

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**DETERMINACIÓN DE MODELOS DE CARGA PARA ESTUDIOS
DE FLUJO DE POTENCIA Y SU INFLUENCIA EN LA
SIMULACIÓN DE ESTABILIDAD PERMANENTE Y
TRANSITORIA**

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electricidad

Presentado por:

Nathalie Desireé Ramírez Neira

Dietmar Alois Sánchez Montalbán

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecemos a las personas e instituciones que hicieron posible este trabajo.

A nuestro tutor, el Dr. Javier Urquiza por su gran ayuda y colaboración en este trabajo de investigación.

Al ingeniero Juan Plazarte, por su valiosa guía durante el desarrollo de este proyecto.

A nuestros profesores, por su colaboración durante nuestro aprendizaje.

v

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios por haberme dado fuerza y salud para culminarlo.

A mi familia por haber estado ahí para mí en todo momento. Mi abuelo Carlos, quién siempre ha cuidado de mí. A mis hermanos, Diana y Joseph, por motivarme siempre a dar más de mi misma. A mi madre, Laura, quién me enseñó cuán lejos puedo llegar por mí misma. A mi padre, por sus palabras de aliento.

A mis amigos, con los que pude disfrutar plenamente los años de permanencia en la institución, especialmente a Magaly Román quien ha sido mi confidente incondicional, a Jean Moreta, Bethzabeth Pincay, Erick Perez, Ronaldo Monserrate y Jonathan Garcés, quienes se convirtieron en una constante de apoyo durante estos años.

A mi compañero de tesis y amigo Dietmar Sánchez, porque siempre mantuvimos un enfoque positivo cuando el proyecto parecía encontrar un punto complejo.

Y a todas las personas que en determinado momento me apoyaron de una u otra forma.

Nathalie Desireé Ramírez Neira.

DEDICATORIA

Gracias Dios por darme una maravillosa familia y sabiduría para culminar mi carrera universitaria, dedico esta tesis a todas las personas que han aportado en mi educación, amigos y familiares. A mi madre Diana Maria Montalban Miranda por siempre apoyarme en todo lo que me he propuesto y estar a mi lado incondicionalmente, a mi padre Dietmar Wladimir Sanchez Sanchez por ser mi modelo a seguir como persona y como profesional, gracias a los dos por estar siempre conmigo en los momentos buenos y malos, por todo lo que me han brindado, vivo eternamente agradecido. A mis abuelos Bladimir Sanchez, Morima Sanchez, Francisco Montalvan y Rosa Miranda por apoyarme con todo lo que más han podido, mis tíos Mariela Montalvan, Whimper Sanchez, Francisco Montalvan por sus consejos y apoyo, mis hermanos Diego y Dayanna por motivarme a ser un ejemplo para ellos, los quiero mucho a todos.

Dietmar Alois Sánchez Montalban.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Nathalie Desireé Ramírez Neira* y *Dietmar Alois Sánchez Montalban* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



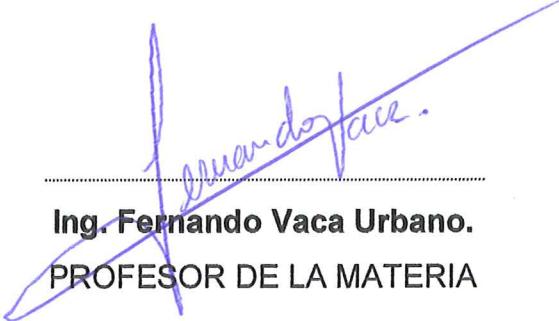
Nathalie Desireé Ramírez
Neira



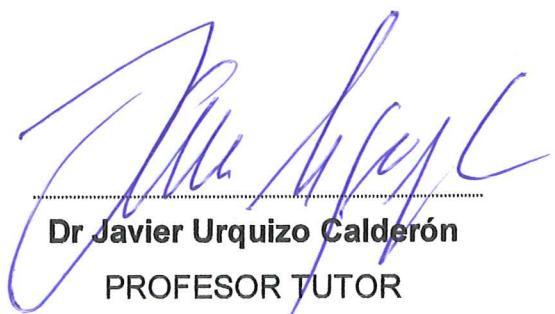
Dietmar Alois Sánchez
Montalban

X

EVALUADORES



Ing. Fernando Vaca Urbano.
PROFESOR DE LA MATERIA



Dr. Javier Urquiza Calderón
PROFESOR TUTOR

ABSTRACT

The study of the charge behavior represents a challenge in the power electrical systems; this is due to the difficulty to predict the changes that may occur due to the entry or disconnection of equipment in the network. To perform the planning of the energy dispatch optimally, it is necessary to have knowledge of the possible behavior of the power system, according to the loads connected to it. There are other aspects that must be analyzed if it is intended to provide energy efficiently, maintaining the reliability of the system with reduced losses, the loads models facilitate these analyzes. It starts with the identification of the types of charges connected to the different bars of the National Interconnected System and, the availability of the necessary equipment for the acquisition of data that allows the development of charge models base on the characteristics of these. It were considered those bars that are located in the city of Guayaquil and have a historical database that meets the characteristics required for the development of the models. It were obtained seven charge static models and one dynamic model, those were entered in the software to perform power flows and, from variations in the magnitude and voltage angles at different points of the system, get information about the stability of this. It's possible to set up procedures for the obtaining of charge models; their considerations vary according the type of model, the period of time established and, the characteristics of the disturbances that occurs in the analyzed point.

Keywords: load model, static model, dynamic model, power flow.

RESUMEN

El estudio del comportamiento de la carga representa un reto en los sistemas eléctricos de potencia, esto se debe a la dificultad para predecir los cambios que pueden presentarse por el ingreso o desconexión de equipos en la red. Para realizar la planificación del despacho de energía de forma óptima, es necesario tener conocimientos del posible comportamiento del sistema de potencia, según las cargas conectadas a este. Existen otros aspectos que deben ser analizados si se pretende proveer energía de forma eficiente, manteniendo la confiabilidad del sistema con reducidas perdidas, los modelos de carga facilitan estos análisis. Se empieza con la identificación de los tipos de cargas conectados a las diferentes barras del Sistema Nacional Interconectado y, con la disponibilidad de los equipos necesarios para la adquisición de datos que permitan el desarrollo de modelos de carga basados en las características de estas. Se consideraron aquellas barras que se encuentran en la ciudad de Guayaquil y, que cuenten con una base histórica de datos que cumpla con las características requeridas para el desarrollo de los modelos. Como resultado se obtuvieron siete modelos de carga estáticos y un modelo dinámico, estos se ingresaron al software DIgSILENT PowerFactory para realizar flujos de potencia y, a partir de las variaciones de la magnitud y ángulos de voltaje en diferentes puntos del sistema adquirir información respecto a la estabilidad de este. Es posible establecer procedimientos para la obtención de modelos de carga, sus consideraciones varían según el tipo de modelo, el periodo de tiempo establecido y, las características de las perturbaciones que se presenten en el punto analizado.

Palabras clave: Modelos de carga, modelos estáticos, modelos dinámicos, Flujos de potencia.

TABLA DE CONTENIDOS

RECONOCIMIENTOS.....	IV
DEDICATORIA	VI
DEDICATORIA	VIII
EVALUADORES	XII
ABSTRACT	XIV
RESUMEN.....	XVI
TABLA DE CONTENIDOS	XVIII
LISTA DE FIGURAS.....	XXIV
LISTA DE TABLAS	XXVIII
ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS.....	XXXII
SIMBOLOGÍA.....	XXXIV
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	3
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.	5
1.3. OBJETIVOS.....	6
1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.	7
1.5. CONTRIBUCIÓN AL CAMPO DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA EN POTENCIA.....	8
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	13

2.1.	SISTEMAS DE POTENCIA.....	14
2.2.	CARGAS.....	15
2.3.	MODELOS DE CARGA.....	17
2.3.1.	<i>MODELOS ESTÁTICOS</i>	19
2.3.2.	<i>MODELOS DINÁMICOS</i>	22
2.4.	ESTABILIDAD.....	29
2.4.1.	<i>ESTABILIDAD DE VOLTAJE</i>	29
2.4.2.	<i>ESTABILIDAD DE FRECUENCIA</i>	30
2.5.	MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS.....	30
3.	METODOLOGÍA	35
3.1.	MODELOS ESTÁTICOS DE CARGA.....	35
3.1.1.	<i>SELECCIÓN DE SUBESTACIONES</i>	35
3.1.2.	<i>PROCEDIMIENTO</i>	36
3.2.	MODELOS DINÁMICOS DE CARGA.....	39
3.2.1.	<i>SELECCIÓN DE DATOS</i>	39
3.2.2.	<i>PROCEDIMIENTO</i>	39
3.2.3.	<i>EJEMPLO</i>	43
3.3.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.....	48
3.3.1.	<i>INGRESO DE LOS MODELOS DE CARGAS A DIGSILENT POWER FACTORY</i>	49
4.	RESULTADOS	59

4.1.	MODELOS ESTÁTICOS	59
4.1.1.	<i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN POLICENTRO.</i>	60
4.1.2.	<i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN PASCUALES.</i>	65
4.1.3.	<i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN CARAGUAY.</i>	66
4.1.4.	<i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN ELECTROQUIL.</i>	67
4.1.5.	<i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN NUEVA PROSPERINA.</i>	68
4.1.6.	<i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN SALITRAL.</i>	69
4.1.7.	<i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN TRINITARIA.</i>	70
4.2.	MODELOS DINÁMICOS	71
4.2.1.	<i>MODELO DE LA PRIMERA PERTUBACIÓN.</i>	71
4.2.2.	<i>MODELO DE LA SEGUNDA PERTUBACIÓN.</i>	77
4.2.3.	<i>MODELO DE LA TERCERA PERTUBACIÓN.</i>	79
4.2.4.	<i>MODELO DE LA CUARTA PERTUBACIÓN.</i>	81
4.2.5.	<i>MODELO DE LA QUINTA PERTUBACIÓN.</i>	83
4.2.6.	<i>MODELO DE LA SEXTA PERTUBACIÓN.</i>	85
4.3.	INGRESO DE MODELOS A DIGSILENT POWERFACTORY	87
4.3.1.	<i>Modelo de carga subestación Policentro.</i>	87
4.3.2.	<i>Modelo de carga subestación Pascuales.</i>	90
4.3.3.	<i>Modelo de carga subestación Caraguay.</i>	91
4.3.4.	<i>Modelo de carga subestación Electroquil.</i>	93

4.3.5. <i>Modelo de carga subestación Nueva Prosperina.</i>	95
4.3.6. <i>Modelo de carga subestación Salitral.</i>	96
4.3.7. <i>Modelo de carga subestación Trinitaria.</i>	98
4.4. ESTABILIDAD DE LAS ZONAS ANALIZADAS	101
5. DISCUSIÓN.....	113
5.1. INTRODUCCIÓN	113
5.2. INVESTIGACIÓN INICIAL.....	113
5.3. CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE DATOS.....	114
5.4. LIMITACIONES DEL PROYECTO.....	115
5.5. RESULTADOS OBTENIDOS	116
5.6. DIFERENCIAS EN EL SISTEMA PREVIO Y POSTERIOR INGRESO DE LOS MODELOS... 116	
6. CONCLUSIONES	119
APÉNDICE A - TABLAS SUBESTACIÓN POLICENTRO.	123
APÉNDICE B - TABLAS SUBESTACIÓN PASCUALES.	125
APÉNDICE C - TABLAS SUBESTACIÓN CARAGUAY.	128
APÉNDICE D - TABLAS SUBESTACIÓN ELECTROQUIL.	131
APÉNDICE E - TABLAS SUBESTACIÓN NUEVA PROSPERINA.	132
APÉNDICE F - TABLAS SUBESTACIÓN SALITRAL.	134
APÉNDICE G - TABLAS SUBESTACIÓN TRINITARIA.	137
APÉNDICE H	139

APÉNDICE I	142
APÉNDICE J	145
APÉNDICE K.....	148
APÉNDICE L	151
APÉNDICE M	154
REFERENCIAS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Ejemplo de la configuración de un sistema de potencia (libro Power System Stability and Control, Prabha Kundur)	15
Figura 2.2 Componentes de una onda sinusoidal periódica.....	23
Figura 2.3 Perturbación en los valores de potencia y voltaje.	28
Figura 3.1 Triángulo de potencias	37
Figura 3.2 Superposición de las señales de voltaje y corriente de una subestación.	40
Figura 3.3 Desfase entre las ondas de voltaje y corriente a partir del cual se obtiene el factor de potencia.....	41
Figura 3.4 Señales de la corriente, el voltaje, y la potencia instantánea obtenida como producto de ambos.	43
Figura 3.5 Gráfica de voltaje en función del tiempo en la barra Policentro...44	
Figura 3.6 Gráfica de potencia en función del tiempo en la barra Policentro45	
Figura 3.7 Selección de puntos de estudio en las gráficas de voltaje de la subestación Policentro	46
Figura 3.8 Selección de puntos en la gráfica de la curva de potencia de la subestación	46
Figura 3.9 Selección del tipo de carga a ingresar.....	49

Figura 3.10 Representación en el circuito de una carga tipo “General Load”	50
.....	
Figura 3.11 Cuadro de diálogo de la carga general	50
Figura 3.12 Creación del nuevo proyecto de carga.....	51
Figura 3.13 Ventana de parámetros que describen el comportamiento de la carga.....	51
Figura 3.14 Ingreso de coeficientes.	52
Figura 3.15 Porcentaje de carga estática y dinámica considerado para el modelo.....	52
Figura 3.16 Parámetros a modificar en la pestaña “Load Flow”.....	53
Figura 3.17 Inicio del flujo de potencia.....	53
Figura 3.18 Parámetros para inicialización del flujo de potencia.....	54
Figura 3.19 Estado del Sistema al finalizar el flujo de potencia.	55
Figura 4.1 Señales de voltaje y corriente a la salida de la subestación Policentro	71
Figura 4.2 Desfase entre las curvas de voltaje y corriente para la obtención del factor de potencia.....	71
Figura 4.3 Potencia instantánea a la salida de la subestación Policentro	72
Figura 4.4 Valores eficaces de la potencia activa de la demanda.....	73
Figura 4.5 Valores eficaces de la tensión.....	73

Figura 4.6 Selección de puntos en la representación de tensión antes y después de la perturbación	74
Figura 4.7 Selección de puntos en la representación de potencia activa antes, durante y después de la perturbación	75
Figura 4.8 Representación de la subestación Policentro en PowerFactory...	87
Figura 4.9 Creación de un modelo específico para la subestación	88
Figura 4.10 Ingreso de los coeficientes al modelo de carga de la subestación Policentro.....	89
Figura 4.11 Representación de la subestación Pascuales en PowerFactory	90
Figura 4.12 Representación de la subestación Pascuales en PowerFactory	92
Figura 4.13 Representación de la subestación Pascuales en PowerFactory	93
Figura 4.14 Representación de la subestación Pascuales en PowerFactory	95
Figura 4.15 Representación de la subestación Salitral en PowerFactory.....	97
Figura 4.16 Representación de la subestación Salitral en PowerFactory.....	98
Figura 4.17 Curvas PV de la zona trinitaria	101
Figura 4.18 Curvas PV de la zona trinitaria	102
Figura 4.19 Curva PV de la barra Caraguay.....	102
Figura 4.20 Curva PV de la barra Caraguay.....	103
Figura 4.21 Curva PV de la barra Trinitaria	103

Figura 4.22 Curva PV de la barra Trinitaria.....	104
Figura 4.23 Curva PV de la barra Nueva Prosperina	104
Figura 4.24 Curva PV de la barra Nueva Prosperina	105
Figura 4.25 Curva PV de la barra Electroquil	105
Figura 4.26 Curva PV de la barra Electroquil	106
Figura 4.27 Curva PV de la barra Salitral.....	106
Figura 4.28 Curva PV de la barra Salitral.....	107
Figura 4.29 Curva PV de la barra Policentro.....	107
Figura 4.30 Curva PV de la barra Policentro.....	108
Figura 4.31 Curva PV de la barra Pascuales	108
Figura 4.32 Curva PV de la barra Pascuales	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Valores de voltaje y potencia en los puntos seleccionados de las gráficas.....	47
Tabla 4.1 Energía consumida por cada sector de carga en la subestación Pascuales.....	61
Tabla 4.2 Potencia activa suministrada a cada sector de carga por la subestación Policentro	61
Tabla 4.3 Potencia reactiva suministrada a cada sector de carga por la subestación Policentro	62
Tabla 4.4 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Policentro	63
Tabla 4.5 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Pascuales..	65
Tabla 4.6 Voltajes en la subestación Pascuales.....	65
Tabla 4.7 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Caraguay.	66
Tabla 4.8 Voltajes en la subestación Caraguay.....	66
Tabla 4.9 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Electroquil.	67
Tabla 4.10 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Nueva Prosperina.....	68
Tabla 4.11 Voltajes en la subestación Nueva Prosperina	68
Tabla 4.12 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Salitral	69

Tabla 4.13 Voltajes en la subestación Salitral.....	69
Tabla 4.14 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Trinitaria....	70
Tabla 4.15 Voltajes en la subestación Trinitaria.....	70
Tabla 4.16 Valores de los puntos de voltaje y potencia seleccionados.....	75
Tabla 4.17 Valores de los puntos de voltaje y potencia seleccionados.....	77
Tabla 4.18 Valores de los puntos de voltaje y potencia seleccionados.....	79
Tabla 4.19 Valores de los puntos de voltaje y potencia seleccionados.....	81
Tabla 4.20 Valores de los puntos de voltaje y potencia seleccionados.....	83
Tabla 4.21 Valores de los puntos de voltaje y potencia seleccionados.....	85
Tabla 4.22 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo	88
Tabla 4.23 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo	89
Tabla 4.24 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación	89
Tabla 4.25 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo	90
Tabla 4.26 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo	91
Tabla 4.27 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación	91

Tabla 4.28 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo	92
Tabla 4.29 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo.....	93
Tabla 4.30 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación.....	93
Tabla 4.31 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo	94
Tabla 4.32 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo.....	94
Tabla 4.33 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación.....	95
Tabla 4.34 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo	96
Tabla 4.35 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo.....	96
Tabla 4.36 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación.....	96
Tabla 4.37 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo	97
Tabla 4.38 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo.....	98
Tabla 4.39 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación.....	98
Tabla 4.40 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo	99

Tabla 4.41 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo 99

Tabla 4.42 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación 100

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
SNI	Sistema Nacional Interconectado
CELEC	Corporación Eléctrica del Ecuador
DigSILEN™	Digital Simulator and Electrical Network “Simulator Digital y red eléctrica”

SIMBOLOGÍA

kV	kilovoltio
MW	Megavatio
A	Amperios
P	Potencia activa
Q	Potencia reactiva
S	Potencia aparente
V_o	Voltaje nominal
P_o	Potencia activa en operación normal
Q_o	Potencia reactiva en operación normal
P_r	Potencia de recuperación
P_s	Potencia después la perturbación
P_t	Potencia durante la recuperación
T_p	Tiempo en segundos de la Potencia al llegar al 63% de su estado de recuperación.
α_s	Coeficiente de recuperación
α_τ	Coeficiente según el tipo de carga

CAPÍTULO I:

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE CAPÍTULO I

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
1.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2.	JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	5
1.3.	OBJETIVOS.....	6
1.4.	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	7
1.5.	CONTRIBUCIÓN AL CAMPO DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA EN POTENCIA.....	8

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

El alcance de este proyecto depende, inicialmente, del reconocimiento de los tipos de cargas y el porcentaje de contribución de estas al consumo de potencia en las barras que se encuentran conectados al sistema, de esta forma se determinan modelos basados en las características de sus estructuras que puedan ingresarse en la simulación de flujos de potencia, los que se utilizan para realizar análisis de estabilidad.

Estos modelos se referirán como “cargas” y corresponden a la representación de una sección del sistema. Pueden ser clasificados como estáticos, dinámicos y no convencionales y, una vez identificados los tipos que se encuentran conectados a las barras de las subestaciones que han sido seleccionadas como objeto de estudio, se determinan las clases a las que pertenecen que pueden ser del tipo industrial, residencial, comercial o de agricultura.

Los datos disponibles de potencia activa y reactiva, voltaje y frecuencia provenientes de las subestaciones permiten realizar los modelos matemáticos corresponden a las principales variables que componen los distintos tipos de cargas que se encuentran conectadas. La construcción de los modelos implica una clasificación de las cargas de forma que, aquellas de estructuras con características similares, quedan agrupadas de forma conjunta.

A través del estudio de las cargas conectadas a las barras seleccionadas, se reemplaza en el sistema toda la sección correspondiente a estas por un modelo equivalente, de forma que promuevan una mejor comprensión durante la simulación de flujos de potencia y así, observar el comportamiento de las potencias activa y

reactiva ante las variaciones de voltaje y frecuencia ocasionados por la misma. Una vez definidos los modelos de carga planteados en las zonas seleccionadas, se realiza un análisis comparando las características del sistema, es decir, los resultados del flujo de potencia, antes y después del cambio de las cargas por los modelos desarrollados en los distintos puntos de la red, cuyo consumo se adquiere a partir de mediciones reales en las subestaciones.(Maitra, Gaikwad, Pourbeik, & Brooks)

Para el modelado de cargas y las simulaciones que se manejan en los análisis de los resultados del flujo de potencia en el sistema se utilizó el software DigSilent PowerFactory, puesto que es una herramienta especializada en el análisis de sistemas de energía, con una amplia cobertura para el ingreso de variables presentes en los sistemas reales; sin embargo, debido a que los modelos dinámicos de carga requieren el ingreso de datos históricos de voltaje y frecuencia para su modelamiento y, a que los métodos para la obtención de datos en el sistema sólo registran valores de potencia, el presente proyecto de investigación está enfocado puramente en la obtención de modelos estáticos de carga, que no dependen del tiempo y consisten, básicamente, en el coeficiente obtenido de la relación entre la potencia, activa o reactiva, con la tensión o frecuencia respectivamente. Por esta razón, el tipo de modelo asume que esta relación será la misma para cualquier instante de tiempo en el sistema. De manera similar, el modelo polinómico se orienta a la descripción matemática de las perturbaciones que ocurren en una subestación equipada con los equipos de adquisición de datos con alta frecuencia de muestreo necesarios para su desarrollo.

Este trabajo pretende formular cuestionamientos, que surgen a partir de los objetivos enunciados y las delimitaciones del alcance del estudio, estos consisten en cuantificar la magnitud de afectación que provocan los cambios en las cargas en el sistema. De esta manera se han planteado las siguientes interrogantes:

1. ¿Es posible que la conexión y desconexión de cargas en Guayaquil afecten a la estabilidad del sistema en puntos distantes respecto a las subestaciones en las que se realizan las pruebas?
2. ¿Cuáles son los diferentes modelos de carga que existen y cuáles son aquellos cuyas características cumplen con los requisitos para utilizarlos con las subestaciones que se estudian?
3. ¿Qué datos son necesarios para realizar un adecuado desarrollo de modelos de carga?
4. ¿Cómo funciona el ingreso de modelos de carga en el software DIgSILENT PowerFactory?
5. ¿Existe un procedimiento para desarrollar modelos de carga?
6. ¿Cuáles son las ventajas de desarrollar modelos de carga?

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.

Para su comprensión el Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.) puede segmentarse en tres etapas: generación, transmisión y distribución. Mientras que los procesos de generación y transmisión de energía han sido ampliamente estudiados para su adecuado manejo en el sistema de potencia; las cargas a las que entrega energía el sistema de distribución constituyen un complejo tema de análisis debido a la extensa variabilidad de estas y, a las diferentes características que las componen.

Actualmente, la distribución de energía hacia los consumidores se basa en un estudio histórico del consumo registrado en intervalos de tiempo previos, cuyas características puedan coincidir con aquellas previstas para el tiempo en que se realiza la planificación de generación en el sistema. Para esto se consideran, entre otras, la tendencia de crecimiento de la demanda en años anteriores según las condiciones ambientales, la temporada del año y el incremento de la población.

Los estudios en la estabilidad de voltaje han limitado la operación de los sistemas eléctricos de potencia alrededor del mundo. El alcance del desarrollo actual y el

incremento de la demanda eléctrica ha obligado a los mercados eléctricos a operar en los límites de cargabilidad de los equipos que componen al sistema eléctrico. El propósito de este proyecto integrador es proporcionar modelos de carga a partir de datos reales y, establecer un procedimiento para su obtención. Como resultado se presentarán modelos estáticos y dinámicos para su ingreso a la simulación de flujo de potencia en el software DigSilent de forma que puedan obtenerse conclusiones respecto al comportamiento del sistema.

1.3. OBJETIVOS.

El presente trabajo se ha propuesto alcanzar los siguientes objetivos durante su desarrollo:

- Determinar modelos de carga estáticos y dinámicos que puedan utilizarse en la simulación de flujos de potencia a fin de obtener información que contribuya en el análisis de estabilidad permanente y transitoria.
- Explicar qué son los modelos de carga, sus tipos y sus usos según las características de la sección del sistema a modelar.
- Identificar los tipos de modelos de carga que pueden desarrollarse con la información disponible y que cumplan con los requerimientos de las características de la sección del sistema.
- Seleccionar y justificar un modelo de carga para desarrollar los modelos estáticos.
- Seleccionar y justificar un modelo de carga para desarrollar los modelos dinámicos.
- Analizar las ventajas y desventajas de reducir el comportamiento de una sección del sistema a la representación propuesta en modelo de carga.
- Determinar modelos estáticos de carga basados en la potencia entregada del sistema hacia los diferentes tipos de consumidores en subestaciones específicas del S.N.I.

- Obtener los coeficientes de las ecuaciones que utiliza DigSilent para la simulación de modelos de carga en un sistema.
- Determinar modelos dinámicos de carga a través de datos obtenidos en tiempo real con alta frecuencia de muestreo de voltaje y corriente en un punto específico del sistema.
- Realizar la simulación de flujos de potencia variando la disponibilidad de modelos de carga conectados a la red en los puntos estudiados.
- Analizar la variación en la estabilidad del sistema a medida que se ingresan más modelos de carga a la red en estado estable o transiente.
- Determinar el modelo más crítico para la estabilidad de la red y las causas del alcance de su impacto.

1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.

La estructura del proyecto se presenta en seis apartados, el Capítulo I contiene la Introducción, en la que se muestra el objetivo principal del modelado de carga y su uso para análisis de estabilidad en estudios de flujos de potencia. Además, explica brevemente los procedimientos utilizados para cumplir con estos durante la elaboración del proyecto, así mismo, establece las preguntas de investigación y las delimitaciones en el alcance del estudio.

En el Capítulo II se abordan conceptos y teoría en los que se basa el desarrollo de la metodología y, que constituyen la base del desarrollo del proyecto, enfatizando en aquellos que describen los tipos de cargas que pueden modelarse de acuerdo a las condiciones del sistema, los datos de variables existentes y aquellos disponibles en las librerías del software utilizado.

En el Capítulo III, correspondiente a la metodología del desarrollo y obtención de modelos de carga, se explican los procedimientos, cálculos y limitaciones de selección a partir de los cuales se obtienen los datos de las variables que se necesitan para el diseño y simulación de los modelos de carga y, de qué forma estos ingresarán

al sistema en el punto de estudio para el análisis de estabilidad. Este capítulo pretende establecer un procedimiento constituido por una secuencia ordenada de pasos para la obtención de modelos estáticos y dinámicos.

Los resultados se reflejan en el Capítulo IV donde se explica la obtención de los modelos desarrollados y, los resultados de las simulaciones de flujos de potencia después del ingreso de los modelos generales de carga, es decir, el comportamiento del sistema. En este capítulo se realiza un análisis basado en los diferentes resultados obtenidos según los modelos de carga que se encuentren activos en el sistema; de forma que se puedan enfatizar las diferencias antes y después del ingreso de estos.

En los últimos capítulos, que representan la discusión y las conclusiones respectivamente, se evalúan los resultados obtenidos y se comparan estos con las expectativas iniciales del proyecto, se destacan las diferencias entre el análisis del modelo actual del sistema y aquellos en los que se han ingresado los modelos de carga en diferentes puntos de la red, posteriormente se explican los resultados y razonamientos finales de forma general y su importancia en la aportación a los modelos existentes del sistema en el estudio de estabilidad y planificación de la expansión del sistema eléctrico.

1.5. CONTRIBUCIÓN AL CAMPO DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA EN POTENCIA.

En Ecuador, el Sistema Nacional Interconectado se encuentra completamente representado en el software DIgSILENT PowerFactory, esto incluye todos los equipos de generación, transformación, filtros, barras, líneas de transmisión, entre otros. Las cargas se incluyen en este listado, sin embargo, se cuenta con un único modelo para estas en el que la única variación es la potencia consumida. Esto representa un inconveniente al momento de obtener datos reales al realizar la simulación de flujos de potencia y sus resultados.

Se han obtenido modelos de carga para su ingreso al sistema con base en datos reales, considerando las características de las cargas conectadas y su contribución al consumo de cada subestación seleccionada.

Este proyecto hará una contribución en el campo eléctrico al facilitar el análisis con datos reales de consumo en el país y, establecer un procedimiento para la obtención de modelos de carga en los diferentes puntos del Sistema Nacional Interconectado.

CAPÍTULO II:

REVISIÓN DE LA

LITERATURA

ÍNDICE CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	13
2.1. SISTEMAS DE POTENCIA	14
2.2. CARGAS	15
2.3. MODELOS DE CARGA.....	17
2.3.1. <i>MODELOS ESTÁTICOS</i>	19
i. MODELO EXPONENCIAL	20
ii. MODELO POLINOMIAL.....	20
2.3.2. <i>MODELOS DINÁMICOS</i>	22
i. ANÁLISIS DE FOURIER: SEÑALES SINUSOIDALES. –.....	23
ii. TEOREMA DE FOURIER.....	24
iii. VALOR MEDIO Y VALOR EFICAZ RMS.	25
iv. REPRESENTACION DEL MODELO.	27
v. ADQUISICIÓN DE DATOS.....	28
2.4. ESTABILIDAD.	29
2.4.1. <i>ESTABILIDAD DE VOLTAJE</i>	29
2.4.2. <i>ESTABILIDAD DE FRECUENCIA</i>	30
2.5. MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS.	30

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Para modelar un sistema físico se debe realizar un proceso de selección, en el cual se escogen las características más importantes y/o representativas para la descripción del sistema, de esta forma se obtiene una representación simplificada de un sistema real. Este proceso depende del punto de vista de la persona que lo lleva a cabo, por lo que deben considerarse los componentes y las relaciones del sistema para seguir un correcto proceso de modelado. Para realizar un modelo correcto, el comportamiento obtenido a través de la simulación del sistema regido por la ecuación matemática que lo describe, debe compararse con aquel observado en el sistema físico. Para este proyecto integrador se define el sistema físico bajo estudio conformado por todas las cargas eléctricas conectadas a una subestación, que puedan modelarse para su uso en estudios de estabilidad.(Aromataris, Amera, & Riubrugent, 2001)

Para obtener los modelos de carga, estáticos y dinámicos, debe establecerse un procedimiento, el cual es diferente según la naturaleza del modelo a realizar; partiendo de la selección, orden y clasificación de los datos obtenidos para el estudio, hasta su procesamiento y la obtención de la ecuación final que describirá el comportamiento provocado por la carga en el sistema.

Dado que se pretende clasificar las cargas para obtener modelos aplicables a diferentes puntos de la red, se debe presentar definiciones para la respuesta eléctrica obtenida del análisis de diferentes tipos de cargas basadas en la forma de onda de las corrientes absorbidas por ellas, de la cantidad de potencia activa o reactiva consumida; estas serán distintas aun cuando se tenga la misma tensión de alimentación para todas.

El análisis de estabilidad se fundamenta en el estudio de señales, estacionarias y transitorias. Para las señales estacionarias se analizan la tensión, corriente, potencia y admitancia mientras que; para las señales transitorias se analiza su forma, tamaño y duración. Estos últimos ocurren en momentos de conexión y desconexión de cargas.(Monagas, Palacios, & Rueda, 2010)

2.1. SISTEMAS DE POTENCIA.

Un sistema eléctrico de potencia corresponde a un sistema de funcionamiento no lineal cuya operación se somete a los cambios del medio; estas corresponden a entradas y salidas de carga o generación, cambios en la topología o en parámetros importantes. Está constituido por elementos cuya función es la de generar, transformar, transmitir y distribuir energía a los puntos de consumo; también se cuenta entre estos elementos a aquellos dispositivos adicionales que son necesarios para que la energía sea suministrada de forma continua, con un adecuado control de la tensión y la frecuencia manteniendo la mayor calidad al menor costo posible. El SNI se constituye por tres segmentos de análisis: generación, transmisión y distribución.

La generación consiste en la transformación de cualquier forma de energía en electricidad; se hace entrega de energía mecánica a los generadores, a través del movimiento de su eje, para su transformación a energía eléctrica. Esta energía mecánica puede provenir del movimiento en ríos, de las mareas, del viento, por combustión, entre otros.

La etapa de transmisión consiste en el transporte de energía desde los puntos de generación hasta las concentraciones poblacionales en diferentes lugares. Su estudio ha sido ampliamente tratado debido a que siempre se busca el medio para reducir en lo posible las pérdidas de la forma más económica posible.

Los dos segmentos mencionados han sido ampliamente estudiados mientras qué, la distribución de energía, se hace bajo la premisa de generar para suplir la demanda de los usuarios. Esta se estudia según los intervalos de demanda, en los que se establece un valor promedio de la energía requerida por los usuarios durante determinados lapsos de tiempo; de esta manera se construyen perfiles de carga diarios para analizar el consumo de energía. La Figura 2.1 muestra la topología de un sistema típico de potencia.

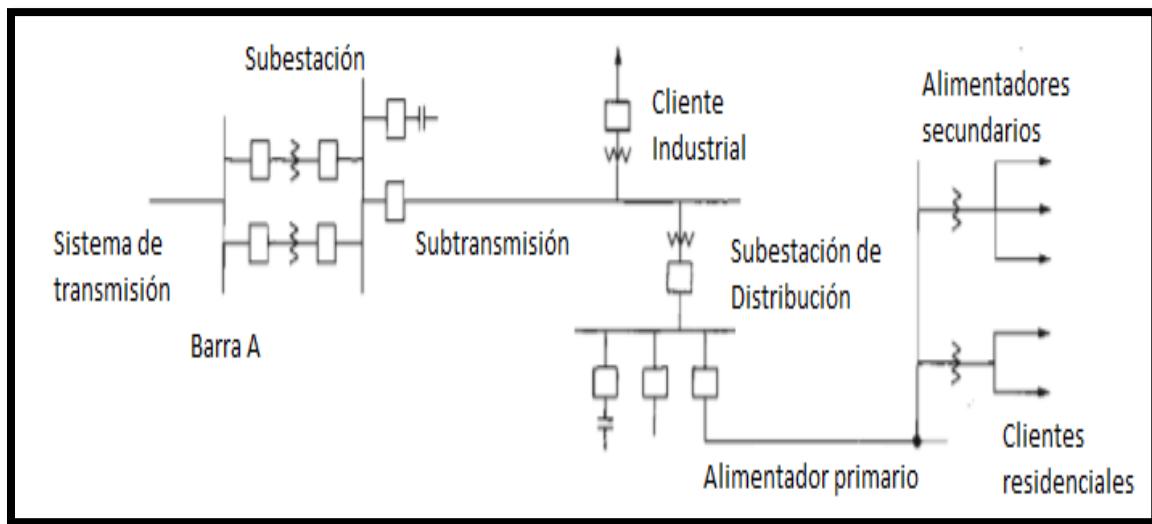


FIGURA 2.1 EJEMPLO DE LA CONFIGURACIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA (LIBRO POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL, PRABHA KUNDUR)

En la Figura 2.1 observamos la configuración de un sistema típico de potencia cuyas funciones pueden resumirse en generar energía, elevar el voltaje durante la transmisión y reducirlo nuevamente a valores comerciales al llegar a las áreas de distribución.

2.2. CARGAS.

La carga es la sección terminal de un sistema de potencia e incluye a todos los equipos que requieren energía eléctrica para funcionar. La sumatoria de las intensidades y potencias de estos equipos dependientes de una parte del sistema

constituyen la carga conectada y representan la máxima demanda que podría requerirse. En los sistemas eléctricos, el término “carga” es ampliamente utilizado y puede referirse a: uno solo de los dispositivos conectados al sistema que consuma potencia, a la potencia total que consumen todos los dispositivos conectados, a la representación de un segmento del sistema tratado como un único dispositivo. Al hacer referencia a la composición de una carga deben definirse algunos términos que se utilizaran posteriormente:

- **Componente de carga.** - Corresponde a un equivalente de dispositivos que son del mismo tipo de carga o de cargas similares.
- **Clases de carga.** - Se refieren a las categorías de estas, es decir, residenciales, comerciales o industriales; de esta forma pueden agruparse en clases de estructuras similares.
- **Demanda.** - Es una cantidad dependiente del caso de estudio, diferenciada si se trata de la selección de equipos o de la planificación del sistema. La sucesión de valores de demanda se conoce como curva de carga y, la caracterización de la carga se ve influenciada por la frecuencia de medición establecida según los intervalos de demanda. Esta medición puede hacerse de forma discreta o, mediante integración.
- **Medición discreta.** - Se refiere a un valor de carga instantánea obtenido por cada intervalo de demanda establecido, esto afecta severamente la caracterización de la carga; sin embargo, este método de muestreo es útil cuando se aplica a un alimentador completo o a una subestación puesto que, la variación individual de cargas no contribuye a un cambio de gran percepción en los datos finales obtenidos.
- **Medición por integración.** - Trabaja haciendo uso del área bajo la curva de un perfil diario de carga continuo, el cual corresponde al total de energía consumida durante ese día, aplicando la ecuación (2.1):

$$Energía = \int_{t-\Delta t}^t D(\tau) d\tau \quad (2.1)$$

Aplicando la ecuación (2.1) durante un intervalo de demanda, el área bajo la curva corresponderá a la demanda efectiva de energía, es decir, el consumo real del sistema.

