

**CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA PARA UN CIRCUITO  
A 13.2 KV SEGÚN LA NORMA NTC 5001 EN PRESENCIA DE  
UNA CARGA NO LINEAL**



**Yineth Lorena Correa Muñoz  
Juliana Andrea Montilla López**

Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de electrónica, instrumentación y control  
Ingeniería en Automática Industrial  
Popayán, Colombia  
2019

**CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA PARA UN CIRCUITO  
A 13.2 KV SEGÚN LA NORMA NTC 5001 EN PRESENCIA DE  
UNA CARGA NO LINEAL**

**Yineth Lorena Correa Muñoz  
Juliana Andrea Montilla López**

Trabajo de grado presentado para optar por el título de:  
**Ingeniero en Automática Industrial**

Director:

Mg. Francisco Franco Obando Díaz

Codirectora:

Mg. Judy Cristina Realpe Chamorro

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de electrónica, instrumentación y control

Ingeniería en Automática Industrial

Popayán, Colombia

2019

## Dedicatoria

*A mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida.*

*A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación profesional y como ser humano.*

*Lorena Correa*

*A mis padres y hermana por ser el núcleo fundamental de mi vida.*

*Juliana Montilla*

## **Agradecimientos**

*Agradezco a Dios por bendecir mi vida, por guiarme a lo largo de mi existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.*

*Doy gracias a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas. Gracias a todos mis tíos que siempre han apoyado a mi familia, así como mis abuelitas y primos/as.*

*A mi compañera y amiga Juliana, por su paciencia y colaboración durante la elaboración de este proyecto de grado; para mí fue realmente un privilegio y un honor poder compartir esta etapa contigo, pues finalmente se vieron reflejados los esfuerzos de tantas noches de traspasado, fines de semana completos y algunos desacuerdos.*

*Gracias al Mg. Francisco Franco Obando quien con su experiencia, conocimiento y motivación nos orientó durante todo el desarrollo de esta investigación, la cual culminó con éxito.*

*por supuesto a todos mis amigos que durante toda la carrera se convirtieron en mi segunda familia.*

*Lorena Correa*

*Inicialmente, deseo expresar mi sincera gratitud a mis padres Diego y Gladys por haberme brindado la oportunidad de estudiar esta carrera, pues sin su respaldo este proyecto no se habría efectuado. A mi hermana Angie, por ser esa amiga incondicional que ha estado ahí para mí, escuchándome, aconsejándome, alentándome y confortándome. A mis abuelas, tíos(as), que con su apoyo a nuestra familia han contribuido a alcanzar este logro y a mis queridos primos por ser un soporte y grata compañía.*

*De igual manera, agradezco al Mg. Francisco Franco por haberme permitido trabajar bajo su dirección, por guiar con su experiencia y conocimientos el desarrollo de esta investigación, con la exigencia y paciencia necesaria para alcanzar el éxito de la misma.*

*Asimismo, agradezco a mis compañeros y amigos a quienes he tenido el placer de conocer a lo largo de estos años, gracias por su amistad; primordialmente, a mi compañera de tesis Lorena Correa por desarrollar junto a mí este proyecto, por motivarme con su perseverancia y firmeza, pues sin su apoyo y colaboración este trabajo no habría sido posible.*

*Juliana Montilla*

# Contenido

Lista de Tablas	VII
Lista de Figuras	IX
Introducción	1
<b>1 Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodologías de evaluación en punto de conexión común (NTC 5001)</b>	<b>3</b>
1.1 Calidad de la potencia según NTC 5001 . . . . .	3
1.2 Revisión de normatividad sobre calidad de potencia eléctrica . . .	4
1.3 Descripción general de la norma técnica colombiana NTC 5001 . .	5
1.4 Perturbaciones en las redes eléctricas según NTC 5001 . . . . .	6
1.4.1 Armónicos . . . . .	6
1.4.2 Muestras de tensión ( <i>notches</i> ) . . . . .	11
1.4.3 Variaciones de frecuencia . . . . .	13
1.4.4 <i>Flickers</i> . . . . .	15
1.4.5 Variaciones de tensión de estado estable . . . . .	16
1.4.6 Sobretensiones transitorias . . . . .	16
1.4.7 Interrupciones de corta duración (<1 min) . . . . .	18
1.4.8 Hundimientos de tensión ( <i>Sags</i> ) . . . . .	19
1.4.9 Elevaciones de tensión <i>Swells</i> . . . . .	21
1.4.10 Variaciones de tensión de larga duración (subtensiones y sobretensiones) . . . . .	23
1.4.11 Interrupciones de larga duración ( $\geq 1min$ ) . . . . .	25
1.4.12 Desbalance de tensión . . . . .	26
1.5 Indicadores adicionales de energía en el usuario final . . . . .	27
1.5.1 Evaluación de corriente RMS . . . . .	27
1.5.2 Desbalance de corriente . . . . .	28
1.5.3 Factor de potencia (FP) . . . . .	28
1.6 Efecto de cargas no lineales sobre la calidad de la potencia . . . .	29

<b>2 Estructura de red de Popayán</b>	<b>33</b>
2.1 Descripción del sistema eléctrico de potencia . . . . .	33
2.1.1 Descripción del circuito 32 . . . . .	35
2.2 Simulación del circuito 32 . . . . .	38
2.2.1 Flujo de carga . . . . .	40
<b>3 Efecto de cargas no lineales en el circuito 32 de la ciudad de Popayán</b>	<b>46</b>
3.1 Modelo de cargas no lineales . . . . .	46
3.1.1 Modelo estático de carga . . . . .	47
3.1.2 Modelo dinámico de carga . . . . .	49
3.2 Selección de cargas de prueba . . . . .	50
3.3 Simulación del modelo de recuperación exponencial en Simulink-Matlab . . . . .	51
3.4 Simulación del circuito 32 en presencia de una carga no lineal . .	54
3.5 Perturbaciones en el circuito 32 en presencia de cargas no lineales	58
3.5.1 Armónicos . . . . .	60
3.5.2 Variaciones de tensión de estado estable . . . . .	64
3.5.3 Desbalances de tensión . . . . .	68
3.5.4 Interrupciones de corta duración . . . . .	71
3.5.5 Variaciones de tensión de larga duración . . . . .	73
3.5.6 Interrupciones de larga duración ( $\geq 1$ min) . . . . .	73
3.5.7 Perturbaciones no presentes en la simulación . . . . .	75
<b>4 Cuantificación de la calidad de potencia por efecto de las cargas no lineales</b>	<b>79</b>
4.1 Análisis de resultados . . . . .	79
<b>5 Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>84</b>
5.1 Conclusiones . . . . .	84
5.2 Trabajos futuros . . . . .	86
<b>Bibliografía</b>	<b>89</b>
<b>Anexos</b>	<b>91</b>
<b>A Parámetros de elementos y nodos del circuito 32</b>	<b>92</b>
A.1 Diagrama unifilar de la figura 2.3 . . . . .	92
A.2 Parámetros del circuito 32 modificado en el capítulo 3 . . . . .	94

<b>B Configuración armónica de las cargas no lineal</b>	<b>95</b>
<b>C Resultados de perturbaciones para la carga típica</b>	<b>98</b>
<b>D Resultados del circuito 32 ante la conexión de la carga no lineal</b>	<b>100</b>

# Lista de Tablas

1.1	Clasificación de perturbaciones . . . . .	6
1.2	Valores de referencia de THD . . . . .	8
1.3	Valores límite de distorsión de $D_h$ y $TDD$ , % $I_L$ (armónicos impares)	11
1.4	Limites de distorsión . . . . .	13
1.5	Valores de referencia de variaciones de frecuencia . . . . .	15
1.6	Valores de referencia del Plt . . . . .	16
1.7	Valores indicativos de $Sags$ . . . . .	21
1.8	Porcentaje máximo de desbalance de tensión . . . . .	27
1.9	Porcentaje máximo de desbalance de corriente . . . . .	28
1.10	Porcentaje de residencias colombianas con dispositivos eléctricos	31
1.11	Perturbaciones de calidad de potencia eléctrica según NTC 5001 .	32
2.1	Resumen de resultados del análisis de flujo de carga . . . . .	41
3.1	Valores de $\alpha$ y $\beta$ de cargas residenciales típicas . . . . .	48
3.2	Estimación de consumo eléctrico edificios sector Santo Domingo .	51
3.3	Parámetros de cargas no lineales para modelo de recuperación exponencial . . . . .	57
3.4	Máxima distorsión armónica individual de tensión y distorsión armónica total. . . . .	61
3.5	Relación $I_{sc}/I_L$ para cada carga . . . . .	62
3.6	Distorsión de demanda total y máxima distorsión armónica individual de corriente . . . . .	64
3.7	Variaciones de tensión en los nodos del circuito . . . . .	65
3.8	Porcentaje de desbalance de tensión en cada nodo del circuito . .	69
4.1	Porcentajes excedidos por nodo para armónicos de tensión . . . .	80
4.2	Porcentaje de armónicos de corriente excedidos por elemento . .	81
A.1	Equivalente de red . . . . .	92
A.2	Nodos . . . . .	92
A.3	Líneas . . . . .	93



A.4	Transformador de dos devanados . . . . .	93
A.5	Transformador de tres devanados . . . . .	93
A.6	Cargas . . . . .	93
A.7	Maquina sincrónica . . . . .	94
A.8	Interruptores . . . . .	94
A.9	Nodos . . . . .	94
A.10	Carga típica . . . . .	94
C.1	Variaciones de tensión para carga típica . . . . .	98
C.2	Desbalance de tensión para carga típica . . . . .	99
D.1	Respuesta gráfica del circuito 32 ante la conexión de cargas no lineales . . . . .	100

# Lista de Figuras

1.1	Armónicos de tensión o corriente . . . . .	7
1.2	Descripción de una muesca de tensión . . . . .	12
1.3	Definición de variaciones de frecuencia . . . . .	14
1.4	<i>Fickers</i> . . . . .	15
1.5	Onda de tensión afectada por una sobretensión transitoria . . . . .	17
1.6	Interrupción de corta duración . . . . .	18
1.7	Descripción del hundimiento de tensión <i>Sag</i> . . . . .	20
1.8	Ventana de clasificación de <i>Sags</i> . . . . .	21
1.9	Descripción de la elevación de tensión <i>Swell</i> . . . . .	22
1.10	Sobretensión . . . . .	24
1.11	Subtensión . . . . .	24
1.12	Desbalance de tensión . . . . .	26
1.13	FP $\cos\Theta$ , valores límite $-25^\circ < \Theta < 25^\circ$ . . . . .	29
2.1	Diagrama unifilar del circuito 32 . . . . .	36
2.2	Distribución geográfica del circuito 32 . . . . .	38
2.3	Diagrama unifilar del circuito 32 en Neplan . . . . .	39
2.4	Resultados del análisis de flujo de carga del circuito 32 . . . . .	41
2.5	Curva de demanda del circuito 32 . . . . .	42
2.6	Curva de potencia activa y reactiva de FLORIDA2 . . . . .	43
2.7	Curvas de potencia en las líneas 1 y 2 POP_PPAL2_POP_CENTRO1 . . . . .	44
2.8	Potencia activa y reactiva en POP_NORTE1 . . . . .	45
3.1	Tipos de modelo de carga . . . . .	47
3.2	Modelo de carga de recuperación exponencial en Simulink . . . . .	52
3.3	Magnitud de voltaje VT de modelo de carga no lineal . . . . .	53
3.4	Comportamiento exponencial de la magnitud de la corriente IT para cada carga . . . . .	54
3.5	Circuito 32 de la ciudad de Popayán con carga no lineal . . . . .	55
3.6	Interfaz del modelo definido por usuario en NEPLAN . . . . .	56
3.7	Evento a . . . . .	58

3.8	Evento b en NEPLAN . . . . .	59
3.9	Evento c en NEPLAN . . . . .	59
3.10	Variaciones de tensión con y sin carga no lineal . . . . .	67
3.11	Comparación desbalances de tensión con y sin carga no lineal . . . . .	70
3.12	Clasificación de los eventos de tensión según estándar IEEE 1159-1995 . . . . .	71
3.13	Interrupciones de corta duración para cargas no lineales . . . . .	72
3.14	Simulación de sobretensiones para cargas no lineales . . . . .	74
3.15	Simulación de interrupciones de larga duración para cargas no lineales . . . . .	76
3.16	Conexión de lampara fluorescente a 90 % de carga instalada . . . . .	77
3.17	Conexión de televisor a 10 % de carga instalada . . . . .	78
3.18	Conexión de televisor a 90 % de carga instalada . . . . .	78
B.1	Fuente armónica Televisor . . . . .	95
B.2	Fuente armónica Refrigerador . . . . .	96
B.3	Fuente armónica Lámpara Fluorescente . . . . .	96
B.4	Fuente armónica del Aire Acondicionado . . . . .	97

---

## Introducción

---

El presente documento muestra la evaluación de la calidad de la potencia eléctrica en un circuito simulado a 13.2 kV por medio del software de simulación Neplan, en presencia de cargas no lineales, con base en los parámetros establecidos por la norma NTC 5001, tomando como caso de estudio el circuito 32 de la ciudad de Popayán.

