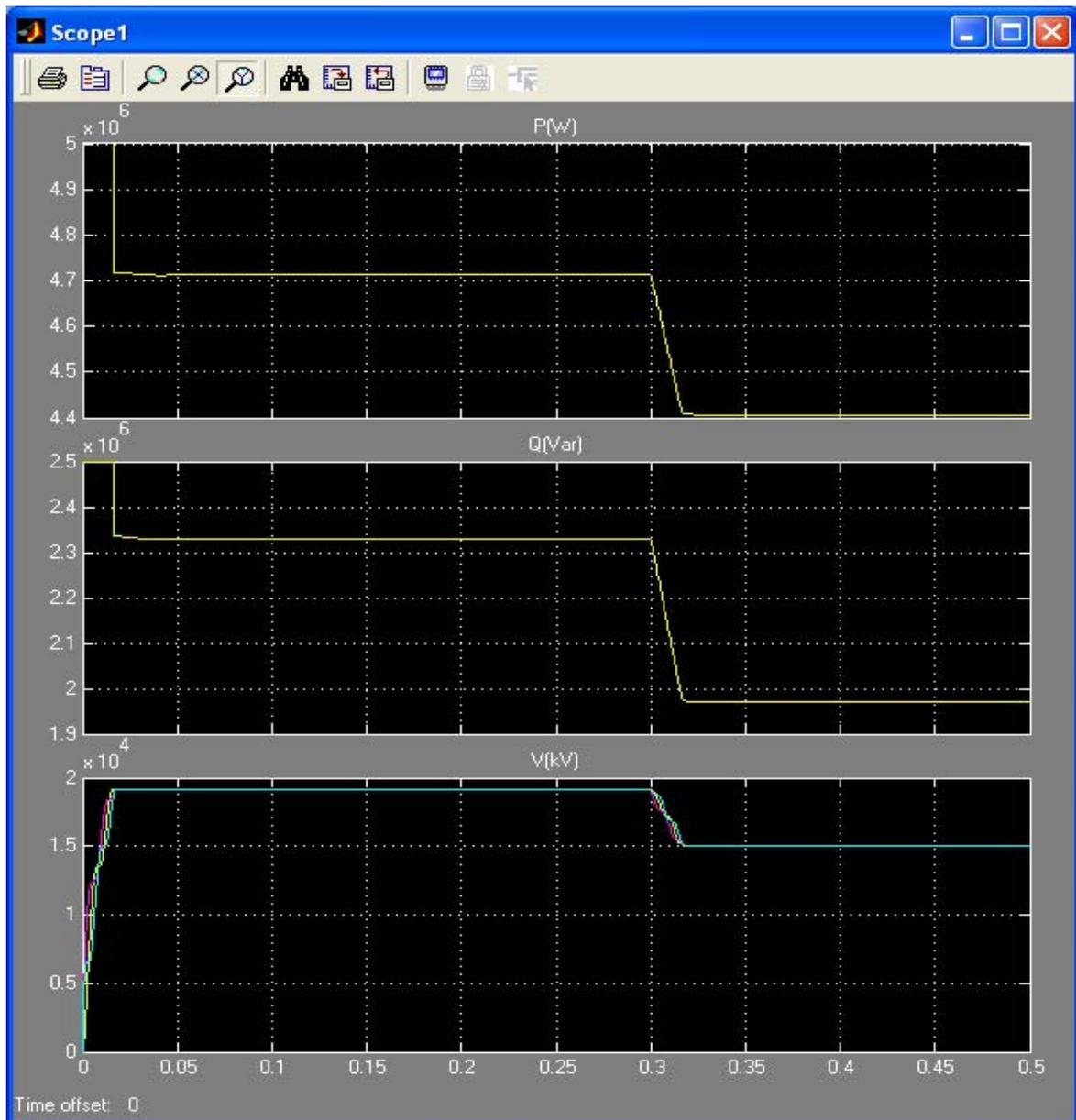


Figura 3.7 Respuesta de la composición de carga "I" ante un disturbio de voltaje.