2.3. MODELOS DE CARGA.

Un elemento de carga consiste en un dispositivo o el equivalente de un conjunto de elementos que consumen, generan o controlan potencias, sean activas o reactivas, que muestra sensibilidad ante variaciones transitorias, dinámicas o de estado estable en la tensión de la barra donde se encuentra conectada junto a otros elementos y esta, a su vez, a una fuente de energía eléctrica.

Debe señalarse que el término “carga” hace referencia también a transformadores a nivel de sub-transmisión, alimentadores primarios y secundarios, bancos de capacitores, reactores, entre otros dispositivos. Dado que, la representación individual de la composición de carga de cada uno de los dispositivos conectados a la red es poco eficiente considerando las extensas cantidades existentes de estos en un sistema, la representación se hará bajo un proceso de simplificación y agrupación.

En el presente proyecto, al citar la premisa “modelos de carga” se hace referencia a un segmento del sistema eléctrico que no está descrito de forma detallada en la porción de la red bajo estudio y, que se trata como si fuese un solo objeto que consume potencia conectado a un nodo de la red. De esta forma se tiene una representación equivalente de una porción del sistema.(Concordia & Ihara, 1982)

Los modelos de carga representan, matemáticamente, el comportamiento de la carga a través de la descripción de la relación existente entre las potencias que componen la carga conectada a una barra y los valores de voltaje y frecuencia que caracterizan a esta última.

Se pueden clasificar los modelos de carga en dos grupos. Los modelos estáticos cuyas características representan potencia activa y reactiva como funciones de las variables de voltaje y frecuencia en un instante de tiempo y; los modelos dinámicos, los cuales utilizan ecuaciones diferenciales para relacionar las potencias con los valores de voltaje y frecuencia en una red.

La forma general de los modelos estáticos de carga se describe en las ecuaciones (2.2) y (2.3):

$$P = P(P_o, Q_o, V_o, f_o, V, f) \quad (2.2)$$

$$Q = Q(P_o, Q_o, V_o, f_o, V, f) \quad (2.3)$$

Donde la ecuación (2.2) describe el modelo general de la potencia activa y, la ecuación (2.3) da la descripción del modelo general de la potencia reactiva para los modelos estáticos de carga.

La forma general de los modelos dinámicos de carga se describe en las ecuaciones (2.4) y (2.5):

$$f\left(\frac{\delta^n P}{\delta t^n}, \dots, \frac{\delta P}{\delta t}, P, \frac{\delta^m V}{\delta t^m}, \dots, \frac{\delta V}{\delta t}, V\right) = 0 \quad (2.4)$$

$$f\left(\frac{\delta^r Q}{\delta t^r}, \dots, \frac{\delta Q}{\delta t}, P, \frac{\delta^s V}{\delta t^s}, \dots, \frac{\delta V}{\delta t}, V\right) = 0 \quad (2.5)$$

Donde la ecuación (2.4) describe el modelo general de la potencia activa y, la ecuación (2.5) describe el modelo general de la potencia reactiva. Sin embargo, la forma individual de las ecuaciones para un modelo determinado dependerá de las características de la carga a la que representarán.

Se puede concluir que la diferencia entre ambos modelos radica en los valores que utilizan para el cálculo de la respuesta del modelo, mientras que los estáticos utilizan valores instantáneos, los dinámicos utilizan instantáneos e históricos.

2.3.1. MODELOS ESTÁTICOS.

Los modelos estáticos no tienen dependencia del tiempo puesto que, su comportamiento se representa adecuadamente mediante funciones algebraicas de la tensión y/o frecuencia. Estos describen la relación existente entre las potencias con la magnitud del voltaje y con la frecuencia que se dan en un instante de tiempo, sin considerar los datos de instantes previos. Este tipo de modelos consideran que dicha relación será un valor constante para cualquier instante de tiempo.

Entre los modelos estáticos de carga podemos destacar como los más comunes los que se describen a continuación:

- **De impedancia constante.** – en el que la potencia varía de forma proporcional al cuadrado de la magnitud del voltaje.
- **De corriente constante.** – en el que la potencia varía de forma proporcional al valor de la magnitud del voltaje.
- **De potencia constante.** – en el que la potencia no varía aun cuando existan variaciones en la magnitud de voltaje.
- **Polinomial.** – en el que se muestran las relaciones entre las potencias y la magnitud el voltaje, corresponde a la combinación lineal de los modelos mencionados anteriormente y expresados como una ecuación polinomial. Este modelo produce mayor impacto en los análisis de la estabilidad de tensión.
- **Exponencial.** – se representa por ecuaciones constituidas por valores de las condiciones iniciales de la carga y, datos de sensibilidad de las potencias respecto a la magnitud de la tensión para el punto estudiado.

Debido a que la variación en p.u. de la frecuencia con respecto a los otros parámetros va a ser reducida no se considerará la dependencia de la variación de la potencia activa y reactiva con esta y, dadas las características de las cargas que se estudian en este proyecto, los modelos en los que se centrará este documento corresponden a los dos últimos mencionados, el modelo exponencial y el modelo polinomial; con los que, según las características de la carga, se obtendrán los parámetros requeridos para obtener las ecuaciones matemáticas correspondientes sin considerar la dependencia de la frecuencia.(Herrera, Mora, & Patiño, 2013)

i. MODELO EXPONENCIAL.

Este modelo permite separar y representar las dependencias de potencia activa y reactiva ante la variabilidad de los valores de tensión, estos pueden representarse mediante las ecuaciones (2.6) y (2.7) respectivamente:

$$P = P_0(\bar{V})^a \quad (2.6)$$

$$Q = Q_0(\bar{V})^b \quad (2.7)$$

$$\bar{V} = \frac{V}{V_0} \quad (2.8)$$

Los exponentes a de la ecuación (2.6) y b de la ecuación (2.7) tienen, a tensión nominal, un comportamiento similar al de las pendientes (dP/dV) y (dQ/dV) respectivamente. El exponente a tiene valores que pueden variar entre 0,5 y 1,8 mientras que, el exponente b se caracteriza por variar como una función no lineal, esta variación se asocia a la saturación que se da en los devanados de transformadores y motores. (Rodriguez, Perez, & Mora, 2013)

ii. MODELO POLINOMIAL.

En la representación de los modelos estáticos, se suele representar de manera independiente la potencia de carga como potencia activa y potencia reactiva;

cada uno de estos conformados por la combinación lineal de los modelos de impedancia, potencia y corriente constante. Este modelo permite la relación de las potencias con la tensión y la frecuencia mediante ecuaciones polinomiales, generalmente se describen con las ecuaciones (2.9) y (2.10):

$$P = P_0 \left[a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_3 \right] \quad (2.9)$$

$$Q = Q_0 \left[b_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + b_3 \right] \quad (2.10)$$

La ecuación (2.9) corresponde al modelo polinomial utilizado para el consumo de potencia activa y, la ecuación (2.10) corresponde al modelo polinomial utilizado para representar el consumo de potencia reactiva. Los coeficientes $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ corresponden a los parámetros del modelo, también debe tenerse presente el factor de potencia de la carga. Al utilizar este modelo el valor de V_0 es el que corresponde al voltaje nominal del dispositivo de carga y, P_0 y Q_0 deben ser las potencias consumidas a voltaje nominal; sin embargo, cuando se trata de la representación de una carga conectada a una barra, estos valores suelen tomarse como aquellos en la condición de operación inicial del sistema bajo estudio.(Herrera et al., 2013)

Los modelos seleccionados se utilizan mayormente para representar modelos estáticos, sin embargo, pueden formular modelos dinámicos partiendo de una ecuación diferencial de estos que considere la variable temporal, de esta forma se pueden aplicar a estudios de estabilidad de tensión. El modelo polinomial consiste en la combinación lineal de los modelos de potencia constante, impedancia constante y corriente constante, de esta forma pueden representar los distintos tipos de cargas que se conectan en un mismo transformador o, en su defecto, una subestación.(Rodriguez et al., 2013)

El modelo de potencia constante corresponde a la representación de la carga industrial de un sistema, debido al alto contenido de motores que la componen. Asume mínimas variaciones en el voltaje nominal y la potencia constante en esa porción del sistema de forma independiente a las variaciones de tensión. En los sistemas de transmisión y distribución que se encargan de la energización de cargas industriales se reduce la corriente a medida que aumenta la tensión.(Perez., Rodriguez., & Mora, 2015)

El modelo de corriente constante corresponde a la representación de la carga comercial, normalmente compuesta por oficinas o negocios que contienen, principalmente, alumbrado y equipos de aire acondicionado. Asume mínimas variaciones en voltaje nominal y corriente constante a través de los alimentadores aún en condiciones de variación de tensión en la alimentación; el valor que cambia en estas ecuaciones es el de la potencia consumida.

El modelo de impedancia constante corresponde a la representación de la carga residencial, normalmente compuesta por alumbrado, electrodomésticos y equipos predominantemente resistivos. Asume constante la demanda de los consumidores y la variación de la potencia proporcional al cuadrado del valor del voltaje. En este modelo el consumo de potencia y, por consiguiente, el de corriente aumenta de forma proporcional al incremento de tensión en los terminales.(Caicedo, 2002)

2 . 3 . 2 . MODELOS DINÁMICOS .

Para los modelos dinámicos se requiere un análisis de la forma sinusoidal que toman los datos proporcionados una vez que son graficados.

i. ANÁLISIS DE FOURIER: SEÑALES SINUSOIDALES. –

Para comprender apropiadamente el uso y alcance del análisis de Fourier en este trabajo deben revisarse algunos conceptos:

Periodo. – Corresponde al espacio de tiempo existente entre la emisión de dos ondas consecutivas.

Frecuencia. – Se refiere al número de ondas emitidas cada segundo, en el caso de la operación del sistema nacional interconectado se trabaja con una frecuencia de 60 oscilaciones por segundo.

Ciclo. – Se refiere a una oscilación completa, desde el punto donde se inicia la trayectoria reiterativa hasta donde termina.

Amplitud. – Es la distancia vertical entre el punto medio de la onda y una cresta, según la naturaleza de la onda la amplitud puede ser variable.

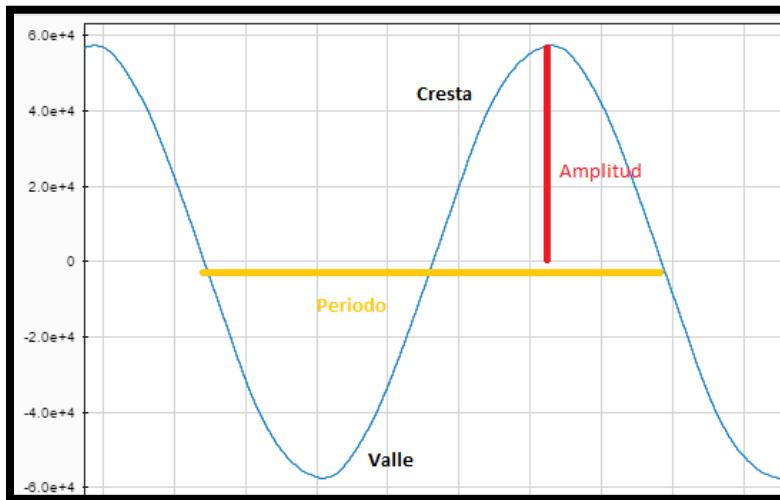


FIGURA 2.2 COMPONENTES DE UNA ONDA SINUSOIDAL PERIÓDICA.

Existen formas de onda especiales con características periódicas que, debido a su facilidad de análisis, son utilizadas para el estudio de formas de ondas

más complejas, gracias a sus propiedades: si se tienen dos señales sinusoidales y estas tienen el mismo valor de frecuencia, su suma dará como resultado una onda sinusoidal de la misma frecuencia con otra amplitud; si se tienen dos señales sinusoidales y estas tienen diferentes valores de frecuencia, la onda resultante después de sumarlas no será una señal periódica; si se tienen dos señales sinusoidales con diferentes valores de frecuencia, pero numéricamente cercanos entre sí, al superponerlas se visualizarán variaciones en la amplitud.

Cualquier forma de onda periódica puede descomponerse en una serie de ondas puras conocidas como armónicos. Al combinarse nuevamente estos armónicos debe obtenerse la onda original. Las frecuencias de estos armónicos son múltiplos enteros de la onda fundamental.(Fernandez-Hernandez, 2007)

ii. TEOREMA DE FOURIER.

El análisis de ondas periódicas puede representarse a través de la superposición de una gran cantidad de ondas sinusoidales que formen una serie armónica, independientemente del nivel de complejidad de estas según el teorema de Fourier:

“Toda función periódica de período P puede descomponerse en una suma de ondas armónicas sinusoidales, de amplitudes y fases adecuadas, cuyo primer armónico posea período P' ”.

Todas las funciones $f(t)$ que sean periódicas, con periodo P , pueden representarse con una sumatoria infinita de funciones armónicas, como se muestra en la ecuación (2.11):

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos(i\omega t) + b_i \sin(i\omega t)) \quad (2.11)$$

En la ecuación (2.11) se tiene el periodo representado por P , mientras que a_i y b_i corresponden a los coeficientes de Fourier.

Así como el teorema describe la descomposición para su análisis de cualquier forma de onda periódica, puede ser también utilizado para la construcción de señales a partir de la sumatoria de ondas sinusoidales puras. De esta forma, el teorema de Fourier puede escribirse como:

"Toda función periódica de periodo P puede construirse a partir de una suma de sinusoides, cuyas frecuencias formen una serie armónica fundamental $f = 1/P$. Cada sinusoide debe poseer la adecuada amplitud y fase, estas se determinarán a partir de la función periódica a estudiar." (Fernandez-Hernandez, 2007)

La disposición de los datos de amplitud, frecuencia y fases de las ondas sinusoidales armónicas se denominan espectro de Fourier.

iii. VALOR MEDIO Y VALOR EFICAZ RMS.

El valor medio de una señal o forma de onda se define como la media de todos los valores que componen esta onda. La sumatoria de estos valores tiene como resultado el área bajo la curva entre los dos puntos seleccionados como límites de integración y puede calcularse mediante la ecuación (2.12):

$$\int_{t_0}^{t_1} f(t) * dt \quad (2.12)$$

Para ondas periódicas es común considerar como el intervalo de integración los valores limitantes del primer periodo; de esta forma $t_0 = 0$ y $t_1 = T$ tal que la expresión anterior será de la forma de la ecuación (2.13):

$$Valor\ Medio = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) * dt \quad (2.13)$$

Este intervalo se considera suficiente dado que, si se consideran n periodos se incrementarán el tiempo y el área en un factor de n , de forma que el resultado final no se vería afectado.

El valor eficaz RMS o, el cuadrado medio de la raíz, es un método para expresar una forma de onda sinusoidal de voltaje como un voltaje equivalente que representa su valor en DC, es decir, es el valor equivalente de una fuente de corriente continua; corresponde al valor de voltaje o corriente alterna que produce el mismo efecto de disipación de energía que su equivalente de voltaje o corriente en corriente continua.

El valor RMS proporciona u estándar para la comparación de la cantidad de energía que una forma de onda AC puede dar a un circuito con respecto a una forma de onda DC. Las formas de onda pueden representar voltaje o corriente.

Estos modelos incluyen, además de los valores de tensión y frecuencia en los nodos a cada instante (al igual que en los modelos estáticos), dependencia del estado de la carga en el momento previo a la ocurrencia de la perturbación. Generalmente estos modelos son empleados cuando se realiza el análisis de las perturbaciones de voltaje y de frecuencia que ocurren a través de los sistemas eléctricos de potencia, las perturbaciones más comunes son generalmente producidas por la variación de potencia activa o reactiva de las cargas conectadas a las barras del sistema. Se utilizan ecuaciones diferenciales para modelar las cargas conectadas al sistema de potencia que cumplan con las condiciones mencionadas, considerando las características mecánicas y eléctricas que las componen.(Fernandez-Hernandez, 2007)

iv. REPRESENTACION DEL MODELO.

El modelo está representado por la ecuación (2.14) de característica no lineal, dado que la potencia activa y reactiva poseen una dependencia no lineal del voltaje.

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} + P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t} \quad (2.14)$$

Donde U_0 y P_0 son los valores de voltaje y de potencia momentos antes de que ocurra la perturbación, P_r es la recuperación de potencia activa después de la perturbación, P_i es la respuesta total de potencia activa, T_p es la constante de tiempo de recuperación de carga, α_t es el transiente de la carga activa que depende del voltaje, y α_s corresponde al estado estable de la carga dependiente del voltaje.(IEEE Task Force, 1993)

T_p es el tiempo que demora la potencia activa para llegar al 63% de su estado nominal después de la perturbación, α_s representa la cantidad de potencia de la carga que se ha restaurado después de la perturbación donde un valor igual a 0 significa que esta se ha restaurado el 100%, mientras que un valor diferente representa tan solo un porcentaje.

Cuando α_t toma el valor de cero, la carga se comporta como un modelo de potencia constante, si es igual a uno la carga se comporta como un modelo de corriente constante y si es igual a dos se comporta como un modelo de impedancia constante.

Se han realizado los modelos dinámicos de las perturbaciones más comunes que pueden presentarse en la barra Policentro para poder observar el nivel de afectación que tienen estas en la estabilidad del sistema nacional interconectado. Se realizará el análisis en el momento en donde ocurría una

variación de potencia activa que, a su vez, producirá una variación de tensión.(Renmu, Jin, & Hill, 2006)

Para realizar el análisis se tomarán en cuenta tres puntos críticos, que describirán el comportamiento del modelo dinámico, estos puntos se refieren a momentos antes de la perturbación, durante la perturbación y después de la perturbación, y analizan la variación que puede llegar a tener la potencia y el tiempo que tardará en recuperarse de esa perturbación. Todo lo descrito anteriormente puede visualizarse en la Figura 2.3.

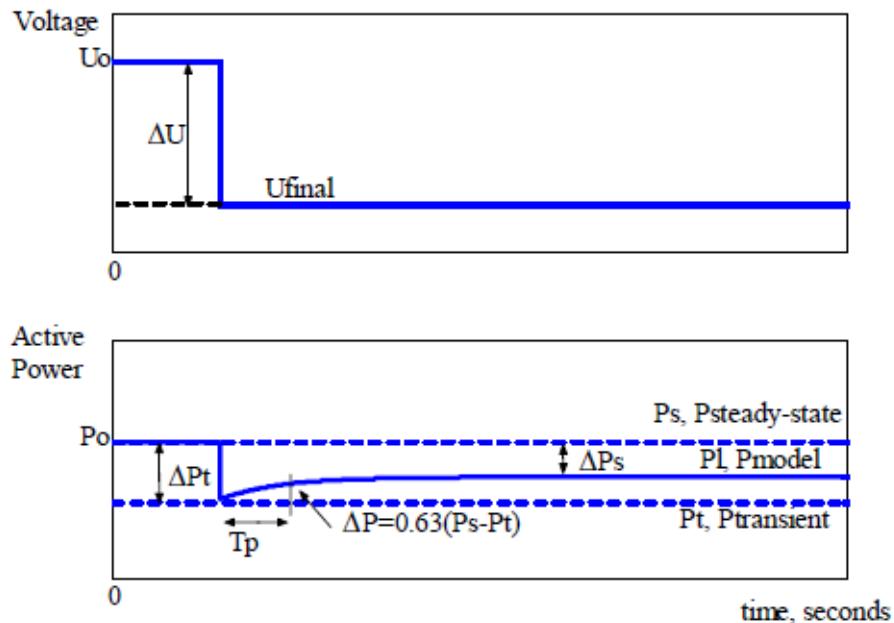


FIGURA 2.3 PERTURBACIÓN EN LOS VALORES DE POTENCIA Y VOLTAJE.

La Figura 2.3 muestra la representación de una perturbación en términos del voltaje y de la potencia activa.

v. ADQUISICIÓN DE DATOS.

Se han seleccionado datos instantáneos de señales de voltaje y de corriente del alimentador Policentro, estos se han utilizado para la realización del

modelo dinámico de carga, los parámetros tales como el factor de potencia, la potencia aparente, la potencia activa y la potencia reactiva se han obtenido a través de las curvas de tensión y de intensidad de corriente, debido a que los datos han sido tomados a una alta frecuencia de muestreo el análisis para la obtención del modelo dinámico es confiable; ya que este se ha basado en las perturbaciones cuya duración está en el orden de los milisegundos.(Zhang, Yan, Chen, & Gao, 2008)

2.4. ESTABILIDAD.

La estabilidad en el sistema eléctrico depende de la capacidad del balance entre la carga y la generación, es por esto que las características de las cargas conectadas a la red deben ser consideradas en los estudios que se realicen.

2.4.1. ESTABILIDAD DE VOLTAJE.

Este tipo de estabilidad se determina especialmente por las características de la carga y los dispositivos utilizados para el control de la tensión, principalmente por aquellos que corresponden al control de la excitación del generador, por ejemplo, el limitador de sobreexcitación. Para la simulación del comportamiento de un sistema eléctrico se busca precisión en el modelado de las cargas, sobre todo si se trata de obtener nociones del comportamiento de este ante grandes perturbaciones. (Concordia & Ihara, 1982)

El análisis de la estabilidad de voltaje destaca la importancia de desarrollar modelos de carga apropiados, sin embargo, no existe un criterio uniforme sobre el modelo óptimo a utilizar en las simulaciones. Este análisis se desarrolla según la capacidad del sistema de potencia para mantener, dentro de un rango de valores en los que puede considerarse que la estabilidad existe, la magnitud de voltaje de un sistema para todas sus barras en condiciones normales de operación y, en pocos ciclos después de presentarse una perturbación.(Lopez, Perez, & Rodriguez, 2016)

Este tipo de inestabilidad tiene un efecto de decremento progresivo en la magnitud de voltaje de las barras en el sistema. La inestabilidad puede producirse debido a escasez de potencia reactiva en los nodos del sistema, esta puede deberse a pequeñas y grandes perturbaciones atribuibles a fallas en el sistema como: cambios en la topología (desconexión de equipos o líneas), coordinación inadecuada de protecciones, dinámica en puntos del sistema como resultado de los intercambiadores de taps (OLTC), pérdida de generación.(Quezada, 2013)

2.4.2. ESTABILIDAD DE FRECUENCIA.

Es analizada a través de la respuesta de un sistema de potencia cuando ocurren perturbaciones severas en la red. Estas llevan grandes variaciones en los valores de frecuencia, tensión y en los flujos de potencia a través del sistema; suelen activar la actuación de las protecciones y la acción de sistemas de control de lento procesamiento, los cuales han sido modelados durante estudios de estabilidad transitoria. Consiste en la capacidad del sistema para mantener, dentro de un rango de valores en los que puede considerarse que la estabilidad existe, un valor de frecuencia de estado estacionario aceptable luego de un evento que provoca perturbación severa al sistema y que, por lo tanto, produzca un importante desbalance entre lo que debería ser la igualdad carga – generación.(Kundur)

2.5. MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS.

Existen dos métodos para obtener los coeficientes de los modelos de carga basados en potencia activa y reactiva, estos son: modelos determinísticos y estadísticos. Para el presente proyecto integrador se utilizarán los primeros; estos dependerán del consumo de energía y las capacidades de los transformadores.(Caicedo, 2002)

MÉTODOS DETERMINÍSTICOS. – Este tipo de método requiere los valores de consumo de potencia activa y reactiva de las diferentes clasificaciones de carga y, algunos datos de los transformadores como la capacidad instalada, el factor de

potencia y el factor de carga. Como en el caso de los modelos estáticos, el método determinístico no considera la característica con respecto al tiempo del consumo de energía, por lo que puede determinarse dentro de un intervalo de tiempo específico.

CAPÍTULO III:

METODOLOGÍA

ÍNDICE CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA	35
3.1. MODELOS ESTÁTICOS DE CARGA	35
3.1.1. SELECCIÓN DE SUBESTACIONES	35
3.1.2. PROCEDIMIENTO	36
3.2. MODELOS DINÁMICOS DE CARGA	39
3.2.1. SELECCIÓN DE DATOS	39
3.2.2. PROCEDIMIENTO	39
3.2.3. EJEMPLO	43
3.3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	48
3.3.1. INGRESO DE LOS MODELOS DE CARGAS A DIGSILENT POWER FACTORY	49

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de los modelos de carga, estáticos y dinámicos ha sido necesario solicitar la información histórica de datos con espacio temporal de cuatro años; estos corresponden a valores de voltaje, potencia activa, potencia reactiva, corrientes, factor de potencia, consumo de transformadores de distribución y facturación según el área de clasificación de carga de las subestaciones seleccionadas para los estudios. El manejo de estos datos varía ligeramente dependiendo del modelo de carga que se desarrolla.

3.1. MODELOS ESTÁTICOS DE CARGA.

Para el desarrollo de los modelos estáticos de carga han sido proporcionados datos de los valores de voltajes en las subestaciones seleccionadas, además se cuenta con datos referentes a los factores de potencia de los transformadores de distribución conectados a estas y, con los valores de energía facturada en los sectores residencial, industrial y comercial; pérdidas en las líneas y energía destinada para consumos no especificados.

3.1.1. SELECCIÓN DE SUBESTACIONES .

Se ha considerado modelar la carga de subestaciones pertenecientes al área de Guayaquil, cuyas bases de datos cuenten con la información descrita en el párrafo anterior. Con base en esto las subestaciones seleccionadas se listan a continuación:

- Subestación POLICENTRO.
- Subestación PASCUALES.
- Subestación CARAGUAY.
- Subestación ELECTROQUIL.

- Subestación NUEVA PROSPERINA
- Subestación SALITRAL.
- Subestación TRINITARIA.

3.1.2. PROCEDIMIENTO .

Se ha propuesto emplear el modelo de carga polinomial, por lo que es necesario obtener los parámetros que se observan en las ecuaciones (3.1) y (3.2), tanto para el equivalente de consumo de potencia activa como para el de potencia reactiva.

$$P = P_0 \left[a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_3 \right] \quad (3.1)$$

$$Q = Q_0 \left[b_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + b_3 \right] \quad (3.2)$$

Dado que el modelo polinomial es el resultado de la combinación lineal de los modelos de impedancia, potencia y corriente constante; los coeficientes a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 y b_3 de las ecuaciones (3.1) y (3.2) que representan el consumo de potencia activa y reactiva respectivamente, pueden obtenerse si se conoce el consumo individual de cada uno de los sectores (residencial, comercial e industrial) a los que estos modelos de carga representan, también deben considerarse consumos registrados por pérdidas de transmisión y demanda no facturada a abonados por registro de medidores.

Señalado lo anterior, la obtención de los modelos de carga estáticos puede describirse en un procedimiento constituido por el siguiente conjunto de pasos:

- **Paso 1:**

Los datos proporcionados corresponden al consumo de energía en diferentes sectores, se debe realizar su correspondiente transformación para que puedan ser trabajados en términos de potencia, haciendo uso de la ecuación (3.3):

$$Potencia [MW] = Energía[KWh] * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} * \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} \quad (3.3)$$

Para este estudio, la ecuación (3.3) ha considerado que los datos de consumo se obtienen en espacios temporales de un mes.

- **Paso 2:**

Utilizando los datos de factor de potencia de cada transformador y, habiendo obtenido los valores de potencia activa de estos, se procede a obtener la potencia reactiva, basados en el principio demostrado en la Figura 3.1.

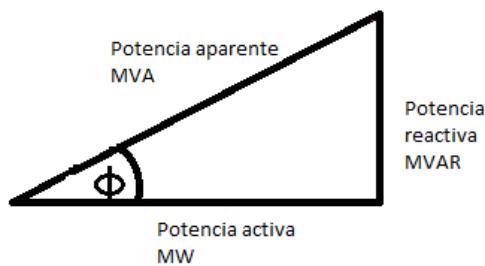


FIGURA 3.1 TRIÁNGULO DE POTENCIAS

$$Potencia Reactiva Q = Potencia Activa P * \tan(\phi) \quad (3.4)$$

Mediante el principio demostrado a través de la Figura 3.1 y con la ecuación (3.4) obtenemos los valores de potencia reactiva entregados por cada uno de los transformadores de distribución en las subestaciones seleccionadas.

- **Paso 3:**

La componente de potencia constante de la combinación lineal que corresponde al modelo polinómico, se utiliza para representar las cargas industriales en el sistema, por lo tanto, el coeficiente obtenido será el valor de a_3 y b_3 . Este dato se obtiene a partir de la potencia total suministrada por la subestación y la potencia total consumida por los transformadores de distribución.

$$a_3 \quad \text{y} \quad b_3$$

La componente de corriente constante de la combinación lineal que corresponde al modelo polinómico, se utiliza para representar las cargas comerciales en el sistema, por lo tanto, el coeficiente obtenido será el valor de a_2 y b_2 . Este dato se obtiene a partir de la potencia total suministrada por la subestación y la potencia total consumida por los transformadores de distribución.

$$a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) \quad \text{y} \quad b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

La componente de impedancia constante de la combinación lineal que corresponde al modelo polinómico, se utiliza para representar las cargas residenciales en el sistema, por lo tanto, el coeficiente obtenido será el valor de a_1 y b_1 . Este dato se obtiene a partir de la potencia total suministrada por la subestación y la potencia total consumida por los transformadores de distribución.

$$a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad \text{y} \quad b_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2$$

- **Paso 4:**

Para los valores de V se utiliza el método de los mínimos cuadrados en los datos históricos del período de tiempo seleccionado, para la reducción de datos y la obtención del que se utilizará en la determinación del modelo. Para el valor de V_0 se emplea el dato de voltaje nominal al que trabaja la subestación.

- **Paso 5:**

Los valores de P_0 y Q_0 corresponderán a aquellos que entrega la subestación en condiciones normales de operación.

3.2. MODELOS DINÁMICOS DE CARGA.

Para el desarrollo de los modelos dinámicos de carga se han utilizado datos históricos de voltaje y corriente en la salida del alimentador de la subestación Policentro. Se ha utilizado el software Matlab para mejorar la interpretación de los datos proporcionados.

3.2.1. SELECCIÓN DE DATOS.

Para obtener el modelo dinámico se analizarán las perturbaciones que ocurren en el sistema a partir de la selección de los tramos de las curvas dónde se observan estas.

Una vez elegido el tramo a analizar se toman tres puntos de la gráfica en la que se observa la perturbación de tensión, el primero punto de análisis se toma en comportamiento estable, momentos antes de la ocurrencia de la perturbación. El segundo punto pertenece a la sección de la gráfica donde se visualiza la perturbación o caída del voltaje, justo en el momento en donde empieza a decaer el voltaje en la barra, es decir, en el rango donde ocurre la caída de tensión. Por último, se toma el tercer punto cuando el sistema empieza a estabilizarse y los valores de tensión se encuentren en un rango de operación normal.(Kulkarni, Gao, & Ning, 2010)

La base de datos utilizada para modelar la carga dinámica de la subestación Policentro se ha obtenido mediante un registro de valores con alta frecuencia de muestreo; de esta forma se puede señalar que se cuenta con 19200 registros por segundo, tanto para los valores de voltaje como para los de corriente.(Perez. et al., 2015)

3.2.2. PROCEDIMIENTO.

A continuación, se describe el procedimiento establecido para el desarrollo de modelos de cargas dinámicos.

- **Paso 1:**

Se cuenta con 55 conjuntos de datos, cada uno de los cuales contiene 192000 valores registrados con alta frecuencia de muestreo, para un manejo adecuado de estos durante la realización del modelo de carga se debe realizar una inspección en busca de perturbaciones.

Inicialmente los datos son entregados en archivos de texto con extensión .txt por lo que, para poder hacer uso de ellos, deben convertirse a formatos de hojas de cálculo (Excel), esto se realizó utilizando el software Matlab.

- **Paso 2:**

Una vez convertidos los datos a un formato adecuado, estos se grafican y se analizan en busca de perturbaciones, para esto se utiliza la herramienta “Signal Analyzer” en la que se grafican los 192000 puntos de cada archivo de datos y se someten a una inspección visual a fin de encontrar datos aberrantes. Esto puede visualizarse en la Figura 3.2.

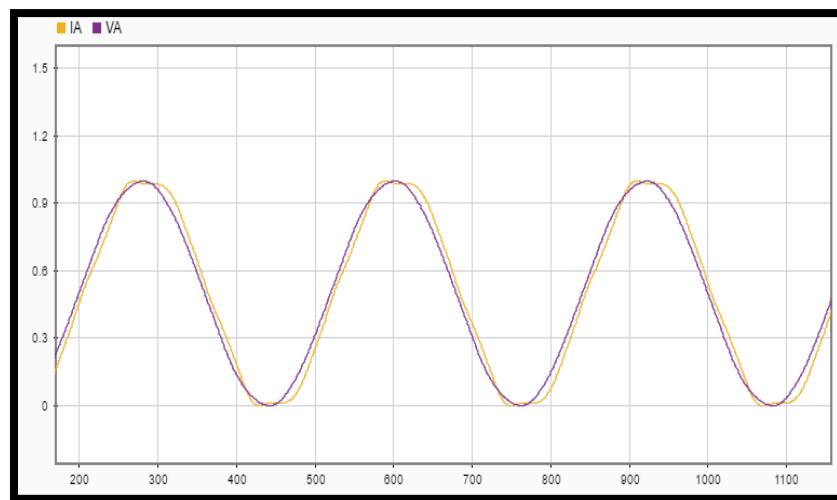


FIGURA 3.2 SUPERPOSICIÓN DE LAS SEÑALES DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE UNA SUBESTACIÓN.

En la Figura 3.2 puede observarse la superposición de las señales de voltaje y corriente, cuyos datos se obtuvieron a alta frecuencia de muestreo. Las señales a las salidas de todas las subestaciones bajo estudio deben representarse de esta forma.

- **Paso 3:**

Se obtiene el desfase existente entre las ondas sinusoidales de voltaje y corriente para cada fase. Esto se realiza, nuevamente, con la ayuda de la herramienta “Signal Analyzer” y, considerando el espacio temporal existente entre la adquisición individual de cada uno de los datos como se muestra en la Figura 3.3.

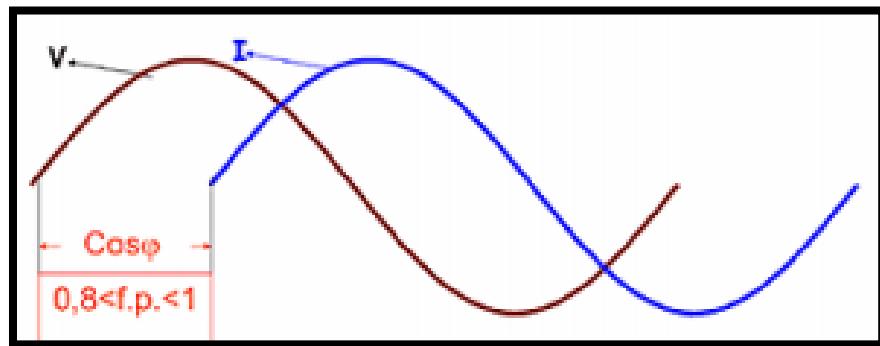


FIGURA 3.3 DESFASE ENTRE LAS ONDAS DE VOLTAJE Y CORRIENTE A PARTIR DEL CUAL SE OBTIENE EL FACTOR DE POTENCIA.

A partir del desfase mostrado en la Figura 3.3 se puede obtener el factor de potencia a través de la diferencia de ángulo entre ambas señales.

En el caso de los archivos que contienen la información para la elaboración del modelo de carga dinámico de la subestación Policentro; se tienen 192000 valores obtenidos de un rango de tiempo de 10 segundos. Por lo que el intervalo de tiempo entre la toma de un dato y su consecuente está dado por:

$$\text{Intervalo entre datos} = \frac{\text{Tiempo de muestreo}}{\text{Número de datos}} = \frac{10 \text{ segundos}}{192000}$$

$$= 0,0000520833333 [seg]$$

Este número corresponde al valor que representará cada unidad de división de la abscisa (eje X) del plano en el que se grafican las ondas de voltaje y corriente. Por lo que, para la obtención del desfase, se inicia ubicando los cursores uno en el cruce por el origen de la ordenada (eje Y) en la onda de corriente y, el otro en el origen de la ordenada de la onda de voltaje. El valor obtenido en distancia se multiplica por aquel obtenido como intervalo entre adquisición de datos. De esta forma, se tiene el desfase como unidad de tiempo en segundos.