Para esto se expone en primer lugar la cimentación conceptual de la norma NTC 5001, donde se hace una descripción de cada fenómeno asociado a la calidad de la potencia eléctrica, los límites en los cuales deben estar y su forma de medición, además se definen las cargas no lineales y la forma en la cual afectan a los elementos de una red eléctrica de distribución; posteriormente se describe la red de distribución que gestiona el operador de red Compañía Energética de Occidente (CEO), en el departamento del Cauca y en especial el área geográfica que compone el circuito 32 de Popayán, el cual fue simulado en el software Neplan con la finalidad de analizar el comportamiento del mismo cuando tiene una carga típica conectada; en tercer lugar se realizó un análisis del circuito en presencia de 4 diferentes cargas residenciales de tipo no lineal, las cuales son caracterizadas por un modelo de recuperación exponencial cuando se aplican varios eventos y se clasifican las perturbaciones presentes. Finalmente se muestra el nivel de cumplimiento de la norma NTC 5001 a partir de la cuantificación de los parámetros que afectaron a la red simulada durante el estudio por variaciones en la magnitud de la carga instalada, permitiendo determinar que la presencia de cargas no lineales conectadas a la red afecta la calidad de la potencia eléctrica mediante la inserción de perturbaciones, así mismo el factor de potencia incide en la presencia de perturbaciones en la red. Al finalizar, se muestran las conclu-

siones del proyecto a partir de la cuantificación del efecto de la no linealidad de las cargas en la calidad de potencia del circuito simulado.

# Capítulo 1

---

## **Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodologías de evaluación en punto de conexión común (NTC 5001)**

---

En este capítulo se abarca la Norma Técnica Colombiana NTC 5001 [1] titulada “Calidad de la Potencia Eléctrica. Límites y metodología de evaluación en punto de conexión común”, comprendiendo cada uno de los parámetros asociados a la calidad de la potencia que esta norma abarca, las metodologías de evaluación y los valores de referencia establecidos para cada uno de ellos, con el propósito de identificar parámetros que permitan evaluar las condiciones de operación de los sistemas eléctricos de potencia y regular su calidad. De igual forma se busca exponer los efectos de la conexión de cargas no lineales en circuitos de media tensión a 13.2 kV, las cuales deforman la onda de tensión y corriente deteriorando la calidad de la potencia eléctrica del sistema.

### **1.1. Calidad de la potencia según NTC 5001**

La calidad del servicio de energía comprende tres aspectos fundamentales: la continuidad del suministro, la calidad de la potencia eléctrica y la calidad de la atención al cliente; así pues, la continuidad del servicio alude al número de interrupciones y su duración, mientras que la calidad de la potencia eléctrica atañe a las características de la forma de onda correspondiente a las señales de tensión y corriente [2].

En cuanto a la calidad de la potencia eléctrica, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) en la resolución 024 de 2005 [3], establece diversas

definiciones aplicables a los sistemas de distribución de energía eléctrica y la conceptualiza como un conjunto de calificadores de fenómenos inherentes a la forma de onda de la tensión, que permiten juzgar el valor de las desviaciones de la tensión instantánea con respecto a su forma y frecuencia estándar, así como el efecto que dichas desviaciones pueden tener sobre los equipos eléctricos u otros sistemas [4]. Ahora bien, la norma NTC 5001 tiene un concepto similar al dispuesto por la CREG, pero se diferencia en que define la calidad de la potencia como un conjunto de características, en un punto dado del sistema de potencia para un tiempo determinado, las cuales se evalúan respecto a parámetros técnicos que han sido instaurados previamente, con el propósito de brindar al usuario una admisible prestación del servicio eléctrico [1]. Cabe mencionar que el término calidad de potencia hace referencia a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos como: armónicos, transitorios, caídas y elevaciones de voltaje, entre otros, los cuales caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado del sistema de potencia [5].

## **1.2. Revisión de normatividad sobre calidad de potencia eléctrica**

A nivel internacional existen entes que se han encargado de proponer estándares donde se establecen recomendaciones y parámetros que permiten normalizar los niveles de voltaje y corriente, con el objeto de favorecer la compatibilidad entre el equipo del usuario y el sistema eléctrico y así, garantizar la calidad de la potencia. Aunque cada país desarrolla normas propias, los estándares relacionados con la calidad de la potencia eléctrica más conocidos son de origen estadounidense y europeo, y han servido de referencia para la regulación de esta en muchos países.

En el caso colombiano, se encuentra la norma NTC 5001, la cual se ha fundamentado en normas y estándares internacionales como el estándar IEEE<sup>1</sup> 519-1992 [6], que trata de las prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia debido a cargas no lineales [7], con la finalidad de prevenir problemas en la calidad de la potencia. Así mismo, la norma EN<sup>2</sup> 50160 [8] proporciona las principales características de voltaje en los terminales de suministro para un usuario de red, en sistemas públicos de distribución para baja y media tensión en condiciones normales de

---

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

<sup>2</sup>Estándar europeo

operación, con el objetivo de describir los parámetros del voltaje de alimentación sobre: frecuencia, magnitud, forma de onda y simetría de los tres voltajes de fase. La metodología propuesta por la NTC 5001 para la medición de las perturbaciones se basa en la norma internacional IEC<sup>3</sup> 61000-4-30 [9] que define métodos de medición e interpretación de resultados para parámetros de calidad de la potencia en sistemas de suministro de energía de 50/60 Hz.

Cabe destacar que el estándar IEEE 1159 [5] no se encuentra referenciado en la norma NTC 5001, sin embargo, es una normativa importante por sus aportes a la regulación de la calidad de la potencia ya que trata del monitoreo de la calidad eléctrica de los sistemas de alimentación de Corriente Alterna (CA) monofásicos y polifásicos; y describe los diversos fenómenos electromagnéticos que pueden transmitirse a través de un sistema de potencia, definiendo las condiciones nominales y las desviaciones que pueden generarse dentro de la fuente del suministro, en el equipo de carga o por interacciones entre la fuente y la carga. De igual manera analiza las técnicas de medición, aplicación e interpretación de los resultados del monitoreo [5].

### **1.3. Descripción general de la norma técnica colombiana NTC 5001**

La norma técnica colombiana NTC 5001 establece metodologías de evaluación y valores de referencia de los parámetros asociados a la calidad de la potencia eléctrica en el punto de conexión común entre el operador de red y el usuario para todos los niveles de tensión, bajo condiciones normales de operación [1]. Es importante aclarar que estos valores de referencia, determinan las condiciones dentro de las cuales se espera que se encuentren los parámetros del suministro de energía eléctrica, para considerar que la calidad de la potencia sea aceptable [1].

Hay que tener en cuenta que esta norma abarca los disturbios más representativos de normas y estándares internacionales como el IEEE 519:1992, EN 50160, e IEC 61000-4-7:1993, clasificando las perturbaciones de calidad de la potencia de acuerdo a su duración, como se presentan en la Tabla 1.1:

---

<sup>3</sup>Comisión electrotécnica Internacional



**Tabla 1.1:** Clasificación de perturbaciones

<b>Perturbaciones</b>	<b>Tipo</b>
	Variaciones de tensión de estado estable Desbalance de tensión <i>Flicker</i>
Larga duración o permanentes	Interrupciones de larga duración (>1 min) Armónicos de tensión Armónicos de corriente Muestras de tensión Variaciones de tensión de larga duración (subtensiones y sobretensiones)
Lentas	Interrupciones de corta duración (<1 min) Hundimientos ( <i>Sags</i> ) Elevaciones ( <i>Swells</i> ) Variaciones de frecuencia
Rápidas	Sobretensiones transitorias

Fuente: NTC 5001. Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en punto de conexión común [1].

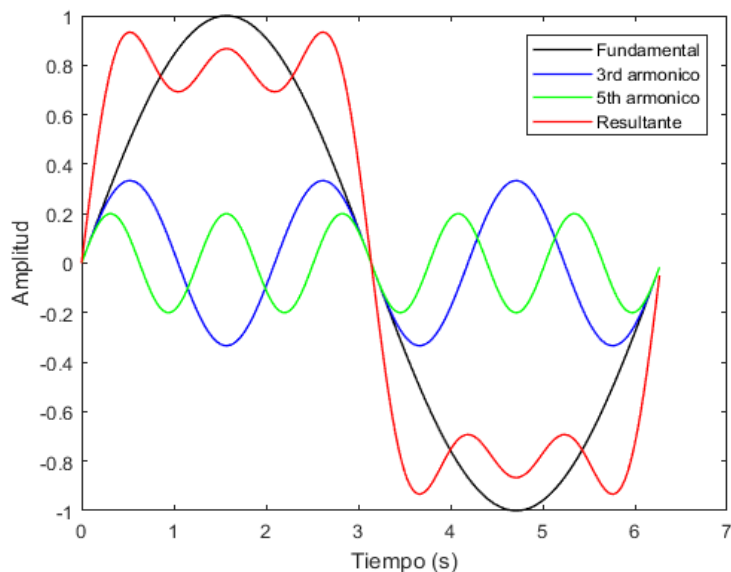
A continuación, se explica cada una de las perturbaciones que esta norma comprende, además de sus causas, efectos, valores de referencia y métodos de evaluación.

## **1.4. Perturbaciones en las redes eléctricas según NTC 5001**

### **1.4.1. Armónicos**

Son ondas sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (60 Hz), cabe destacar que este disturbio tiene dos parámetros fundamentales, la frecuencia y la magnitud del mismo. La norma NTC 5001 clasifica 2 tipos: los armónicos de corriente y los armónicos de tensión, a su vez define los armónicos característicos y no característicos. En la figura 1.1 se presenta la distorsión armónica de tensión o corriente en una onda sinusoidal.

**Figura 1.1:** Armónicos de tensión o corriente



Fuente: Elaboración propia

#### 1.4.1.1. Armónicos de tensión

Los armónicos de tensión son causados por dispositivos cuya característica tensión\corriente es no lineal y sus efectos se ven reflejados en el aumento de pérdidas y calentamiento en equipos eléctricos; la dificultad en arranques de procesos, fallas u operación prematura de dispositivos de protección; fallas de sincronización de disparo en equipos como variadores de velocidad; y sobre o subfacturación de energía, por alteración del Valor Medio Cuadrático (RMS, *Root Mean Square*) rms de la tensión y/o corriente que pasa por el medidor de energía.

La norma NTC 5001 propone un periodo de evaluación para este disturbio de una (1) semana, efectuando las mediciones en el PCC, en condiciones normales de operación se deben calcular los percentiles al 95 % de los parámetros presentados a continuación. Cabe mencionar que los percentiles calculados para cada fase, deben ser menores o iguales a los valores de referencia.

Distorsión armónica individual de tensión:

$$D_V = \frac{V_h}{V_I} \times 100 \% \quad (1.1)$$

Distorsión armónica total de tensión:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} V_h^2}}{V_I} \times 100 \% \quad (1.2)$$

En donde,

- $V_h$  Magnitud de la componente armónica individual (Voltios rms).
- $h$  Orden del armónico (sin condición específica,  $h$  será como mínimo igual a 40).
- $V_I$  Magnitud de la componente fundamental (Voltios rms).

Los valores de  $D_V$  y  $THD_V$  calculados para cada fase no deben sobrepasar los valores presentados en la Tabla 1.2:

**Tabla 1.2:** Valores de referencia de THD

Rango de tensión nominal de la red $V_n$	Distorsión armónica individual (%)	Distorsión armónica total $THD_V$ (%)
$1\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	3.0	5.0
$69\text{kV} < V_n \leq 161\text{kV}$	1.5	2.5
$V_n \geq 69\text{kV}$	1.0	1.5

Fuente: NTC 5001 [1].

#### 1.4.1.2. Armónicos de corriente

Las cargas no lineales conectadas al sistema de suministro eléctrico producen corrientes armónicas que se propagan al sistema de potencia y causan distorsiones armónicas de tensión que afectan a otros usuarios. Estas perturbaciones son causadas por dispositivos cuya característica de tensión\corriente es no lineal, por ejemplo, convertidores electrónicos de potencia para variadores de velocidad de motores, rectificadores, hornos de arco, etc. Sus efectos se reflejan en fallas, sobrecalentamiento y daños en transformadores con baja carga, motores, generadores y balastos electrónicos; en la pérdida de datos de equipos de

memoria y en el aumento de pérdidas de energía de los equipos eléctricos.