Para el estudio del comportamiento de la carga se implementó una variación de la amplitud del voltaje suministrado a la carga del orden de 0.2 p.u, esta variación se aprecia con facilidad en la parte baja del grafico obtenido.

Del análisis de estas simulaciones se puede ver como tanto la potencia activa como la reactiva varían en cuanto a su valor esto se debe a que según sea la composición de las cargas estas determinaran diferentes valores de potencia debido a la variación o dependencia exponencial de las mismas con el voltaje según los valores de N_p y N_q .

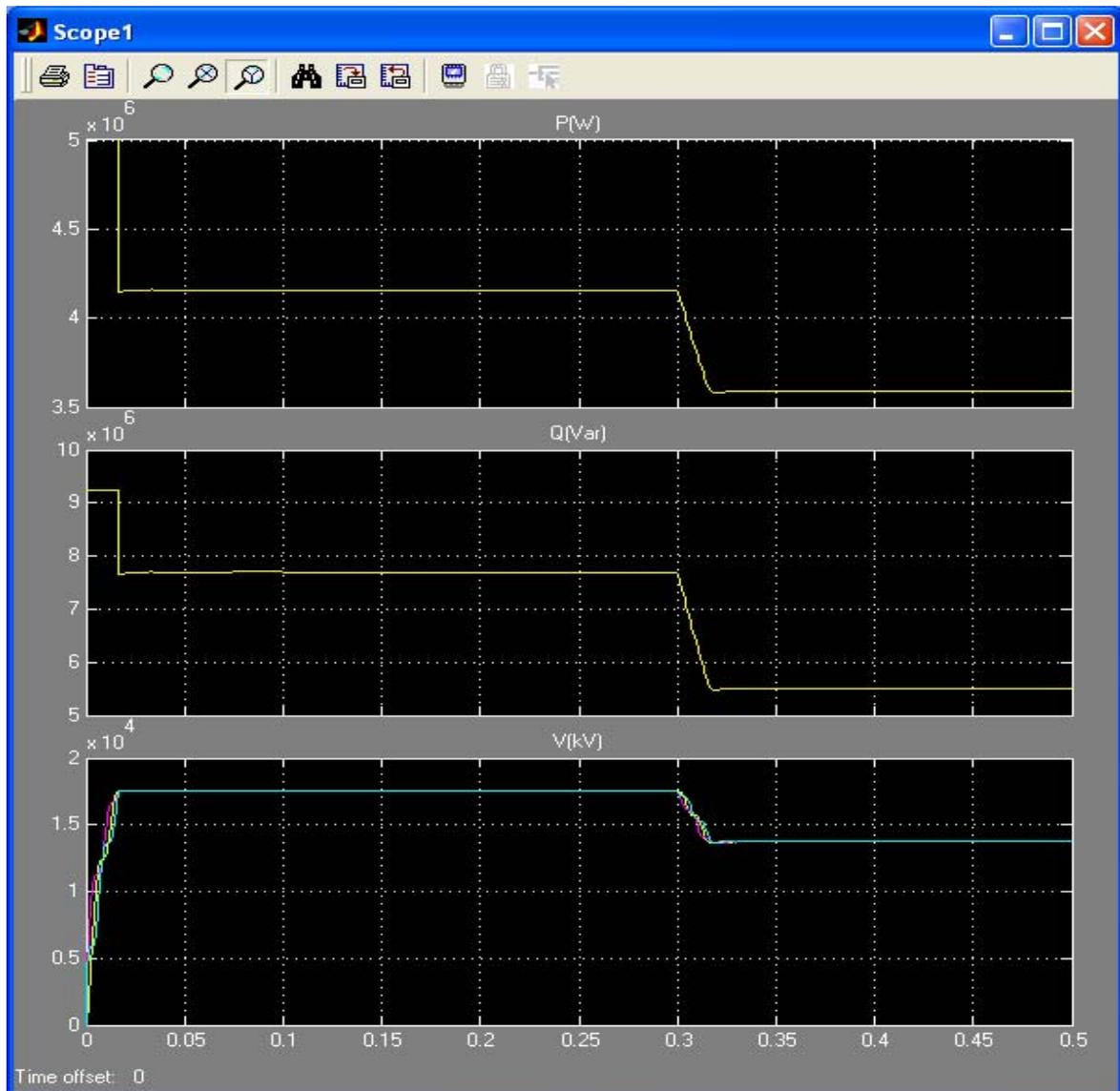


Figura 3.8 Comportamiento de la carga Para la Composición "II".