Sabiendo qué, el valor de la frecuencia en Ecuador es de 60 [Hertz] (60 ciclos por segundo) se obtiene el periodo de la onda de la siguiente manera:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0,016666666667 \text{ [seg]}$$

Este periodo constituirá un recorrido de 360° en la onda sinusoidal, sea esta de voltaje o corriente por lo que, para obtener el ángulo de desfase bastará con una regla de tres. Se consideran los datos obtenidos a partir del intervalo entre adquisición de datos y el valor de su unidad de división, los cuales serán representados por la letra "N"; se procede de la siguiente forma:

$$0,016666666667 \quad \rightarrow \quad 360^\circ$$

$$N \quad \rightarrow \quad X^\circ$$

$$X^\circ = \frac{N * 360}{0,016666666667}$$

Donde "N" está dado en segundos.

- **Paso 4:**

Obtenido el desfase se procede al cálculo de los valores eficaces (RMS) de las formas de onda de voltaje, corriente y potencia y; dado que en las gráficas sinusoidales no

se aprecian las perturbaciones que puede presentar el sistema, se obtienen los valores eficaces de las ondas graficadas.

3.2.3. EJEMPLO.

Se obtiene la potencia aparente a partir del producto de los valores instantáneos de corriente y voltaje como se observa en la Figura 3.4:

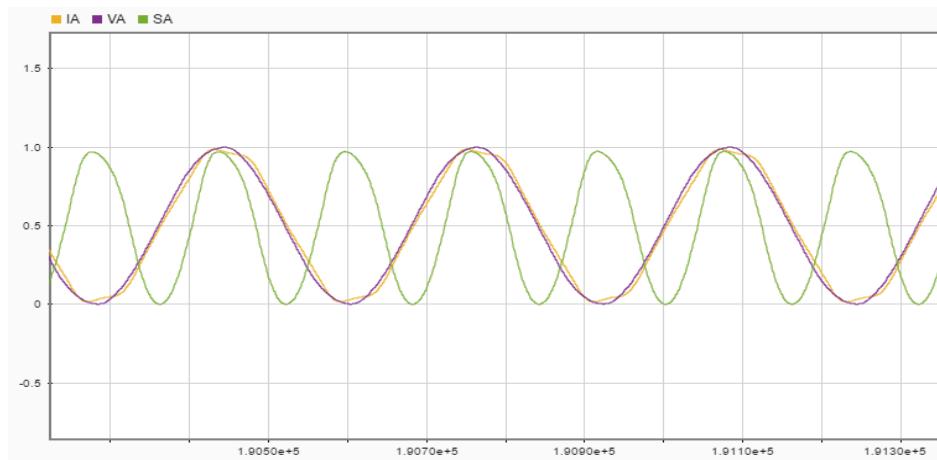


FIGURA 3.4 SEÑALES DE LA CORRIENTE, EL VOLTAJE, Y LA POTENCIA INSTANTÁNEA OBTENIDA COMO PRODUCTO DE AMBOS.

La Figura 3.4 muestra la potencia instantánea que corresponde a la señal que será analizada para la obtención del modelo dinámico de las perturbaciones típicas que afectan a la subestación o barra bajo estudio. Para esto se utilizará el análisis de Fourier para ondas sinusoidales, como se muestra a continuación:

$$\text{Valor RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2 * dx}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} A_1^2 \operatorname{sen}^2(\omega t) * dt}$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{\frac{2A_1^2}{T} \int_0^{T/2} \sin^2(\omega t) * dt} = \sqrt{\frac{2A_1^2}{T} \int_0^{T/2} \left(\frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} \right) dt} \\
&= \sqrt{\frac{2A_1^2}{T} \left[\frac{t + \sin(2\omega t)}{2\omega} \right]_0^{T/2}} = \sqrt{\frac{2A_1^2}{T} \left[\frac{T/2 + \sin(T)}{2} - \frac{0 + \sin(0)}{2} \right]} \\
&= \sqrt{\frac{2A_1^2}{T} \left[\frac{\pi + \sin(2\pi)}{2} \right]} = \sqrt{\frac{2A_1^2}{T} \left[\frac{\pi}{2} \right]} = \sqrt{\frac{2A_1^2}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2} \right]} = \sqrt{\frac{A_1^2}{2}} = \frac{A_1}{\sqrt{2}}
\end{aligned}$$

Los datos de voltaje y corriente en la barra en base a la cual se va a realizar el modelo deben ser graficados para facilitar la selección del tramo en el que se observa la ocurrencia de una variación de voltaje producto de la variación de potencia activa.

Después de un análisis visual de las gráficas de potencia y voltaje se utiliza el intervalo desde el que ocurre la caída de voltaje más pronunciada hasta el punto en el que se estabiliza la tensión.

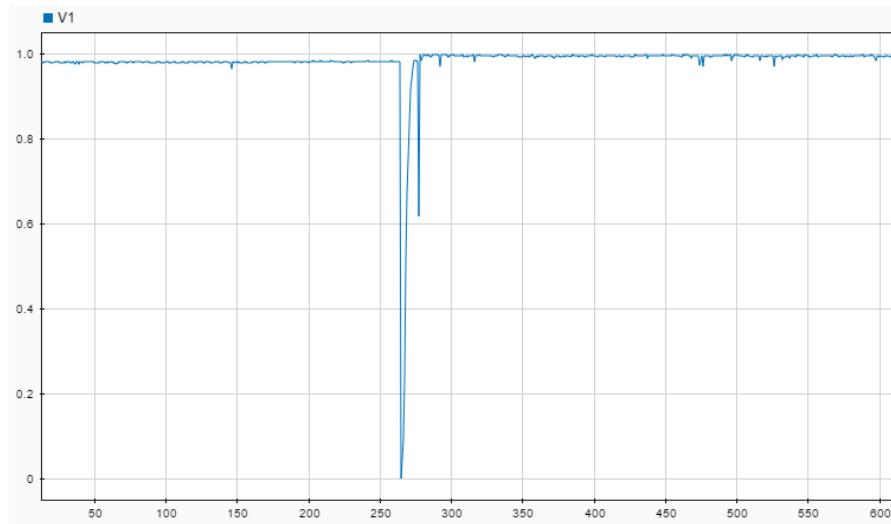


FIGURA 3.5 GRÁFICA DE VOLTAJE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO EN LA BARRA POLICENTRO

La Figura 3.5 representa la variación de voltaje respecto al tiempo durante una perturbación en la barra de la subestación Policentro.

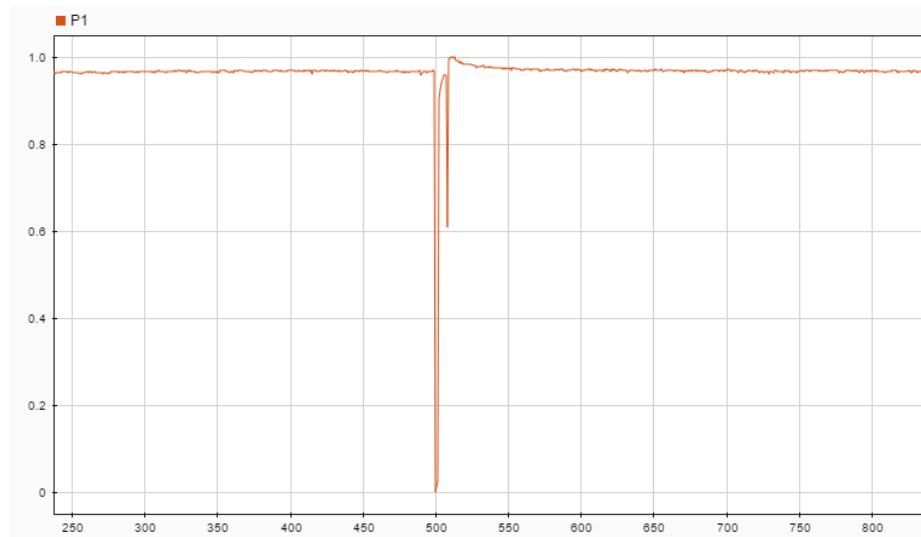


FIGURA 3.6 GRÁFICA DE POTENCIA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO EN LA BARRA POLICENTRO

La Figura 3.6 representa la variación de potencia respecto al tiempo durante el análisis de una perturbación en la barra de la subestación Policentro.

Una vez seleccionado el tramo a analizar, se consideran tres puntos de la gráfica; el primero se seleccionará en donde el comportamiento de la curva sea estable, momentos antes de que ocurra la perturbación. El segundo se toma dentro del intervalo de duración de la perturbación o caída en el nivel de tensión. Por último, el tercer punto pertenecerá al segmento de la gráfica donde se visualice la tendencia del sistema a regresar a un punto estable, es decir, cuando los valores de tensión regresan al rango de operación normal, esto se observa en la Figura 3.7.

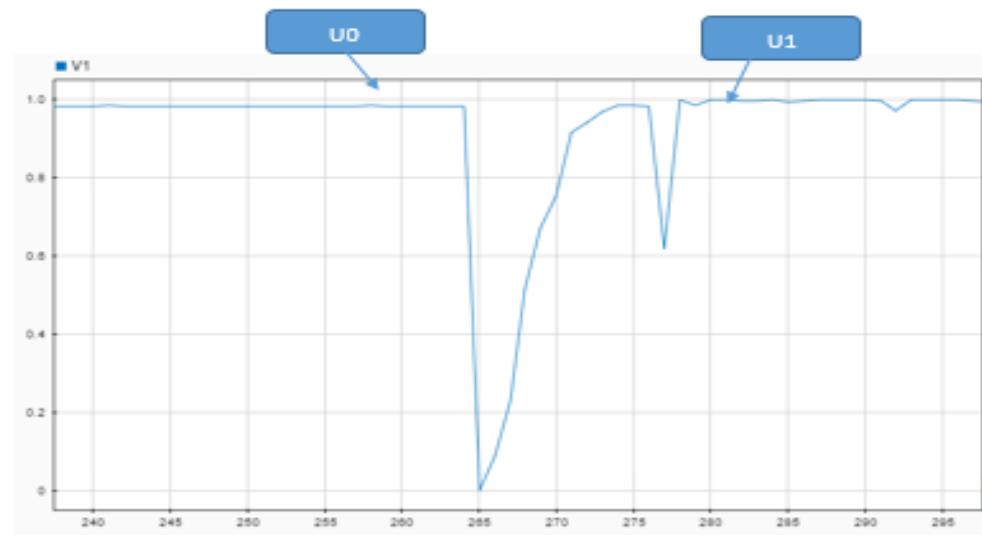


FIGURA 3.7 SELECCIÓN DE PUNTOS DE ESTUDIO EN LAS GRÁFICAS DE VOLTAJE DE LA SUBESTACIÓN POLICENTRO

La Figura 3.7 muestra los dos puntos seleccionados en la gráfica de voltaje durante el análisis de la perturbación. Estos corresponden al momento previo a la perturbación y, los instantes posteriores cuando ha alcanzado la estabilidad.

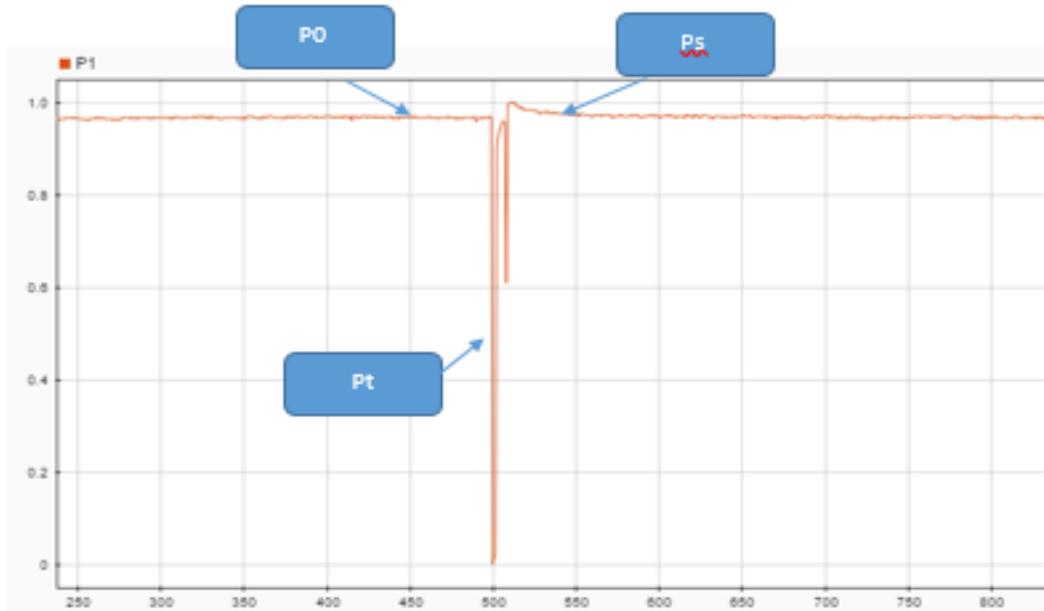


FIGURA 3.8 SELECCIÓN DE PUNTOS EN LA GRÁFICA DE LA CURVA DE POTENCIA DE LA SUBESTACIÓN

La Figura 3.8Figura 3.7 muestra los tres puntos seleccionados en la gráfica de potencia durante el análisis de la perturbación. Estos corresponden al momento previo a la perturbación, durante y, a los instantes posteriores cuando ha alcanzado la estabilidad.

A continuación, se muestran los valores de los puntos seleccionados en las gráficas de voltaje y potencia.

VOLTAJES	POTENCIAS
$V_0 = \text{pu}$	$V_0 = \text{MW}$
$V_1 = \text{pu}$	$P_t = \text{MW}$
	$P_s = \text{MW}$

Tabla 3.1 Valores de voltaje y potencia en los puntos seleccionados de las gráficas

Una vez seleccionados los puntos que se analizaran en las gráficas de voltaje y potencia, se procede a realizar la adquisición de los parámetros del modelo haciendo uso de las ecuaciones (3.5) y (3.6):

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} + P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t} \quad (3.5)$$

$$(3.6)$$

$$Pl = Pr + Po \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t}$$

Los caracteres U_0 y P_0 corresponden a los valores de voltaje y de potencia antes de que ocurra la perturbación; P_r es la recuperación de potencia activa después de la perturbación.

$$Pr = 0.63(Ps - Pt)$$

T_p es el tiempo que demora la potencia activa para llegar al 63% de su potencia nominal después de la perturbación.

$$Pp = 0.63(P0)$$

$$Tp = s$$

α_t es el transiente de la carga activa dependiente del voltaje, un valor igual a 0 significa que se ha restaurado el 100% de la carga, mientras que un valor diferente representa tan solo un parte.

α_s es el estado estable de la carga de pendiente del voltaje, cuando α_t toma el valor de 0, la carga se comporta como un modelo de potencia constante, si este es igual a 1 la carga se comporta como un modelo de corriente constante y, si es igual a 2, se comporta como un modelo de impedancia constante.

Se concluye que el modelo dinámico estará representado por las ecuaciones (3.5) y (3.6):

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} + P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t} \quad (3.7)$$

$$Pl = Pr + Po \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t} \quad (3.8)$$

3.3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.

Para los análisis de estabilidad se considera la afectación que se produce en el sistema, en la magnitud del voltaje, el ángulo en las barras, el porcentaje de uso de los equipos según la cargabilidad permitida en estos, entre otros. Este análisis se realiza para los elementos de la red a medida que se van ingresando los modelos de carga obtenidos con los procedimientos descritos en la sección 3.1.2 y 3.2.2. (Aromataris et al., 2001)

3.3.1. INGRESO DE LOS MODELOS DE CARGAS A DIGSILENT POWER FACTORY.

Para ingresar los modelos al sistema se debe crear un tipo de carga diferente para cada uno de ellos. El procedimiento para crear una nueva carga en DigSilent Power Factory se describe a continuación:

- **Paso 1:**

En la barra “Drawing tools” se selecciona la carga que se desea agregar al sistema, esta es del tipo “General Load” y se presenta en la Figura 3.9:



FIGURA 3.9 SELECCIÓN DEL TIPO DE CARGA A INGRESAR

En la Figura 3.9 se observa, resaltado por un círculo amarillo, el ícono del botón correspondiente a la carga de tipo general en DlgSILENT PowerFactory.

- **Paso 2:**

Una vez conectado a la barra, la carga se representará gráficamente como se muestra en la Figura 3.10:

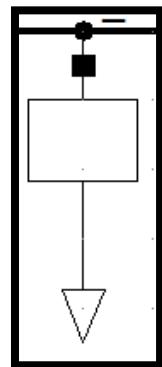


FIGURA 3.10 REPRESENTACIÓN EN EL CIRCUITO DE UNA CARGA TIPO “GENERAL LOAD”

En la Figura 3.10 se observa cómo se representa la carga de tipo general en DIgSILENT PowerFactory una vez conectada a una barra del sistema.

- **Paso 3:**

Al dar doble clic sobre la imagen de la Figura 3.10 se desplegará el menú mostrado en la Figura 3.11:

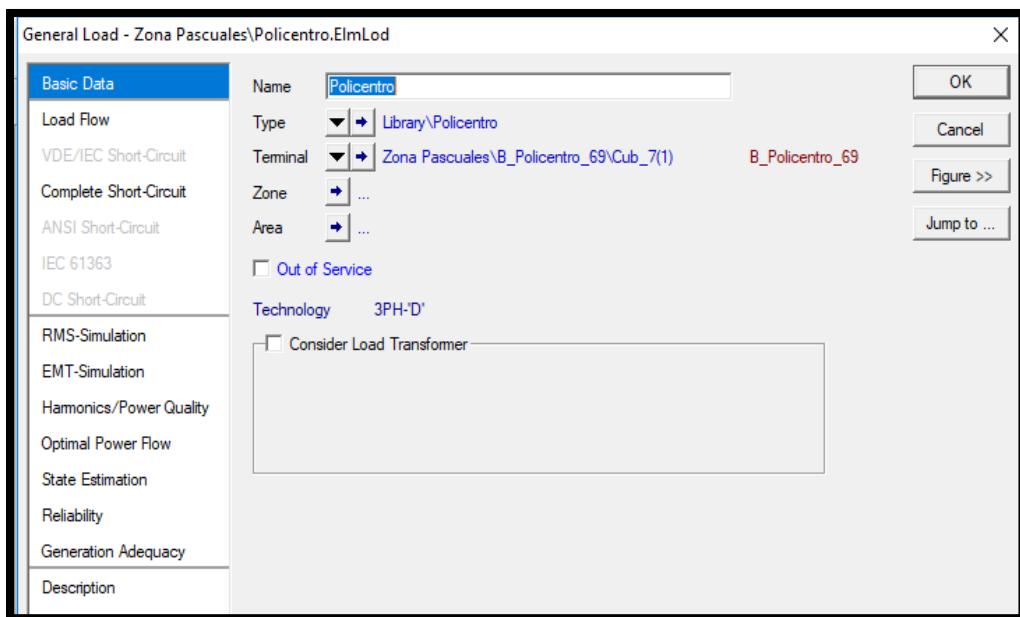


FIGURA 3.11 CUADRO DE DIALOGO DE LA CARGA GENERAL

Se procede a crear el tipo de carga con los parámetros deseados, para esto se crea un nuevo proyecto de carga para el sistema siguiendo los pasos descritos en la Figura 3.12:

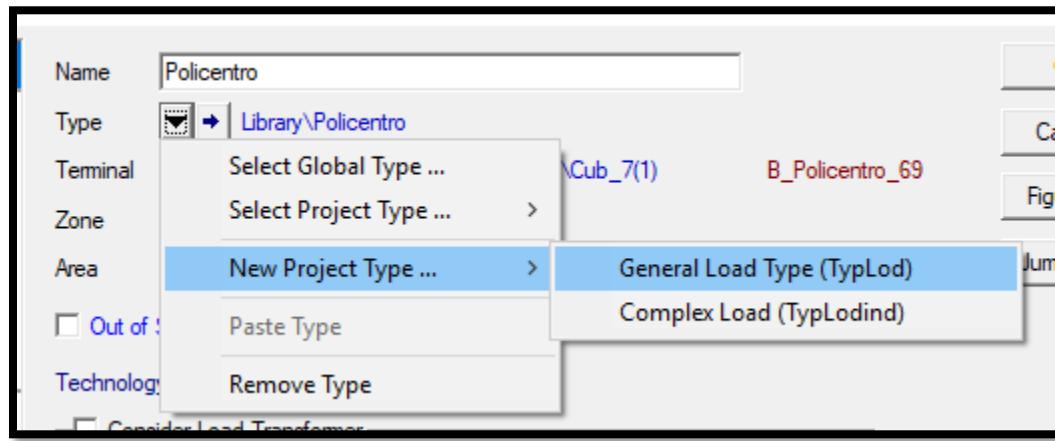


FIGURA 3.12 CREACIÓN DEL NUEVO PROYECTO DE CARGA

- **Paso 4:**

Se abre la ventana de la Figura 3.13 para el ingreso de los parámetros que describen el comportamiento de la carga que se está creando:

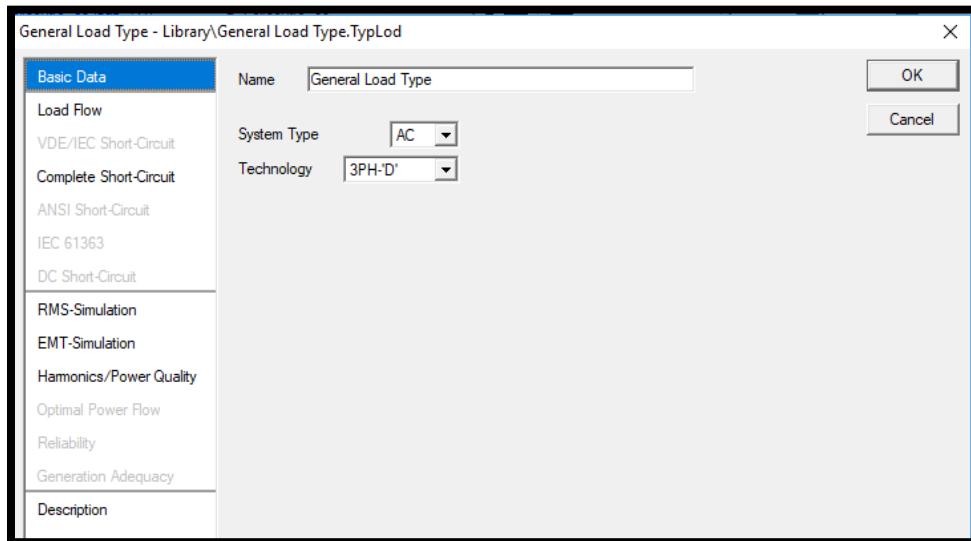


FIGURA 3.13 VENTANA DE PARÁMETROS QUE DESCRIBEN EL COMPORTAMIENTO DE LA CARGA.

En la pestaña “Basic Data” mostrada en la Figura 3.14 se modifica el nombre del modelo, se selecciona el tipo de sistema (AC o DC) y se escoge la conexión de la carga a la red.

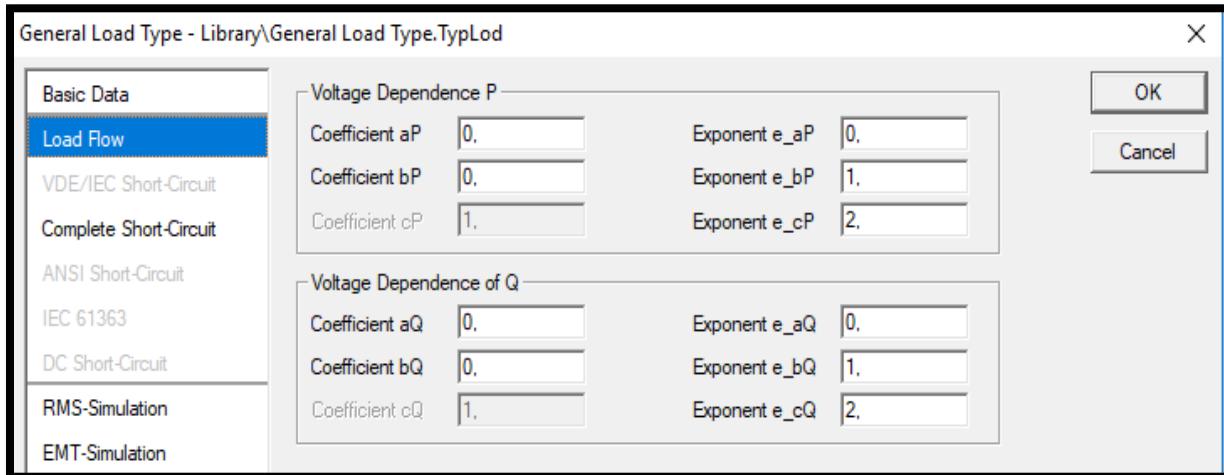


FIGURA 3.14 INGRESO DE COEFICIENTES.

En la pestaña “Load Flow” mostrada en la Figura 3.14 se ingresan los coeficientes obtenidos mediante el procedimiento descrito en la sección 3.1.236, los exponentes de estos se ingresan en el lado derecho, según el tipo de carga que describan.

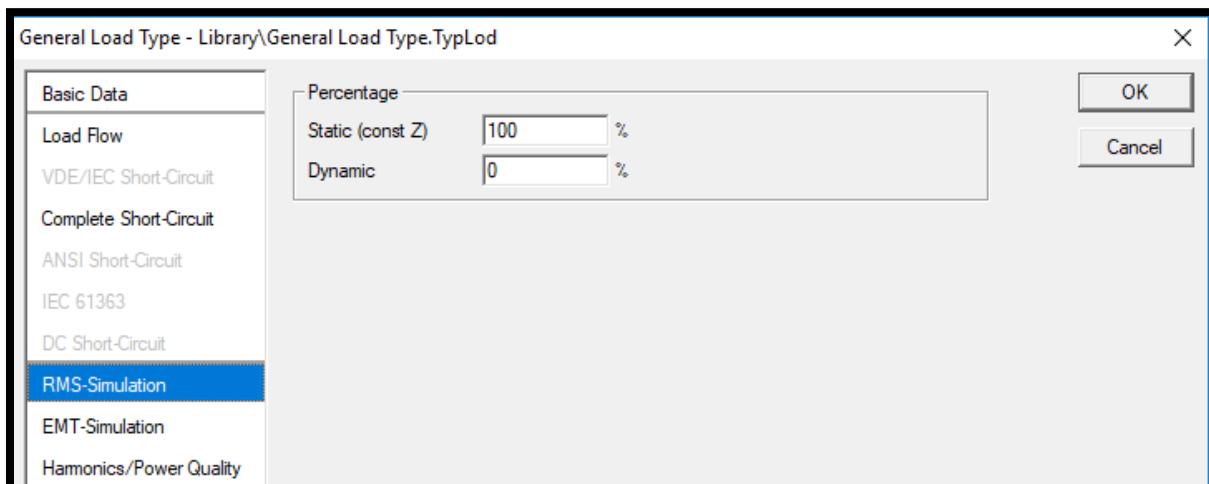


FIGURA 3.15 PORCENTAJE DE CARGA ESTÁTICA Y DINÁMICA CONSIDERADO PARA EL MODELO.

En la pestaña “RMS – Simulation” mostrada en la Figura 3.15 se ingresa el porcentaje de carga que tendrá un comportamiento estático y, el que corresponderá al comportamiento dinámico en el sistema.

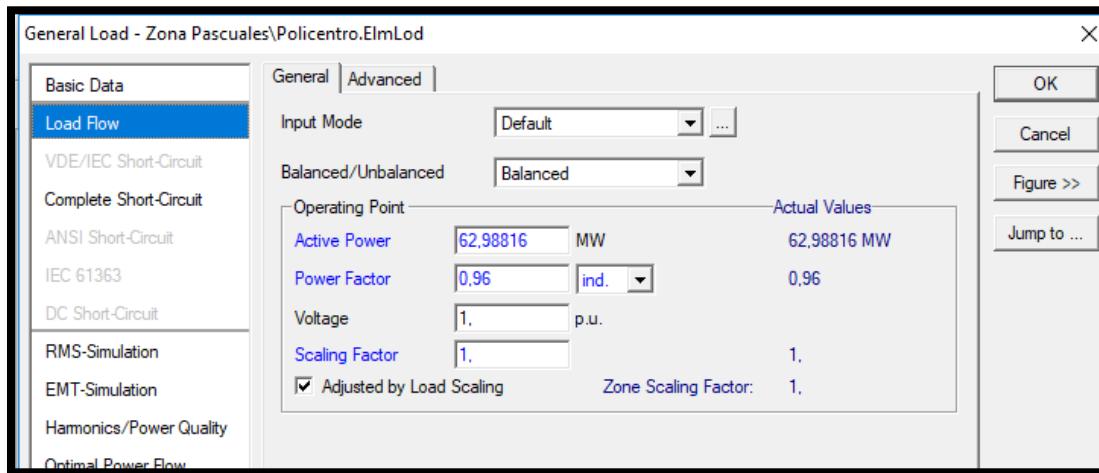


FIGURA 3.16 PARÁMETROS A MODIFICAR EN LA PESTAÑA “LOAD FLOW”

En la pestaña “Load Flow”, mostrada en la Figura 3.16 del modelo general de carga, se ingresan los valores de potencia consumida, factor de potencia y tipo de carga (predominantemente inductiva o capacitiva) y, el voltaje en la barra a la que está conectada la carga.

- Paso 5:**

Para inicializar el flujo de potencia una vez ingresadas las cargas se da clic en el ícono encerrado en una circunferencia amarilla en la Figura 3.17:

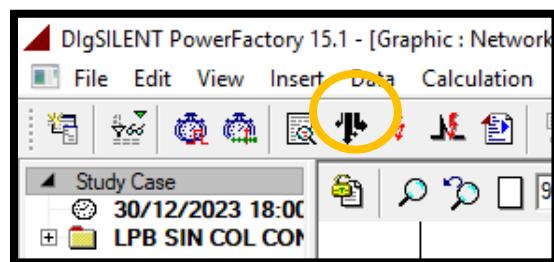


FIGURA 3.17 INICIO DEL FLUJO DE POTENCIA

Al hacerlo se desplegará el menú de la Figura 3.18; es importante asegurar que se encuentre seleccionada la opción de consideración del voltaje como un dependiente de la carga, resaltada en amarillo.

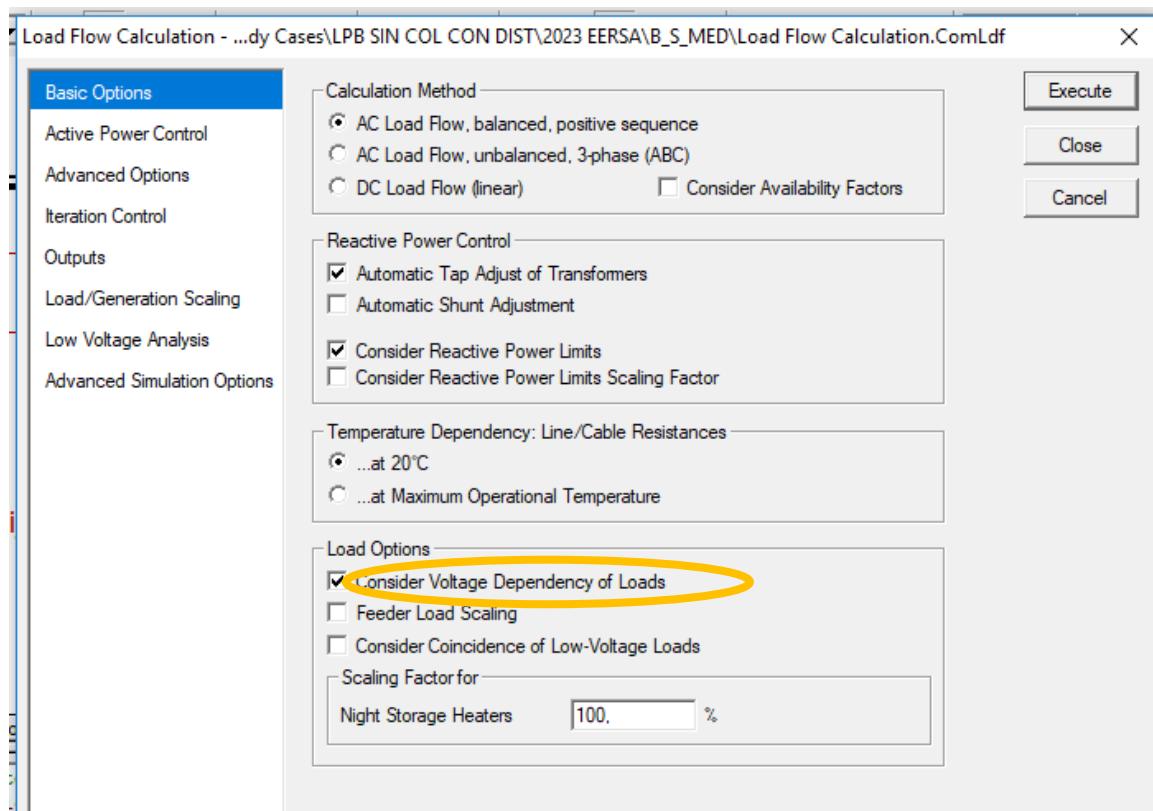


FIGURA 3.18 PARÁMETROS PARA INICIALIZACIÓN DEL FLUJO DE POTENCIA.

Finalmente, al correr el flujo de potencia se obtienen datos sobre el estado del sistema, como se muestra en la Figura 3.19, estos valores son los que se considerarán para el análisis de estabilidad en el sistema. Las variaciones que se tendrán en cuenta son las de los voltajes y ángulos en las barras al realizar flujos antes y después del ingreso de cada uno de los modelos de carga.

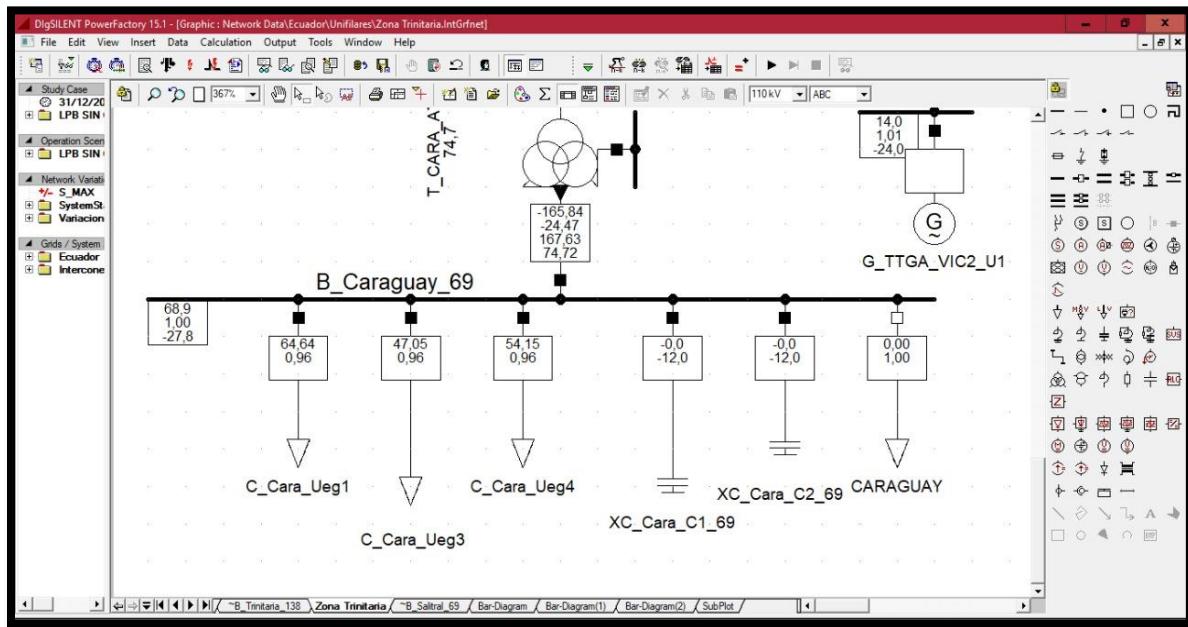


FIGURA 3.19 ESTADO DEL SISTEMA AL FINALIZAR EL FLUJO DE POTENCIA.

Los datos de la Figura 3.19 corresponden a los que se emplean para el análisis de la variación de estabilidad en el sistema, antes y después del ingreso de los modelos desarrollados.