El periodo de evaluación de estos armónicos es de una semana, con un intervalo de agregación de 10 minutos, para realizar su análisis se debe calcular los percentiles para los siguientes parámetros, en condiciones normales de operación los percentiles calculados no deben sobrepasar los valores de referencia.

Distorsión armónica individual de corriente:

$$D_h = \frac{I_h}{I_L} \times 100 \% \quad (1.3)$$

Distorsión total de demanda:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100 \% \quad (1.4)$$

En donde,

$I_h$  Magnitud de la componente armónica individual.

$h$  Orden del armónico (sin condición específica,  $h$  será como mínimo igual a 40).

$I_L$  Corriente de carga de demanda máxima en el PCC (componente de frecuencia fundamental-Amperios rms).

La distorsión armónica total de corriente  $THD_i$  se define como:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100 \% \quad (1.5)$$

$$TDD = THD_i \frac{I_1}{I_L} \quad (1.6)$$

En donde,

- $I_h$  Magnitud de la componente armónica individual.
- $h$  Orden del armónico (sin condición específica,  $h$  será como mínimo igual a 40).
- $I_1$  Magnitud de la componente fundamental (Amperios rms).
- $I_L$  Corriente de carga de demanda máxima en el PCC (componente de frecuencia fundamental-Amperios rms).

Los límites de corriente armónica estarán basados en el tamaño de la carga con respecto a la capacidad del sistema de potencia al cual la carga está conectada. Los valores de referencia de distorsión total de demanda  $TDD$  indicados a en la Tabla 1.3, establecen la distorsión de corriente máxima, permitida en el PCC.

En donde,

- $I_{SC}$  Mínima corriente de corto circuito trifásica que se tenga disponible para hacer la evaluación en el punto de conexión común (amperios rms). En el caso de un usuario monofásico se debe utilizar la corriente de corto monofásica.
- $I_L$  Corriente de carga de demanda máxima en el PCC (componente de frecuencia fundamental-Amperios rms).

**Tabla 1.3:** Valores límite de distorsión de  $D_h$  y  $TDD$ , %  $I_L$  (armónicos impares)

<b>Límites de distorsión en corriente para sistemas de distribución</b>						
<b>120V &lt; Vn ≤ 69kV</b>						
<b>Relación</b>	<b>&lt;11</b>	<b>11 ≤ h ≤ 17</b>	<b>17 ≤ h ≤ 23</b>	<b>23 ≤ h ≤ 35</b>	<b>h ≥ 35</b>	<b>TDD</b>
<b>&lt;20</b>	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
<b>20 &lt;50</b>	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
<b>50 &lt;100</b>	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
<b>100 &lt;1000</b>	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
<b>&gt;1000</b>	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

<b>Límites de distorsión en corriente para sistemas de subtransmisión</b>						
<b>69kV &lt; Vn ≤ 161kV</b>						
<b>&lt;20</b>	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
<b>20 &lt;50</b>	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
<b>50 &lt;100</b>	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
<b>100 &lt;1000</b>	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
<b>&gt;1000</b>	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0

<b>Límites de distorsión de corriente para sistemas de transmisión</b>						
<b>(Vn &gt; 161kV), generación distribuida y cogeneración</b>						
<b>&lt;25</b>	1,0	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
<b>25 &lt;50</b>	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
<b>50</b>	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Fuente: NTC 5001 [1]

#### 1.4.2. Muecas de tensión (*notches*)

La norma NTC 5001 define las muecas de tensión como un disturbio electro-magnético periódico de voltaje que afecta la forma de onda; además, menciona que estas son ocasionadas por la operación normal de dispositivos electrónicos de potencia, cuando la corriente es conmutada de una fase a otra. Puede agregarse que estas distorsiones producen fallas de funcionamiento en los dispositivos de control asociados a los equipos y oscilaciones de alta frecuencia que inducen tensiones en otros circuitos. Cabe destacar que la norma NTC 5001

agrega que los intervalos del disturbio, generalmente no sobrepasan los 0.5 ciclos.

La distorsión armónica total de la señal debida a las muescas se define como:

$$THD_{max} = 0.074 \sqrt{\frac{A_N}{\rho}} \% \quad (1.7)$$

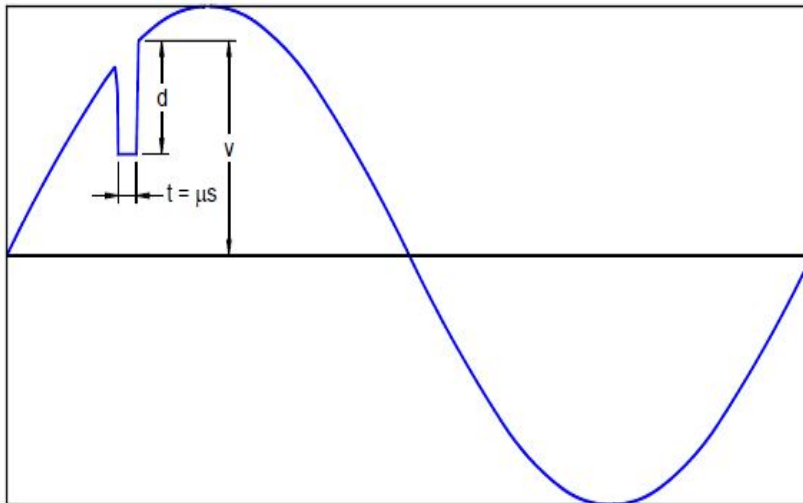
En donde,

$\rho$  Relación de la inductancia total con respecto a la del sistema.

$A_N$  Área de la muesca medida en voltios-microsegundos.

La figura 1.2 representa gráficamente una muesca de tensión y las variables que son usadas para el cálculo de profundidad y área de la muesca, las cuales se describen a continuación.

**Figura 1.2:** Descripción de una muesca de tensión



Fuente: NTC 5001 [1]

**Profundidad de la muesca:** la profundidad promedio de la tensión de línea de la muesca en la onda senoidal de tensión.

$$\%N_d = V \times 100 \quad (1.8)$$

**Área de la muesca:** es el producto de la profundidad de la muesca en voltios multiplicada por el ancho de esta medida en microsegundos.

$$A_N = t \times d[V - \mu s] \quad (1.9)$$

La NTC 5001 establece límites para la distorsión armónica total, la profundidad y el área de la muesca, los cuales son mostrados en la tabla 4, estos umbrales son recomendados para sistemas de baja tensión, donde el área de la muesca es fácil de medir en un osciloscopio. Cabe destacar que la Tabla 1.4 define los límites de distorsión según los tipos y se puede notar que las aplicaciones especiales como hospitales y aeropuertos tienen menor porcentaje de distorsión, ya que son cargas de primera categoría y deben conservar una alta calidad de potencia eléctrica.

**Tabla 1.4:** Límites de distorsión

Límites de distorsión			
	Aplicaciones especiales[Símbolo]	Sistema General	Sistema dedicado†
<b>Profundidad de la muesca</b>	10 %	20 %	50 %
<b>THD (tensión)</b>	3 %	5 %	10 %
<b>Área de la muesca (AN)††</b>	16400	22800	36500

NOTA: el valor de AN en sistemas diferentes a 480 V se multiplica por V/480

Hospitales y aeropuertos

† Un sistema dedicado es exclusivamente dedicado al rectificador de carga

†† En Voltios-microsegundos

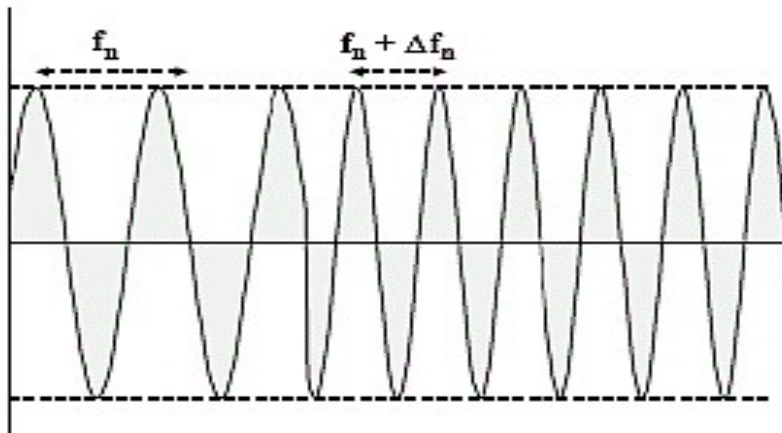
Fuente: NTC 5001 [1]

### 1.4.3. Variaciones de frecuencia

Estos disturbios se definen como la desviación de la frecuencia fundamental del sistema de potencia de su valor nominal especificado (60 Hz), este valor es determinado por la velocidad de los alternadores en las estaciones de generación. En cualquier instante, la frecuencia depende del equilibrio entre la carga y la capacidad de la generación disponible; cuando este equilibrio dinámico cambia, ocurren pequeños cambios en la frecuencia. A continuación, se mostrará en la figura 1.3, los cambios de la frecuencia en una señal.



**Figura 1.3:** Definición de variaciones de frecuencia



Fuente: Aspectos regulatorios sobre la calidad de la energía eléctrica en Colombia [7]

Las variaciones de frecuencia normalmente son causadas por el balance entre la carga y la potencia producida por las estaciones de generación, los cambios de este balance en el tiempo, se pueden observar como pequeñas variaciones de frecuencia. Adicionalmente, el sistema puede estar sujeto a variaciones más grandes como consecuencia de cortocircuitos, cambios de carga o generación; la magnitud y duración de estas variaciones temporales depende de la severidad de la perturbación. Por otro lado, estas perturbaciones provocan comportamientos erróneos en equipos electrónicos, interrupciones del servicio, variaciones de tensión por deslastre de cargas y errores de sincronización de frecuencia, en usuarios que manejan cargas con grandes rectificadores.

De acuerdo con la NTC 5001, el intervalo de la medida debe ser de una semana. Los valores de frecuencia tomados cada 10 min se agruparán para un período de una semana, de tal forma que puedan ser evaluados los valores de percentil del 95%, los valores máximos y mínimos, excluidos los valores de frecuencia durante períodos de interrupciones del servicio, de manera que se encuentren dentro del rango permisible presentado en la Tabla 1.5.

**Tabla 1.5:** Valores de referencia de variaciones de frecuencia

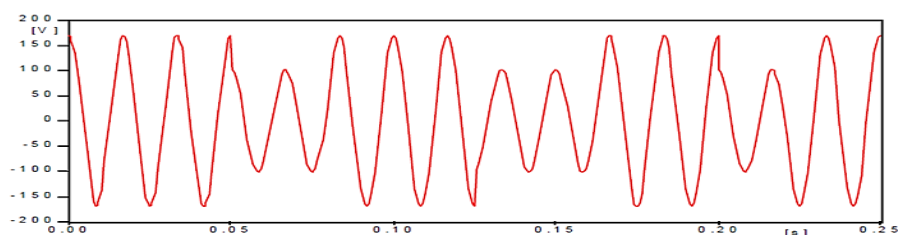
Tipo de red	Frecuencia aceptable durante el 95 % de los datos tomados de una semana	Frecuencia aceptable durante el 100 %
Redes acopladas por enlaces síncronos a un sistema interconectado	Todos mayores a 59.8 Hz y todos menores a 60.2 Hz	Todos mayores a 57.5 Hz y todos menores a 63 Hz
Redes sin conexión síncrona a un sistema interconectado (redes de distribución en regiones no interconectadas e islas)	Todos mayores a 59.8 Hz y todos menores a 60.2 Hz	Todos mayores a 51 Hz y todos menores a 69 Hz

Fuente: NTC 5001 [1]

#### 1.4.4. *Flickers*

El *flicker* es definido como un efecto producido sobre la percepción visual humana por una emisión cambiante de luz debido a iluminación sujeta a fluctuaciones en la tensión de suministro. Acorde con la norma NTC 5001, las causas de estas perturbaciones son variaciones repetitivas de tensión provocadas por ciertas cargas industriales tales como máquinas soldadoras, grandes motores con cargas variables, hornos de arco, entre otros. Además, estos disturbios pueden ocasionar sensación de inestabilidad, irritabilidad y cansancio visual; efecto estroboscópico y variaciones en niveles de iluminación de bombillas incandescentes y bombillas de descarga. La figura 1.4 muestra una onda de tensión afectada por *flickers*.