Como la composición de la carga varía considerablemente con el tiempo, e incluso con el paso de las horas esta puede ser bastante diferente se hace necesario varias modelaciones que respondan a diferentes composiciones de la carga, en la figura 3.9 se puede valorar otra modelación de la carga de barra.

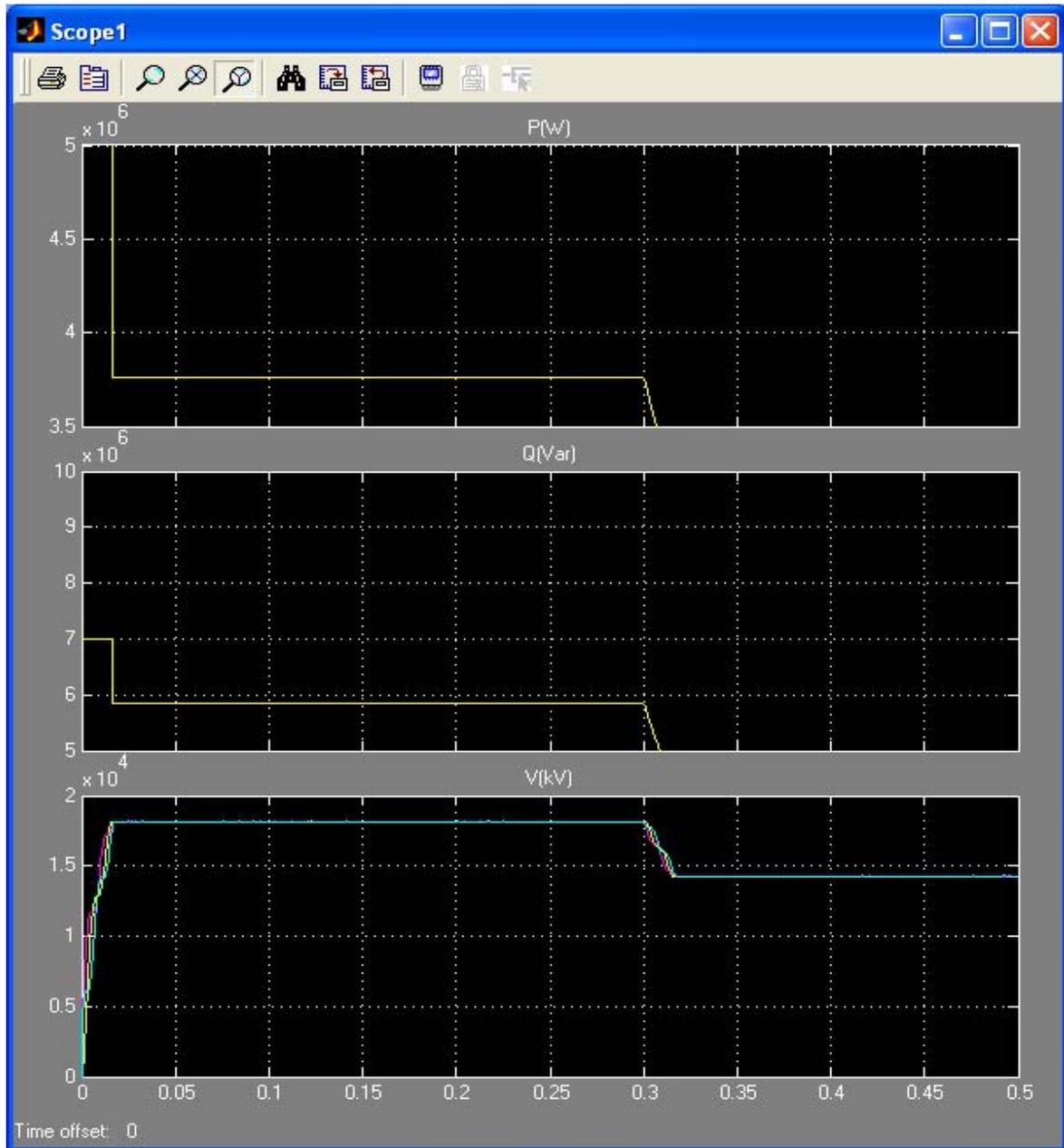


Figura 3.9 Comportamiento típico de la carga para la composición “III”

Se puede apreciar en la figura 3.10 que el comportamiento de la carga no difiere mucho en ese caso de la modelación en cuanto a la forma de las oscilaciones de

la potencia lo cual esta dado por la modelación de las cargas de forma estática En la forma en que se ha realizado la modelación de las cargas de forma tal que la variación de las cargas se produce de una forma brusca lo cual es inusual que ocurra en un sistema de potencia, permite notar a simple vista diferencias en el comportamiento de las características de la carga.