CAPÍTULO IV:

RESULTADOS

CONTENIDO CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS.....	59
4.1. MODELOS ESTÁTICOS.....	59
4.1.1. <i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN POLICENTRO.</i>	60
4.1.2. <i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN PASCUALES.</i>	65
4.1.3. <i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN CARAGUAY.</i>	66
4.1.4. <i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN ELECTROQUIL.</i>	67
4.1.5. <i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN NUEVA PROSPERINA.</i>	68
4.1.6. <i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN SALITRAL.</i>	69
4.1.7. <i>MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN TRINITARIA.</i>	70
4.2. MODELOS DINÁMICOS	71
4.2.1. <i>MODELO DE LA PRIMERA PERTUBACIÓN.</i>	71
4.2.1.1. SELECCIÓN DE DATOS.	74
i. PROCEDIMIENTO.	75
4.2.2. <i>MODELO DE LA SEGUNDA PERTUBACIÓN.</i>	77
4.2.3. <i>MODELO DE LA TERCERA PERTUBACIÓN.</i>	79
4.2.4. <i>MODELO DE LA CUARTA PERTUBACIÓN.</i>	81
4.2.5. <i>MODELO DE LA QUINTA PERTUBACIÓN.</i>	83
4.2.6. <i>MODELO DE LA SEXTA PERTUBACIÓN.</i>	85
4.3. INGRESO DE MODELOS A DIGSILENT POWERFACTORY.	87
4.3.1. <i>Modelo de carga subestación Policentro.</i>	87
4.3.2. <i>Modelo de carga subestación Pascuales.</i>	90
4.3.3. <i>Modelo de carga subestación Caraguay.</i>	91
4.3.4. <i>Modelo de carga subestación Electroquil.</i>	93
4.3.5. <i>Modelo de carga subestación Nueva Prosperina.</i>	95
4.3.6. <i>Modelo de carga subestación Salitral.</i>	96
4.3.7. <i>Modelo de carga subestación Trinitaria.</i>	98

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. MODELOS ESTÁTICOS.

Los modelos de carga estáticos están basados en el modelo polinómico, a continuación, se describe el proceso para la obtención de cada uno de los modelos de carga y su ecuación descriptiva resultante.

Datos históricos disponibles de las subestaciones para el modelamiento de las cargas:

- Energía total suministrada por la subestación.
- Energía total suministrada a clientes residenciales.
- Energía total suministrada a clientes industriales.
- Energía total suministrada a clientes comerciales.
- Energía total considerada en pérdidas.
- Energía total suministrada a otros consumos.
- Factor de potencia de cada transformador de distribución conectado a la subestación.
- Energía suministrada a cada tipo de consumidor por cada transformador de distribución conectado a la subestación.
- Histórico de datos de voltaje

A partir de los datos de energía suministrada se obtienen los valores de la potencia activa consumida por cada conjunto de clientes, de la siguiente forma:

$$Potencia [MW] = Energía[KWh] * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} * \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}}$$

4.1.1. MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN POLICENTRO.

La Tabla 4.1 muestra los datos proporcionados de consumo de energía suministrada por la subestación Policentro durante el mes de diciembre durante el año 2016, utilizando la fórmula expresada anteriormente se transforma la energía en potencia para, de esta forma, obtener los valores de potencia consumida.

La Tabla 4.2 muestra los resultados de la aplicación de la fórmula anterior, estos valores corresponden a la potencia suministrada por la subestación Policentro a los diferentes tipos de usuarios.

Haciendo uso del factor de potencia de cada uno de los transformadores de distribución y, teniendo conocimiento del suministro de potencia activa, obtenemos los datos necesarios de potencia reactiva demandada por el sistema.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	ENERGIA					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
Policentro	America	0,98	3189657,47	2200913,83	5031,722926	245457,645	719677,66	6360738,33
Policentro	Garzota	0,99	4308540,28	3494120,55	150335,9546	617293,554	1093384,18	9663674,52
Policentro	Guayacanes	0,99	5787408,33	765858,863	1615,133691	171175,223	858099,858	7584157,41
Policentro	Kennedy Norte I	0,97	1374722,84	3572901,57	121230,7956	386797,663	696023,624	6151676,5
Policentro	Kennedy Norte II	0,95	381711,255	4331004,62	78,55514952	1013597,09	730564,037	6456955,57
Policentro	Alborada	0,99	6397206,25	1444103,73	9162,998876	250315,343	1033485,85	9134274,18
TOTAL			21439246,4	15808903,2	287455,1608	2684636,52	5131235,21	45351476,5

TABLA 4.1 ENERGÍA CONSUMIDA POR CADA SECTOR DE CARGA EN LA SUBESTACIÓN PASCUALES.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA ACTIVA [MW]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
Policentro	America	0,98	4,43007983	3,05682476	0,0069885	0,3409134	0,9995523	8,83435879
Policentro	Garzota	0,99	5,98408372	4,85294521	0,20879994	0,85735216	1,51858914	13,4217702
Policentro	Guayacanes	0,99	8,03806713	1,06369287	0,00224324	0,23774336	1,19180536	10,533552
Policentro	Kennedy Norte I	0,97	1,90933728	4,96236329	0,1683761	0,53721898	0,96669948	8,54399514
Policentro	Kennedy Norte II	0,95	0,53015452	6,0152842	0,0001091	1,40777374	1,01467227	8,96799384
Policentro	Alborada	0,99	8,88500868	2,00569963	0,01272639	0,3476602	1,43539701	12,6864919
TOTAL			29,7767312	21,95681	0,39924328	3,72866184	7,12671557	62,9881618

TABLA 4.2 POTENCIA ACTIVA SUMINISTRADA A CADA SECTOR DE CARGA POR LA SUBESTACIÓN POLICENTRO.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA REACTIVA [MVAR]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
Policentro	America	0,98	0,89956608	0,62071474	0,001419076	0,06922542	0,20296775	1,79389306
Policentro	Garzota	0,99	0,85268575	0,69150724	0,02975238	0,12216607	0,21638723	1,91249867
Policentro	Guayacanes	0,99	1,14536253	0,15156802	0,000319645	0,03387659	0,16982307	1,50094986
Policentro	Kennedy Norte I	0,97	0,47852503	1,24368547	0,04219903	0,13463977	0,24227773	2,14132703
Policentro	Kennedy Norte II	0,95	0,17425336	1,97712831	0,0000358609	0,46271285	0,33350665	2,94763703
Policentro	Alborada	0,99	1,26604517	0,28579672	0,001813412	0,0495389	0,204533	1,80772719
TOTAL			4,81643792	4,9704005	0,075539403	0,87215959	1,36949542	12,1040328

Tabla 4.3 Potencia reactiva suministrada a cada sector de carga por la subestación Policentro

La Tabla 4.3 presenta los valores de potencia reactiva consumidos por cada sector de carga, suministrados por la subestación Policentro.

Una vez obtenidas las potencias individuales suministradas a cada sector de carga y, la potencia total que proporciona la subestación Policentro se procede a obtener los valores de los coeficientes de la ecuación del modelo de carga polinomial.

$$P = P_0 \left[a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_3 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[b_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + b_3 \right]$$

Los coeficientes que se obtendrán corresponden a los valores a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 y b_3 ; para lo cual se emplean los conceptos de modelos de potencia constante, impedancia constante y corriente constante; los cuales fueron diseñados para cargas industriales, residenciales y comerciales respectivamente. Debido a que los consumos registrados por pérdidas y por las cargas referidas como otros constituyen una constante invariable en el sistema (siempre se encuentran presentes en el sistema) se ha optado por incluirlas en el modelo de impedancia constante que corresponde a los consumos residenciales.

De esta forma los coeficientes para cada término de la expresión de carga polinomial se muestran en la Tabla 4.4:

MODELO:	CONSUMO:	P		Q	
		Potencia	Coeficiente	Potencia	Coeficiente
Impedancia constante	Residencial+Otros+Pérdidas	40,6321086	0,64507532	7,05809294	0,58311912
Corriente constante	Comercial	21,95681	0,3485863	4,9704005	0,41064004
Potencia constante	Industrial	0,39924328	0,00633839	0,0755394	0,00624085
Total			1		1

TABLA 4.4 COEFICIENTES DEL MODELO DE CARGA DE LA SUBESTACIÓN POLICENTRO

Como se señaló anteriormente, al sumar los coeficientes de la ecuación polinomial del modelo de carga el resultado debe ser la unidad. Por lo que las ecuaciones del modelo de carga tomarán la siguiente forma:

$$P = P_0 \left[0,64507532 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,3485863 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,00633839 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,58311912 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,41064004 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,00624085 \right]$$

El siguiente paso es la obtención de los valores correspondientes a V y V_0 . El valor de V_0 corresponde al voltaje nominal al que opera la subestación bajo condiciones normales del sistema. El valor de V se obtiene a través de un análisis de los datos históricos de voltaje en el periodo de tiempo para el cual se está modelando la carga, estos se reducirán mediante el método de los mínimos cuadrados y, el dato de voltaje resultante, será el que se ingrese al modelo de carga.

El modelo desarrollado ha considerado el periodo de tiempo correspondiente al mes de diciembre del 2016, por lo que se ha aplicado el método estadístico de los mínimos cuadrados para la obtención de la ecuación de la recta de tendencia de la variación de voltaje en este intervalo de tiempo.

Se han obtenido los valores mínimos, promedios y máximos de voltaje en por unidad, considerando un voltaje base de 69 [kV] para su ingreso al software. Estos se muestran a continuación:

4.1.2. MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN PASCUALES.

Siguiendo el procedimiento descrito para el modelo de la subestación Policentro se obtienen los coeficientes para el modelo de la subestación Pascuales que se muestran en la Tabla 4.5.

MODELO:	CONSUMO:	P		Q	
		Potencia	Coeficiente	Potencia	Coeficiente
Impedancia constante	Residencial+otros+pérdidas	49,2205818	0,60725341	9,10824417	0,6016756
Corriente constante	Comercial	11,9929269	0,14796139	2,23450623	0,1476078
Potencia constante	Industrial	19,8409265	0,2447852	3,79538071	0,2507166
Total			1		1

Tabla 4.5 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Pascuales.

Como se señaló anteriormente, al sumar los coeficientes de la ecuación polinomial del modelo de carga el resultado debe ser la unidad. Por lo que las ecuaciones del modelo de carga tomarán la siguiente forma:

$$P = P_0 \left[0,60725341 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,14796139 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,2447852 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,6016756 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,1476078 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,2507166 \right]$$

De manera similar a lo descrito para la subestación Pascuales se encuentran los voltajes en la barra de 69 [kV] de la subestación y se muestran en la Tabla 4.6.

Voltaje	Voltaje en [p.u.]
Máximo Voltaje	1,02396314
Mínimo Voltaje	0,98920352
Voltaje promedio	1,00596076

Tabla 4.6 Voltajes en la subestación Pascuales

4.1.3. MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN CARAGUAY.

Siguiendo el procedimiento descrito para el modelo de la subestación Policentro se obtienen los coeficientes para el modelo de la subestación Caraguay que se muestran en la Tabla 4.7.

MODELO:	CONSUMO:	P		Q	
		Potencia	Coeficiente	Potencia	Coeficiente
Impedancia constante	Residencial+otros+pérdidas	48,4002119	0,65726028	7,08783745	0,64173702
Corriente constante	Comercial	22,6689679	0,30783775	3,48607415	0,31563123
Potencia constante	Industrial	2,57015812	0,03490197	0,47085787	0,04263175
Total			1		1

Tabla 4.7 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Caraguay.

Como se señaló anteriormente, al sumar los coeficientes de la ecuación polinomial del modelo de carga el resultado debe ser la unidad. Por lo que las ecuaciones del modelo de carga tomarán la siguiente forma:

$$P = P_0 \left[0,65726028 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,30783775 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,03490197 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,64173702 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,31563123 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,04263175 \right]$$

De manera similar a lo descrito para la subestación Caraguay se encuentran los voltajes en la barra de 69 [kV] de la subestación y se muestran en la tabla Tabla 4.8:

Voltaje	Voltaje en [p.u.]
Máximo Voltaje	1,0317837
Mínimo Voltaje	0,98229019
Voltaje promedio	1,00726942

Tabla 4.8 Voltajes en la subestación Caraguay

4.1.4. MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN ELECTROQUIL .

Siguiendo el procedimiento descrito para el modelo de la subestación Policentro se obtienen los coeficientes para el modelo de la subestación Electroquil que se muestran en la Tabla 4.9.

MODELO:	CONSUMO:	P		Q	
		Potencia	Coeficiente	Potencia	Coeficiente
Impedancia constante	Residencial+otros+pérdidas	1,34262762	0,348762	0,29489392	0,348762
Corriente constante	Comercial	0,23592728	0,06128465	0,05181893	0,06128465
Potencia constante	Industrial	2,27114099	0,58995335	0,49883204	0,58995335
Total			1		1

Tabla 4.9 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Electroquil.

Como se señaló anteriormente, al sumar los coeficientes de la ecuación polinomial del modelo de carga el resultado debe ser la unidad. Por lo que las ecuaciones del modelo de carga tomarán la siguiente forma:

$$P = P_0 \left[0,348762 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,06128465 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,58995335 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,348762 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,06128465 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,58995335 \right]$$

4.1.5. MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN NUEVA PROSPERINA.

Siguiendo el procedimiento descrito para el modelo de la subestación Policentro se obtienen los coeficientes para el modelo de la subestación Nueva Prosperina que se muestran en la Tabla 4.10.

MODELO:	CONSUMO:	P		Q	
		Potencia	Coeficiente	Potencia	Coeficiente
Impedancia constante	Residencial+otros+pérdidas	25,86533432	0,89632974	6,7197953	0,908389005
Corriente constante	Comercial	2,362490533	0,081869057	0,55578327	0,075131368
Potencia constante	Industrial	0,629116025	0,021801203	0,12190782	0,016479628
Total			1		1

Tabla 4.10 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Nueva Prosperina.

Como se señaló anteriormente, al sumar los coeficientes de la ecuación polinomial del modelo de carga el resultado debe ser la unidad. Por lo que las ecuaciones del modelo de carga tomarán la siguiente forma:

$$P = P_0 \left[0,89632974 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,081869057 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,021801203 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,908389005 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,075131368 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,016479628 \right]$$

De manera similar a lo descrito para la subestación Nueva Prosperina se encuentran los voltajes en la barra de 69 [kV] de la subestación y se presentan en la Tabla 4.11.

Voltaje	Voltaje en [p.u.]
Máximo Voltaje	1,0317837
Mínimo Voltaje	0,98229019
Voltaje promedio	1,00726942

Tabla 4.11 Voltajes en la subestación Nueva Prosperina

4.1.6. MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN SALITRAL.

Siguiendo el procedimiento descrito para el modelo de la subestación Salitral se obtienen los coeficientes para lo modelo de la subestación Salitral se muestran en la Tabla 4.12.

MODELO:	Consumo:	P		Q	
		Potencia	Coeficiente	Potencia	Coeficiente
Impedancia constante	Residencial+otros+pérdidas	143,332831	0,69955225	21,9418244	0,69177245
Corriente constante	Comercial	50,2463591	0,24523309	7,92639337	0,24989994
Potencia constante	Industrial	11,3130551	0,05521466	1,85005074	0,05832761
Total			1		1

Tabla 4.12 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Salitral

Como se señaló anteriormente, al sumar los coeficientes de la ecuación polinomial del modelo de carga el resultado debe ser la unidad. Por lo que las ecuaciones del modelo de carga tomarán la siguiente forma:

$$P = P_0 \left[0,69955225 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,24523309 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,05521466 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,69177245 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,24989994 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,05832761 \right]$$

De manera similar a lo descrito para la subestación Salitral se encuentran los voltajes en la barra de 69 [kV] de la subestación y se presentan en la Tabla 4.13.

Voltaje	Voltaje en [p.u.]
Máximo Voltaje	1,04226773
Mínimo Voltaje	1,00392416
Voltaje promedio	1,02145841

Tabla 4.13 Voltajes en la subestación Salitral

4.1.7. MODELO DE CARGA SUBESTACIÓN TRINITARIA.

Siguiendo el procedimiento descrito para el modelo de la subestación Policentro se obtienen los coeficientes para el modelo de la subestación Trinitaria se muestran en la Tabla 4.14.

MODELO:	CONSUMO:	P		Q	
		Potencia	Coeficiente	Potencia	Coeficiente
Impedancia constante	Residencial+otros+pérdidas	32,7965679	0,888706784	6,12639128	0,891411866
Corriente constante	Comercial	3,988439164	0,108076947	0,72677587	0,105748492
Potencia constante	Industrial	0,118692191	0,003216268	0,01951596	0,002839642
TOTAL:			1		1

Tabla 4.14 Coeficientes del modelo de carga de la subestación Trinitaria

Como se señaló anteriormente, al sumar los coeficientes de la ecuación polinomial del modelo de carga el resultado debe ser la unidad. Por lo que las ecuaciones del modelo de carga tomarán la siguiente forma:

$$P = P_0 \left[0,888706784 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,108076947 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,003216268 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,891411866 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,105748492 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,002839642 \right]$$

De manera similar a lo descrito para la subestación Trinitaria se encuentran los voltajes en la barra de 69 [kV] de la subestación y se presentan en la Tabla 4.15.

Voltaje	Voltaje en [p.u.]
Máximo Voltaje	1,03231035
Mínimo Voltaje	0,9786157
Voltaje promedio	1,00482818

Tabla 4.15 Voltajes en la subestación Trinitaria

4.2. MODELOS DINÁMICOS

Los datos del modelo dinámico de carga corresponden a los valores de voltaje y corriente tomados de la subestación Policentro, a una alta frecuencia de muestreo.

4.2.1. MODELO DE LA PRIMERA PERTURBACIÓN.

Posteriormente al análisis de los datos y las gráficas de estos, las curvas que corresponden al comportamiento del voltaje y la corriente, se procede a la obtención del factor de potencia, el cual está dado por el desfase existente entre las curvas que se muestran en la Figura 4.1:

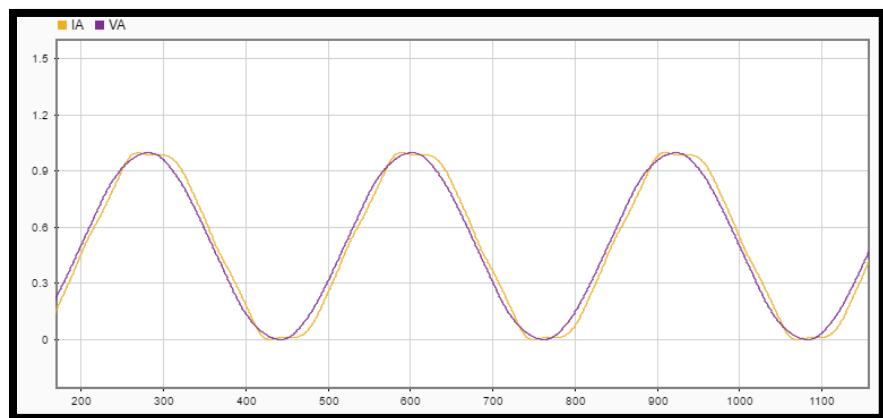


FIGURA 4.1 SEÑALES DE VOLTAJE Y CORRIENTE A LA SALIDA DE LA SUBESTACIÓN POLICENTRO

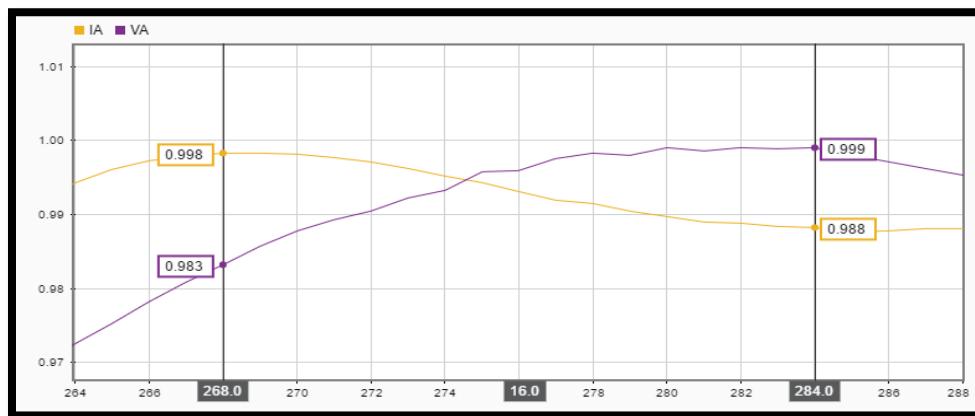


FIGURA 4.2 DESFASE ENTRE LAS CURVAS DE VOLTAJE Y CORRIENTE PARA LA OBTENCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

El desfase obtenido es de 16 unidades, como se muestra en la Figura 4.2, este valor se multiplica por el factor expresado en los capítulos anteriores, el cual corresponde al intervalo de tiempo existente entre la obtención de un dato y su conseciente.

$$t = 16 * 0,00005208333$$

$$t = 0,8333 \text{ ms}$$

De esta forma se obtiene un factor de potencia de 0.83, el cual coincide con los valores típicos de factor de potencia en los transformadores de distribución.

A continuación, se obtendrá la potencia instantánea del sistema a partir del producto de los valores instantáneos de corriente y voltaje registrados.

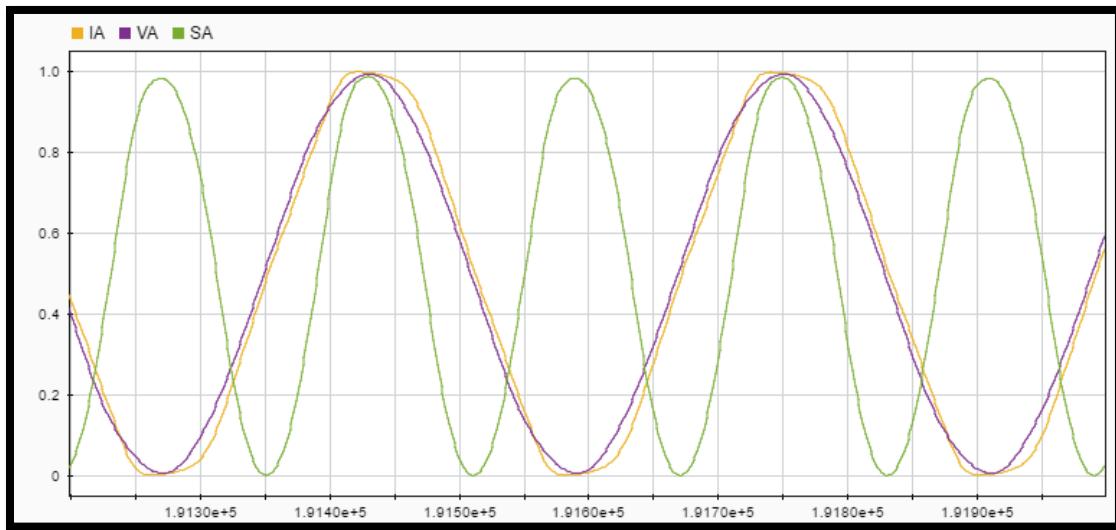


FIGURA 4.3 POTENCIA INSTANTÁNEA A LA SALIDA DE LA SUBESTACIÓN POLICENTRO

Los gráficos sinusoidales, como el que se muestra en la Figura 4.3, no representan apropiadamente las perturbaciones del sistema, por este motivo se convierten estas señales a sus valores eficaces como se muestra en las Figura 4.4 y Figura 4.5, de forma que se puedan apreciar las perturbaciones que sufre el sistema en un eje temporal. Para obtener los valores eficaces de las señales se consideran los valores

picos de cada onda y se dividen estos para $\sqrt{2}$ como se demostró en la sección 2.3.2 – i dado que la onda corresponde a una señal sinusoidal.

El valor de potencia activa corresponde al producto de los valores eficaces obtenidos a partir de la potencia aparente y el factor de potencia. Esta señal será aquella que se analizará para la realización del modelo dinámico de la primera perturbación.

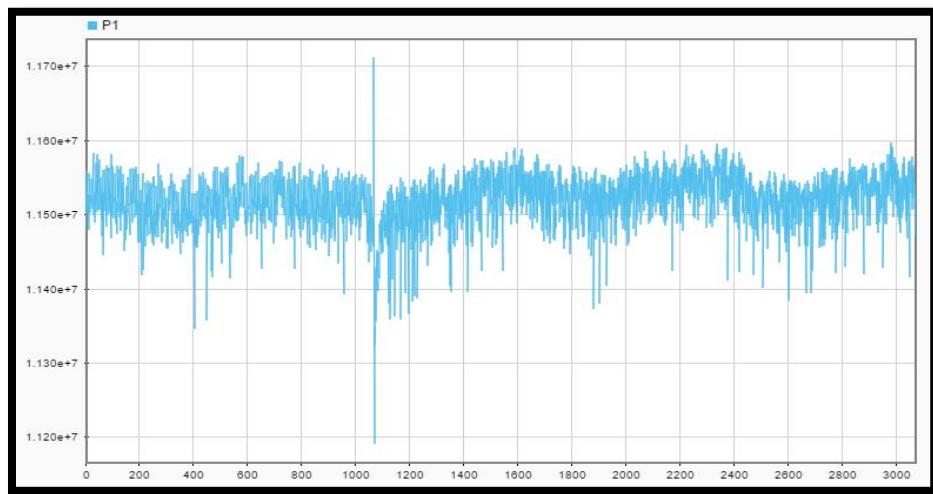


FIGURA 4.4 VALORES EFICACES DE LA POTENCIA ACTIVA DE LA DEMANDA

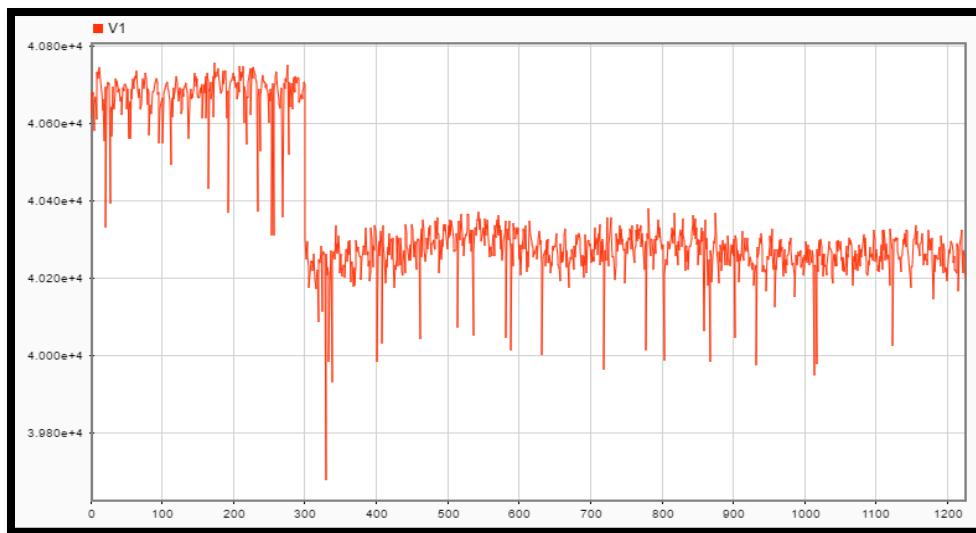


FIGURA 4.5 VALORES EFICACES DE LA TENSIÓN

En la perturbación mostrada en las Figura 4.4 y Figura 4.5, dada la perdida de potencia demandada se obtiene un desbalance en los niveles de la tensión de las fases. La demanda se restablece rápidamente a sus valores previos, sin embargo, los niveles de tensión se estabilizan por debajo de aquellos nominales antes de la perturbación.

4.2.1.1. SELECCIÓN DE DATOS.

Para obtener el modelo dinámico se deben analizar las perturbaciones que tienen lugar en el sistema y, se seleccionará la sección de las curvas que represente el intervalo de tiempo en el que se produce la perturbación.

Una vez escogida la sección de la curva se seleccionan tres puntos de la gráfica, como se muestra en la Figura 4.7; situados antes, durante y después de la perturbación; es decir, el primer punto de análisis se toma antes de la ocurrencia de la perturbación, el segundo punto se sitúa en la gráfica durante la perturbación y; el tercero, una vez que el sistema ha alcanzado la estabilidad y sus valores de tensión se encuentren dentro de los rangos de operación nominal.

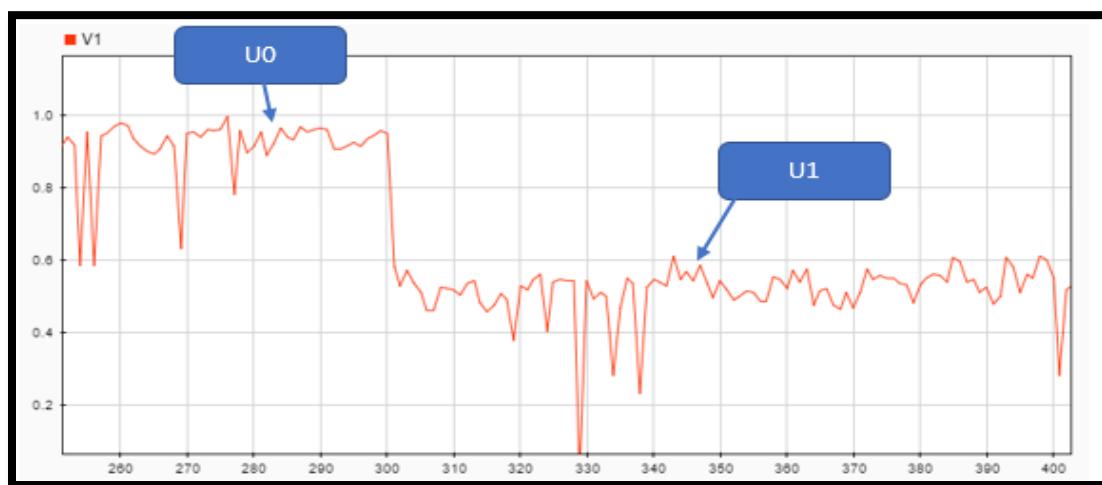


FIGURA 4.6 SELECCIÓN DE PUNTOS EN LA REPRESENTACIÓN DE TENSIÓN ANTES Y DESPUÉS DE LA PERTURBACIÓN

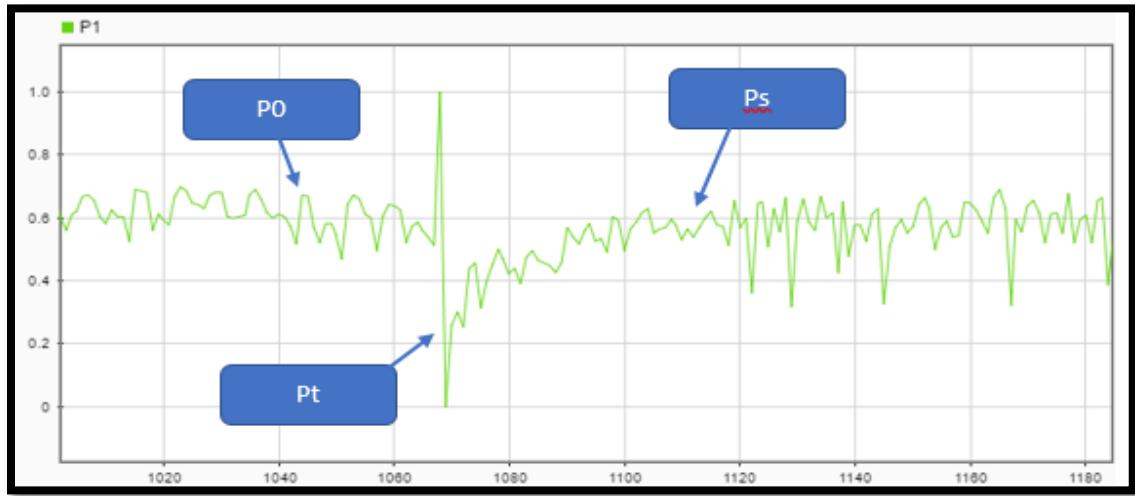


FIGURA 4.7 SELECCIÓN DE PUNTOS EN LA REPRESENTACIÓN DE POTENCIA ACTIVA ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE LA PERTURBACIÓN

VOLTAJES	POTENCIAS
V0 = 0.95 pu	P0 = 11.53 MW
V1 = 0.54 pu	Pt = 11.35 MW
	Ps = 11.42 MW

Tabla 4.16 Valores de los puntos de voltaje y potencia seleccionados.

Finalmente los valores numéricos de los puntos escogidos de la Figura 4.6 y la Figura 4.7 se muestran en la Tabla 4.16

i. PROCEDIMIENTO.

Una vez seleccionados los puntos de análisis de ambas curvas se procede a realizar la adquisición de los parámetros del modelo.

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} + P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t}$$

$$Pr = 0.63(Ps - Pt)$$

$$Pr = 0.63(11.42 - 11.35)$$

$$Pr = 0.0441$$

Dónde Tp corresponde al valor en segundos de la potencia al llegar al 63% de su estado de recuperación.

$$Pp = 0.63(P0)$$

$$Pp = 11.43 \text{ MW}$$

$$Tp = 1073 * 0,000052083333$$

$$Tp = 1073 * 0,000052083333$$

$$Tp = 0.05588542 \text{ s}$$

Dado que la recuperación de potencia activa fue total, el valor del coeficiente α_s es cero.

$$\alpha_s = 0$$

La carga bajo análisis se considera como un modelo con impedancia constante por lo que su coeficiente α_t será dos.

$$\alpha_t = 2$$

$$Uo = 0.95 \text{ pu}$$

$$Po = 11.53 \text{ MW}$$

$$Pl = Pr + Po \left(\frac{U}{Uo} \right)^{\alpha_t}$$

$$Pl = 0.0441 + 11.53 \left(\frac{U}{0.95} \right)^2$$

4.2.2. MODELO DE LA SEGUNDA PERTUBACIÓN.

El desfase obtenido es de 16 unidades, este valor se multiplica por el factor expresado en los capítulos anteriores, el cual corresponde al intervalo de tiempo existente entre la obtención de un dato y su consecuente.

$$t = 16 * 0,00005208333$$

$$t = 0,8333 \text{ ms}$$

De esta forma se tiene que el factor de potencia obtenido es de 0.83, el cual coincide con los valores típicos de factor de potencia en los transformadores de distribución.

A continuación, se obtendrá la potencia instantánea del sistema a partir del producto de los valores instantáneos de corriente y voltaje registrados.

VOLTAJES	POTENCIAS
$V_0 = 0.98 \text{ pu}$	$P_0 = 12.53 \text{ MW}$
$V_1 = 0.99 \text{ pu}$	$P_t = 1.03 \text{ MW}$
	$P_s = 12.5 \text{ MW}$

Tabla 4.17 Valores de los puntos de voltaje y potencia seleccionados

Una vez seleccionados los puntos de análisis de ambas curvas se procede a realizar la adquisición de los parámetros del modelo.

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} + P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t}$$

$$Pr = 0.63(Ps - Pt)$$

$$Pr = 0.63(12.5 - 1.03)$$

$$Pr = 7.2261$$

Dónde Tp corresponde al valor en segundos de la potencia al llegar al 63% de su estado de recuperación.

$$Pp = 0.63(P0)$$

$$Pp = 12.4 \text{ MW}$$

$$Tp = 507 * 0,000052083333$$

$$Tp = 0.02640625 \text{ s}$$

Dado que la recuperación de potencia activa fue total, el valor del coeficiente α_s es cero.

$$\alpha_s = 0$$

La carga bajo análisis se considera como un modelo con impedancia constante por lo que su coeficiente α_t será dos.

$$\alpha_t = 2$$

$$Uo = 0.98 \text{ pu}$$

$$Po = 12.53 \text{ MW}$$

$$Pl = Pr + Po \left(\frac{U}{Uo} \right)^{\alpha_t}$$

$$Pl = 7.2261 + 12.53 \left(\frac{U}{0.98} \right)^2$$

4.2.3. MODELO DE LA TERCERA PERTUBACIÓN.

El desfase obtenido es de 16 unidades, este valor se multiplica por el factor expresado en los capítulos anteriores, el cual corresponde al intervalo de tiempo existente entre la obtención de un dato y su consecuente.

$$t = 18 * 0,00005208333$$

$$t = 0,9333 \text{ ms}$$

De esta forma se tiene que el factor de potencia obtenido es de 0.93, el cual coincide con los valores típicos de factor de potencia en los transformadores de distribución.

A continuación, se obtendrá la potencia instantánea del sistema a partir del producto de los valores instantáneos de corriente y voltaje registrados.

VOLTAJES	POTENCIAS
$V_0 = 0.80 \text{ pu}$	$P_0 = 22.50 \text{ MW}$
$V_1 = 0.90 \text{ pu}$	$P_t = 19.95 \text{ MW}$
	$P_s = 22.50 \text{ MW}$

Tabla 4.18 Valores de los puntos de voltaje y potencia seleccionados

Una vez seleccionados los puntos de análisis de ambas curvas se procede a realizar la adquisición de los parámetros del modelo.