**Figura 1.4:** *Fickers*



Fuente: Calidad del servicio de energía eléctrica [10]

Para evaluar el impacto de los *flickers* se utiliza como indicador la Severidad de Larga Duración ( $P_{lt}$ ), el cual se evalúa en un periodo de 2 horas y se mide de acuerdo a las indicaciones del estándar IEC 61000-4-15:2003, siendo el punto de medida el PCC y período de evaluación de una semana esto implica un número de 84 datos de  $P_{lt}$  por fase. Es necesario calcular el percentil al 95 % de estos valores por cada fase y compararlo con el valor de referencia para el  $P_{lt}$  (véase la Tabla 1.6). Los tres percentiles deben ser menores o iguales al valor de referencia, de acuerdo al nivel de tensión. Bajo condiciones de operación normales, la severidad de larga duración ( $P_{lt}$ ) para el *flicker*, causado por fluctuaciones en la tensión de suministro debe cumplir con los valores de referencia mostrados en la Tabla 1.6.

**Tabla 1.6:** Valores de referencia del Plt

Rango de tensión	Valor de referencia Plt
$V_n < 69$ kV	1.0 Pu.
$V_n \geq 69$ kV	0.8 Pu.

Fuente: NTC 5001 [1]

#### 1.4.5. Variaciones de tensión de estado estable

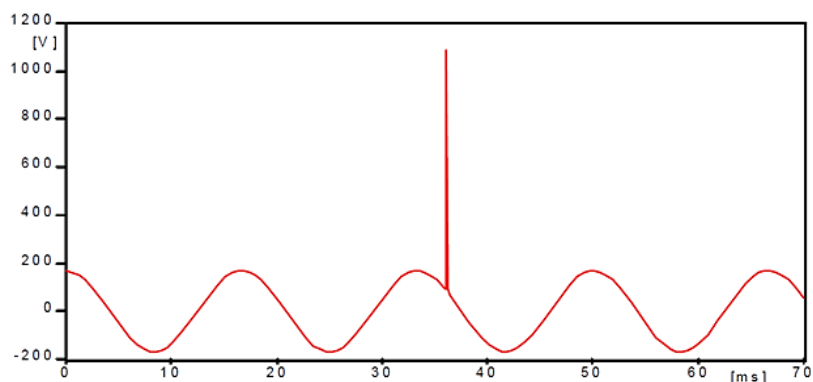
Las variaciones de tensión de estado estable son un aumento o disminución de tensión con respecto a su valor de referencia, que tienen una duración mayor a 1 minuto. En un sistema eléctrico lo que ocasiona estas perturbaciones son las variaciones de grandes cargas eléctricas y de las condiciones de diseño del sistema; sus efectos se ven reflejados en los cambios de velocidad en máquinas de inducción, salida de operación de motores y reducción o aumento de la potencia de salida del banco de condensadores.

La norma NTC 5001 establece un periodo de medida de una semana con un periodo de agregación de 10 minutos. El 100 % de los valores registrados en la semana debe estar dentro del  $\pm 10$  % de la tensión de alimentación declarada.

#### 1.4.6. Sobretensiones transitorias

De acuerdo con la norma NTC 5001, las sobretensiones transitorias son perturbaciones de muy corta duración, que regularmente duran menos de medio ciclo

**Figura 1.5:** Onda de tensión afectada por una sobretensión transitoria



Fuente: Calidad del servicio de energía eléctrica [10]

y se clasifican en impulsivas y oscilatorias. La figura 1.5 corresponde a una señal afecta por una sobretensión transitoria impulsiva.

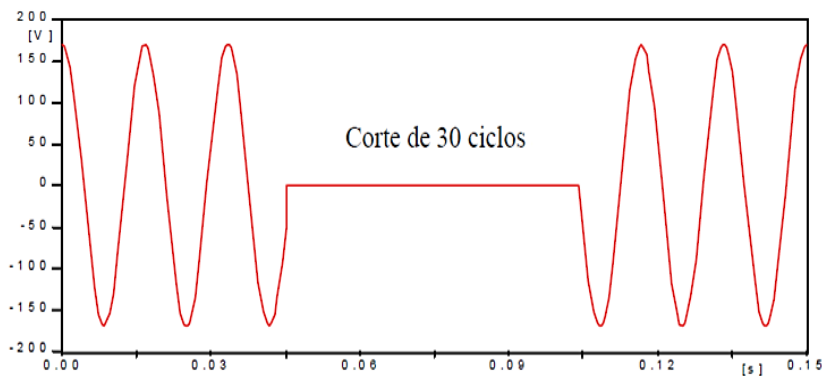
Sucesos como: maniobras en líneas y equipos del sistema (energización de bancos de condensadores), conmutación de cargas inductivas que producen transitorios rápidos, descargas atmosféricas, maniobras, alta frecuencia de disparos en tiristores, fallas en cableado e interruptores, cierre de relés y contactos, desconexión y arranque de cargas con alto consumo de energía; pueden provocar este tipo de fenómenos, además, la propagación de estas sobretensiones en un sistema de potencia puede deteriorar o provocar la falla inmediata del aislamiento en toda clase de equipos ya sean del usuario o de la subestación, decrecimiento del tiempo de ocurrencia entre las fallas del equipo, fallas en los componentes de las fuentes de potencia de equipos electrónicos, disparos molestos de variadores de velocidad ajustables, daños en discos duros y pérdida de memoria en PCs.

En cuanto a metodologías de evaluación para esta perturbación, la norma NTC 5001 se limita a recomendar el uso de un dispositivo con un ancho de banda que supere la frecuencia del fenómeno para la medición de su onda de tensión y su valor de cresta instantáneo. En circuitos abiertos, restringe los valores de cresta de estas sobretensiones a 6kV dentro de las instalaciones y entre 10 kV y 20 kV externamente. La fijación de estos valores de referencia depende de la tensión de aislamiento de las instalaciones de baja tensión; sin embargo, no se encuentran valores de referencia claramente establecidos para este tipo de perturbación dentro de esta norma.

### 1.4.7. Interrupciones de corta duración (<1 min)

Las interrupciones de corta duración ocurren cuando el valor eficaz de la tensión (tensión de alimentación) es menor al 10 % de la tensión declarada  $V_c$  en todas las fases (caso trifásico) y tardan menos de 1 minuto. La figura 1.6 es un ejemplo de este tipo de interrupción en una onda de tensión.

**Figura 1.6:** Interrupción de corta duración



Fuente: Calidad del servicio de energía eléctrica [10]

La presencia de estas perturbaciones en redes de media tensión se debe comúnmente a la operación de dispositivos de protección del sistema contra cortocircuitos, provocando interrupciones de procesos y equipos, salida y reinicio de sistemas, desprogramación de PLCs y equipo electrónico, caída de sistemas telefónicos, apagado de sistemas de iluminación, y mala operación de equipos electrónicos y de iluminación.

La norma NTC 5001 destaca que este tipo de perturbaciones no son tenidas en cuenta por la regulación vigente en Colombia para cálculos de confiabilidad y continuidad del servicio debido a su corta duración; pero dado que afectan la calidad de la potencia en las redes eléctricas, esta norma recomienda evaluarlos durante un periodo de una semana registrando la cantidad de interrupciones de este tipo y la duración de cada una, sin embargo no asigna valores de referencia para la frecuencia anual de ocurrencia y la duración media típica de interrupciones de este tipo.

### **1.4.8. Hundimientos de tensión (*Sags*)**

La NTC 5001 define los hundimientos de tensión o *sags* como reducciones súbitas del valor eficaz de la tensión por debajo del 90 % y por encima del 10 % de la tensión declarada, seguidas por un retorno a un valor más alto que el 90 % de la tensión en un tiempo que varía desde los 8.33ms (medio ciclo a 60 Hz) hasta 1 minuto.

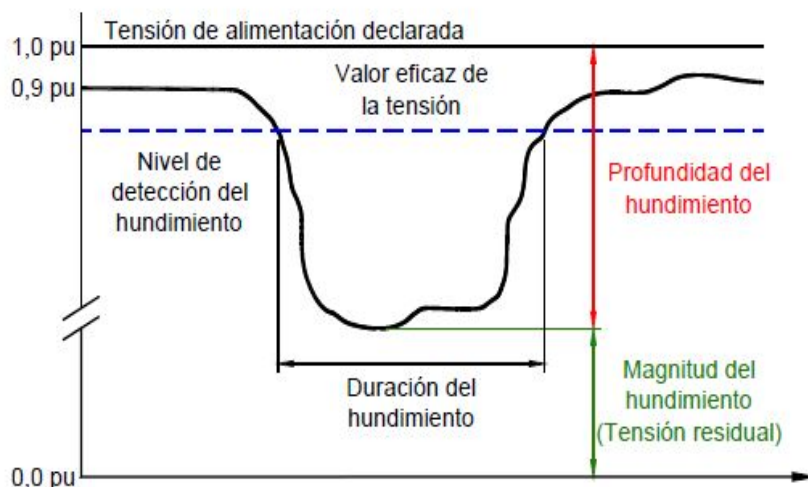
Estos hundimientos pueden ser provocados por fallas en las instalaciones de los usuarios de la red o en el sistema de distribución, por lo que su presencia depende de la configuración del sistema y comúnmente es ocasionada por corrientes elevadas originadas, ya sea por cortocircuitos, conexión u operación de cargas que demandan alta potencia, fallas en la fuente de alimentación propia o vecina, arranque de motores o cortocircuitos provocados por fenómenos naturales (como árboles, rayos, terceros).

Cabe resaltar que, los *sags* son impredecibles y aleatorios, por lo que su comportamiento en un periodo de tiempo puede ser variable, causando numerosas interrupciones de proceso, breve reducción de la luz visible de algunos dispositivos de iluminación, caídas de sistemas telefónicos, disparos de protecciones, mal funcionamiento de equipos, salida de operación de controladores para motores, incremento en las pérdidas por calentamiento en los motores de inducción, ligeros cambios de velocidad en máquinas de inducción, salida de operación y pérdida de datos en dispositivos electrónicos, y leve reducción en la salida de bancos de condensadores.

Por otra parte, la evaluación de los hundimientos de tensión se hace de acuerdo a parámetros como magnitud y duración. La duración corresponde al tiempo medido desde el momento en que el valor eficaz de la tensión cae por debajo del umbral, hasta que retorna por encima de este, y la magnitud es la máxima desviación del valor eficaz de la tensión de la fase más afectada (caso trifásico), con respecto a la tensión declarada (profundidad). Ver figura 1.7.

La norma NTC 5001 recomienda que la ocurrencia de los *sags* se evalúe teniendo en cuenta la tensión declarada cuando se mide en el punto de conexión común para sistemas de baja y media tensión, y la tensión de referencia deslizando para sistemas de transmisión (no recomendable para sistemas de baja o

**Figura 1.7:** Descripción del hundimiento de tensión *Sag*

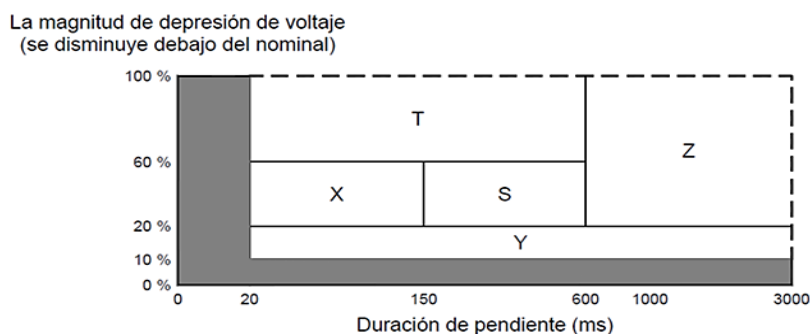


Fuente: NTC 5001 [1]

media tensión). Además, indica el procedimiento para la elaboración de cartas de hundimiento (*sag*), utilizado en la valoración del ambiente electromagnético en el PCC donde se realiza la medición. Cabe resaltar que esta norma no fija valores de referencia para este disturbio, dado que su naturaleza aleatoria dificulta la definición de estos valores para los diferentes niveles de tensión comprendidos, sin embargo, aporta valores indicativos para caracterizar las redes en cuanto a *sags*, los cuales son propuestos por la norma surafricana NRS 048-2:1996, son dados en forma de un máximo de hundimientos por año para rangos definidos en magnitud y duración designados como categorías Z, T, Y, S y X.

La figura 1.8 muestra las categorías de clasificación de *sags* de acuerdo con la magnitud y duración del evento como propone la norma NRS 048-2:1996, mientras que en la Tabla 1.7 se presentan los valores indicativos de esta norma para cada categoría.