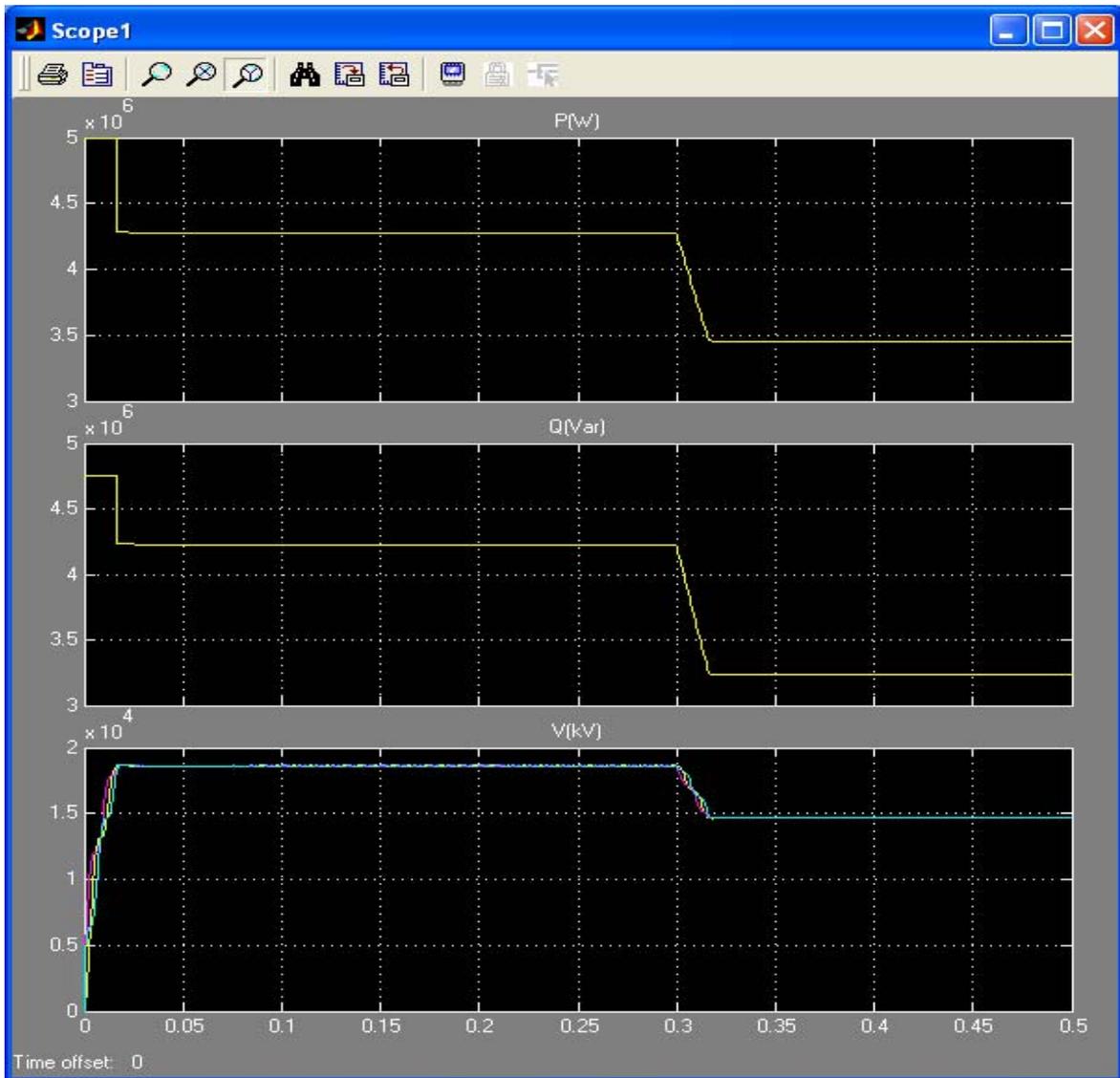


Figura 3.10 Comportamiento de la carga para la composición “IV” de la carga (que pudiera estar dada por factores como la hora o la estación del año).

Esto se puede comprobar si se examinan todas las modelaciones teniendo en cuenta la amplitud de la potencia tanto activa como reactiva en cada evento, lo que consiste la mayor diferencia de cada representación de la carga.