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} + P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t}$$

$$Pr = 0.63(Ps - Pt)$$

$$Pr = 0.63(22.5 - 19.95)$$

$$Pr = 1.6065$$

Dónde Tp corresponde al valor en segundos de la potencia al llegar al 63% de su estado de recuperación.

$$Pp = 0.63(P0)$$

$$Pp = 21.51 \text{ MW}$$

$$Tp = 439 * 0,000052083333$$

$$Tp = 0.02286458 \text{ s}$$

Dado que la recuperación de potencia activa fue total, el valor del coeficiente α_s es cero.

$$\alpha_s = 0$$

La carga bajo análisis se considera como un modelo con impedancia constante por lo que su coeficiente α_t será dos.

$$\alpha_t = 2$$

$$Uo = 0.80 \text{ pu}$$

$$Po = 22.50 \text{ MW}$$

$$Pl = Pr + Po \left(\frac{U}{Uo} \right)^{\alpha_t}$$

$$Pl = 1.6065 + 22.50 \left(\frac{U}{0.80} \right)^2$$

4.2.4. MODELO DE LA CUARTA PERTUBACIÓN.

El desfase obtenido es de 16 unidades, este valor se multiplica por el factor expresado en los capítulos anteriores, el cual corresponde al intervalo de tiempo existente entre la obtención de un dato y su consecuente.

$$t = 6 * 0,00005208333$$

$$t = 0,31 \text{ ms}$$

De esta forma se tiene que el factor de potencia obtenido es de 0.31, el cual coincide con los valores típicos de factor de potencia en los transformadores de distribución.

A continuación, se obtendrá la potencia instantánea del sistema a partir del producto de los valores instantáneos de corriente y voltaje registrados.

VOLTAJES	POTENCIAS
V0 = 0.95 pu	P0 = 5.78 MW
V1 = 0.55 pu	Pt = 5.58MW
	Ps = 5.71 MW

Tabla 4.19 Valores de los puntos de voltaje y potencia seleccionados

Una vez seleccionados los puntos de análisis de ambas curvas se procede a realizar la adquisición de los parámetros del modelo.

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} + P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t}$$

$$Pr = 0.63(Ps - Pt)$$

$$Pr = 0.63(5.71 - 5.58)$$

$$Pr = 0.0819$$

Dónde T_p corresponde al valor en segundos de la potencia al llegar al 63% de su estado de recuperación.

$$Pp = 0.63(P0)$$

$$Pp = 5.67 \text{ MW}$$

$$Tp = 505 * 0,000052083333$$

$$Tp = 0.02630208 \text{ s}$$

Dado que la recuperación de potencia activa fue total, el valor del coeficiente α_s es cero.

$$\alpha_s = 0$$

La carga bajo análisis se considera como un modelo con impedancia constante por lo que su coeficiente α_t será dos.

$$\alpha_t = 2$$

$$Uo = 0.95 \text{ pu}$$

$$Po = 5.78 \text{ MW}$$

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} + P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t}$$

$$0.02630208 \frac{dP_r}{dt} + 0.0819 = 5.78 \left(\frac{U}{0.95} \right)^{0.1} + 5.78 \left(\frac{U}{0.95} \right)^2$$

4.2.5. MODELO DE LA QUINTA PERTUBACIÓN.

El desfase obtenido es de 16 unidades, este valor se multiplica por el factor expresado en los capítulos anteriores, el cual corresponde al intervalo de tiempo existente entre la obtención de un dato y su consecuente.

$$t = 14 * 0,00005208333$$

$$t = 0,72 \text{ ms}$$

De esta forma se tiene que el factor de potencia obtenido es de 0.31, el cual coincide con los valores típicos de factor de potencia en los transformadores de distribución.

A continuación, se obtendrá la potencia instantánea del sistema a partir del producto de los valores instantáneos de corriente y voltaje registrados.

VOLTAJES	POTENCIAS
$V_0 = 0.73 \text{ pu}$	$P_0 = 10.75 \text{ MW}$
$V_1 = 0.83 \text{ pu}$	$P_t = 10.45 \text{ MW}$
	$P_s = 10.77 \text{ MW}$

TABLA 4.20 VALORES DE LOS PUNTOS DE VOLTAJE Y POTENCIA SELECCIONADOS.

Una vez seleccionados los puntos de análisis de ambas curvas se procede a realizar la adquisición de los parámetros del modelo.

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} + P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t}$$

$$Pr = 0.63(Ps - Pt)$$

$$Pr = 0.63(10.77 - 10.45)$$

$$Pr = 0.20160000$$

Dónde Tp corresponde al valor en segundos de la potencia al llegar al 63% de su estado de recuperación.

$$Pp = 0.63(P0)$$

$$Pp = 10.71 \text{ MW}$$

$$Tp = 562 * 0,000052083333$$

$$Tp = 0.02927083 \text{ s}$$

Dado que la recuperación de potencia activa fue total, el valor del coeficiente α_s es cero.

$$\alpha_s = 0$$

La carga bajo análisis se considera como un modelo con impedancia constante por lo que su coeficiente α_t será dos.

$$\alpha_t = 2$$

$$Uo = 0.73 \text{ pu}$$

$$Po = 10.75 \text{ MW}$$

$$Pl = Pr + Po \left(\frac{U}{Uo} \right)^{\alpha_t}$$

$$Pl = 0.20160000 + 10.75 \left(\frac{U}{0.73} \right)^2$$

4.2.6. MODELO DE LA SEXTA PERTUBACIÓN.

El desfase obtenido es de 14 unidades, este valor se multiplica por el factor expresado en los capítulos anteriores, el cual corresponde al intervalo de tiempo existente entre la obtención de un dato y su consecuente.

$$t = 14 * 0,00005208333$$

$$t = 0,72 \text{ ms}$$

De esta forma se tiene que el factor de potencia obtenido es de 0.72, el cual coincide con los valores típicos de factor de potencia en los transformadores de distribución.

A continuación, se obtendrá la potencia instantánea del sistema a partir del producto de los valores instantáneos de corriente y voltaje registrados.

VOLTAJES	POTENCIAS
V0 = 0.90 pu	P0 = 17.80 MW
V1 = 0.86 pu	Pt = 17.51MW
	Ps = 17.84 MW

Tabla 4.21 Valores de los puntos de voltaje y potencia seleccionados

Una vez seleccionados los puntos de análisis de ambas curvas se procede a realizar la adquisición de los parámetros del modelo.

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} + P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t}$$

$$Pr = 0.63(Ps - Pt)$$

$$Pr = 0.63(17.84 - 17.51)$$

$$Pr = 0.20790000$$

Dónde Tp corresponde al valor en segundos de la potencia al llegar al 63% de su estado de recuperación.

$$Pp = 0.63(P0)$$

$$Pp = 17.66 \text{ MW}$$

$$Tp = 506 * 0,000052083333$$

$$Tp = 0.02635417 \text{ s}$$

Dado que la recuperación de potencia activa fue total, el valor del coeficiente α_s es cero.

$$\alpha_s = 0$$

La carga bajo análisis se considera como un modelo con impedancia constante por lo que su coeficiente α_t será dos.

$$\alpha_t = 2$$

$$Uo = 0.90 \text{ pu}$$

$$Po = 17.80 \text{ MW}$$

$$Pl = Pr + Po \left(\frac{U}{Uo} \right)^{\alpha_t}$$

$$Pl = 0.20790000 + 17.80 \left(\frac{U}{0.90} \right)^2$$

4.3. INGRESO DE MODELOS A DIGSILENT POWERFACTORY.

A continuación, se describe el ingreso de cada modelo de carga desarrollado al SNI de DIGSILENT PowerFactory

4.3.1. Modelo de carga subestación Policentro.

La Figura 4.8 corresponde a la barra de la subestación Policentro representada en el software DIGSILENT en la que se ha ingresado una nueva carga de tipo general cuyos parámetros corresponden a los obtenidos en el modelo de carga desarrollados.

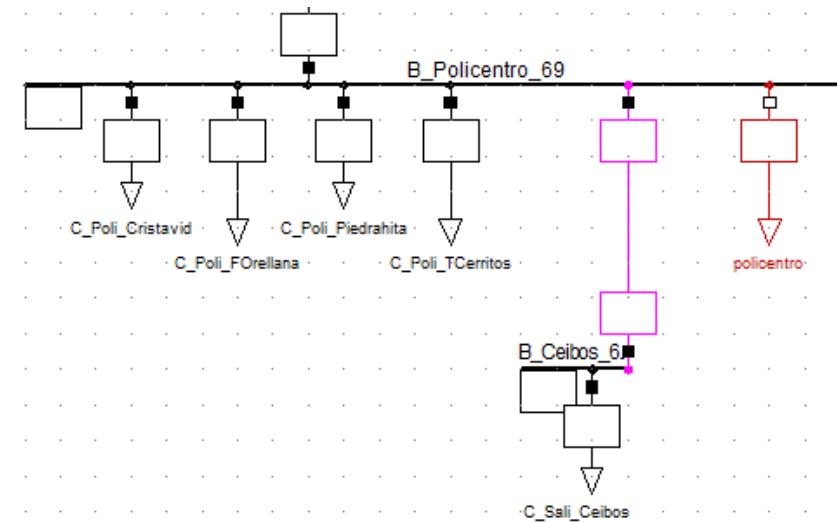


FIGURA 4.8 REPRESENTACIÓN DE LA SUBESTACIÓN POLICENTRO EN POWERFACTORY

Modelo de ingreso a DIGSILENT PowerFactory:

$$P = P_0 \left[0,64507532 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,3485863 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,00633839 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,58311912 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,41064004 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,00624085 \right]$$

La magnitud y el ángulo de voltaje existente en las barras previo al ingreso del modelo, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] y sin ingresar los modelos al sistema se muestran en la Tabla 4.22:

	Voltaje	Ángulo
B_Policentro_69	69,1 [kV]	-25,7
B_Policentro_138	138,6 [kV]	-22,1
B_Pascuales_138	140 [kV]	-21,1
B_Pascuales_230	229,6 [kV]	-18,7

Tabla 4.22 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo

Se ha creado una nueva carga general para cada modelo de carga en DIgSILENT como se muestra en la Figura 4.9:

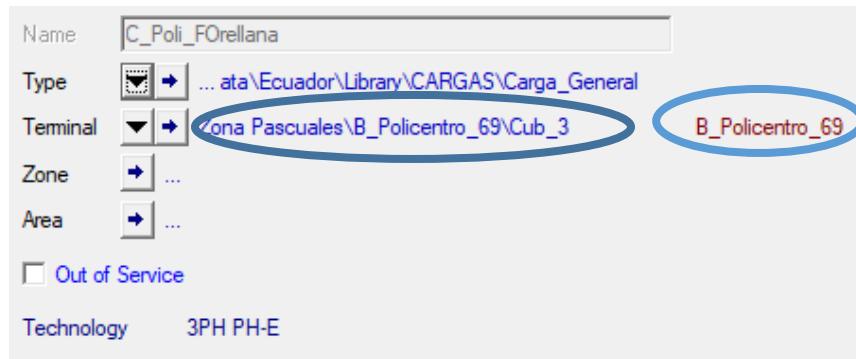


FIGURA 4.9 CREACIÓN DE UN MODELO ESPECÍFICO PARA LA SUBESTACIÓN

En cada una de las nuevas cargas generales creadas de la forma mostrada en la Figura 4.9 se procede al ingreso de los coeficientes correspondientes al modelo desarrollado para la barra en la que se está trabajando, esto se muestra en la Figura 4.10. Inicialmente se mantiene el valor nominal de voltaje en la subestación:

Voltage Dependence P			
Coefficient aP	0,00633839	Exponent e_aP	0,
Coefficient bP	0,3485863	Exponent e_bP	1,
Coefficient cP	0,6450753	Exponent e_cP	2,
Voltage Dependence of Q			
Coefficient aQ	0,00624085	Exponent e_aQ	0,
Coefficient bQ	0,41064	Exponent e_bQ	1,
Coefficient cQ	0,5831191	Exponent e_cQ	2,

FIGURA 4.10 INGRESO DE LOS COEFICIENTES AL MODELO DE CARGA DE LA SUBESTACIÓN POLICENTRO

La magnitud y el ángulo de voltaje en las barras en un flujo de potencia realizado, posterior al ingreso del modelo en DIgSILENT y, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] en las barras correspondientes, se muestran en la Tabla 4.23:

	Voltaje	Ángulo
B_Policentro_69	68,8 [kV]	-19,6
B_Policentro_138	139,2 [kV]	-17,4
B_Pascuales_138	140,1 [kV]	-16,8
B_Pascuales_230	229,7 [kV]	-14,6

Tabla 4.23 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo

Finalmente, la magnitud y ángulo de voltaje en las barras, posterior al ingreso del modelo en DIgSILENT, ingresando el valor real de voltaje en [p.u.] en las barras de la subestación se muestran en la Tabla 4.24 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación

	Voltaje	Ángulo
B_Policentro_69	69,3 [kV]	19,3
B_Policentro_138	143,6 [kV]	21,4
B_Pascuales_138	144,5 [kV]	22

TABLA 4.24 VARIACIÓN EN EL ÁNGULO Y MAGNITUD DE VOLTAJE POSTERIOR AL CAMBIO DEL VALOR DE VOLTAJE EN LA SUBESTACIÓN

4.3.2. Modelo de carga subestación Pascuales.

La Figura 4.11 corresponde a la barra de la subestación Pascuales representada en el software DIgSILENT en la que se ha ingresado una nueva carga de tipo general cuyos parámetros corresponden a los obtenidos en el modelo de carga desarrollados.

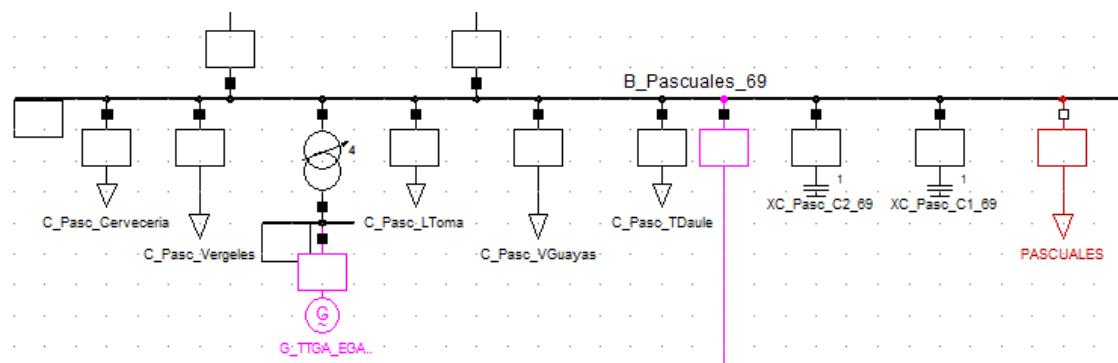


FIGURA 4.11 REPRESENTACIÓN DE LA SUBESTACIÓN PASCUALES EN POWERFACTORY

Modelo de ingreso a DIgSILENT PowerFactory:

$$P = P_0 \left[0,60725341 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,14796139 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,2447852 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,6016756 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,1476078 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,2507166 \right]$$

La magnitud y el ángulo de voltaje en las barras de la subestación, previo al ingreso del modelo de carga desarrollado y, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] en las barras de la subestación, se muestran en la Tabla 4.25 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo

:

	Voltaje	Ángulo
B_Pascuales_69	69,1 [kV]	-21,8
B_Pascuales_138	140 [kV]	-19,9
B_Pascuales_230	229,6 [kV]	-17,5

TABLA 4.25 VOLTAJE Y ÁNGULO EN LAS BARRAS PREVIO AL INGRESO DEL MODELO

La magnitud y el ángulo de voltaje en las barras, posterior al ingreso del modelo desarrollado en el software DlgSILENT y, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] se muestran en la Tabla 4.26:

	Voltaje	Ángulo
B_Pascuales_69	69,1 [kV]	-10,4
B_Pascuales_138	140,9 [kV]	-9,7
B_Pascuales_230	230,3 [kV]	-7,9

Tabla 4.26 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo

La magnitud y el ángulo de voltaje en las barras de la subestación, posterior al ingreso del modelo desarrollado y, considerando el ingreso de los valores reales de voltaje en [p.u.] en las barras de la subestación se muestran en la Tabla 4.27:

	Voltaje	Ángulo
B_Pascuales_69	69,2 [kV]	21,3
B_Pascuales_138	144,5 [kV]	22
B_Pascuales_230	235,8 [kV]	23,3

Tabla 4.27 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación

4 . 3 . 3 . Modelo de carga subestación Caraguay .

La Figura 4.12 corresponde a la barra de la subestación Caraguay representada en el software DlgSILENT en la que se ha ingresado una nueva carga de tipo general cuyos parámetros corresponden a los obtenidos en el modelo de carga desarrollados.

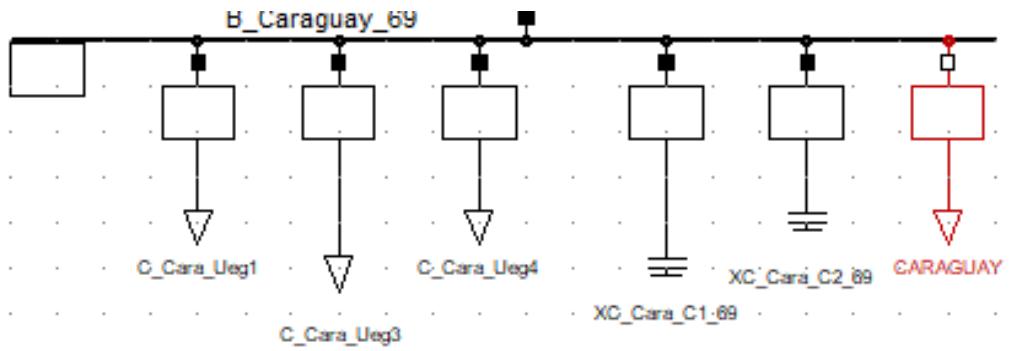


FIGURA 4.12 REPRESENTACIÓN DE LA SUBESTACIÓN PASCUALES EN POWERFACTORY

Modelo de ingreso a DlgSILENT PowerFactory:

$$P = P_0 \left[0,65726028 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,30783775 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,03490197 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,64173702 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,31563123 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,04263175 \right]$$

La magnitud y el ángulo de voltaje existente en las barras previo al ingreso del modelo, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] y sin ingresar los modelos al sistema se muestran en la Tabla 4.28:

	Voltaje	Ángulo
CARAGUAY 69	68,9 [kV]	-27,8
CARAGUAY 138	139,3 [kV]	-24,6
ESCLUSAS 138	139,9 [kV]	-23,9
ESCLUSAS 230	228,7 [kV]	-19,4

Tabla 4.28 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo

La magnitud y el ángulo de voltaje en las barras en un flujo de potencia realizado, posterior al ingreso del modelo en DlgSILENT y, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] en las barras correspondientes, se muestran en la Tabla 4.29:

	Voltaje	Ángulo
CARAGUAY 69	69,2 [kV]	-15,8
CARAGUAY 138	143,8 [kV]	-14,4
ESCLUSAS 138	143,9 [kV]	-14,2
ESCLUSAS 230	230,5 [kV]	-12,2

Tabla 4.29 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo

Finalmente, la magnitud y ángulo de voltaje en las barras, posterior al ingreso del modelo en DlgSILENT, ingresando el valor real de voltaje en [p.u.] en las barras de la subestación se muestran en la Tabla 4.30:

	Voltaje	Ángulo
CARAGUAY 69	69,2 [kV]	2
CARAGUAY 138	146,3 [kV]	3,2
ESCLUSAS 138	146,3 [kV]	3,4
ESCLUSAS 230	234,2 [kV]	5,3

Tabla 4.30 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación

4.3.4. Modelo de carga subestación Electroquil.

La Figura 4.13 corresponde a la barra de la subestación Electroquil representada en el software DlgSILENT en la que se ha ingresado una nueva carga de tipo general cuyos parámetros corresponden a los obtenidos en el modelo de carga desarrollados.

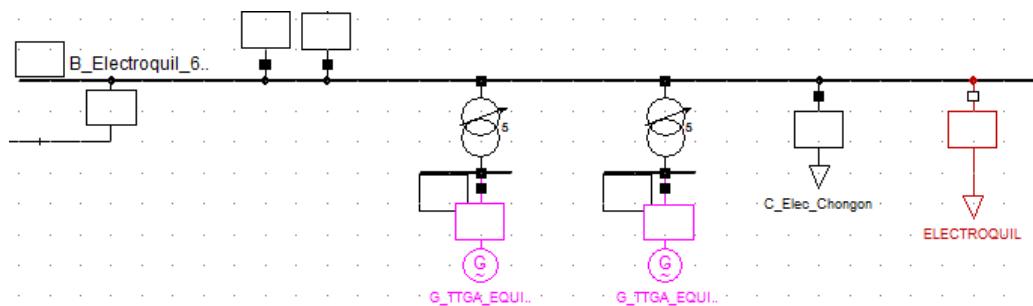


FIGURA 4.13 REPRESENTACIÓN DE LA SUBESTACIÓN PASCUALES EN POWERFACTORY

Modelo de ingreso a DIgSILENT PowerFactory:

$$P = P_0 \left[0,65726028 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,30783775 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,03490197 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,64173702 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,31563123 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,04263175 \right]$$

La magnitud y el ángulo de voltaje existente en las barras previo al ingreso del modelo, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] y sin ingresar los modelos al sistema se muestran en la Tabla 4.31:

	Voltaje	Ángulo
CARAGUAY 69	68,9 [kV]	-27,8
CARAGUAY 138	139,3 [kV]	-24,6
ESCLUSAS 138	139,9 [kV]	-23,9
ESCLUSAS 230	228,7 [kV]	-19,4

Tabla 4.31 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo

La magnitud y el ángulo de voltaje en las barras en un flujo de potencia realizado, posterior al ingreso del modelo en DIgSILENT y, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] en las barras correspondientes, se muestran en la Tabla 4.32:

	Voltaje	Ángulo
CARAGUAY 69	69,2 [kV]	-15,8
CARAGUAY 138	143,8 [kV]	-14,4
ESCLUSAS 138	143,9 [kV]	-14,2
ESCLUSAS 230	230,5 [kV]	-12,2

Tabla 4.32 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo

Finalmente, la magnitud y ángulo de voltaje en las barras, posterior al ingreso del modelo en DIgSILENT, ingresando el valor real de voltaje en [p.u.] en las barras de la subestación se muestran en la Tabla 4.33:

	Voltaje	Ángulo
CARAGUAY 69	69,2 [kV]	2
CARAGUAY 138	146,3 [kV]	3,2
ESCLUSAS 138	146,3 [kV]	3,4
ESCLUSAS 230	234,2 [kV]	5,3

Tabla 4.33 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación

4.3.5. Modelo de carga subestación Nueva Prosperina.

La Figura 4.14 corresponde a la barra de la subestación Nueva Prosperina representada en el software DlgSILENT en la que se ha ingresado una nueva carga de tipo general cuyos parámetros corresponden a los obtenidos en el modelo de carga desarrollados.

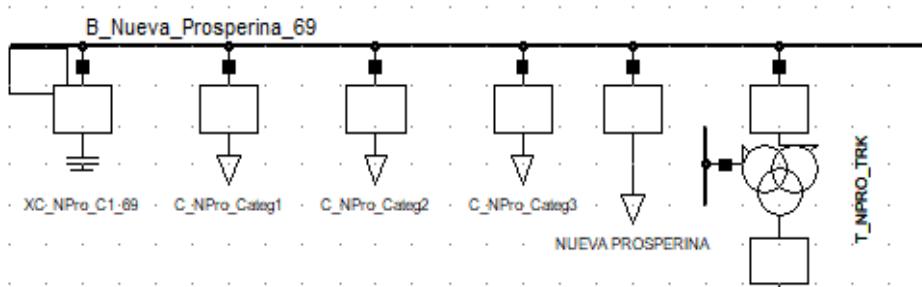


FIGURA 4.14 REPRESENTACIÓN DE LA SUBESTACIÓN PASCUALES EN POWERFACTORY

Modelo de ingreso a DlgSILENT PowerFactory:

$$P = P_0 \left[0,89632974 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,081869057 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,021801203 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,908389005 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,075131368 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,016479628 \right]$$

La magnitud y el ángulo de voltaje existente en las barras previo al ingreso del modelo, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] y sin ingresar los modelos al sistema se muestran en la

	Voltaje	Ángulo
PROSPERINA 69	68,8 [kV]	-22,8
PROSPERINA 230	229,8 [kV]	-19,9

Tabla 4.34 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo

La magnitud y el ángulo de voltaje en las barras en un flujo de potencia realizado, posterior al ingreso del modelo en DIgSILENT y, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] en las barras correspondientes, se muestran en la Tabla 4.34:

	Voltaje	Ángulo
PROSPERINA 69	69,2 [kV]	-15,8
PROSPERINA 230	143,8 [kV]	-14,4

Tabla 4.35 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo

Finalmente, la magnitud y ángulo de voltaje en las barras, posterior al ingreso del modelo en DIgSILENT, ingresando el valor real de voltaje en [p.u.] en las barras de la subestación se muestran en la Tabla 4.36 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación

	Voltaje	Ángulo
PROSPERINA 69	69,1 [kV]	3,9
PROSPERINA 230	235 [kV]	4,9

TABLA 4.36 VARIACIÓN EN EL ÁNGULO Y MAGNITUD DE VOLTAJE POSTERIOR AL CAMBIO DEL VALOR DE VOLTAJE EN LA SUBESTACIÓN

4.3.6. Modelo de carga subestación Salitral.

La Figura 4.15 corresponde a la barra de la subestación Nueva Prosperina representada en el software DIgSILENT en la que se ha ingresado una nueva carga de tipo general cuyos parámetros corresponden a los obtenidos en el modelo de carga desarrollados.

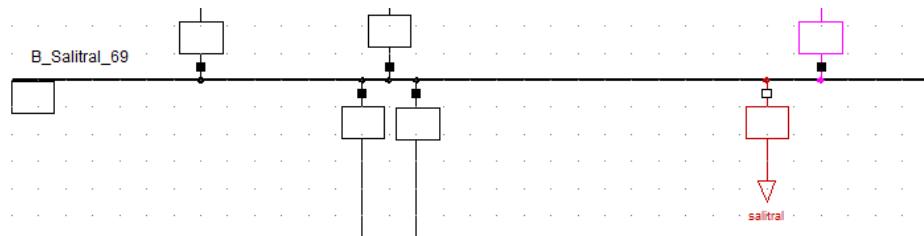


FIGURA 4.15 REPRESENTACIÓN DE LA SUBESTACIÓN SALITRAL EN POWERFACTORY

Modelo de ingreso a DIgSILENT PowerFactory:

$$P = P_0 \left[0,69955225 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,24523309 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,05521466 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,69177245 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,24989994 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,05832761 \right]$$

La magnitud y el ángulo de voltaje existente en las barras previo al ingreso del modelo, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] y sin ingresar los modelos al sistema se muestran en la Tabla 4.37 Voltaje y ángulo en las barras previo al ingreso del modelo

:

	Voltaje	Ángulo
SALITRAL 69	69,1 [kV]	-23,6
SALITRAL 138	137,4 [kV]	-20,8
PASCUALES 138	140 [kV]	-19,9
PASCUALES 230	229,6 [kV]	-17,5

TABLA 4.37 VOLTAJE Y ÁNGULO EN LAS BARRAS PREVIO AL INGRESO DEL MODELO

La magnitud y el ángulo de voltaje en las barras en un flujo de potencia realizado, posterior al ingreso del modelo en DIgSILENT y, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] en las barras correspondientes, se muestran en la Tabla 4.38:

	Voltaje	Ángulo
SALITRAL 69	68,8 [kV]	-41,8
SALITRAL 138	134,5 [kV]	-37,4
PASCUALES 138	137,8 [kV]	-35,5
PASCUALES 230	226,4 [kV]	-32,7

Tabla 4.38 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo

Finalmente, la magnitud y ángulo de voltaje en las barras, posterior al ingreso del modelo en DIgSILENT, ingresando el valor real de voltaje en [p.u.] en las barras de la subestación se muestran en la Tabla 4.39:

	Voltaje	Ángulo
SALITRAL 69	69,5 [kV]	-1,3
SALITRAL 138	139,2 [kV]	2,7
PASCUALES 138	143,8 [kV]	3,9
PASCUALES 230	233,5 [kV]	5,6

Tabla 4.39 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación

4.3.7. Modelo de carga subestación Trinitaria.

La Figura 4.16 corresponde a la barra de la subestación Trinitaria representada en el software DIgSILENT en la que se ha ingresado una nueva carga de tipo general cuyos parámetros corresponden a los obtenidos en el modelo de carga desarrollados.

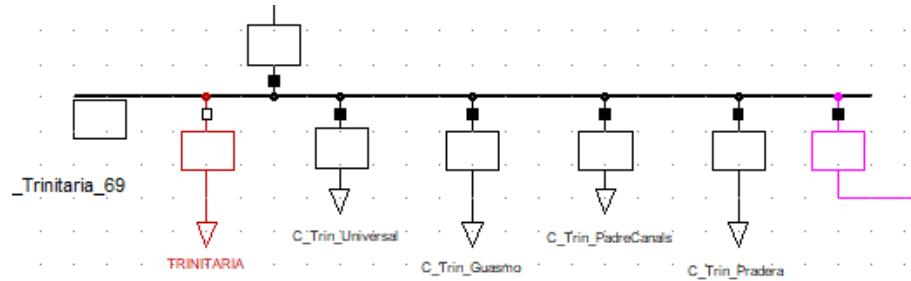


FIGURA 4.16 REPRESENTACIÓN DE LA SUBESTACIÓN SALITRAL EN POWERFACTORY

Modelo de ingreso a DlgSILENT PowerFactory:

$$P = P_0 \left[0,888706784 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,108076947 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,003216268 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[0,891411866 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + 0,105748492 \left(\frac{V}{V_0} \right) + 0,002839642 \right]$$

La magnitud y el ángulo de voltaje existente en las barras previo al ingreso del modelo, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] y sin ingresar los modelos al sistema se muestran en la Tabla 4.39:

	Voltaje	Ángulo
TRINITARIA 69	68,8 [kV]	-24,3
TRINITARIA 138	138,2 [kV]	-21,4
TRINITARIA 230	228,5 [kV]	-19,6
PASCUALES 230	229,6 [kV]	-18,7

TABLA 4.40 VOLTAJE Y ÁNGULO EN LAS BARRAS PREVIO AL INGRESO DEL MODELO

La magnitud y el ángulo de voltaje en las barras en un flujo de potencia realizado, posterior al ingreso del modelo en DlgSILENT y, manteniendo los valores de voltaje en 1 [p.u] en las barras correspondientes, se muestran en la Tabla 4.41:

	Voltaje	Ángulo
TRINITARIA 69	69 [kV]	-17,3

TRINITARIA 138	138,9 [kV]	-16,2
TRINITARIA 230	229 [kV]	-15,1
PASCUALES 230	229,7 [kV]	-14,3

Tabla 4.41 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al ingreso del modelo

Finalmente, la magnitud y ángulo de voltaje en las barras, posterior al ingreso del modelo en DIgSILENT, ingresando el valor real de voltaje en [p.u.] en las barras de la subestación se muestran en la Tabla 4.42:

	Voltaje	Ángulo
TRINITARIA 69	68,9 [kV]	2,7
TRINITARIA 138	140,4 [kV]	3,7
TRINITARIA 230	233,7 [kV]	5
PASCUALES 230	234,2 [kV]	5,3

Tabla 4.42 Variación en el ángulo y magnitud de voltaje posterior al cambio del valor de voltaje en la subestación

4.4. Estabilidad de las zonas analizadas

A continuación, se presentan las curvas PV en la zona a la que pertenecen las barras para las que se desarrollaron modelos de cargas.

Graficas de Voltaje vs Potencia

En las gráficas a continuación se puede apreciar la influencia que tienen los parámetros de los modelos de cargas ingresados respecto a la variación en la estabilidad. Se observa que el punto de inflexión se alcanza a un mayor nivel de potencia y el nivel de tolerancia que tiene el sistema ante estos cambios es mayor.

Análisis de la zona trinitaria

Ocurre un incremento en el margen de estabilidad cuando se reemplazan las cargas conectadas por la carga con los parámetros ya ingresados.