**Figura 1.8:** Ventana de clasificación de *Sags*



Fuente: NTC 5001 [1]

**Tabla 1.7:** Valores indicativos de *Sags*

1	2	3	4	5	6
Red	Número caídas				
	S	T	X	Y	Z
6.9kV a $\leq$ 44kV	30	30	100	150	20
6.9kV a $\leq$ 44kV rural	69	54	215	314	49
>44kV a $\leq$ 132kV	25	25	80	120	16
220kV a $\leq$ 765kV	11	6	45	88	

Fuente: NTC 5001 [1]

### 1.4.9. Elevaciones de tensión *Swells*

La norma NTC 5001 describe las elevaciones de tensión como incrementos súbitos del valor eficaz de la tensión que superan el 110% de la tensión declarada y pueden durar entre 8.33 ms (medio ciclo) y 1 minuto.

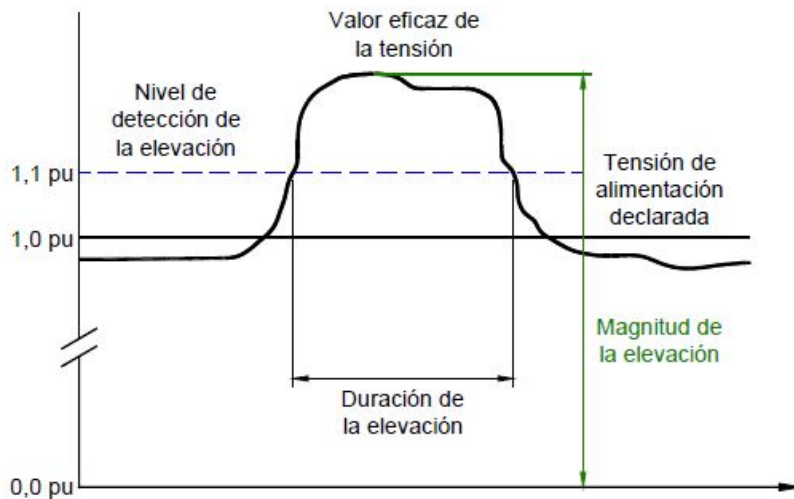
Los *swells* pueden ser generados por cortocircuitos, salidas de carga, fenómenos de resonancia y ferresonancia, switcheo de grandes cargas o bancos de capacitores, algunas fuentes características son los arcos en soldadura, la operación de cargas controladas por tiristores, el funcionamiento de grandes sistemas de UPS y Dimmers. De acuerdo con su frecuencia de ocurrencia, las elevaciones de tensión pueden provocar fallas en los componentes de un equipo, reducir la vida útil de dispositivos electrónicos, conductores, barrajes, maquinaria rotativa, transformadores de tensión y corriente; causan operaciones indeseadas en relés de protección, aumento de la luz visible en dispositivos de iluminación, degradación



o destrucción de dispositivos de protección (varistores o diodos de avalancha de silicio), levantamientos en la carcasa de condensadores en bancos de control reactivos e incrementos en la potencia de salida en bancos de condensadores.

Las elevaciones de tensión pueden caracterizarse mediante su magnitud y duración. Siendo la duración el tiempo medido desde el momento en que el valor eficaz de la tensión sobrepasa el umbral de detección, hasta que regresa por debajo de este. La magnitud de la elevación (tensión residual) está dada por el máximo valor eficaz de tensión medido durante la elevación en cualquiera de las fases, y su duración está dada por un tiempo inicial y final del evento. Ver figura 1.9.

**Figura 1.9:** Descripción de la elevación de tensión *Swell*



Fuente: NTC 5001 [1]

A su vez, la norma NTC 5001 sugiere evaluar la ocurrencia de estas elevaciones de tensión tomando como referencia la tensión declarada, cuando la medida se realiza en el punto de conexión común y luego se comparan las perturbaciones ocurridas con las curvas de inmunidad ante elevaciones del usuario que está siendo evaluado o con las de los equipos que el usuario tenga instalados, sin embargo, esta norma no establece valores de referencia para esta perturbación.

#### **1.4.10. Variaciones de tensión de larga duración (subtensiones y sobretensiones)**

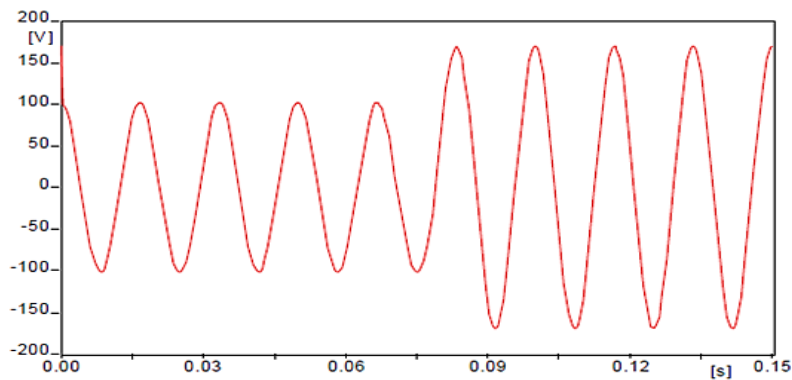
Los eventos en tensión de larga duración son desviaciones del valor eficaz de la tensión que pueden estar por encima o por debajo del  $\pm 10\%$  de la tensión de alimentación declarada, pueden ser sobretensiones o subtensiones dependiendo de la causa o variación.

Ahora bien, las variaciones de tensión de larga duración pueden caracterizarse mediante dos parámetros, magnitud y duración; donde la duración se define como la diferencia entre el tiempo inicial y el tiempo final de la variación. De acuerdo con la norma NTC 5001, para evaluar las variaciones de tensión de larga duración ocurridas en un PCC se deben comparar las perturbaciones ocurridas con las curvas de inmunidad ante variaciones de larga duración del usuario que está siendo evaluado o con las de los equipos que el usuario tenga instalados, no obstante, no establece valores de referencia para variaciones de tensión de larga duración.

##### **1.4.10.1. Sobretensiones:**

Las sobretensiones pueden ser consecuencia de maniobras en la carga como desconexión de cargas grandes, energización de bancos de condensadores, mala regulación en el sistema de suministro o ajustes inadecuados de los taps en transformadores. Durante una sobretensión, equipos electrónicos pueden evidenciar fallas inmediatas, lo cual no ocurre en transformadores, cables, barras, maquinas rotativas y transformadores de potencia y de corriente, sin embargo, sobretensiones demasiado largas pueden provocar la pérdida de la vida útil de estos equipos, además pueden originar operaciones indeseadas en dispositivos de protección, incremento de la potencia reactiva en bancos de condensadores y de la luz visible en dispositivos de iluminación. La figura 1.10 corresponde a una señal afectada por una sobretensión.

**Figura 1.10: Sobretensión**

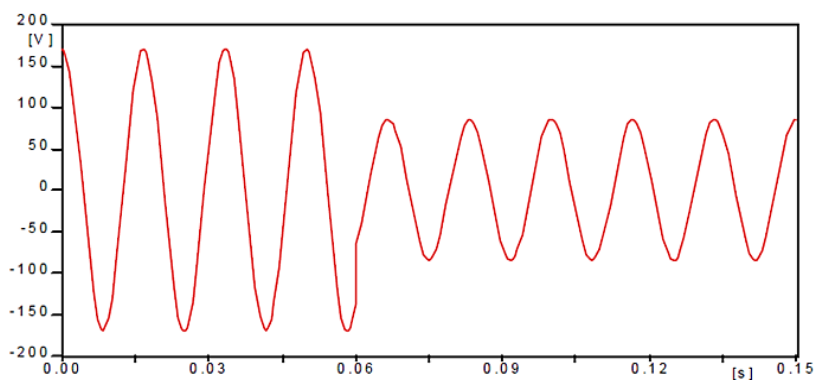


Fuente: Calidad del servicio de energía eléctrica [10]

#### 1.4.10.2. Subtensiones:

Las subtensiones son provocadas por eventos contrarios a los que causan sobrevoltajes como energización de una carga grande, desconexión de un banco de condensadores o circuitos sobrecargados. Puede agregarse que fenómenos de este tipo generan funcionamientos inadecuados en equipos, paradas de procesos, salida de operación en dispositivos de control para motores, incremento de pérdidas por calentamiento en motores de inducción y cambios de velocidad en la operación de los mismos, disminución de la potencia reactiva en bancos de condensadores y reducción de la luz visible en dispositivos de iluminación. La figura 1.11 ilustra una subtensión en una señal.

**Figura 1.11: Subtensión**



Fuente: Calidad del servicio de energía eléctrica [1]

#### 1.4.11. Interrupciones de larga duración ( $\geq 1min$ )

La norma NTC 5001 describe las interrupciones de larga duración como una condición de decremento de voltaje en la que el valor eficaz de la tensión de alimentación es inferior al 10% de la tensión declarada  $V_c$  con una duración mayor a 1 minuto, y las clasifica en:

- **Programadas:** cuando se informa a los clientes previamente sobre la ejecución de trabajos planeados sobre la red de distribución.
- **Accidentales:** cuando es ocasionada por defectos permanentes o temporales, asociados usualmente a eventos o daños externos y fallas o interferencias en los equipos.

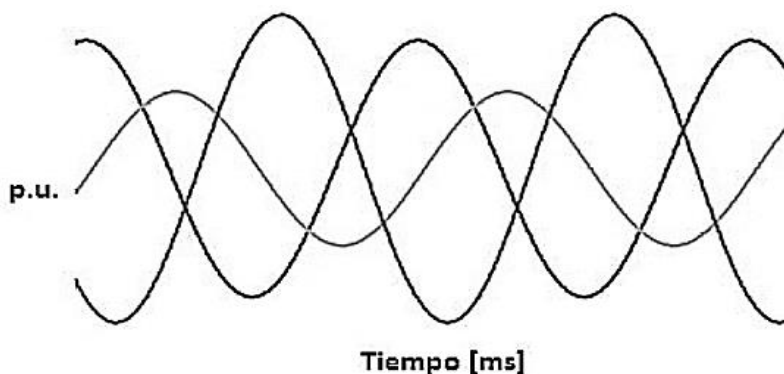
Se debe agregar que, las interrupciones accidentales pueden darse por causas externas o internas, la mayoría de veces originadas por eventos fuera del control de las empresas de energía, tales como: fallas en la fuente del sistema de potencia y en el cableado, disparos por protecciones del sistema eléctrico, problemas en las transferencias automáticas o manuales, apertura o cierre de los interruptores de protección. Además, estas interrupciones pueden provocar la salida de operación o reinicio de equipos y sistemas, mal funcionamiento y desenergización de contactores en motores de inducción, daños en equipos de arranque suave electrónico y desprogramación de PLCs, paralización de procesos y equipos, apagado de sistemas de iluminación y caída de sistemas telefónicos.

Cabe destacar que la norma NTC 5001 sugiere un periodo de evaluación de 1 semana para este tipo de perturbaciones, con el fin de correlacionar estos datos con los demás parámetros evaluados, para ello se debe contar la cantidad total de interrupciones detectadas y sumar sus tiempos de duración. De igual manera, esta norma establece que la definición de valores de referencia para esta perturbación debe realizarse de acuerdo con los requerimientos de confiabilidad de los usuarios, las condiciones propias del sistema y la reglamentación vigente en Colombia. Estas exigencias dependerán del tipo de proceso y tipo de equipos instalados en el sistema eléctrico. Los valores indicativos y métodos de evaluación serán los establecidos por el ente regulador en Colombia. En consecuencia, no se encuentran definidos valores de referencia para estas perturbaciones dentro de esta norma.

### 1.4.12. Desbalance de tensión

La norma NTC 5001 define el desbalance de tensión como un índice que caracteriza la magnitud y asimetrías del ángulo de fase de las tensiones trifásicas en operación de estado estable; el factor de desbalance de tensión se determina mediante la teoría de componentes simétricas, y corresponde a la relación entre la componente de secuencia negativa de la tensión y la componente de secuencia positiva. La figura 1.12 es un ejemplo de las asimetrías en la magnitud y el ángulo de fase ocurridas durante un desbalance de tensión.

**Figura 1.12:** Desbalance de tensión



Fuente: Análisis de parámetros de calidad de la energía a un sistema de producción farmacéutico [11]

Este disturbio puede ser causado fundamentalmente por asimetrías de la impedancia de la línea y desbalances de carga. Las fuentes de desbalance de tensión más comunes son cargas monofásicas no balanceadas sobre sistemas trifásicos (hornos de arco de una sola caja), anomalías en bancos de condensadores, uso de reguladores de línea en una sola fase y apertura de protección aguas arriba del punto de monitoreo. A su vez, un desbalance de tensión puede reducir la capacidad de carga en motores y la vida útil del aislamiento de los mismos por sobrecalentamiento; e incrementar la distorsión de corriente armónica, los reactivos de la carga y la generación de rizados de corriente en rectificadores con tecnología PWM. Se debe agregar que, es importante controlar el nivel de desbalance en la tensión de alimentación del proveedor de energía, ya que incluso un bajo nivel de desbalance puede causar una importante ondulación de la fuente de alimentación y efectos de calentamiento en los equipos del sistema de generación, transmisión y distribución.