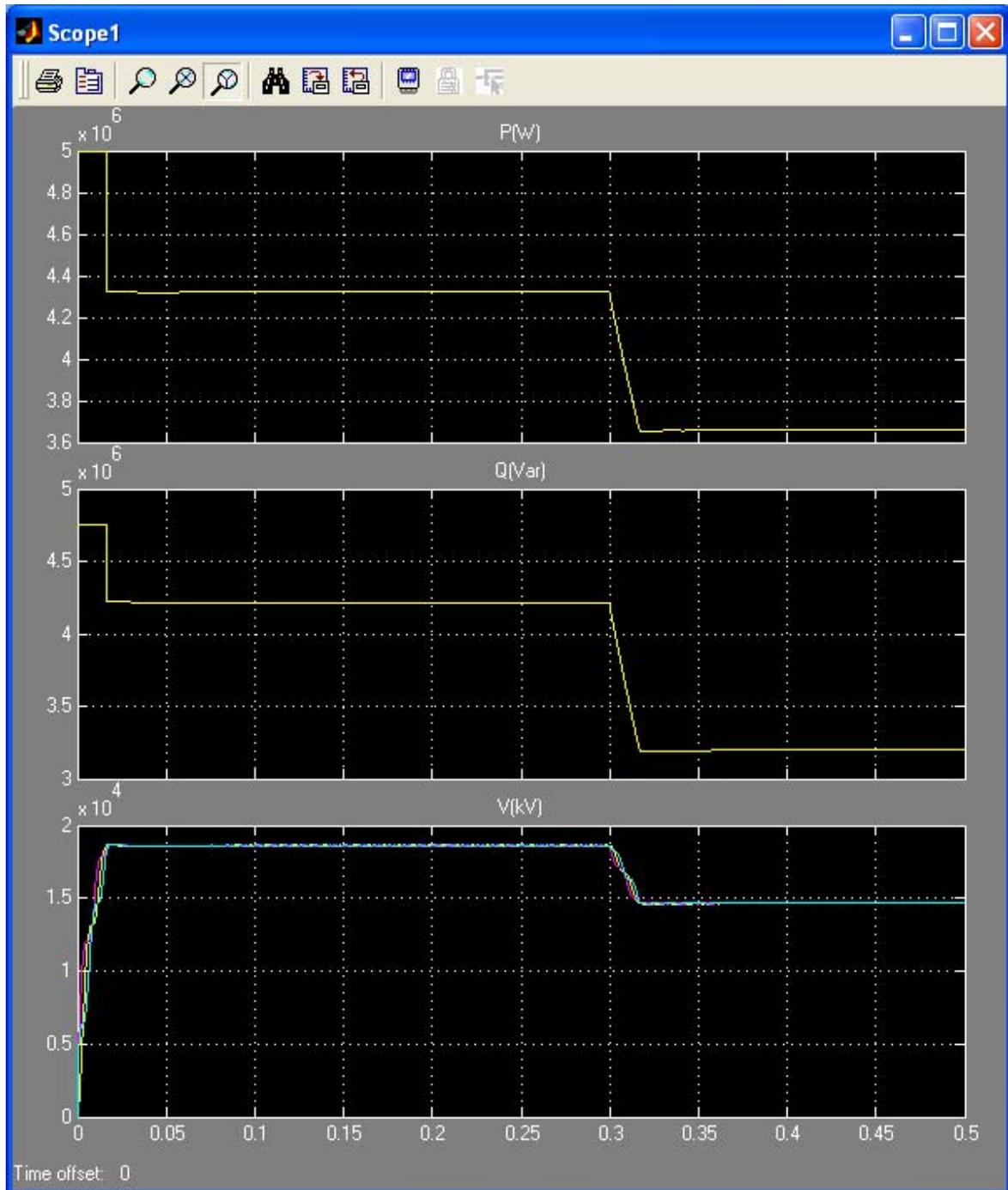


Figura 3.11 Variación del comportamiento de la carga Para la composición "V".

Para poder analizar de una forma más rápida la influencia de la composición de la carga compuesta de una barra se implementa la Tabla 3.3 en la que se expresa el comportamiento de la potencia respecto al voltaje para cada composición de la carga utilizada en la representación de la carga.

Tabla 3.3 Valores de voltaje potencia activa y reactiva producto de la variación del voltaje según las diferentes composiciones de las cargas.

Composición	Vo (kV)	Vmin (kV)	Po (MW)	Pmin (MW)	Qo (MVar)	Qmin (MVar)
I	18.9	15.2	4.714	4.406	2.33	1.97
II	17.6	13.7	4.16	3.59	7.7	5.5
III	18.2	14.6	3.76	3.18	5.86	5.29
IV	18.6	14.6	4.27	3.45	4.22	3.23
V	18.6	14.6	4.32	3.65	4.22	3.2

3.3 Conclusiones Parciales del capítulo.

1. Los resultados de la simulación con el modelo de carga dinámica seleccionado (que de hecho ya existía en Matlab) muestra resultados diferentes cuando la variación de voltaje se realiza mediante el esquema de desconexión de un Transformador y cuando se realiza mediante la desconexión y/o conexión de un banco de capacitores
2. Las simulaciones realizadas con diferentes esquemas de pruebas implementados; así como con el modelo estático de diferentes composiciones demuestran la bondad de esta herramienta para la determinación de los parámetros del modelo escogido para una barra, si se puede disponer de mediciones de campo que permitan la determinación de los parámetros del modelo, (N_p , N_q , T_{p1} , T_{p2} , T_{q1} , T_{q2}) por comparación mediante el método de "prueba y error"
3. En el proceso de modelación basados en el conocimiento de la composición de la carga se puede determinar como la ausencia de los parámetros que aportan la parte dinámica no provoca estados transitorios en el comportamiento de la carga y que solo se obtienen variaciones de la potencia de forma muy parecida a la del voltaje.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Como conclusiones generales del presente trabajo se pueden enunciar las siguientes:

1. La modelación de la carga es un tema complejo y aun abierto a la investigación, lo que a criterio del autor esta dado por la complejidad de esta componente esencial de los Sistema Eléctricos de Potencia, de hecho parece ser un consenso generalizado el criterio de que no es posible, desde el punto de vista práctico obtener un modelo único de carga aplicable para diferentes composiciones, horas del día, estaciones climáticas, diferentes niveles de voltaje, etc.
2. De acuerdo con los resultados de la bibliografía consultada existen dos enfoques fundamentales en la modelación de las cargas; estos son: Enfoque basado en el conocimiento de la composición de la carga y el enfoque basado Mediciones; el más desarrollado ha sido el enfoque basado en la medición directa del comportamiento de la potencia ante una variación de voltaje. A criterio del autor cada uno tiene sus ventajas y limitaciones y por tanto se coincide con aquellos que plantean que se complementan.
3. Aunque para la modelación de cargas han existido varias formas de modelos (exponenciales, de polinomios, etc.) una clasificación mas general de acuerdo con la variación de P y Q como función del voltaje de acuerdo con el tipo de respuesta que se desea investigar los divide en: modelos estáticos y modelos dinámicos. En el caso de los primeros han sido utilizados y

- reportados desde el comienzo de los estudios de comportamiento de Sistemas Eléctricos para condiciones estables, sin embargo su aplicación en análisis de estabilidad a pequeña y gran señal han demostrado la necesidad de modelos dinámicos destacándose entre ellos los que utilizan una función transferencia y el denominado ampliamente como modelo ZIP-motor.
4. El Simpower System toolbox es una biblioteca de mucha utilidad y relativa simplicidad para la para la simulación de diferentes procesos en los sistemas de potencia y dentro de esto, para la simulación de los efectos de variaciones del voltaje sobre la potencia activa y reactiva.
 5. Se han implementado modelos con los bloques de diferentes elementos del Matlab que implementan de forma virtual pruebas de campo reales propuestas para; a partir del enfoque de modelación de carga basado en mediciones, tratar de obtener los valores de los parámetros (mediante la comparación de los resultados de las mediciones con los de la simulación) aspecto que a partir de la estructura del modelo propuesta permitiría su generalización en otros softwares y hasta la modelación de cargas de barras específicas del SEN mediante la identificación de los parámetros del modelo propuesto.

Recomendaciones

1. Realizar pruebas de campo en alguna parte del SEN, de forma que se pueda disponer de datos reales para identificar; con la ayuda de los esquemas implementados en Matlab, los parámetros del modelo (N_p , N_q , T_{p1} , T_{p2} , T_{q1} , T_{q2})
2. Implementar en Matlab algunos de los modelos ZIP-Motor encontrados en la literatura y comparar sus respuestas con el modelo aquí empleado ante variaciones similares del voltaje aplicado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. R., I.D.S.R.I.A.A., *CÁLCULO DE MODELOS DE CARGA EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE COSTA RICA*, in *TECNOLOGÍA – ICE Energía y Telecomunicaciones*. 2003. p. 51-57.
2. Milano, F., *Documentation for Power System Analysis Toolbox*. 2005.
3. Navarro, I.R., *Dynamic Load Models for Power Systems*, in *Department of Industrial Electrical Engineering and Automation*. 2002, Lund University: Lund.
4. J. A. Fuentes, A.M.-G., E. Gómez, *A measurement approach for obtaining static load model parameters in real time at the distribution level*. EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER, 2007.
5. Kundur, P., *Power System Stability and Control*. 1994.
6. Hugh Rednick, R.C.V., *Análisis de sistemas eléctricos de distribución*. 1994.
7. Louie, K.-W., *A New Approach to Compose Load Devices in Electric Power Systems* 2004. **2, 2: 197-210**.
8. Nguyen Trung Nghia, H.D.L., *Dynamic Load Modeling in Power System*. 2006.
9. Satish J. Ranade(SM), D.R.S., Rambabu Adapa, *Load Understanding and Model Development*. 2005.
10. Parveen, T.a.L., Gerard and Palmer., *Model of induction motor changes to power system disturbances*. 2006.
11. Dobrivoje P. Stojanovi´, L.M.K., J.V. Milanovi´, *Dynamic load modelling based on measurements in medium voltage distribution network*. 2007, School of Electrical & Electronic Engineering, University of Manchester, UK.
12. MA Jin†, H.D.H.R., *Measurement-based load modeling: Theory and application*. 2007.
13. Ma Jin, H.R., David J. Hill., *Load Modeling by Finding Support Vectors of Load Data From Field Measurements*. 2006. **21 No2**.