Se presenta las curvas PV correspondientes a las características obtenidas posterior al ingreso de los modelos de carga, se muestran en la Figura 4.17

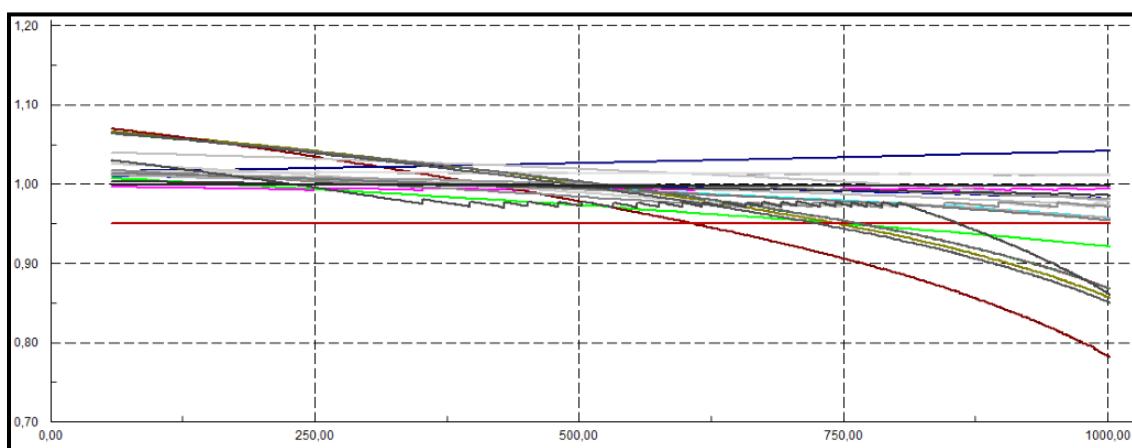


FIGURA 4.17 CURVAS PV DE LA ZONA TRINITARIA

Se presentan las curvas PV correspondientes a las características obtenidas posterior al ingreso de los modelos de carga, se muestran en la Figura 4.18:

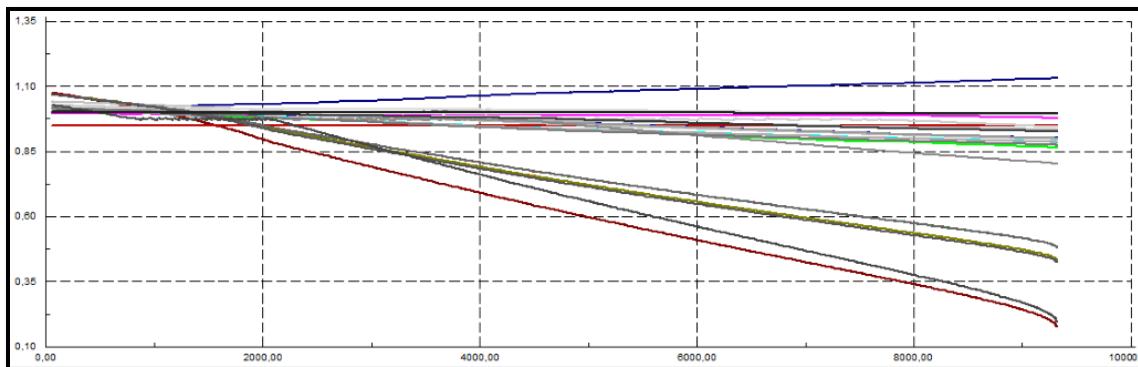


FIGURA 4.18 CURVAS PV DE LA ZONA TRINITARIA

Análisis de la barra Caraguay 69kV:

El ingreso del modelo de carga permite visualizar que la capacidad de mantener el sistema en operación en la barra caraguay a 69 [kV] es mayor, esto se muestra en la Figura 4.19:

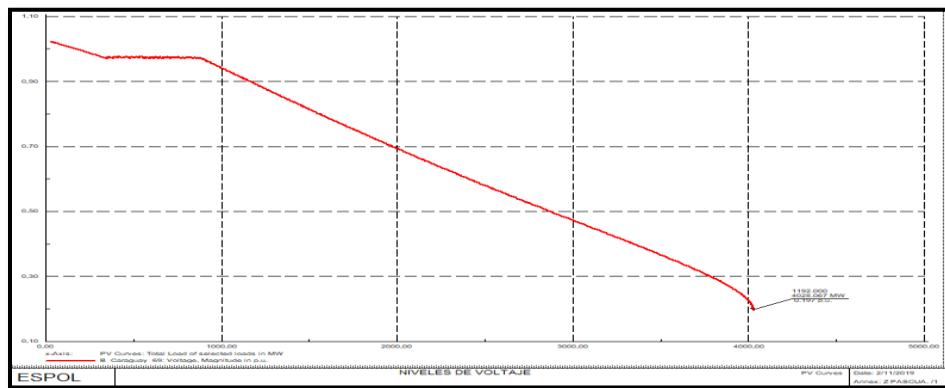


FIGURA 4.19 CURVA PV DE LA BARRA CARAGUAY

Se llega a esta conclusión después de ver la curva PV de la barra previo al ingreso de los parámetros, como se muestra en la Figura 4.20:

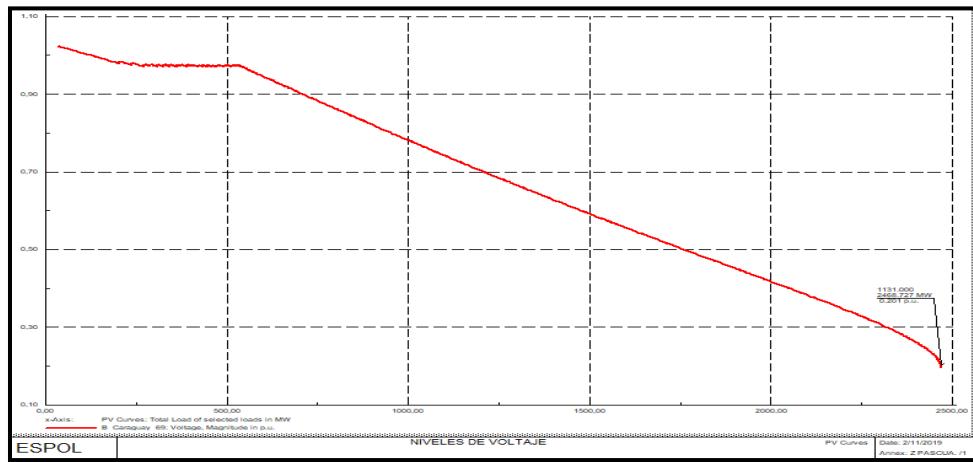


FIGURA 4.20 CURVA PV DE LA BARRA CARAGUAY

Análisis de la barra Trinitaria 69 [kV]:

El ingreso del modelo de carga permite visualizar que la capacidad de mantener el sistema en operación en la barra Trinitaria a 69 [kV] es mayor, esto se muestra en la Figura 4.21:

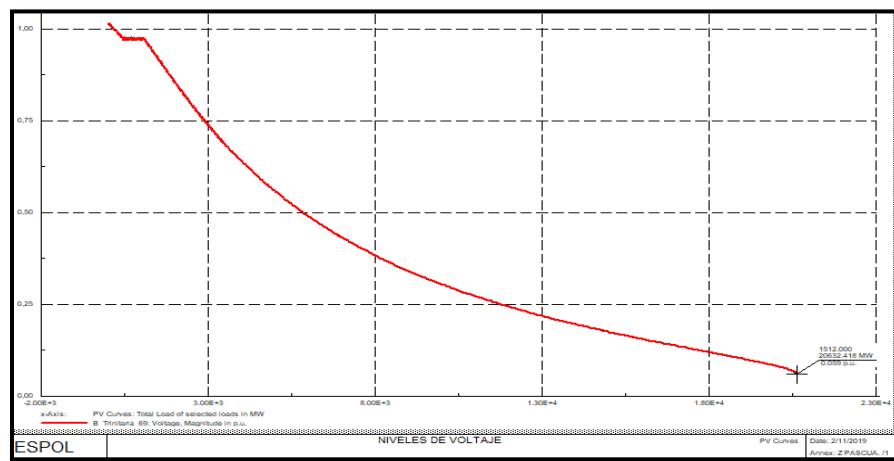


FIGURA 4.21 CURVA PV DE LA BARRA TRINITARIA

Se llega a esta conclusión después de ver la curva PV de la barra previo al ingreso de los parámetros, como se muestra en la Figura 4.22:

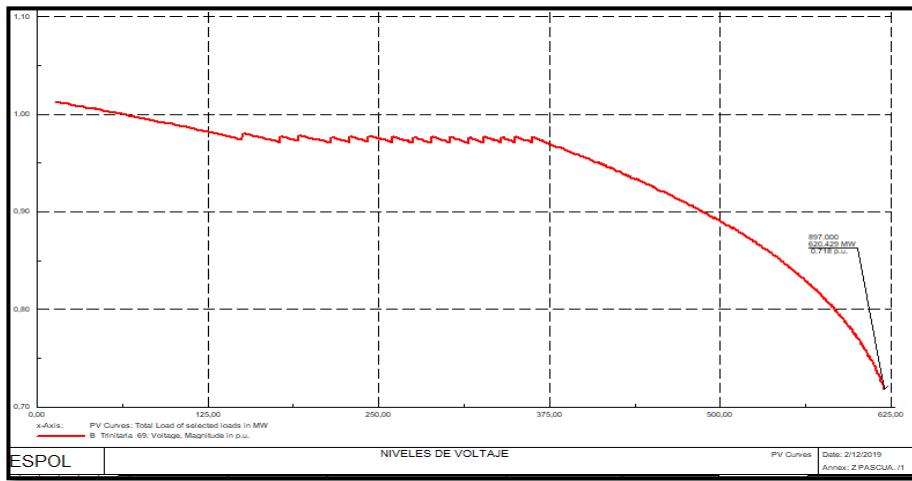


FIGURA 4.22 CURVA PV DE LA BARRA TRINITARIA

Análisis de la barra Nueva Prosperina 69 [kV]:

El ingreso del modelo de carga permite visualizar que la capacidad de mantener el sistema en operación en la barra Nueva Prosperina a 69 [kV] es mayor, esto se muestra en la Figura 4.23:

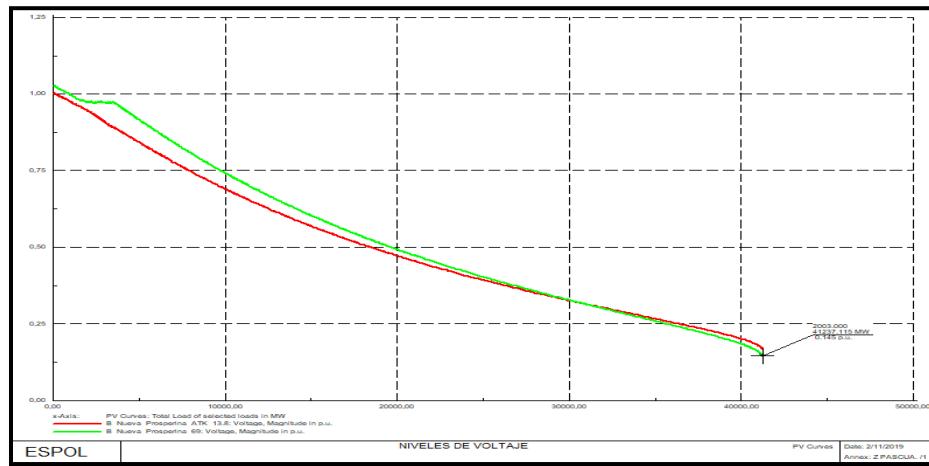


FIGURA 4.23 CURVA PV DE LA BARRA NUEVA PROSPERINA

Se llega a esta conclusión después de ver la curva PV de la barra previo al ingreso de los parámetros, como se muestra en la Figura 4.24:

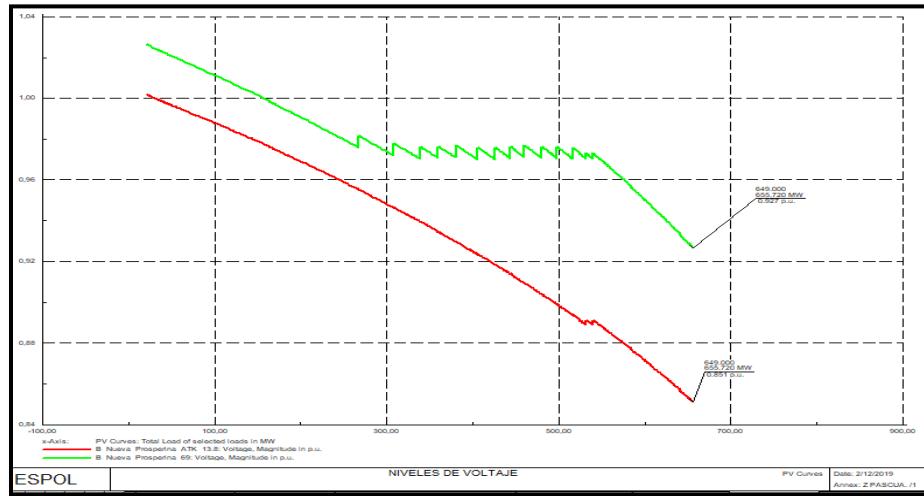


FIGURA 4.24 CURVA PV DE LA BARRA NUEVA PROSPERINA

Análisis de la barra Electroquil 69 [kV]:

El ingreso del modelo de carga permite visualizar que la capacidad de mantener el sistema en operación en la barra Electroquil a 69 [kV] es mayor, esto se muestra en la Figura 4.25:

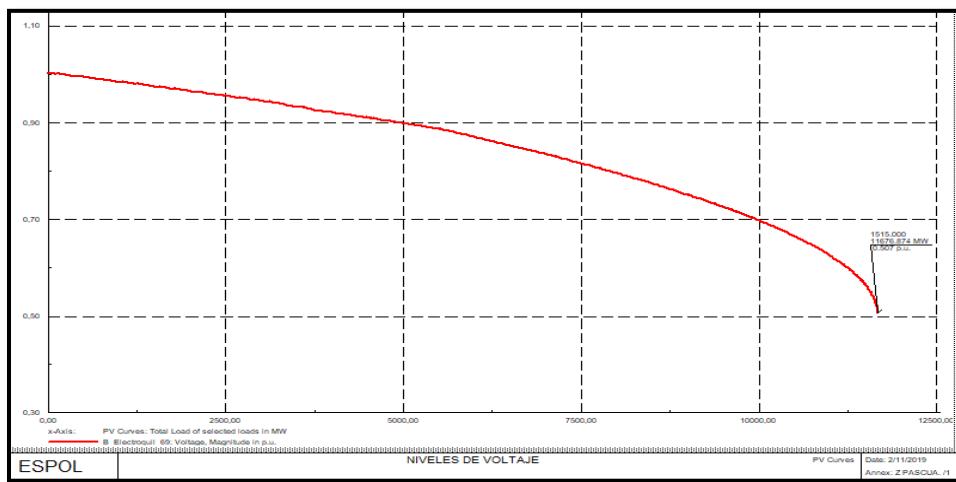


FIGURA 4.25 CURVA PV DE LA BARRA ELECTROQUIL

Se llega a esta conclusión después de ver la curva PV de la barra previo al ingreso de los parámetros, como se muestra en la Figura 4.26:

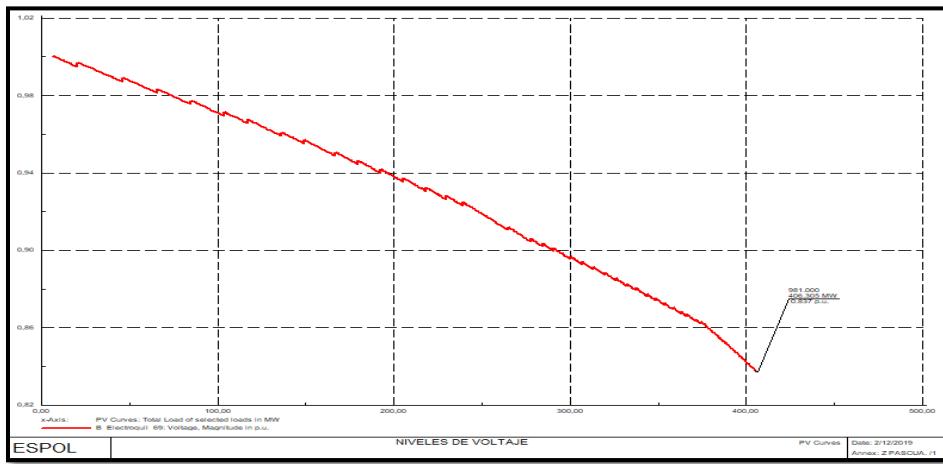


FIGURA 4.26 CURVA PV DE LA BARRA ELECTROQUIL

Análisis de la barra Salitral 69 [kV]:

El ingreso del modelo de carga permite visualizar que la capacidad de mantener el sistema en operación en la barra Salitral a 69 [kV] es mayor, esto se muestra en la Figura 4.27:

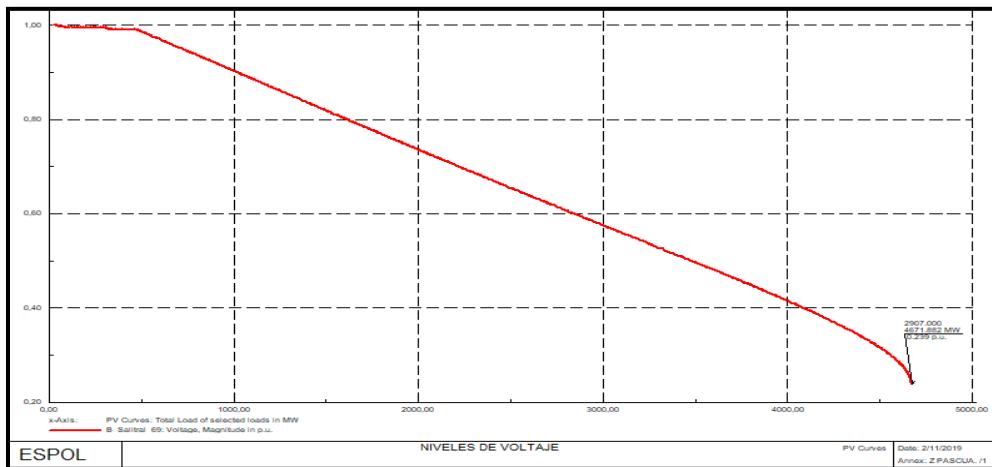


FIGURA 4.27 CURVA PV DE LA BARRA SALITRAL

Se llega a esta conclusión después de ver la curva PV de la barra previo al ingreso de los parámetros, como se muestra en la Figura 4.28:

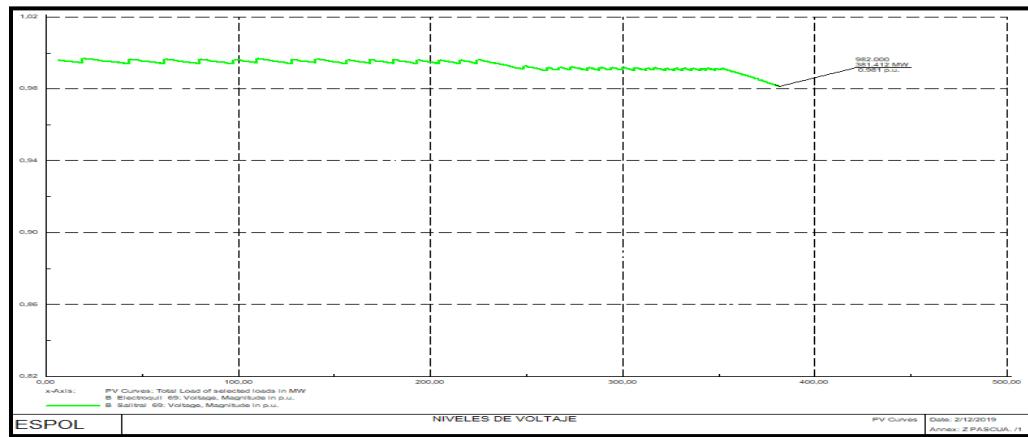


FIGURA 4.28 CURVA PV DE LA BARRA SALITRAL

Análisis de la barra Policentro 69 [kV]:

El ingreso del modelo de carga permite visualizar que la capacidad de mantener el sistema en operación en la barra Policentro a 69 [kV] es mayor, esto se muestra en la Figura 4.29:

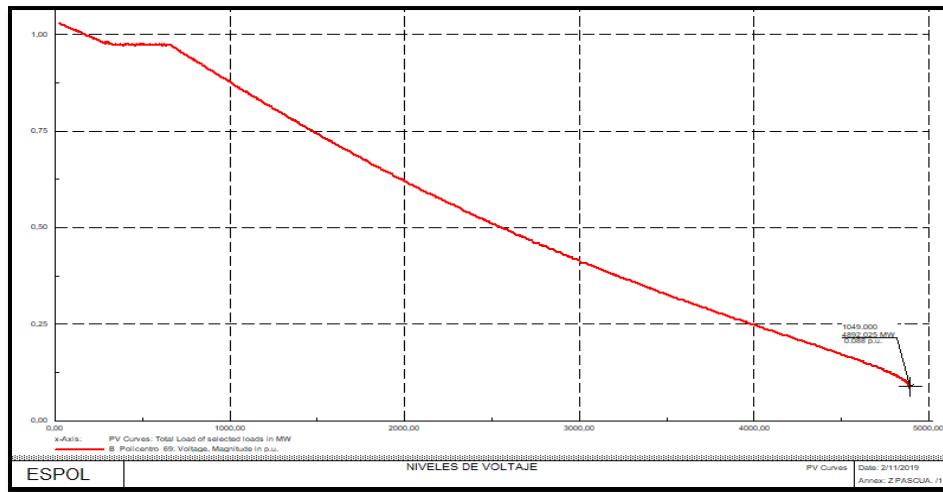


FIGURA 4.29 CURVA PV DE LA BARRA POLICENTRO

Se llega a esta conclusión después de ver la curva PV de la barra previo al ingreso de los parámetros, como se muestra en la Figura 4.30:

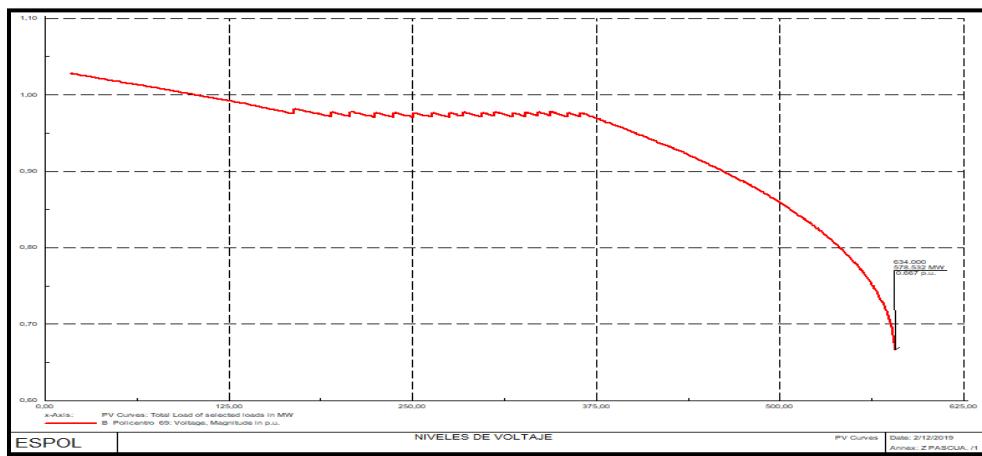


FIGURA 4.30 CURVA PV DE LA BARRA POLICENTRO

Análisis de la barra Pascuales 69 [kV]:

La grafica muestra las curvas PV de la barra Pascuales y del transformador de la planta de generación a gas Enrique García. El ingreso del modelo de carga permite visualizar que la capacidad de mantener el sistema en operación en la barra Pascuales a 69 [kV] es mayor, esto se muestra en la Figura 4.31:

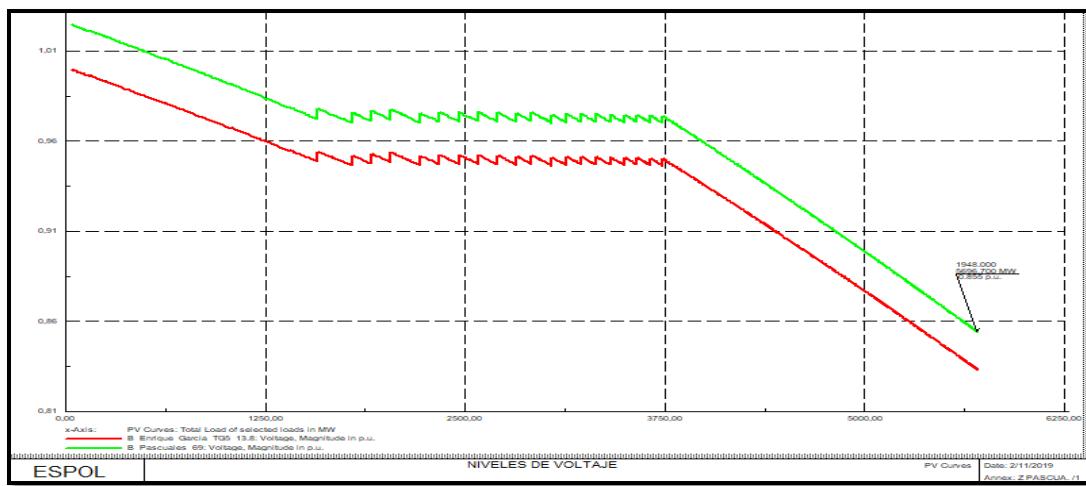


FIGURA 4.31 CURVA PV DE LA BARRA PASCALES

Se llega a esta conclusión después de ver la curva PV de la barra previo al ingreso de los parámetros, como se muestra en la Figura 4.32:

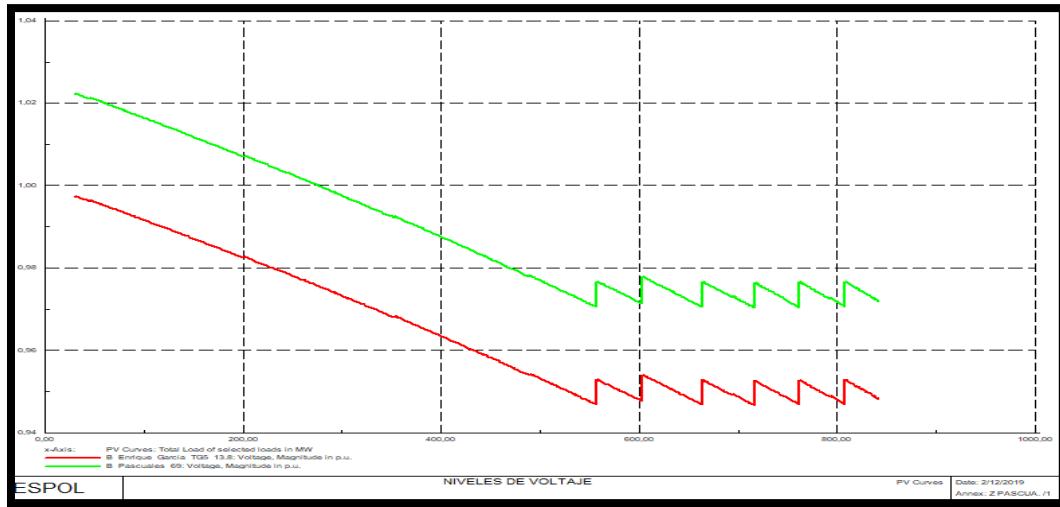


FIGURA 4.32 CURVA PV DE LA BARRA PASCUALES

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

CONTENIDO CAPÍTULO V

5. DISCUSIÓN	113
5.1. INTRODUCCIÓN	113
5.2. INVESTIGACIÓN INICIAL	113
5.3. CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE DATOS	114
5.4. LIMITACIONES DEL PROYECTO	115
5.5. RESULTADOS OBTENIDOS.....	116
5.6. DIFERENCIAS EN EL SISTEMA PREVIO Y POSTERIOR INGRESO DE LOS MODELOS ...	116

CAPÍTULO V

5. DISCUSIÓN

5.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es la discusión del trabajo realizado, iniciando con la obtención y selección de los datos a partir de los cuales de inicio el proceso para el desarrollo del modelo hasta, la obtención del modelo en sí.

Se detalla la experiencia y los conocimientos adquiridos en el área de ingeniería eléctrica en potencia, durante la investigación para el desarrollo de este trabajo, considerando que inicialmente no teníamos conocimiento de la existencia de los modelos de carga, o de que hubiese la posibilidad de modelar el consumo de diferentes tipos de abonados en el mercado eléctrico para obtener una respuesta más precisa de la descripción del comportamiento de un sistema durante el desarrollo de un flujo de potencia.

Por estos motivos, hemos decidido dividir el capítulo de discusión iniciando con la sección 5.2 en la que se harán comentarios respecto a la investigación inicial; continuando con la sección 5.3 que contendrá los criterios en base a los cuales se determinaron los datos que se necesitarían para modelar una carga. La sección 5.4 hará referencia a las limitaciones encontradas durante el desarrollo de los modelos y el manejo de los datos obtenidos para este fin. En la sección 5.5 se expondrán los resultados obtenidos en los modelos dinámicos y estáticos para, finalmente, en la sección 5.6 referirnos a la variación de estabilidad en el sistema.

5.2. INVESTIGACIÓN INICIAL

Este proyecto conoció sus inicios en la investigación del concepto de modelo de carga, aprendimos que existen varios modelos de carga según las características del

consumo que se requiera describir y que la selección del modelo adecuado tendrá mucha dependencia del alcance de carga que describiremos, sean estas cargas limitadas dentro de una construcción o limitadas a un pequeño sector hasta, todas aquellas conectadas a una subestación que es lo que hicimos en este trabajo. Para el análisis de perturbaciones, sin embargo, se requiere un modelo diferente, con mayor cantidad de datos, con esto en mente decidimos realizar el modelamiento de carga dinámica basándonos en una sola subestación, cuyos datos existentes respondieran a las necesidades de nuestro modelo.

De la misma forma, para simular un modelo de carga desarrollado dentro de un sistema, se requiere de un software que admita modelos de carga en sus librerías y, que estos coincidan con los desarrollados puesto que el ingreso de parámetros es preciso. Considerando esto y, sumado al hecho de que el modelo del Sistema Nacional Interconectado que nos fue proporcionado utilizaba el software DIgSILENT PowerFactory se determinó utilizar modelos de carga polinómicos, estos nos permiten la inclusión de abonados de diferentes orígenes y con características de consumo diferentes (industrial, comercial y residencial) y, son admitidos en las librerías del software proporcionado.

5.3. CRITERIOS PARA SELECCIÓN DE DATOS

Nosotros escogimos el modelo polinómico para realizar nuestros modelos estáticos de carga, nos basamos en el hecho de que un modelo polinómico corresponde a la combinación lineal de otros tres modelos y, que cada uno de estos últimos fue pensado para la descripción de una zona particular de consumo (mencionadas en la sección 5.2. INVESTIGACIÓN INICIAL) además de que el software que utilizamos cuenta con el ingreso de parámetros para este tipo de modelos en sus librerías. Después de que estudiamos las características del modelo polinómico determinamos que necesitaríamos conocer el consumo de potencia de cada uno de los sectores conectados a las subestaciones en las que desarrollamos los modelos, por lo que solicitamos nos fueran proporcionados datos de consumo de energía según el sector

por cada transformador de distribución conectado a cada subestación, además pedimos datos de estos transformadores, y de los niveles de voltaje a la salida de las barras y las potencias consumidas en total en cada subestación. Todos estos datos nos fueron proporcionados como una base histórica de valores. Una vez que nuestros requerimientos fueron aprobados el siguiente paso consistió en determinar un procedimiento, tanto para la obtención de modelos estáticos y dinámicos. Describimos paso a paso el procedimiento para la obtención de los coeficientes y demás parámetros.

5.4. LIMITACIONES DEL PROYECTO

Dado que desarrollamos dos clases de modelos de carga es justo describir de forma individual las limitaciones halladas en cada caso.

Empezamos con los modelos estáticos, puesto que nos permitían un análisis del sistema en estado estable una vez terminamos de modelarlos. La limitación principal fue la obtención de datos, inicialmente quisimos trabajar en modelos de carga en barras ubicadas en puntos distantes del S.N.I. pero la adquisición de datos de puntos tan variados no estaba a nuestra disposición, por lo que nuestros tutores nos recomendaron limitar nuestro trabajo a ciertas barras dentro de la ciudad de Guayaquil, estas serían seleccionadas según la disponibilidad de datos en su archivo histórico y, en la coincidencia temporal entre estos.

Los modelos dinámicos representaron un problema de mayor complejidad en lo que respecta a la adquisición de datos, dadas las características de las perturbaciones necesitábamos datos adquiridos con alta frecuencia de muestreo. Los equipos que realizan esta clase de adquisición no están disponibles en la mayoría de las subestaciones. Su análisis fue complicado en comparación a los modelos dinámicos, puesto que no trabajábamos con datos puntuales si no, con señales en las que se consideraban los cambios en los diferentes puntos del intervalo de tiempo seleccionado.

5.5. RESULTADOS OBTENIDOS

Finalmente obtuvimos siete modelos de carga estáticos para las subestaciones mencionadas en la sección 3.1.1 que fueron ingresados al software DIgSILENT PowerFactory, la característica general que obtuvimos como diferencia entre los flujos de potencia realizados en el sistema inicial y, en aquel con los modelos conectados en lugar de las cargas convencionales que disponían, fue en las curvas PV, en todos los casos observamos una amortiguación en la sección de la curva antes de llegar al punto de inflexión y, que este punto se hallaba a una distancia mayor respecto al eje x de voltaje.

En los modelos dinámicos obtuvimos seis perturbaciones cuyas características eran frecuentes a lo largo de los análisis que realizamos de los datos proporcionados.

5.6. DIFERENCIAS EN EL SISTEMA PREVIO Y POSTERIOR INGRESO DE LOS MODELOS

Dentro de las variaciones más representativas que se presentan durante la implementación de los modelos de carga en del sistema, respecto a las cargas anteriormente usadas para el desarrollo de flujos de carga en este, obtuvimos un aumento del margen de estabilidad, es decir, notamos que el sistema tiene mayor capacidad mantenerse en operación ante perturbaciones que ocurran en la red de la que en un principio se había considerado; sin embargo, debemos recalcar que hemos obtenido esto basándonos sólo en las cargas obtenidas para siete subestaciones del S.N.I. y que nuestros resultados no son ni remotamente determinantes pero, marcan un precedente sobre la existencia de la diferencia entre las consideraciones bajo las que se maneja el sistema actualmente y aquellas reales que lo afectan.

CAPÍTULO VI:

CONCLUSIONES

CONTENIDO CAPÍTULO V

6. CONCLUSIONES.....	119
-----------------------------	------------

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES

- Para realizar una adecuada representación de un modelo de carga es importante conocer las características del comportamiento de estas. Actualmente el SNI cuenta con cargas conectadas a sus subestaciones que solo consideran la demanda de potencia activa y reactiva. Las naturalezas de las cargas son diferentes según el consumidor o el sector al cual se abastece, por lo que la respuesta del sistema ante variaciones de estas no puede generalizarse.
- El modelo polinómico trabaja considerando el aporte porcentual de consumo de cada tipo de carga a la demanda en una subestación (para el caso de estudio de este proyecto) por lo que las diferencias entre las magnitudes de voltaje y los ángulos en simulaciones antes y después del ingreso de los modelos obtenidos se ven notablemente afectadas.
- Un modelo dinámico requiere de datos obtenidos a alta frecuencia de muestreo, dadas las características de las perturbaciones, por este motivo la realización de estos es compleja dada la ausencia de equipos apropiados para la adquisición de datos.
- Las variaciones en los ángulos de voltaje funcionan como referencia sobre el desbalance de potencia entre la carga y generación, de esta manera se puede anticipar el tipo de inestabilidad que se presentaría bajo determinadas condiciones puntuales en el sistema.
- El procedimiento para el desarrollo de los modelos estáticos y dinámicos que se han realizado se compara con el de modelos ya existentes, que han sido ideados para niveles de menor potencia, es decir, modelos implementados en cargas puntuales.

- Los modelos realizados en este proyecto poseen información general, esta considera todas las cargas conectadas a las barras de una subestación del sistema de potencia, tomando en cuenta la demanda durante un periodo de tiempo y, el tipo de carga que se encuentra conectada.
- Al implementar los modelos de carga conectados a la red con los parámetros obtenidos se observa un cambio representativo en el sistema ya que, en la mayoría de los casos, el ángulo de voltaje en la barra afectó notoriamente el consumo de reactivos en ésta produciendo una leve sobretensión en el sistema.
- El uso de modelos de carga dentro del sistema nacional interconectado es una nueva propuesta que no ha sido implementada en el análisis del sistema al momento de ejecutar flujos de potencia, es probable que esto se deba a la exhaustiva revisión de datos históricos y, a los diferentes tipos de cargas que requieren análisis en cada barra del sistema nacional.
- Dada la limitación geográfica de los modelos desarrollados, las afectaciones que tienen estos en el sistema se ven reflejadas, sobre todo, a nivel local en la barra donde se encuentra conectado y en los componentes cercanos de la red, es decir, la zona donde ha sido implementada, comparado con las cargas convencionales que se han usado para realizar análisis de estabilidad del sistema, los resultado obtenidos poseen una mayor consideración dentro del análisis de estabilidad ya que su comportamiento cambia según las variaciones de voltaje dentro del sistema.

ANEXOS

APÉNDICE A - TABLAS SUBESTACIÓN POLICENTRO.

Energía consumida por cada sector de carga en la subestación Policentro

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	ENERGIA					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
Policentro	America	0,98	3189657,47	2200913,83	5031,722926	245457,645	719677,66	6360738,33
Policentro	Garzota	0,99	4308540,28	3494120,55	150335,9546	617293,554	1093384,18	9663674,52
Policentro	Guayacanes	0,99	5787408,33	765858,863	1615,133691	171175,223	858099,858	7584157,41
Policentro	Kennedy Norte I	0,97	1374722,84	3572901,57	121230,7956	386797,663	696023,624	6151676,5
Policentro	Kennedy Norte II	0,95	381711,255	4331004,62	78,55514952	1013597,09	730564,037	6456955,57
Policentro	Alborada	0,99	6397206,25	1444103,73	9162,998876	250315,343	1033485,85	9134274,18
TOTAL			21439246,4	15808903,2	287455,1608	2684636,52	5131235,21	45351476,5

Potencia activa suministrada a cada sector de carga por la subestación Policentro.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA ACTIVA [MW]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
Policentro	America	0,98	4,43007983	3,05682476	0,0069885	0,3409134	0,9995523	8,83435879
Policentro	Garzota	0,99	5,98408372	4,85294521	0,20879994	0,85735216	1,51858914	13,4217702
Policentro	Guayacanes	0,99	8,03806713	1,06369287	0,00224324	0,23774336	1,19180536	10,533552
Policentro	Kennedy Norte I	0,97	1,90933728	4,96236329	0,1683761	0,53721898	0,96669948	8,54399514
Policentro	Kennedy Norte II	0,95	0,53015452	6,0152842	0,0001091	1,40777374	1,01467227	8,96799384
Policentro	Alborada	0,99	8,88500868	2,00569963	0,01272639	0,3476602	1,43539701	12,6864919
TOTAL			29,7767312	21,95681	0,39924328	3,72866184	7,12671557	62,9881618

Potencia reactiva suministrada a cada sector de carga por la subestación Policentro

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA REACTIVA [MVAR]
--------------------	-------------	----	--------------------------

			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
Policentro	America	0,98	0,89956608	0,62071474	0,001419076	0,06922542	0,20296775	1,79389306
Policentro	Garzota	0,99	0,85268575	0,69150724	0,02975238	0,12216607	0,21638723	1,91249867
Policentro	Guayacanes	0,99	1,14536253	0,15156802	0,000319645	0,03387659	0,16982307	1,50094986
Policentro	Kennedy Norte I	0,97	0,47852503	1,24368547	0,04219903	0,13463977	0,24227773	2,14132703
Policentro	Kennedy Norte II	0,95	0,17425336	1,97712831	0,0000358609	0,46271285	0,33350665	2,94763703
Policentro	Alborada	0,99	1,26604517	0,28579672	0,001813412	0,0495389	0,204533	1,80772719
TOTAL			4,81643792	4,9704005	0,075539403	0,87215959	1,36949542	12,1040328

APÉNDICE B - TABLAS SUBESTACIÓN PASCUALES.