Cabe mencionar que la NTC 5001 no brinda ecuaciones para el cálculo de este parámetro, sin embargo, ofrece recomendaciones para su medición. El periodo de medida debe ser de una semana, para circuitos urbanos, el 99 % de los valores de desbalance de tensión evaluados en un período de agregación de 10 min deben estar dentro de los valores de referencia, mientras que, para circuitos rurales, el 95 % de los valores de desbalance de tensión evaluados en un período de agregación de 10 min deben estar dentro de los rangos o valores de referencia. Además, fija los siguientes valores de referencia de desbalance de acuerdo al nivel de tensión (ver Tabla 1.8):

**Tabla 1.8:** Porcentaje máximo de desbalance de tensión

<b>Rango de tensión</b>	<b>Valor de referencia</b>
Vn <69 kV	2.0 %
Vn ≤ 69 kV	1.5 %

Fuente: NTC 5001 [1]

## **1.5. Indicadores adicionales de energía en el usuario final**

La norma NTC 5001 en su anexo F (informativo) adiciona indicadores de calidad de energía que hacen referencia a otras perturbaciones que deterioran la calidad de la energía y brindan información del estado en las instalaciones eléctricas de los usuarios, donde las falencias en su configuración generan una mala calidad de potencia.

### **1.5.1. Evaluación de corriente RMS**

Para evaluar los armónicos de corriente se debe medir el valor eficaz de la corriente en cada fase durante un periodo de una semana con un tiempo de agregación de 10 minutos, este intervalo debe coincidir con el periodo de medida empleado en el registro de armónicos de corriente.

### 1.5.2. Desbalance de corriente

Este es un parámetro adicional que determina la magnitud y asimetría del ángulo de las corrientes trifásicas en operación de estado estable. Este disturbio es ocasionado por el desbalance de cargas en instalaciones eléctricas de usuarios, desbalances de tensión en la red de distribución y por la presencia de armónicos en la corriente; sus efectos se reflejan en los desbalances de tensión que pueden afectar a otros usuarios conectados a la red de distribución, disparo de protecciones y aumento de pérdidas en los circuitos debido al aumento de la corriente por el conductor.

Para la medición de los desbalances en corriente se usa la teoría de componentes simétricas, como la relación entre la componente de secuencia negativa de la corriente y la componente de secuencia positiva, además será evaluado con intervalos de tiempo para un periodo de agregación de 10 min con muestreo de 12 ciclos. Respecto al periodo de observación será de una semana para el caso de evaluaciones contractuales, mientras que el periodo de observación será de por lo menos un ciclo de trabajo para diagnósticos o para análisis estadísticos. La norma recomienda que, bajo condiciones de operación normal, el desbalance en corriente cumpla con los valores objetivo presentados en la Tabla 1.9 durante el 95 % del tiempo, de acuerdo con los rangos de tensión asignados.

**Tabla 1.9:** Porcentaje máximo de desbalance de corriente

<b>Tensión</b>	<b>Desbalance de corriente</b>
>62 kV	$\leq 5\%$
$\leq 62$ kV	$\leq 20\%$ (IEEE 446.1995 Orange Book)

Fuente: Adaptado de NTC 5001 [1].

### 1.5.3. Factor de potencia (FP)

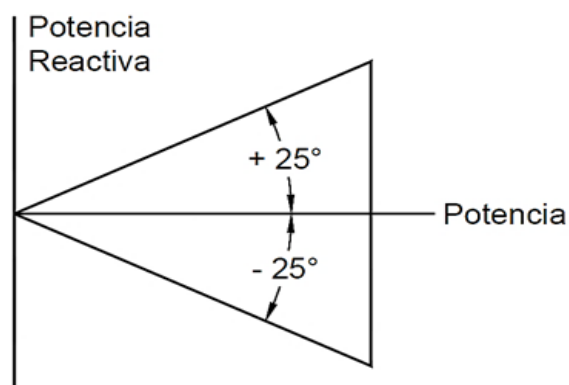
El factor de potencia corresponde a la razón entre la potencia útil (activa) consumida por un circuito o carga y su potencia aparente, y equivale a la máxima potencia que se puede consumir o suministrar en un circuito, según los valores eficaces de tensión y de corriente. Dependiendo de la condición de consumo o suministro de potencia reactiva, el factor de potencia puede ser inductivo (positivo) o capacitivo (negativo).

El factor de potencia se incrementa debido al exceso de demanda de potencia reactiva en motores u hornos de inducción y excedentes en el suministro de potencia reactiva en el caso de sobredimensionamiento en bancos de condensadores en instalaciones de uno o varios usuarios o en la red de distribución. A su vez, el efecto de un alto factor de potencia genera excesos de cargabilidad en conductores, incremento de pérdidas en líneas y redes, resonancias en serie o paralelo y problemas de regulación en tensión.

Por otro lado, el FP se evalúa usando un período de agregación de 10 minutos con un muestreo de 12 ciclos, para ello se debe tener en cuenta la relación entre la potencia activa trifásica y la potencia aparente trifásica discriminando los casos en los que el factor es inductivo o capacitivo. Si la evaluación es de carácter contractual el periodo de observación será de una semana, mientras que para diagnósticos o fines estadísticos será de al menos un ciclo de trabajo.

En condiciones normales de operación, los factores de potencia inductivo y capacitivo deben permanecer durante el 95 % del tiempo entre 0.9 y 1, de manera que el ángulo del diagrama de potencias se encuentre durante el 95 % del tiempo entre  $-25$  y  $25$  como se ilustra en la figura 1.13.

**Figura 1.13:** FP  $\cos\theta$ , valores límite  $-25^\circ < \theta < 25^\circ$



Fuente: NTC 5001 [1]

## 1.6. Efecto de cargas no lineales sobre la calidad de la potencia

Algunos de los disturbios antes presentados pueden ser ocasionados por cargas no lineales. Según la NTC 5001 una carga no lineal, es una carga eléctrica cuya



relación tensión/corriente es no lineal, es decir, que la señal de corriente no sigue la misma forma de onda de la señal de tensión, de la cual se está alimentando la carga [1]. Cabe mencionar que las cargas no lineales conectadas a la red eléctrica son responsables de la distorsión de la forma de onda de tensión en el punto de conexión común (PCC), provocando efectos negativos en el sistema eléctrico como: distorsión de voltaje dentro de las instalaciones eléctricas, corrientes excesivas por el conductor de neutro, altos niveles tensión entre neutro y tierra, sobrecalentamiento en transformadores, grandes campos magnéticos irradiados desde transformadores, reducción en la capacidad de distribución y penalización por bajo factor de potencia.

Algunos ejemplos de cargas no lineales de uso residencial son: dispositivos electrónicos que poseen fuentes de alimentación con rectificadores de onda completa (televisores, consolas de video juegos, videograbadoras, computadoras) [12], dispositivos periféricos equipados con fuentes conmutadas (impresoras, plotters, scanners), lámparas de descarga gaseosa y bombillas ahorradoras. A su vez, en el sector industrial es posible encontrar rectificadores, convertidores AC/DC, variadores de frecuencia, sistemas de soldadura por arco, hornos de inducción, lámparas fluorescentes, compensadores estáticos de potencia y automóviles eléctricos o híbridos [13].

La Tabla 1.9 presenta las cargas electrónicas típicas en los hogares colombianos. Cada carga tiene un nivel de penetración diferente y la conexión simultánea de estos dispositivos puede dar lugar a muchos escenarios diferentes de distorsión armónica [14].

**Tabla 1.10:** Porcentaje de residencias colombianas con dispositivos eléctricos

<b>Dispositivos</b>	<b>Potencia(W)</b>	<b>Nacional(%)</b>	<b>Bogotá(%)</b>
Microondas	1080	20.3	36.1
TV convencional	100	77.7	76.5
TV plasma-led	100	28.5	44.9
Reproductor de vídeo	19	44.7	57.7
Estéreo	75	47.4	58.8
Cámara de vídeo	24	21.1	36.4
PC monitor	48	26.1	39.7
Fuentes de suministro de escritorio	475	26.1	39.7
Computadora portátil	93	23.3	36.7
Teléfono celular	15	94.7	96.3

Fuente: Caracterización de cargas residenciales no lineales para modelado en el dominio de la frecuencia [14].

A continuación, en la Tabla 1.11 se presenta un resumen de los disturbios que abarca la norma NTC 5001 así como los valores de referencia que establece. Vale la pena decir que todas las perturbaciones tienen un periodo de evaluación de una semana y el tiempo de agregación es de 10 minutos, pero el periodo de medida o toma de datos varía dependiendo del disturbio.

**Tabla 1.11: Perturbaciones de calidad de potencia eléctrica según NTC 5001**

Perturbación	Duración	Definición	Valores de referencia
Variaciones de tensión de estado estable	>1 min	Desviación del valor eficaz de la tensión de alimentación a 60 Hz	10 % Vc
Desbalance de tensión			Ver Tabla 1.8
Flicker			Ver Tabla 1.6
Interrupciones de larga duración	1 min	Valor eficaz de la tensión de alimentación <10%Vc	
Armónicos de tensión			Ver Tabla 1.2
Armónicos de corriente			Ver tabla1.3
Muecas de tensión	0.5 Ciclos		Ver Tabla 1.4
Sobretensiones (variación de tensión de larga duración)	>1 min	Valor rms de la tensión >10%Vc	No fija valores de referencia
Subtensiones (variación de tensión de larga duración)	>1 min	Valor eficaz de la tensión <10%Vc	No establece valores de referencia
Interrupciones de corta duración	<1 min	Valor eficaz de la tensión <10 %Vc en todas las fases	No se definen valores de referencia. El 70 % de estas interrupciones pueden ser menores a 1 s. Es difícil establecer una frecuencia anual y una duración media típica.
Hundimientos (sags)	8.33 ms (1/2 ciclo a 60 Hz) a 1 min	10% Vc <valor eficaz de la tensión <90% Vc, El retorno es >90 %Vc	No se establecen valores de referencia para los niveles de tensión comprendidos en esta norma, en su lugar se propone tener en cuenta los valores indicativos del número de sags permitidos en un periodo de tiempo y el uso de las curvas de tolerancia para el usuario.
Elevaciones (swells)	8.33 ms (1/2 ciclo) a 1 min	Valor eficaz >110 %Vc	No propone valores de referencia
Variaciones de frecuencia			Ver Tabla 1.5
Sobretensiones transitorias	Menos de 1/2 ciclo		No establece valores de referencia. En circuitos abiertos Valor de cresta de 6 kv dentro de la instalación y 10 kV- 20 kV externamente

Fuente: Elaboración propia

## Capítulo 2

---

### Estructura de red de Popayán

---

En este capítulo se presenta la estructura general de los circuitos que componen la red de distribución la cual es gestionada por Compañía Energética de Occidente (CEO) en el departamento del Cauca, centrándose en la red de distribución en Popayán, además se describe el circuito 32 de la red, así como el área geográfica que compone y finalmente se realiza la simulación del mismo en el software NEPLAN<sup>4</sup> con el objetivo de hacer un análisis de flujo de carga.

#### 2.1. Descripción del sistema eléctrico de potencia

La prestación del servicio público de energía en el departamento del Cauca se realiza a través de la infraestructura de tendido eléctrico, propiedad de la empresa Centrales Eléctricas del Cauca S.A. E.S.P. (CEDELCA), la cual tiene contratos con la Unión de Trabajadores de la Industria Energética Nacional y de Servicios Públicos Domiciliarios (UTEN), ahora operador integrado UTEN-VATIA, para el manejo de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH's) del departamento [15]; de la misma manera, CEDELCA tiene contratos de gestión con Compañía Energética de Occidente S.A.E.S.P. (CEO) para la administración operativa, técnica y comercial de la infraestructura, responsabilizándola de la distribución y comercialización de energía eléctrica en el departamento [16].

---

<sup>4</sup>NEPLAN: es una herramienta para analizar, planear, optimizar y simular redes. La amigable interfaz gráfica le permite al usuario desarrollar casos de estudios eficientemente. El software es personalizable, tiene un concepto modular y cubre todos los aspectos eléctricos en redes de transmisión, distribución, generación e industriales

La infraestructura que opera CEO en el departamento del Cauca, está constituida por 38 subestaciones en los niveles 115, 34.5 y 13.2 kV, también cuenta con 19.671 transformadores y un tendido de red de 25.760 km en baja, media y alta tensión, representando una capacidad instalada de 735 MVA. Por otra parte, el sistema de distribución está conformado por 12 líneas de 115 kV, 45 líneas de 34.5 kV y 126 circuitos de 13.2 kV. Cabe destacar que la demanda en el departamento es de 959 GWh/Año, con un crecimiento anual de 2.4 % y una cobertura eléctrica del 91 % [17], abarcando 38 de los 42 municipios; además, tiene 7 clientes corporativos: 3 en Barranquilla, 2 en Pereira, 1 en Cali y 1 en Palmira [18].