Energía consumida por cada sector de carga en la subestación Pascuales

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	ENERGIA					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
PASCUALES	GERMANIA	0,98673406	2872076,5	1471028,2	4242852,25	141761,029	1113468,55	9841186,53
PASCUALES	SAUCE	0,962774	2650856,17	1609927,25	2539260,44	87475,4235	878698,89	7766218,16
PASCUALES	PARQUE CALIFORNIA	0,99857327	2385858,29	1154804,79	1088510,62	158502,143	610804,164	5398480
PASCUALES	SAFANDO	0,97114285	1296470,78	199666,828	519226,943	64003,2079	265282,473	2344650,24
PASCUALES	SAUCE	0,98267269	232229,891	1441285,77	3213379,87	133097,464	640442,821	5660435,81
PASCUALES	ORQUIDEAS	0,98112755	4363726,93	470384,897	261577,455	118143,825	665172,639	5879005,75
PASCUALES	VERGELES	0,97839757	4765893,69	856261,712	317464,546	124957,741	773709,295	6838286,98
PASCUALES	LOTES ALEGRIA	0,9797016	1096159,63	561434,117	1619331,3	54104,6584	424967,538	3755997,24
PASCUALES	ORQUIDEAS	0,99459132	4612327,55	497182,627	276479,469	124874,454	703067,386	6213931,49
PASCUALES	MUCHO LOTE	0,97104447	3459655,75	372931,175	207384,184	93666,9434	527363,05	4661001,1
TOTAL			27735255,2	8634907,36	14285467,1	1100586,89	6602976,81	58359193,3

Potencia activa suministrada a cada sector de carga por la subestación Pascuales.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA ACTIVA [MW]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
PASCUALES	GERMANIA	0,98673406	3,98899514	2,04309473	5,89285035	0,19689032	1,5464841	13,6683146
PASCUALES	SAUCE	0,962774	3,68174468	2,23601006	3,5267506	0,12149364	1,22041512	10,7864141
PASCUALES	PARQUE CALIFORNIA	0,99857327	3,31369207	1,60389554	1,5118203	0,22014187	0,84833912	7,4978889
PASCUALES	SAFANDO	0,97114285	1,80065387	0,27731504	0,72114853	0,08889334	0,36844788	3,25645866
PASCUALES	SAUCE	0,98267269	0,32254152	2,00178579	4,46302759	0,18485759	0,88950392	7,86171641
PASCUALES	ORQUIDEAS	0,98112755	6,06073185	0,65331236	0,36330202	0,16408865	0,92385089	8,16528576
PASCUALES	VERGELES	0,97839757	6,61929679	1,18925238	0,44092298	0,17355242	1,07459624	9,49762081
PASCUALES	LOTES ALEGRIA	0,9797016	1,52244393	0,77976961	2,24907125	0,07514536	0,59023269	5,21666284
PASCUALES	ORQUIDEAS	0,99459132	6,40601049	0,69053143	0,38399926	0,17343674	0,97648248	8,6304604
PASCUALES	MUCHO LOTE	0,97104447	4,80507743	0,51795997	0,28803359	0,13009298	0,73244868	6,47361264
TOTAL			38,5211878	11,9929269	19,8409265	1,5285929	9,17080112	81,0544352

Potencia reactiva suministrada a cada sector de carga por la subestación Pascuales.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA REACTIVA [MVAR]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
PASCUALES	GERMANIA	0,98673406	0,65629977	0,33614546	0,96953649	0,03239389	0,25443931	2,24881491
PASCUALES	SAUCE	0,962774	1,03368363	0,62778036	0,99016763	0,03411046	0,34264276	3,02838484
PASCUALES	PARQUE CALIFORNIA	0,99857327	0,17719983	0,08576839	0,08084466	0,0117721	0,04536497	0,40094995
PASCUALES	SAFANDO	0,97114285	0,44221439	0,06810454	0,17710359	0,02183091	0,09048544	0,79973887
PASCUALES	SAUCE	0,98267269	0,06083701	0,37757205	0,84180559	0,0348674	0,1677761	1,48285815
PASCUALES	ORQUIDEAS	0,98112755	1,19445541	0,12875549	0,07159994	0,03233876	0,18207351	1,60922311
PASCUALES	VERGELES	0,97839757	1,39863556	0,2512851	0,09316557	0,03667105	0,22705864	2,00681592
PASCUALES	LOTES ALEGRIA	0,9797016	0,31151452	0,15955238	0,46019321	0,01537585	0,12077033	1,06740629
PASCUALES	ORQUIDEAS	0,99459132	0,66898385	0,07211265	0,04010129	0,01811211	0,1019747	0,90128461
PASCUALES	MUCHO LOTE	0,97104447	1,18215723	0,12742981	0,07086275	0,0320058	0,18019887	1,59265446
TOTAL			7,12598122	2,23450623	3,79538071	0,26947833	1,71278462	15,1381311

APÉNDICE C - TABLAS SUBESTACIÓN CARAGUAY.

Energía consumida por cada sector de carga en la subestación Caraguay.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	ENERGIA					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
CARAGUAY	AYACUCHO	0,995095498	753257,597	4413112,63	55092,7616	448864,882	723411,523	6393739,39
CARAGUAY	ESMERALDAS	0,995753085	5794781,37	1298204,79	81394,4523	259300,219	948377,324	8382058,16
CARAGUAY	ESMERALDAS	0,976585704	4738826,01	1881039,81	200930,573	342896,636	913932,704	8077625,73
CARAGUAY	GUASMO	0,982944061	3451911,13	436570,1	371506,081	197901,579	568730,462	5026619,35
CARAGUAY	GUASMO	0,990832068	6091562,19	1117685,81	8846,8157	246973,605	952381,703	8417450,12
CARAGUAY	ASTILLERO	0,97644971	1125529,84	3055815,48	786684,664	685137,774	721222,262	6374390,02
CARAGUAY	ASTILLERO	0,976470038	1724270,89	2841895,9	168544,391	347901,781	648431,778	5731044,74
CARAGUAY	UNIVERSO	1	2423784,08	1277332,38	177514,109	216335,822	522429,381	4617395,78
TOTAL			26103923,1	16321656,9	1850513,85	2745312,3	5998917,14	53020323,3

Potencia activa suministrada a cada sector de carga por la subestación Caraguay.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA ACTIVA [MW]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
CARAGUAY	AYACUCHO	0,995095498	1,04619111	6,1293231	0,07651772	0,62342345	1,00473823	8,8801936
CARAGUAY	ESMERALDAS	0,995753085	8,04830746	1,80306221	0,11304785	0,36013919	1,31719073	11,6417474
CARAGUAY	ESMERALDAS	0,976585704	6,58170279	2,61255529	0,27907024	0,47624533	1,26935098	11,2189246
CARAGUAY	GUASMO	0,982944061	4,79432101	0,60634736	0,51598067	0,2748633	0,78990342	6,98141576
CARAGUAY	GUASMO	0,990832068	8,46050304	1,5523414	0,01228724	0,3430189	1,32275236	11,6909029
CARAGUAY	ASTILLERO	0,97644971	1,56323588	4,24418817	1,09261759	0,95158024	1,00169759	8,85331947
CARAGUAY	ASTILLERO	0,976470038	2,39482068	3,94707764	0,23408943	0,48319692	0,90059969	7,95978436
CARAGUAY	UNIVERSO	1	3,36636678	1,77407276	0,24654737	0,30046642	0,72559636	6,4130497
TOTAL			36,2554488	22,6689679	2,57015812	3,81293375	8,33182936	73,6393379

Potencia reactiva suministrada a cada sector de carga por la subestación Caraguay.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA REACTIVA [MVAR]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
CARAGUAY	AYACUCHO	0,995095498	0,10399814	0,60929424	0,00760636	0,06197231	0,09987746	0,8827485
CARAGUAY	ESMERALDAS	0,995753085	0,7441202	0,16670524	0,01045203	0,03329729	0,12178315	1,07635791
CARAGUAY	ESMERALDAS	0,976585704	1,4498607	0,57551083	0,06147542	0,10491045	0,27962097	2,47137837
CARAGUAY	GUASMO	0,982944061	0,89699776	0,1134451	0,09653786	0,05142579	0,14778768	1,30619419
CARAGUAY	GUASMO	0,990832068	1,15358375	0,21166068	0,00167536	0,04677039	0,18035637	1,59404655
CARAGUAY	ASTILLERO	0,97644971	0,34539468	0,93774717	0,24141226	0,21025026	0,22132362	1,95612799
CARAGUAY	ASTILLERO	0,976470038	0,52889542	0,8717109	0,05169858	0,10671389	0,19889717	1,75791596
CARAGUAY	UNIVERSO	1	0	0	0	0	0	0
TOTAL			5,22285065	3,48607415	0,47085787	0,61534039	1,24964641	11,0447695

APÉNDICE D - TABLAS SUBESTACIÓN ELECTROQUIL.

Energía consumida por cada sector de carga en la subestación Electroquil.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	ENERGIA					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
ELECTROQUIL	CHONGÓN	0,97671832	600458,942	169867,641	1635221,51	52623,3015	313609,646	2771781,04
TOTAL			600458,942	169867,641	1635221,51	52623,3015	313609,646	2771781,04

Potencia activa suministrada a cada sector de carga por la subestación Electroquil.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA ACTIVA [MW]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
ELECTROQUIL	CHONGÓN	0,97671832	0,83397075	0,23592728	2,27114099	0,07308792	0,43556895	3,84969589
TOTAL			0,83397075	0,23592728	2,27114099	0,07308792	0,43556895	3,84969589

Potencia reactiva suministrada a cada sector de carga por la subestación Electroquil.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA REACTIVA [MVAR]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
ELECTROQUIL	CHONGÓN	0,97671832	0,18317283	0,05181893	0,49883204	0,01605299	0,0956681	0,84554488
TOTAL			0,18317283	0,05181893	0,49883204	0,01605299	0,0956681	0,84554488

APÉNDICE E - TABLAS SUBESTACIÓN NUEVA PROSPERINA.

Energía consumida por cada sector de carga en la subestación Nueva Prosperina.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	ENERGIA					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
NUEVA PROSPERINA	FLOR DE BASTIÓN	0,98189352	6182467,046	680270,9058	437255,302	208163,459	957878,84	8466035,553
NUEVA PROSPERINA	EL FORTÍN	0,93185485	4904457,255	273311,4642	0	63599,1339	668685,478	5910053,331
NUEVA PROSPERINA	FLOR DE BASTIÓN	0,97717013	4565812,805	747410,8141	15708,2355	347754,024	724222,668	6400908,546
TOTAL			15652737,11	1700993,184	452963,538	619516,617	2350786,99	20776997,43

Potencia activa suministrada a cada sector de carga por la subestación Nueva Prosperina.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA ACTIVA [MW]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
NUEVA PROSPERINA	FLOR DE BASTIÓN	0,98189352	8,586759786	0,944820702	0,60729903	0,28911592	1,33038728	11,75838271
NUEVA PROSPERINA	EL FORTÍN	0,93185485	6,811746187	0,379599256	0	0,08833213	0,92872983	8,208407404
NUEVA PROSPERINA	FLOR DE BASTIÓN	0,97717013	6,341406673	1,038070575	0,02181699	0,4829917	1,00586482	8,890150759
TOTAL			21,73991265	2,362490533	0,62911602	0,86043975	3,26498192	28,85694088

Potencia reactiva suministrada a cada sector de carga por la subestación Nueva Prosperina.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA REACTIVA [MVAR]						Total
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas		
NUEVA PROSPERINA	FLOR DE BASTIÓN	0,98189352	1,656617067	0,182281342	0,11716433	0,05577824	0,25666751	2,268508491	
NUEVA PROSPERINA	EL FORTÍN	0,93185485	2,652252814	0,147802512	0	0,0343934	0,36161452	3,196063247	
NUEVA PROSPERINA	FLOR DE BASTIÓN	0,97717013	1,378761537	0,225699416	0,0047435	0,10501304	0,21869717	1,932914659	
TOTAL			5,687631418	0,55578327	0,12190782	0,19518468	0,8369792	7,397486397	

APÉNDICE F - TABLAS SUBESTACIÓN SALITRAL.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	ENERGIA					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
SALITRAL	ATARAZANA	0,97879522	2702730,75	2342296,98	277159,359	817031,617	783231,879	6922450,58
SALITRAL	BOYACÁ	0,98757686	1251400,58	3488348,24	88230,8991	1106665,02	757132,654	6691777,4
SALITRAL	BOYACÁ	0,98837978	412645,878	3139185,75	638377,841	716408,587	625978,625	5532596,68
SALITRAL	CEIBOS	0,99710547	5032019,05	3348123,48	196889,841	568715,869	1166800,19	10312548,4
SALITRAL	GARAY	0,98366866	2141600,65	2204875,07	137644,04	2495910,39	890501,282	7870531,43
SALITRAL	PADRE CANALS	0,98289601	4723705,78	691377,831	14902,8946	221958,311	721066,243	6373011,06
SALITRAL	PUERTO SANTA ANA	0,97454137	306887,317	538249,673	0	830251,853	213743,477	1889132,32
SALITRAL	PUERTO LIZA	0,99413943	5800480,34	810822,305	59507,6307	136460,356	868460,895	7675731,53
SALITRAL	ALBORADA 1	0,99528093	4187403,5	2845702,4	245343,541	353697,588	973697,331	8605844,37
SALITRAL	CERRO BLANCO	0,9812009	3808891,35	1380140,24	931784,547	90964,2429	792489,184	7004269,57
SALITRAL	GARAY	0,98145468	2023797,62	4202901,58	96637,4935	389353,628	856394,488	7569084,82
SALITRAL	CUMBRES	0,99625727	5249283,68	1177799,04	1070417,89	176857,331	979082,532	8653440,48
SALITRAL	TORRE	0,99129131	4402477,17	1498471,81	133897,147	332609,043	812349,929	7179805,1
SALITRAL	TORRE	0,98726687	6226837,33	1369200,1	77095,9042	161963,013	999589,285	8834685,63
SALITRAL	SAMANES	0,99190344	1992861,56	265721,341	147138,207	72247,8009	316135,381	2794104,29
SALITRAL	BELO HORIZONTE	0,9909397	3816000,95	600571,107	224675,618	107176,941	605796,554	5354221,17
SALITRAL	MAPASINGUE	0,98329488	2902994,93	947639,723	1929863,78	207609,436	763953,396	6752061,27
SALITRAL	MAPASINGUE	0,97310912	5677741,81	1532444,76	722073,913	1778444,2	1238876,45	10949581,1
SALITRAL	CEIBOS	0,98747622	3314411,2	1936653,33	661890,412	273039,987	789199,516	6975194,44
SALITRAL	BIEN PUBLICO	0,94163854	376939,039	451234,1	54355,3602	324638,671	154008,491	1361175,66
SALITRAL	PADRE CANALS	0,997605	2800586,74	355966,443	4054,26096	111029,644	417390,321	3689027,41
SALITRAL	PUERTO SANTA ANA	0,99408128	0	266856,29	0	0	34045,1063	300901,396
SALITRAL	SAMANES	0,99046376	5870834,13	782796,933	433459,114	212837,09	931313,254	8231240,52
TOTAL			75022531,4	36177378,5	8145399,69	11485870,6	16691236,5	147522417

Potencia activa suministrada a cada sector de carga por la subestación Salitral.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA ACTIVA [MW]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
SALITRAL	ATARAZANA	0,97879522	3,7537927	3,25319025	0,38494355	1,13476614	1,08782205	9,61451469
SALITRAL	BOYACÁ	0,98757686	1,73805636	4,84492811	0,12254292	1,53703475	1,05157313	9,29413527
SALITRAL	BOYACÁ	0,98837978	0,57311928	4,35998021	0,88663589	0,99501193	0,86941476	7,68416206
SALITRAL	CEIBOS	0,99710547	6,98891535	4,65017149	0,27345811	0,78988315	1,62055583	14,3229839
SALITRAL	GARAY	0,98366866	2,97444534	3,06232649	0,19117228	3,46654221	1,23680734	10,9312937
SALITRAL	PADRE CANALS	0,98289601	6,56070248	0,96024699	0,02069846	0,30827543	1,00148089	8,85140426
SALITRAL	PUERTO SANTA ANA	0,97454137	0,42623238	0,74756899	0	1,15312757	0,29686594	2,62379489
SALITRAL	PUERTO LIZA	0,99413943	8,0562227	1,12614209	0,08264949	0,18952827	1,20619569	10,6607382
SALITRAL	ALBORADA 1	0,99528093	5,8158382	3,95236445	0,34075492	0,49124665	1,3523574	11,9525616
SALITRAL	CERRO BLANCO	0,9812009	5,29012688	1,91686145	1,2941452	0,12633923	1,10067942	9,72815218
SALITRAL	GARAY	0,98145468	2,81083003	5,83736331	0,13421874	0,54076893	1,18943679	10,5126178
SALITRAL	CUMBRES	0,99625727	7,29067178	1,635832	1,48669151	0,24563518	1,35983685	12,0186673
SALITRAL	TORRE	0,99129131	6,11455163	2,08121085	0,18596826	0,461957	1,12826379	9,97195153
SALITRAL	TORRE	0,98726687	8,64838517	1,90166681	0,10707764	0,22494863	1,38831845	12,2703967
SALITRAL	SAMANES	0,99190344	2,76786328	0,36905742	0,20435862	0,10034417	0,43907692	3,8807004
SALITRAL	BELO HORIZONTE	0,9909397	5,30000132	0,83412654	0,31204947	0,14885686	0,8413841	7,43641829
SALITRAL	MAPASINGUE	0,98329488	4,03193741	1,31616628	2,68036636	0,28834644	1,06104638	9,37786287
SALITRAL	MAPASINGUE	0,97310912	7,88575252	2,12839551	1,00288044	2,47006139	1,72066174	15,2077516
SALITRAL	CEIBOS	0,98747622	4,60334888	2,68979629	0,91929224	0,3792222	1,09611044	9,68777006
SALITRAL	BIEN PUBLICO	0,94163854	0,52352644	0,62671403	0,07549356	0,45088704	0,21390068	1,89052175
SALITRAL	PADRE CANALS	0,997605	3,8897038	0,49439784	0,00563092	0,15420784	0,57970878	5,12364918
SALITRAL	PUERTO SANTA ANA	0,99408128	0	0,37063374	0	0	0,04728487	0,41791861
SALITRAL	SAMANES	0,99046376	8,15393629	1,08721796	0,60202655	0,29560707	1,29349063	11,4322785
TOTAL			104,19796	50,2463591	11,3130551	15,9525981	23,1822729	204,892245

Potencia reactiva suministrada a cada sector de carga por la subestación Salitral

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA REACTIVA [MVAR]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
SALITRAL	ATARAZANA	0,97879522	0,78558971	0,68082416	0,08056057	0,23748264	0,22765823	2,01211531
SALITRAL	BOYACÁ	0,98757686	0,27654801	0,77089285	0,01949822	0,24456278	0,16731935	1,47882121
SALITRAL	BOYACÁ	0,98837978	0,08814101	0,67052891	0,13635727	0,15302461	0,1337088	1,1817606
SALITRAL	CEIBOS	0,99710547	0,53291569	0,35458282	0,02085161	0,06022982	0,12356991	1,09214984
SALITRAL	GARAY	0,98366866	0,54425525	0,56033548	0,03498014	0,63429769	0,22630736	2,00017593
SALITRAL	PADRE CANALS	0,98289601	1,22925346	0,17991777	0,00387819	0,05776038	0,1876436	1,6584534
SALITRAL	PUERTO SANTA ANA	0,97454137	0,09806111	0,17198939	0	0,26529418	0,06829843	0,60364312
SALITRAL	PUERTO LIZA	0,99413943	0,87605627	0,12245985	0,00898754	0,02060984	0,13116511	1,1592786
SALITRAL	ALBORADA 1	0,99528093	0,56701791	0,38533765	0,03322206	0,04789433	0,13184873	1,16532067
SALITRAL	CERRO BLANCO	0,9812009	1,04049735	0,37702106	0,25454109	0,02484924	0,21648895	1,91339769
SALITRAL	GARAY	0,98145468	0,5490015	1,14013341	0,02621514	0,1056211	0,23231664	2,05328778
SALITRAL	CUMBRES	0,99625727	0,63255502	0,14192845	0,12898869	0,02131186	0,11798249	1,0427665
SALITRAL	TORRE	0,99129131	0,81228235	0,27647666	0,02470479	0,06136828	0,14988323	1,32471532
SALITRAL	TORRE	0,98726687	1,39346516	0,30640477	0,01725281	0,03624469	0,22369186	1,9770593
SALITRAL	SAMANES	0,99190344	0,35437219	0,04725077	0,02616423	0,01284716	0,05621544	0,49684979
SALITRAL	BELO HORIZONTE	0,9909397	0,71833848	0,11305378	0,04229379	0,02017539	0,11403744	1,00789888
SALITRAL	MAPASINGUE	0,98329488	0,74636023	0,24363825	0,49616813	0,0533764	0,19641248	1,73595549
SALITRAL	MAPASINGUE	0,97310912	1,866663604	0,50381238	0,23739177	0,58468809	0,40729774	3,59982603
SALITRAL	CEIBOS	0,98747622	0,73547162	0,42974558	0,14687424	0,06058788	0,17512427	1,5478036
SALITRAL	BIEN PUBLICO	0,94163854	0,1871551	0,22404355	0,02698814	0,16118729	0,0764672	0,67584127
SALITRAL	PADRE CANALS	0,997605	0,26969041	0,03427879	0,00039042	0,01069191	0,04019378	0,35524531
SALITRAL	PUERTO SANTA ANA	0,99408128	0	0,04050497	0	0	0,00516756	0,04567253
SALITRAL	SAMANES	0,99046376	1,13421281	0,15123205	0,08374191	0,04111895	0,17992459	1,59023032
TOTAL			15,4378767	7,92639337	1,85005074	2,91522452	3,5887232	31,7182685

APÉNDICE G - TABLAS SUBESTACIÓN TRINITARIA.

Energía consumida por cada sector de carga en la subestación Trinitaria.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	ENERGIA					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
TRINITARIA	TRINITARIA	0,96492023	4033617,909	504427,9972	4911,90753	270854,477	614138,611	5427950,901
TRINITARIA	PRADERA	0,98743291	6271769,284	1091022,356	15758,6338	390426,655	991153,873	8760130,802
TRINITARIA	PRADERA	0,98223461	3427546,65	444632,2543	8730,36947	358475,054	540853,994	4780238,322
TRINITARIA	PORTUARIA	0,98863347	5415930,19	831593,5908	56057,4665	438604,698	860157,493	7602343,437
TOTAL			19148864,03	2871676,198	85458,3773	1458360,88	3006303,97	26570663,46

Potencia activa suministrada a cada sector de carga por la subestación Trinitaria.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA ACTIVA [MW]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
TRINITARIA	TRINITARIA	0,96492023	5,602247096	0,700594441	0,00682209	0,37618677	0,85297029	7,538820696
TRINITARIA	PRADERA	0,98743291	8,710790672	1,515308827	0,02188699	0,54225924	1,3766026	12,16684834
TRINITARIA	PRADERA	0,98223461	4,760481459	0,617544798	0,01212551	0,49788202	0,7511861	6,639219891
TRINITARIA	PORTUARIA	0,98863347	7,522125264	1,154991098	0,07785759	0,60917319	1,19466318	10,55881033
TOTAL			26,59564449	3,988439164	0,11869219	2,02550123	4,17542218	36,90369925

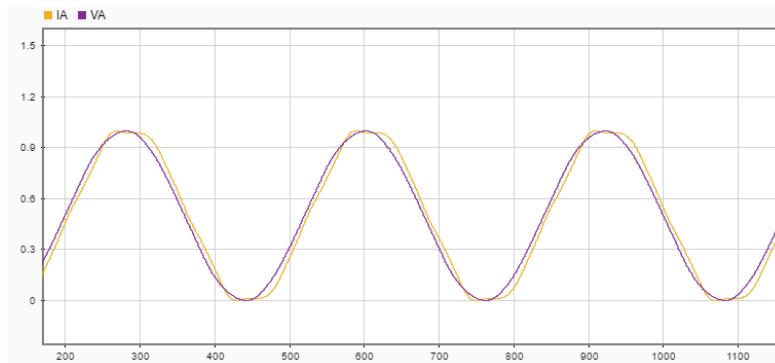
Potencia reactiva suministrada a cada sector de carga por la subestación Trinitaria.

Subestación S.N.I.	Subestación	FP	POTENCIA REACTIVA [MVAR]					
			Residencial	Comercial	Industrial	Otros	Pérdidas	Total
TRINITARIA	TRINITARIA	0,96492023	1,524304241	0,190623344	0,00185621	0,10235591	0,23208299	2,05122269
TRINITARIA	PRADERA	0,98743291	1,394163029	0,242525349	0,00350302	0,08678865	0,2203254	1,947305448
TRINITARIA	PRADERA	0,98223461	0,909495499	0,117982649	0,00231659	0,09512094	0,14351498	1,268430654
TRINITARIA	PORLUARIA	0,98863347	1,143922387	0,175644532	0,01184014	0,09263962	0,18167764	1,605724326
TOTAL			4,971885156	0,726775874	0,01951596	0,37690512	0,777601	6,872683118

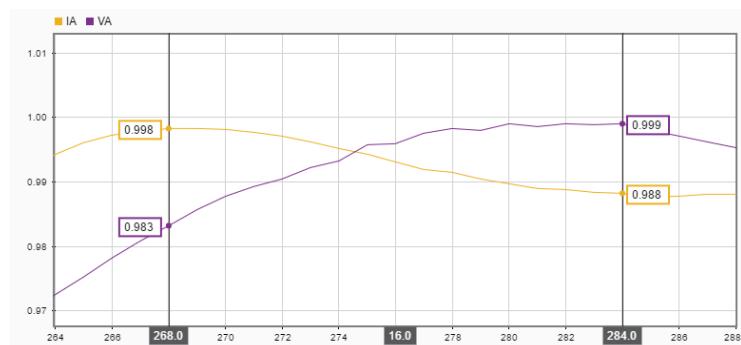
APÉNDICE H

MODELO DE LA PRIMERA PERTURBACIÓN.

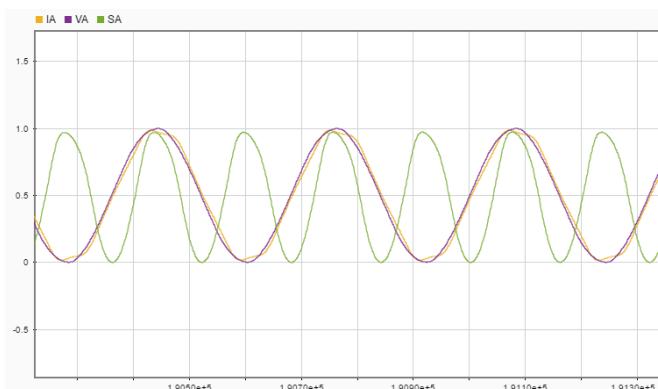
Señales de voltaje y corriente a la salida de la subestación Policentro:



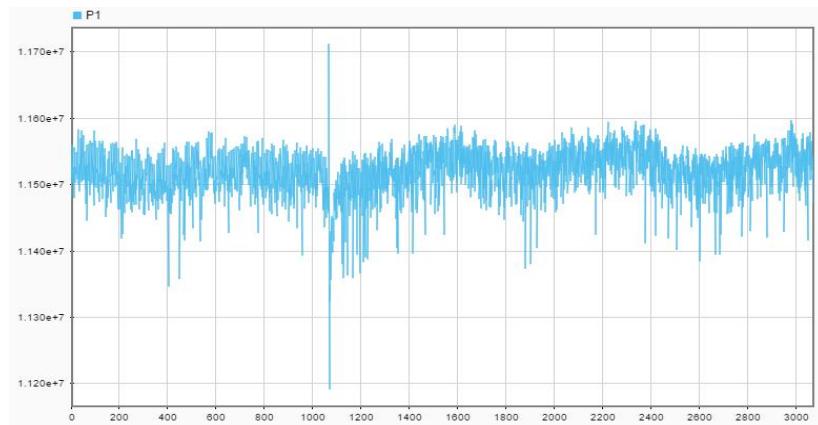
Desfase entre las curvas de voltaje y corriente para la obtención del factor de potencia:



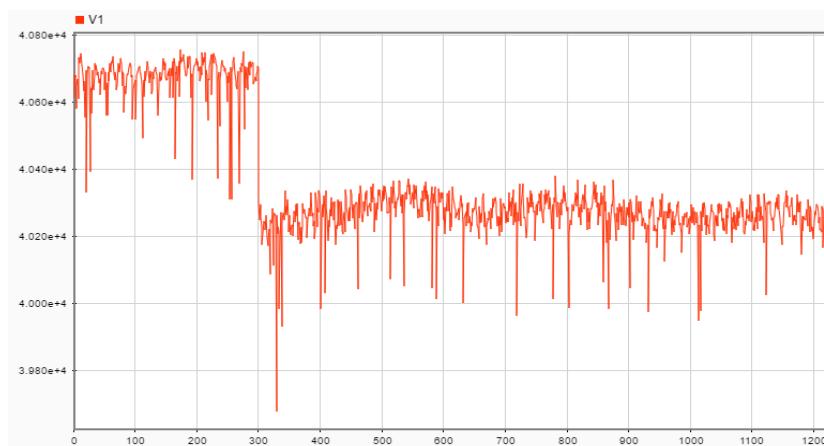
Potencia instantánea a la salida de la subestación Policentro.



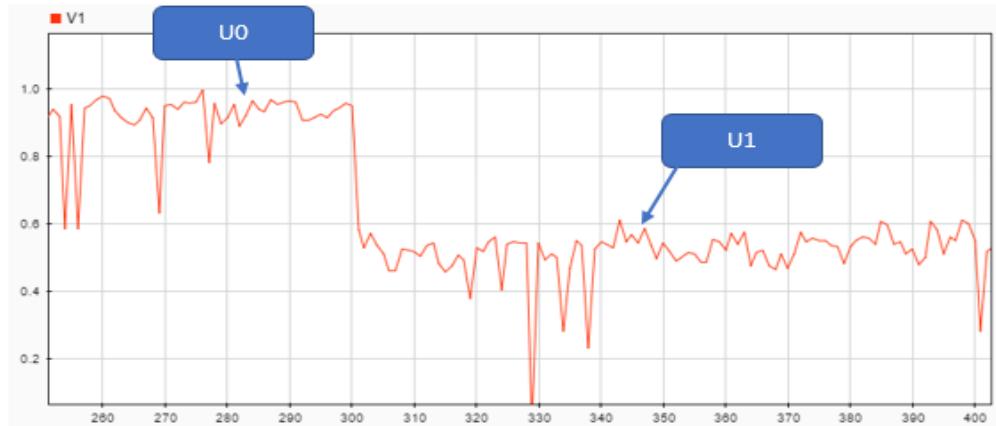
Valores eficaces de la potencia activa de la demanda:



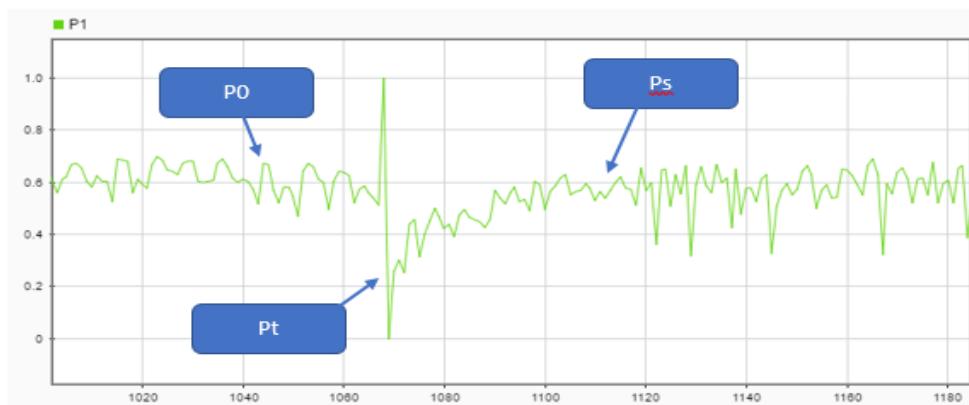
Valores eficaces de la tensión.



Selección de puntos en la representación de tensión antes y después de la perturbación.



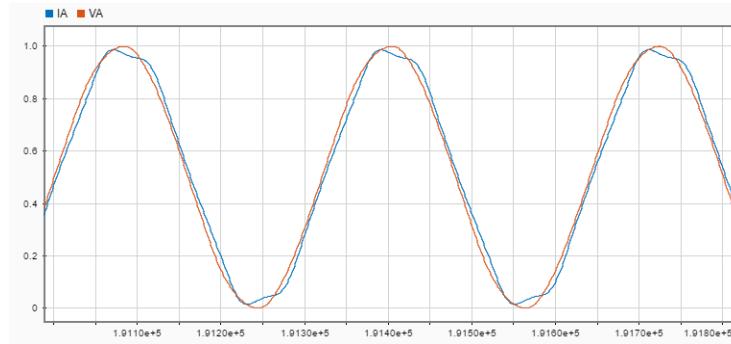
Selección de puntos en la representación de potencia activa antes, durante y después de la perturbación.



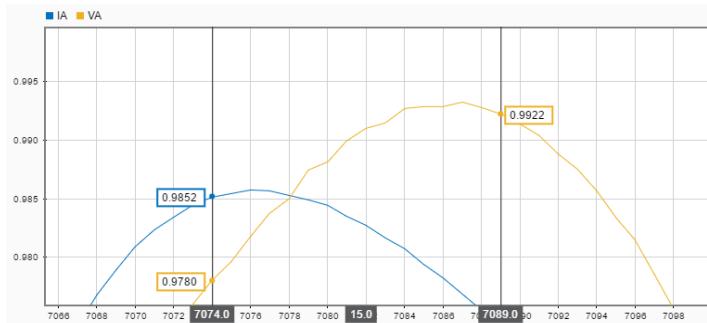
APÉNDICE I

MODELO DE LA SEGUNDA PERTURBACIÓN.

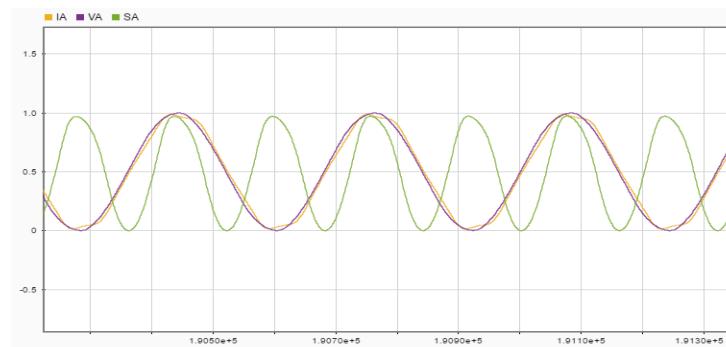
Señales de voltaje y corriente a la salida de la subestación Policentro:



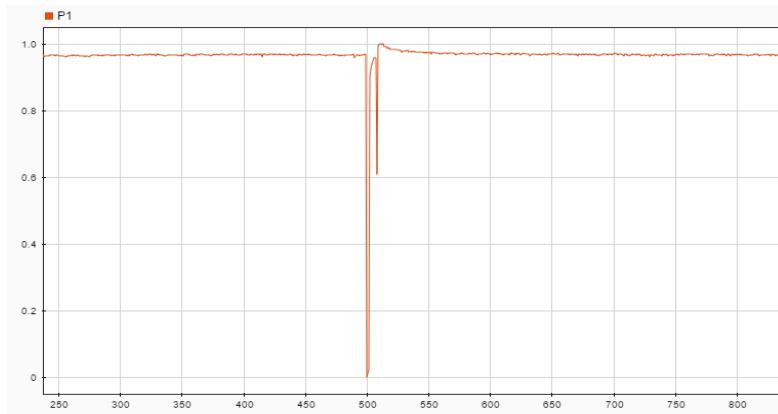
Desfase entre las curvas de voltaje y corriente para la obtención del factor de potencia:



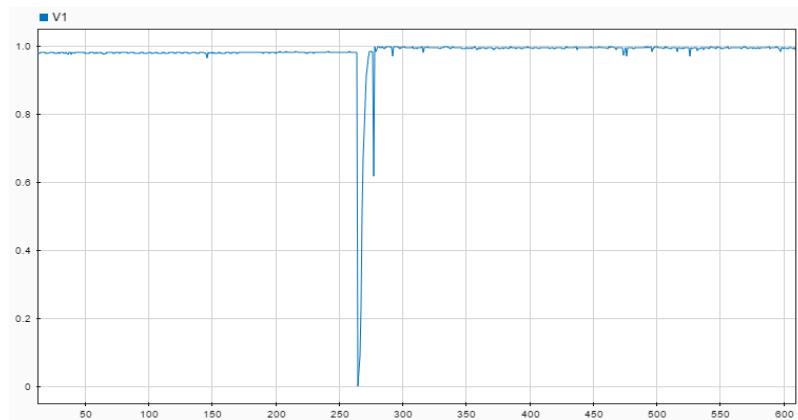
Potencia instantánea a la salida de la subestación Policentro.