Dentro del sistema administrado por CEO, se encuentra la planta de generación Florida II a voltajes mayores o iguales a 115 kV, la cual tiene una capacidad instalada de 19.9 MW [19]; además, existen diez plantas menores de generación a niveles de 34.5 y 13.2 kV, ubicadas en los municipios de Popayán, Puracé, Silvia, Patía, Buenos Aires, Suarez, Caloto y Caldono; 8 de estas PCH's son propiedad de CEDELCA SA. ESP. y son operados por UTEN-VATIA; las 2 PCH's restantes pertenecen a la Empresa Municipal de Energía Eléctrica (EMEESA S.A. E.S.P) y son operadas por esta; en conjunto representan una capacidad de generación de 38 MW aproximadamente [17].

En relación al número de subestaciones de conexión al sistema de transmisión nacional (STN) a 230 kV, en el departamento del Cauca CEO posee dos puntos de conexión: uno en la subestación Páez-ISA<sup>5</sup> (90 MVA) y otro en San Bernardino-ISA (150 MVA); así mismo, en el departamento de Nariño se une a la subestación Jamondino-ISA [20].

Las subestaciones antes mencionadas inyectan potencia al sistema de transmisión regional (STR) operado por la compañía, el cual está constituido por las subestaciones Pance-EPSS<sup>6</sup>, Jamundí-EPSS, La Cabaña, Santander, San Bernardino, Popayán, Zaque-CEDENAR<sup>7</sup>, Rio Mayo-CEDENAR y Florida [20], las cuales se encuentran conectadas a líneas de 115 kV. La operación conjunta de

---

<sup>5</sup>ISA INTERCOLOMBIA es una organización dedicada al transporte de energía de alta tensión en el país, esta empresa de servicios públicos mixta se encarga de administrar, operar y mantener los activos eléctricos propiedad de ISA en Colombia.

<sup>6</sup>Empresa de Energía del Pacífico (EPSS) es una empresa filial de CELSIA entregada a la generación, distribución y transmisión de energía eléctrica.

<sup>7</sup>Centrales Eléctricas de Nariño S.A.E.S.P. (CEDENAR) es una empresa que presta el servicio de distribución, comercialización y generación de energía eléctrica en el departamento de Nariño.

estas subestaciones satisfacen la demanda requerida por el sistema eléctrico manejado por la Compañía Energética de Occidente S.A.S E.S.P, mercado que en su gran mayoría está conformado por usuarios residenciales [21].

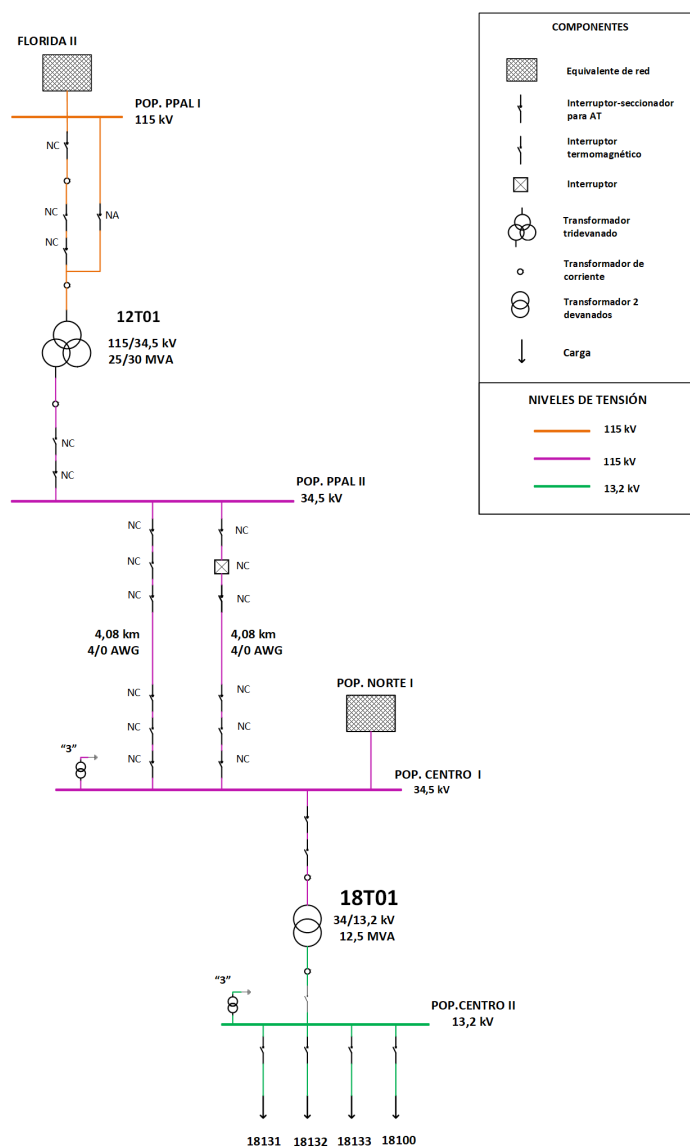
Ahora bien, el sistema de redes de 34.5 kV tiene como función alimentar aquellas subestaciones que atienden las cargas urbanas y rurales de los municipios más importantes del Cauca; finalmente, para sustentar los transformadores de distribución, se emplean redes de 13.2 kV [19]. Cabe destacar que, en el municipio de Popayán, el servicio tiene una cobertura del 99% en el área urbana y del 97.5% en el sector rural, donde la mayoría de usuarios son residenciales. En cuanto al sistema de distribución local (SDL) en el municipio está conformado por cinco circuitos de 34.5 kV con una longitud de 22.3 km, que conforman un anillo a la misma tensión entre las subestaciones San Bernardino, Principal, La Isabela, Centro y Norte; la distribución se realiza con alimentadores primarios a niveles de 13.2 kV y con redes secundarias a 220 V; la mayoría de estos circuitos son aéreos, excepto en la zona histórica donde son subterráneos [9].

Es importante mencionar que CEO realiza un seguimiento preciso de cada elemento que pertenece al sistema de potencia con el objetivo de facilitar la identificación de los mismos, es decir, cada componente de la red como transformadores, líneas, circuitos, subestaciones, barrajes, se reconocen a partir de un código asignado. Una subestación de gran interés en Popayán es la Centro 2, porque suministra potencia a cargas representativas como el centro histórico de la ciudad y el Hospital Universitario San José; esta subestación se reconoce con el número 18 dentro de la compañía y a ella se encuentran conectados los circuitos 31 (18131), 32 (18132), 33 (18133) y 0 (18100).

### **2.1.1. Descripción del circuito 32**

El presente proyecto se enfoca en analizar el comportamiento del circuito 32 de la ciudad de Popayán ante perturbaciones presentes en la red con una carga no lineal conectada, la figura 2.1 presenta el diagrama unifilar del sistema que alimenta este circuito.

**Figura 2.1:** Diagrama unifilar del circuito 32



Fuente: Compañía Energética de Occidente (CEO)

La energía eléctrica suministrada al circuito 32 proviene del STN al cual se encuentra conectada CEO, a través de la subestación Florida II, con un nivel de tensión de 230 kV que se representa con el equivalente de red que tiene el mismo nombre en el diagrama unifilar, esta alimenta la subestación Popayán Principal I perteneciente al STR con un voltaje de 115 kV, el cual se reduce por medio del transformador de 3 devanados 12T01 a 34.5 kV (20/30 MVA), esta línea cuenta con un circuito de transferencia y un seccionador normalmente abierto (NA) que conecta el circuito en caso de fallo de los seccionadores normalmente cerrados (NC) de la otra línea, como se presenta en la figura 2.1.

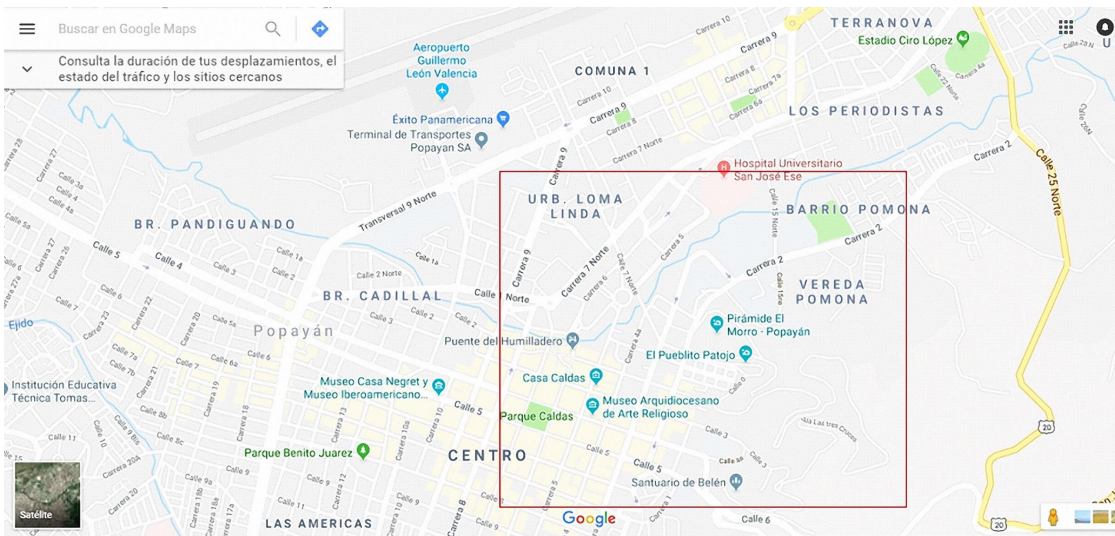
La tensión de 34.5 kV reducida por el transformador se recibe en el nodo Popayán Principal II, este está enlazado con dos líneas de 4.08 km a la subestación Popayán Centro I aportándole el mismo voltaje; esta subestación forma un anillo de respaldo (anillo de Popayán) en caso de falla con la subestación Popayán Norte I, a través de la línea Norte-Centro (16005) de 6.42 km. Por otra parte, la subestación Centro I alimenta a la subestación Popayán Centro II, a través del transformador 18T01 que reduce el voltaje a 13.2 kV alimentando los circuitos 31, 32, 33 y 0. Este último circuito tiene una longitud de 0.52 km y sirve de respaldo en caso de que falle alguna de las líneas principales; los circuitos 31, 32 y 33 tienen una longitud de 8.88, 30.45 y 60 km respectivamente, contando con alrededor de 14.875 usuarios conectados [20].

El circuito 32 está integrado por 157 transformadores que suministran potencia aproximadamente a 4.616 clientes; geográficamente comprende la zona de la ciudad delimitada por el recuadro rojo como se muestra en la figura 2.2, dentro de la cual se encuentran algunos barrios como: Caldas, La Pamba, El Refugio, Vásquez Cobo, Bolívar y parte de otros como Pomona, El Modelo y El Centro, de donde se pueden destacar sitios como: Alcaldía Municipal, Gobernación, SENNA, sedes de la Universidad del Cauca, la Universidad Autónoma del Cauca y la Fundación Universitaria de Popayán, los cuales pertenecen al sector histórico de la ciudad; además, la Industria Licorera del Cauca y el Hospital Universitario San José.

Cabe mencionar que la selección del circuito 32 se realiza teniendo en cuenta que los sectores descritos son áreas residenciales donde se manejan numerosas cargas no lineales, debido al uso mayoritario de dispositivos electrónicos y el Hospital San José, el cual es una carga de primera categoría, donde una interrupción corta en el suministro de energía eléctrica puede causar importantes perjuicios.



**Figura 2.2:** Distribución geográfica del circuito 32



Fuente: Google Maps

## 2.2. Simulación del circuito 32

Con la colaboración de los ingenieros Carlos Muñoz y Jorge Millán de la Compañía Energética de Occidente, se posibilitó el acceso a información interna de la empresa para la construcción del circuito a simular, entre los datos proporcionados se encuentran el diagrama unifilar del circuito de red de Popayán (2.1), curva de demanda del circuito 32 e información técnica de los dispositivos que componen la red.

Para la simulación del circuito 32 de la ciudad de Popayán se hace uso de la herramienta NEPLAN versión 5.5.7 Demo, suministrado por GERS<sup>8</sup> la cual es un software de planeamiento, optimización y simulación de redes eléctricas, que incluye módulos de cálculo donde es posible analizar algunos aspectos del comportamiento de la red, como lo son: flujo de carga, flujo de potencia óptimo, estabilidad transitoria, estabilidad de voltaje, simulación dinámica, corto circuito, armónicos, confiabilidad, entre otros; este proceso se realiza a partir de datos suministrados por CEO y obtenidos de XM<sup>9</sup>.