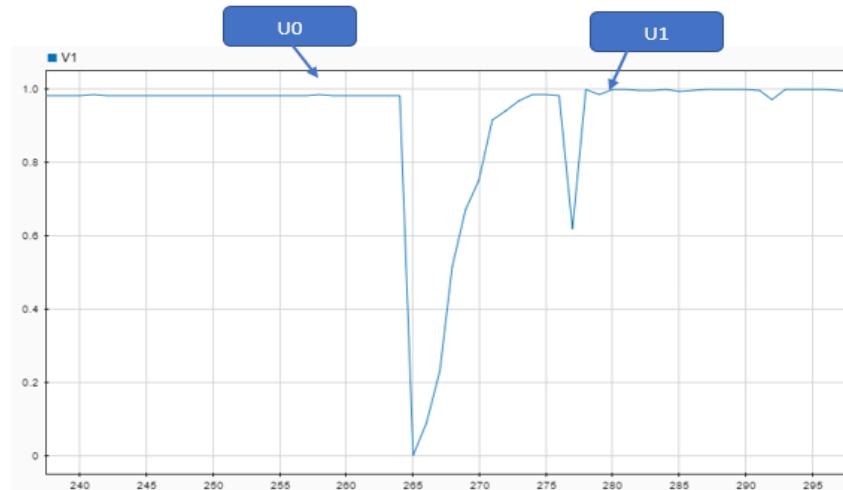
Valores eficaces de la potencia activa de la demanda:



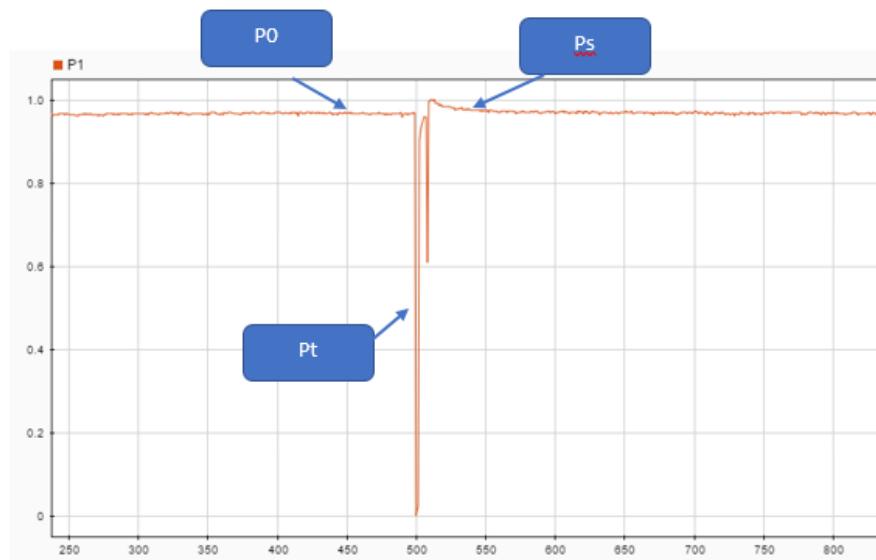
Valores eficaces de la tensión.



Selección de puntos en la representación de tensión antes y después de la perturbación.



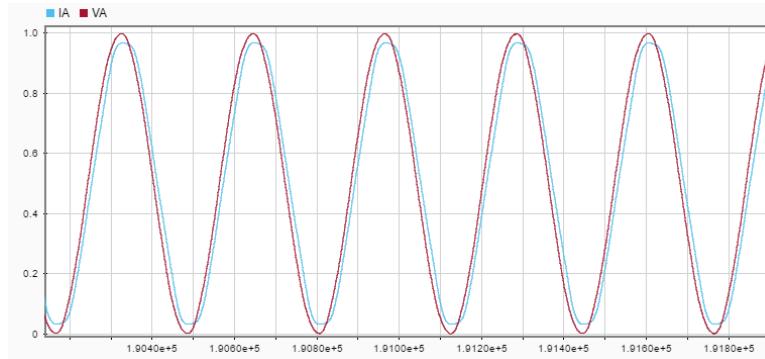
Selección de puntos en la representación de potencia activa antes, durante y después de la perturbación.



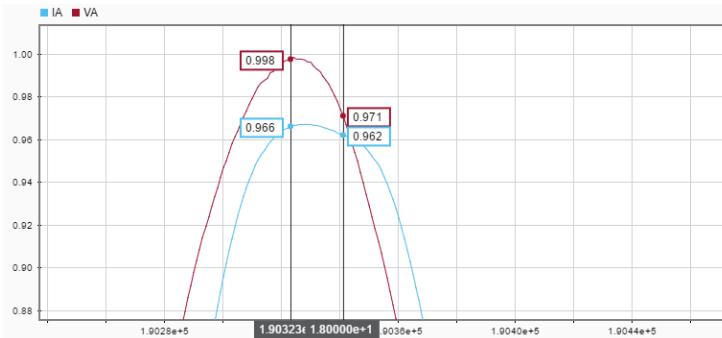
APÉNDICE J

MODELO DE LA TERCERA PERTURBACIÓN.

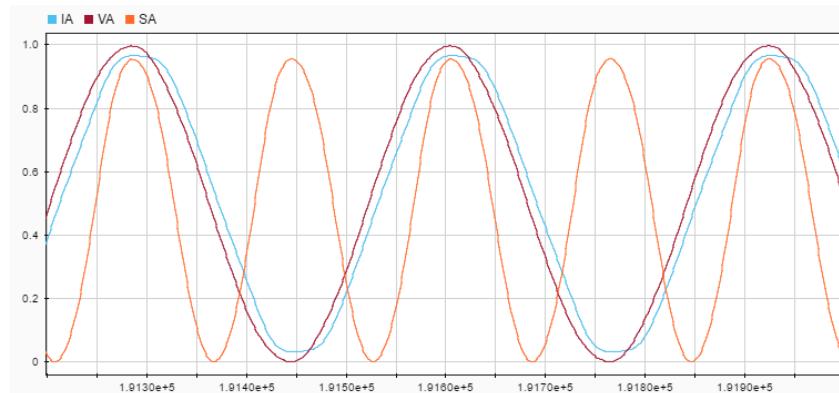
Señales de voltaje y corriente a la salida de la subestación Policentro:



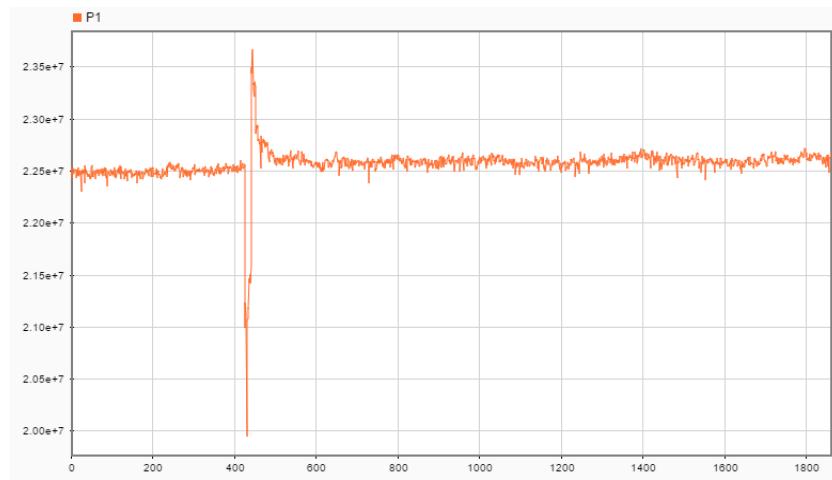
Desfase entre las curvas de voltaje y corriente para la obtención del factor de potencia:



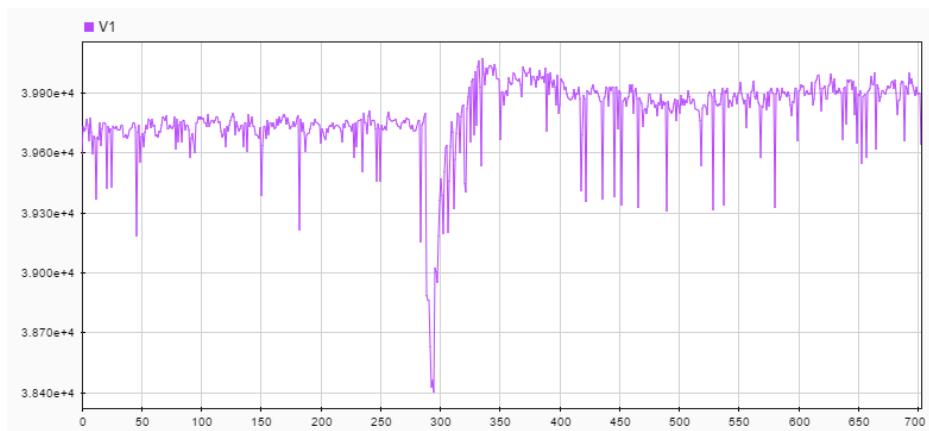
Potencia instantánea a la salida de la subestación Policentro.



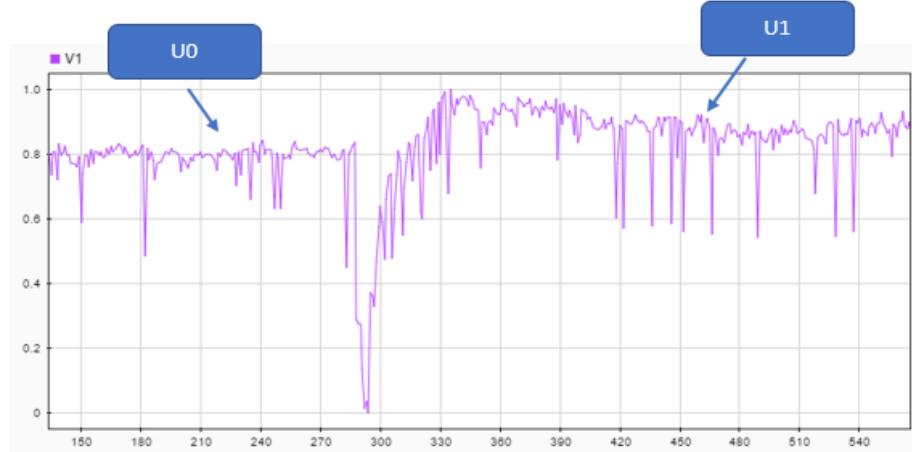
Valores eficaces de la potencia activa de la demanda:



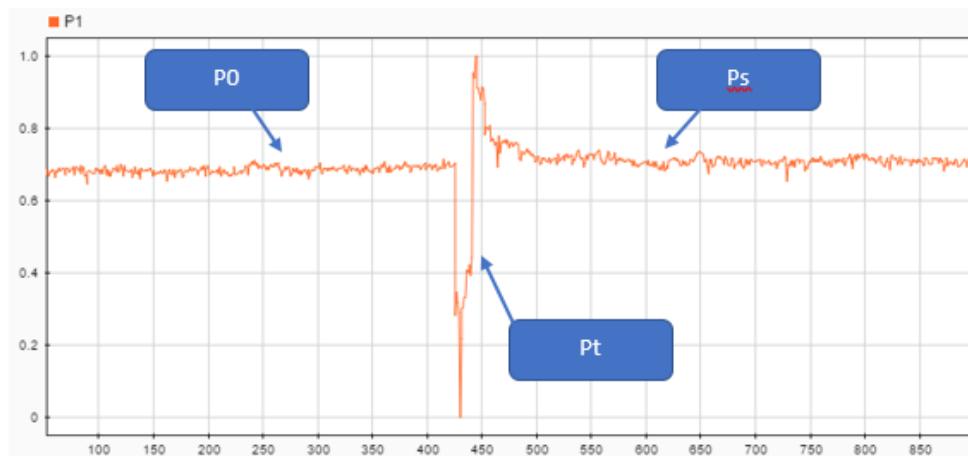
Valores eficaces de la tensión.



Selección de puntos en la representación de tensión antes y después de la perturbación.



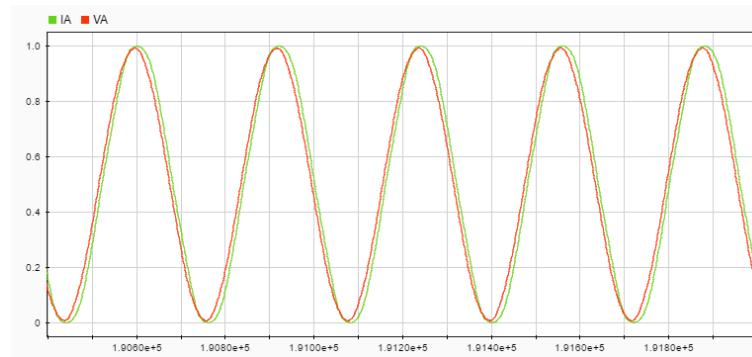
Selección de puntos en la representación de potencia activa antes, durante y después de la perturbación.



APÉNDICE K

MODELO DE LA CUARTA PERTURBACIÓN.

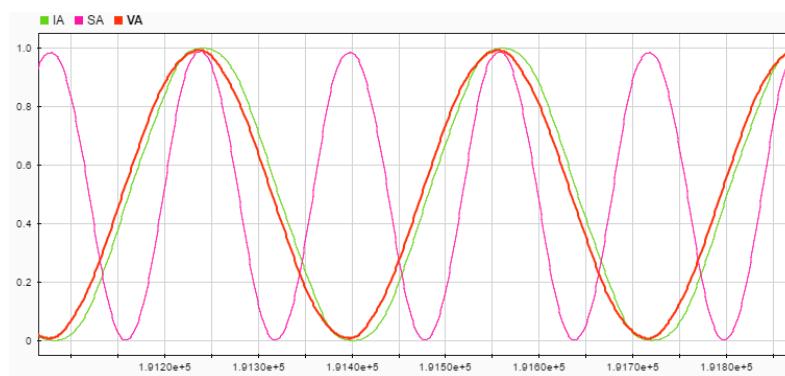
Señales de voltaje y corriente a la salida de la subestación Policentro:



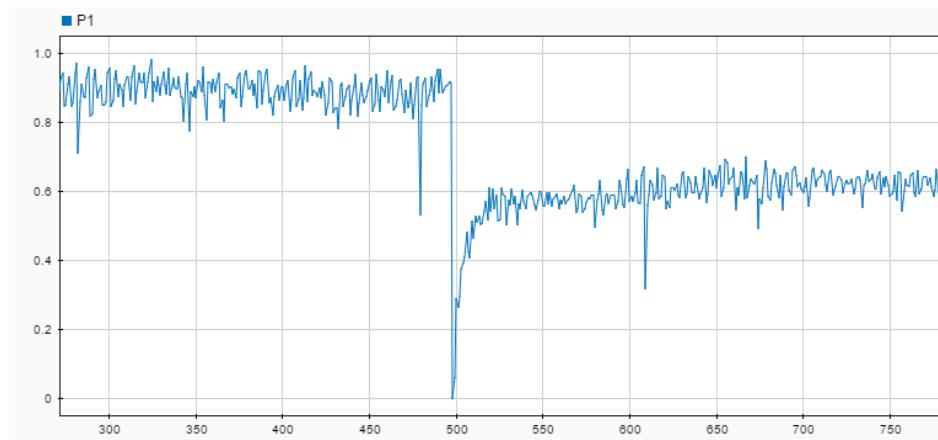
Desfase entre las curvas de voltaje y corriente para la obtención del factor de potencia:



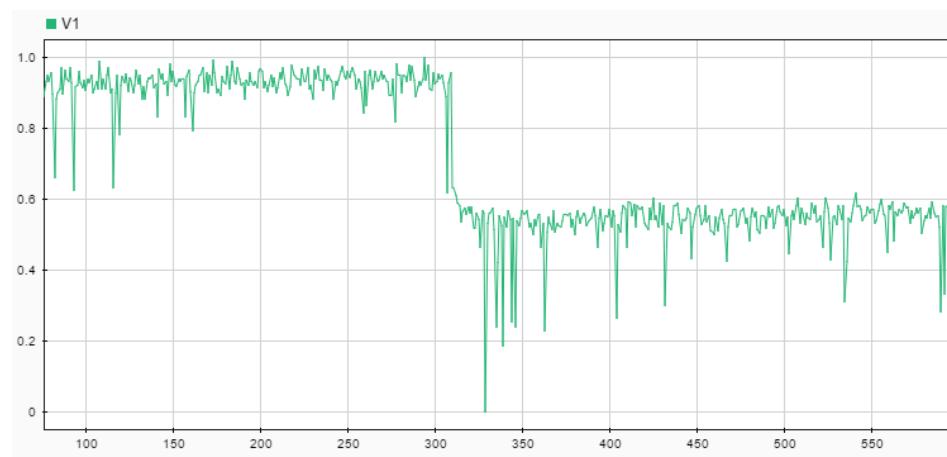
Potencia instantánea a la salida de la subestación Policentro.



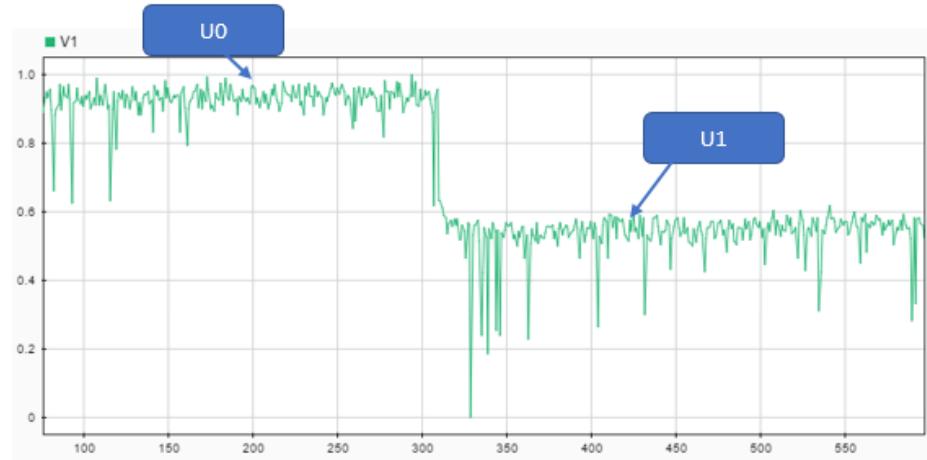
Valores eficaces de la potencia activa de la demanda:



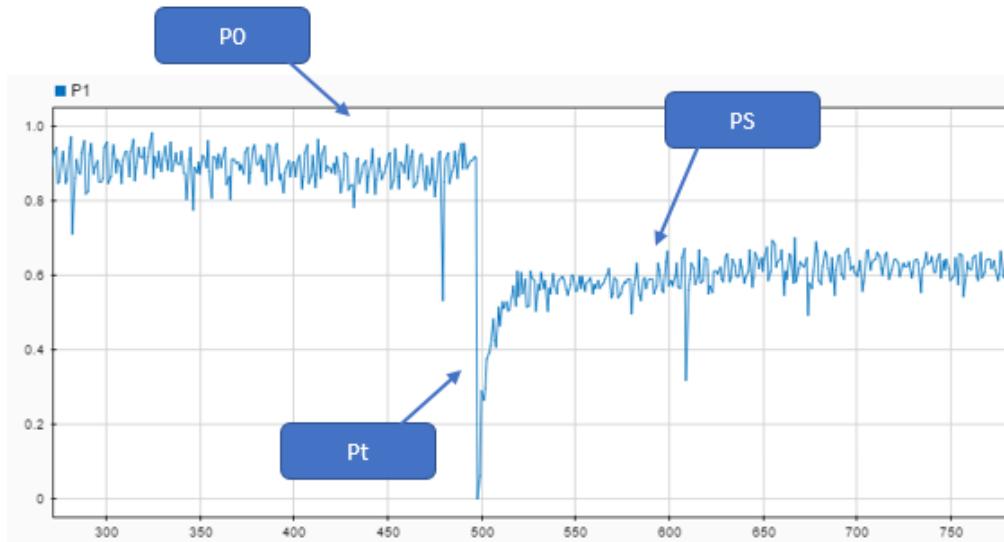
Valores eficaces de la tensión.



Selección de puntos en la representación de tensión antes y después de la perturbación.



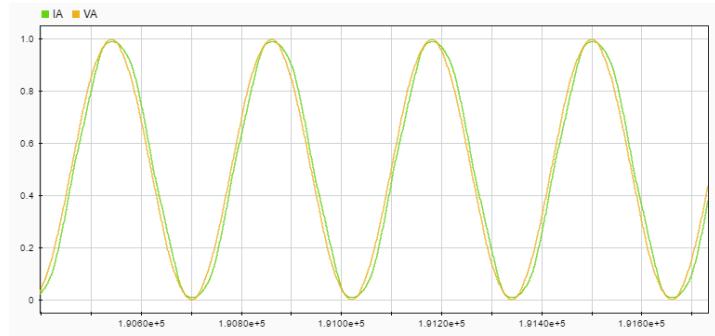
Selección de puntos en la representación de potencia activa antes, durante y después de la perturbación.



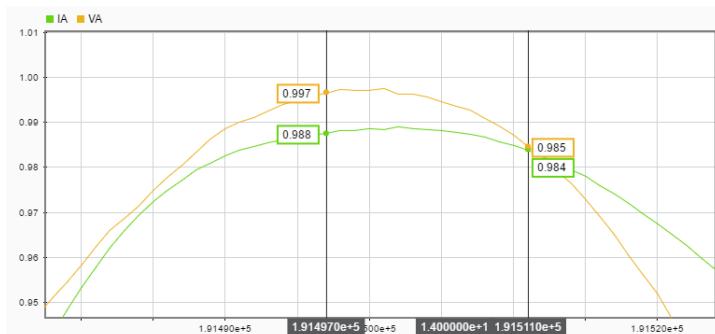
APÉNDICE L

MODELO DE LA QUINTA PERTURBACIÓN.

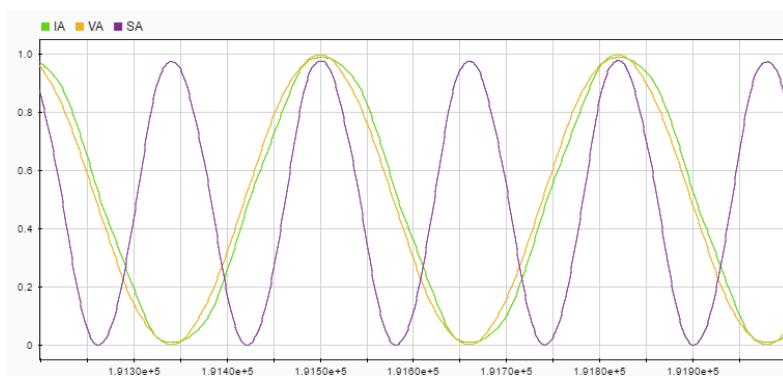
Señales de voltaje y corriente a la salida de la subestación Policentro:



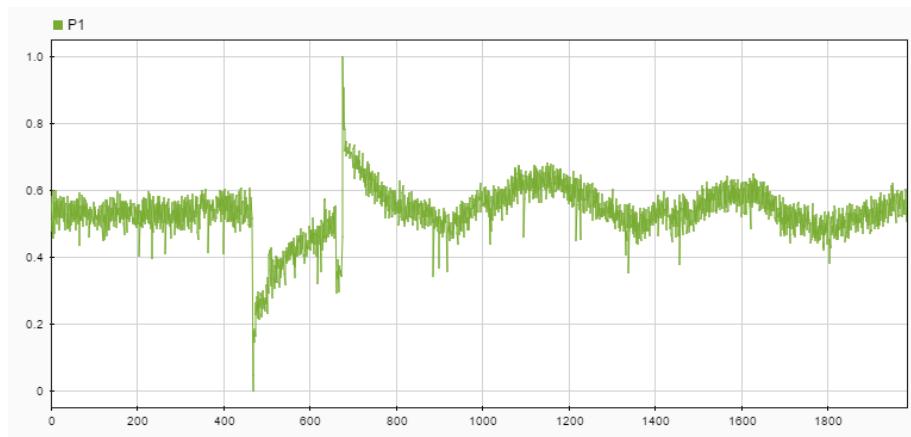
Desfase entre las curvas de voltaje y corriente para la obtención del factor de potencia:



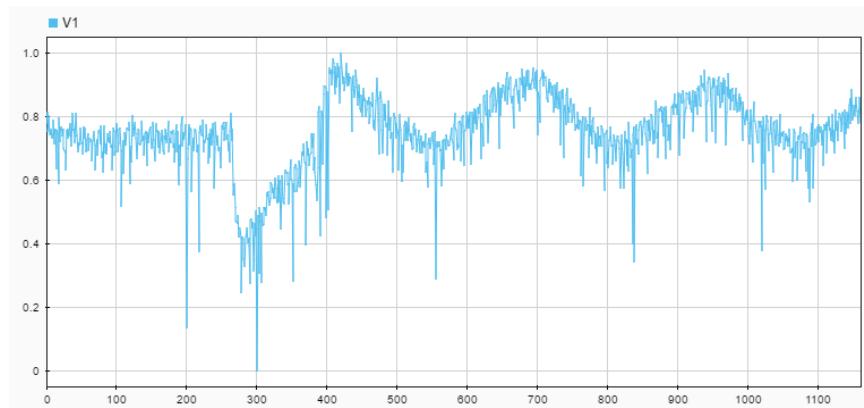
Potencia instantánea a la salida de la subestación Policentro.



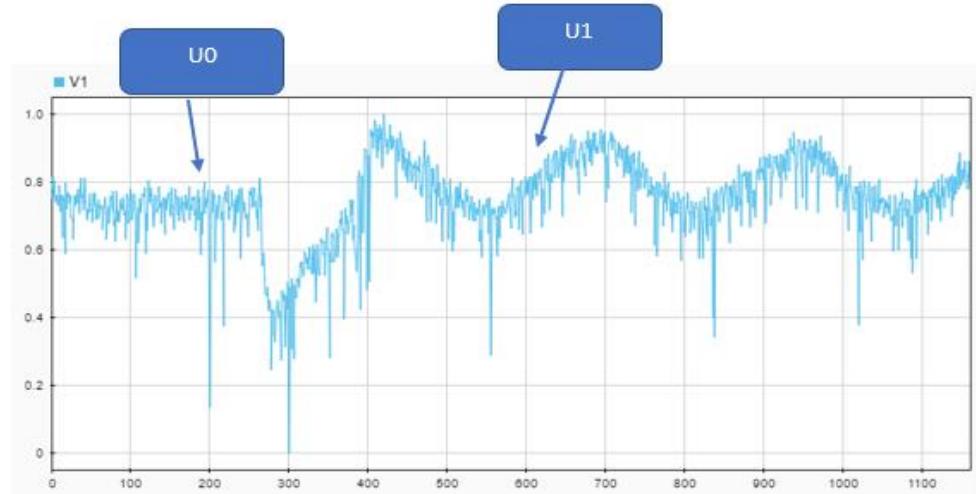
Valores eficaces de la potencia activa de la demanda:



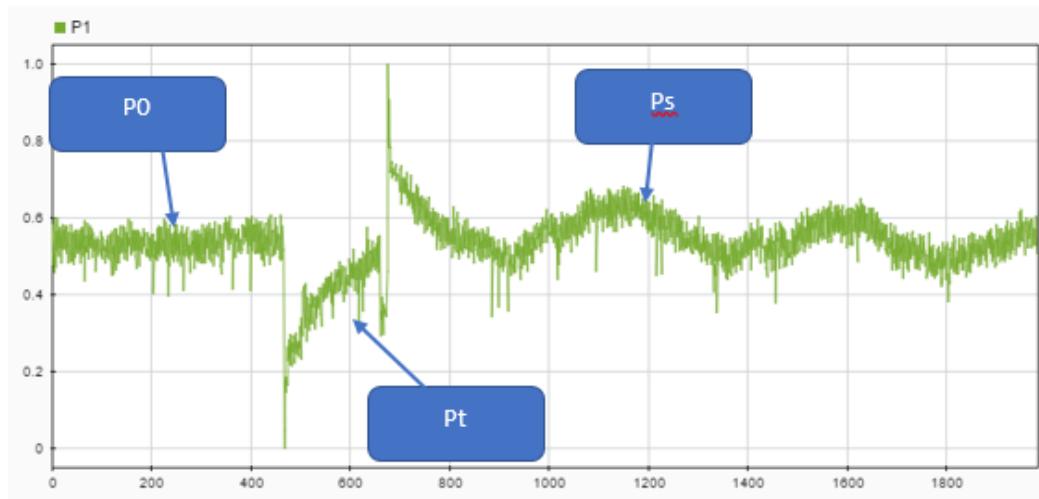
Valores eficaces de la tensión.



Selección de puntos en la representación de tensión antes y después de la perturbación.



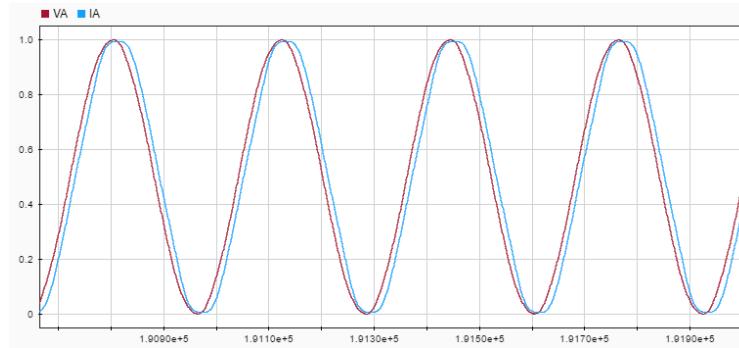
Selección de puntos en la representación de potencia activa antes, durante y después de la perturbación.



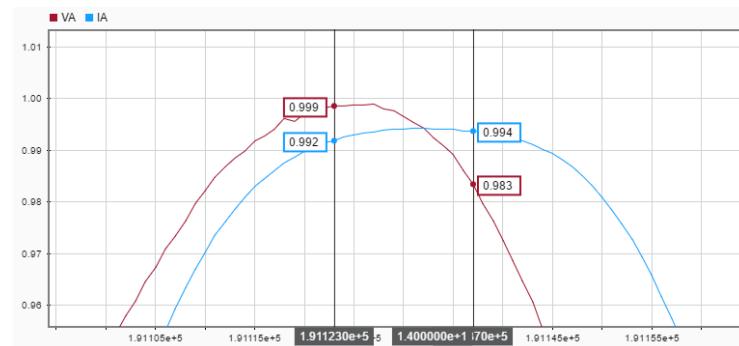
APÉNDICE M

MODELO DE LA SEXTA PERTURBACIÓN.

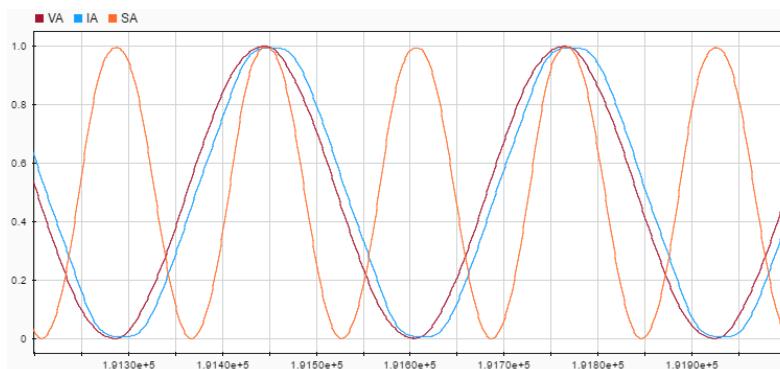
Señales de voltaje y corriente a la salida de la subestación Policentro:



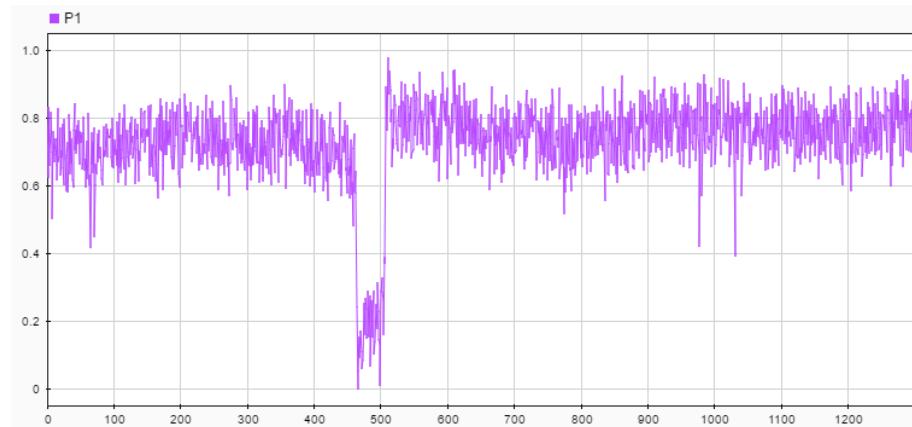
Desfase entre las curvas de voltaje y corriente para la obtención del factor de potencia:



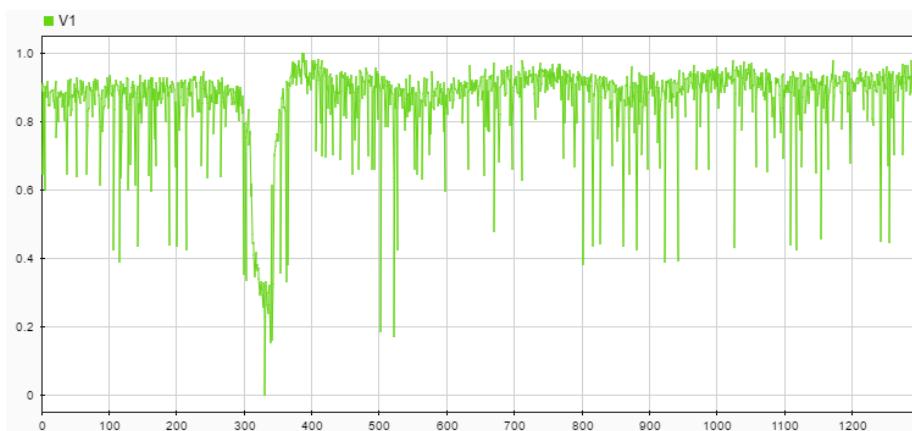
Potencia instantánea a la salida de la subestación Policentro.



Valores eficaces de la potencia activa de la demanda:



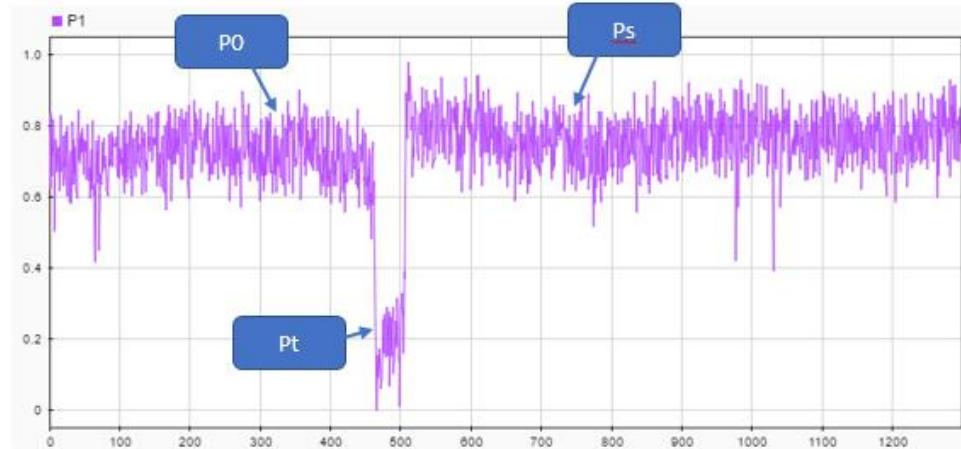
Valores eficaces de la tensión.



Selección de puntos en la representación de tensión antes y después de la perturbación.



Selección de puntos en la representación de potencia activa antes, durante y después de la perturbación.



BIBLIOGRAFÍA

- Aromataris, L., Amera, P., & Riubrugent, J. (2001). Estudio Dinámico de Estabilidad de Tensión comparando Modelos de Carga Estática y Carga Dinámica.
- Caicedo, G. (2002). Modelos para estimar la demanda en Sistemas de Distribución. *Ciencia y Computación*, 11(1), 35-44.
- Concordia, C., & Ihara, S. (1982). Load Representation in Power System Stability Studies. *PAS-101*, 969-977.
- Fernandez-Hernandez, J. (2007). *Cálculo simplificado del valor medio y eficaz de una forma de onda* (Vol. 271).
- Herrera, R., Mora, J., & Patiño, J. (2013). Simulación y Validación del modelo polinomial de la carga utilizando ATP. *Scientia et Technica* 18.
- IEEE Task Force. (1993). Load Representation for Dynamic Performance Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(2).
- Kulkarni, A., Gao, W., & Ning, J. (2010). Study of Power System Load Shedding Scheme Based on Dynamic Simulation. *ieeexplore*.
- Kundur, P. *Power System Stability and Control*.
- Lopez, K., Perez, S., & Rodriguez, L. (2016). Optimal under voltage load shedding based on voltage stability index. *Ingeniería e Investigación*, 36(2), 43-50.
- Maitra, A., Gaikwad, A., Pourbeik, P., & Brooks, D. Load Model Parameter Derivation Using an Automated Algorithm and Measured Data.
- Monagas, E., Palacios, B., & Rueda, M. (2010). Análisis de la estabilidad transitoria de un sistema de generación y trasmisión eléctrica. Caso: Electricidad de Valencia - Corpoelec. *Revista Ingeniería UC*, 17(3), 57-67.
- Perez., S., Rodriguez., L., & Mora, J. (2015). Obtención de modelos de carga compuestos en sistemas de potencia para análisis dinámico: revisión y aplicación. *Tecnura*, 19(44), 171-189.
- Quezada, M. (2013). Modelos de carga y sus efectos en estudios sistémicos: aplicaciones al SING.

Renmu, H., Jin, m., & Hill, D. (2006). *Composite Load Modeling via Measurement Approach* (Vol. 21).

Rodriguez, L., Perez, S., & Mora, J. (2013). Estimación de parámetros de un modelo de carga de recuperación exponencial empleando técnicas metahurísticas. *Scientia et Technica*, 18, 453-462.

Zhang, J., Yan, A., Chen, Z., & Gao, K. (2008). Dynamic Synthesis Load Modeling Approach Based on Load Survey and Load Curves Analysis. 1067-1071.