<sup>8</sup>GERS empresa que realiza estudios de sistemas eléctricos, diseño, supervisión, pruebas, puesta en servicio de proyectos y soluciones EPC (Engineering, Procurement and Construction) para electrificadoras, la industria y el comercio.

<sup>9</sup>XM es una empresa de ISA especializada en la gestión de sistemas de tiempo real, ofreciendo servicios de consultoría especializada, capacitaciones y entrenamiento sobre la operación de sistemas de potencia y administración de mercados de energía.



**Transformador:** es un elemento de transferencia entre los generadores y las líneas de distribución, su función principal es reducir o aumentar el nivel de tensión en el lado secundario a través del principio de inducción electromagnética [10][22]. En el circuito presentado se encuentran 2 tipos de transformadores trifásicos, 12T01 es un transformador de 3 devanados que se encarga de la conversión de 115 kV a 34.5 KV y el transformador 18T01 es de dos devanados encargado de la reducción de 34.5kV a 13.2KV.

**Línea:** una línea de transmisión eléctrica es básicamente el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión y distribución de la energía eléctrica. En el circuito implementado se encuentran las líneas LINEA1\_PPAL2\_CENTRO1 y LINEA2\_PPAL2\_CENTRO1.

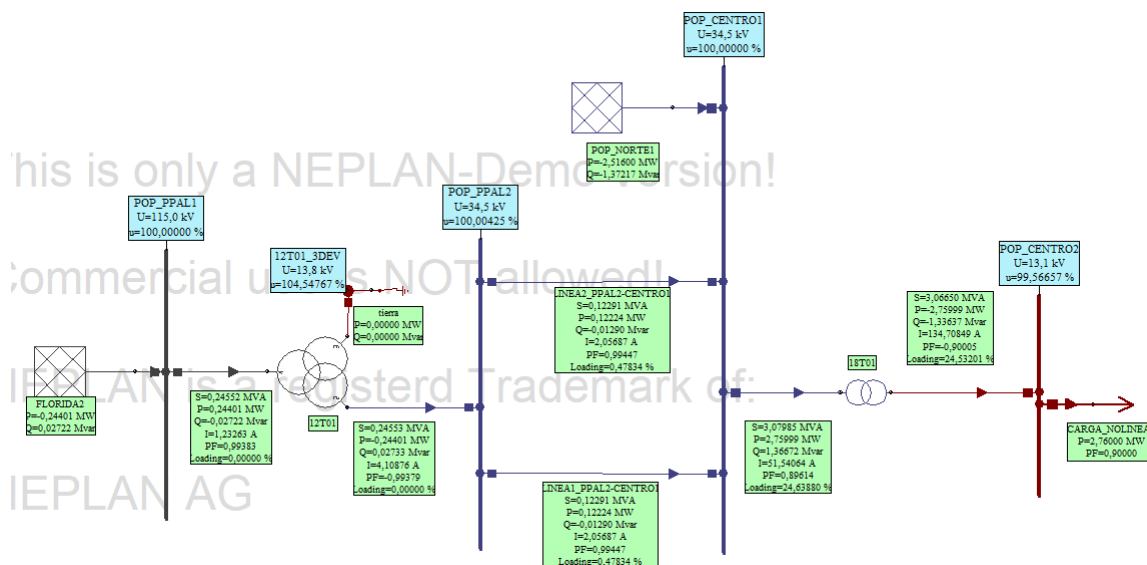
**Carga:** las cargas son elementos de componentes resistivas, capacitivas e inductivas que pueden conectarse a los sistemas de potencia. En este caso la carga se configura ingresando a el software los parámetros de factor de potencia ( $\cos(\phi)$ ) y potencia activa de la curva de demanda del circuito 32.

### 2.2.1. Flujo de carga

Una vez se han insertado los elementos del diagrama, registrado sus respectivos parámetros, e interconectado cada componente, se procede a realizar el cálculo de flujo de carga, para determinar las condiciones de funcionamiento del sistema implementado.

El cálculo se realiza con el método de inyección de corriente, el cual se emplea en redes de distribución y transmisión, de media y baja tensión, además, es más rápido y la operación converge satisfactoriamente. Se observa que el voltaje en la mayoría de los nodos es del 100% del valor nominal de tensión, excepto en la barra POP\_CENTRO2, donde disminuye aproximadamente un 0.3%, como se ve en la figura 1.1, la cual presenta los resultados del análisis del flujo de carga para 2.760 MW de potencia activa consumida en la carga; adicionalmente, en la 2.1 se presenta un resumen de los resultados para cada nodo del circuito 32.

**Figura 2.4:** Resultados del análisis de flujo de carga del circuito 32



Fuente: Elaboración propia

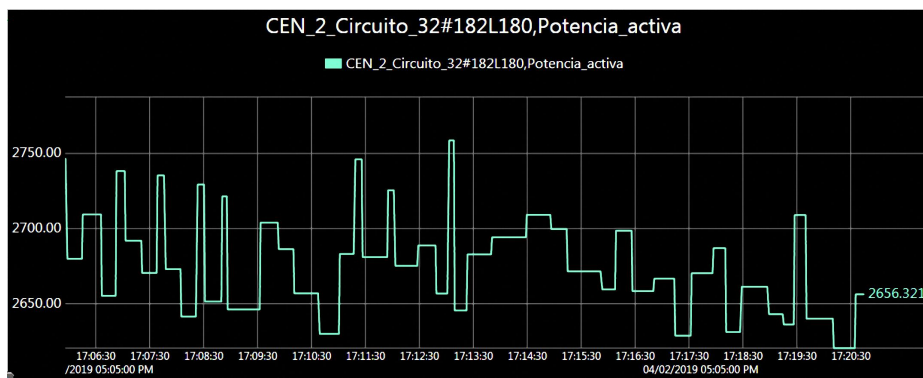
**Tabla 2.1:** Resumen de resultados del análisis de flujo de carga

Elemento	U(kV)	U (%)
POP_PPAL1	115	100
12T01_3DEV	13.8	104.548
POP_PPAL2	34.5	100
POP_CENTRO1	34.5	100
POP_CENTRO2	13.1	99.705

Fuente: Elaboración propia

Para estudiar el comportamiento del circuito construido, se simula en el software NEPLAN, cada punto de la curva mostrada en la figura 2.5, la cual representa la demanda del circuito 32 y está dada en valores de potencia activa en kilovatios (kW) tomados el día 4 de febrero de 2019, entre las 17:06:30 y 17:20:30 horas en el centro de control de la Compañía Energética de Occidente; luego, a partir de los resultados de potencia activa, reactiva o aparente, obtenidos en el cálculo de flujo de carga, se gráfica la curva de potencia para los equivalentes de red FLORIDA2 y POP\_NORTE1, y las líneas LINEA1\_PPAL2\_CENTRO1 y LINEA2\_PPAL2\_CENTRO1.

**Figura 2.5:** Curva de demanda del circuito 32



Fuente: Compañía Energética de Occidente

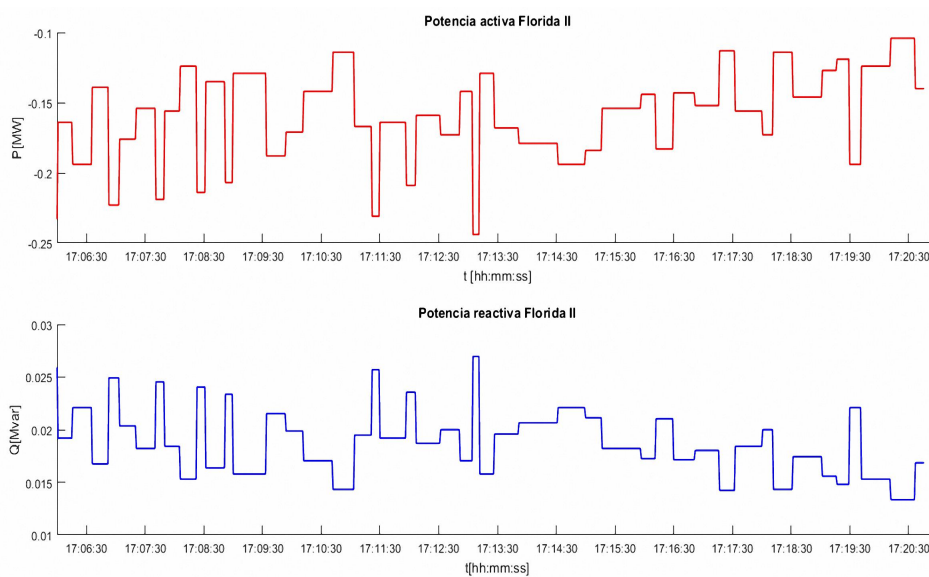
Cabe destacar, que para efectos de la simulación, se asigna a la carga del circuito, la potencia activa consumida a partir de los valores de potencia de la curva de demanda y se establece el factor de potencia en 0.95, de acuerdo con la resolución CREG 108 de 1997, donde se determina el control al factor de potencia en el servicio de energía eléctrica a los usuarios no residenciales, y de los usuarios residenciales conectados a un voltaje superior al nivel de tensión 1, el cual debe ser igual o superior a 0.9 inductivo [23].

A continuación, se analizará el comportamiento de las curvas de potencia obtenidas en los elementos del circuito simulado. Es preciso destacar que los resultados obtenidos se expresan en unidades de MW, MVar y MVA para la potencia activa (P), reactiva (Q) y aparente (S), respectivamente.

### **Equivalente de red FLORIDA2**

En la figura 2.6 se presentan las curvas de potencia activa y reactiva calculada por el software para el equivalente FLORIDA2, se observa que la curva de potencia reactiva es de signo positivo, lo cual indica que esta subestación absorbe la potencia de la red; por otro lado, se evidencia que todos los valores de la curva de potencia activa son negativos, mostrando que este componente constituye una fuente de generación para el sistema, ya que suministra potencia a la red.

**Figura 2.6:** Curva de potencia activa y reactiva de FLORIDA2

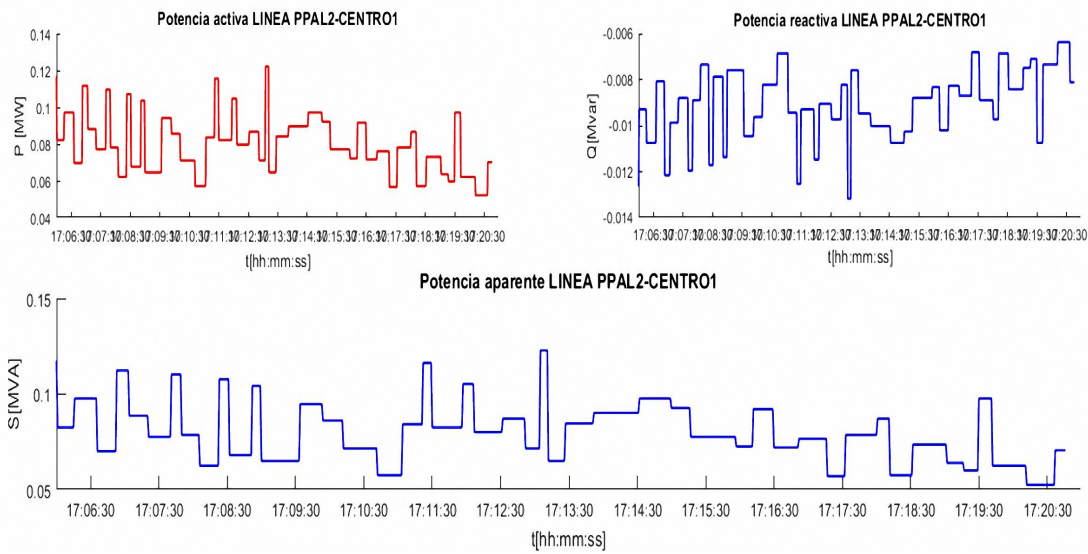


Fuente: Elaboración propia

### **Lineas de conexión**

En la figura 2.7 es posible observar el comportamiento de las potencias en las líneas encargadas de la distribución de energía, desde el barraje de la subestación Principal2 hacia Centro1; además, se visualiza que la potencia activa es positiva, indicando que las líneas están absorbiendo energía de la red, mientras que la potencia reactiva está siendo inyectada a la red porque la magnitud de la señal es negativa; respecto a la potencia total consumida por la carga o mejor conocida como potencia aparente, se puede concluir que está siendo absorbida, ya que es de signo negativo.

**Figura 2.7:** Curvas de potencia en las líneas 1 y 2 POP\_PPAL2\_POP\_CENTRO1

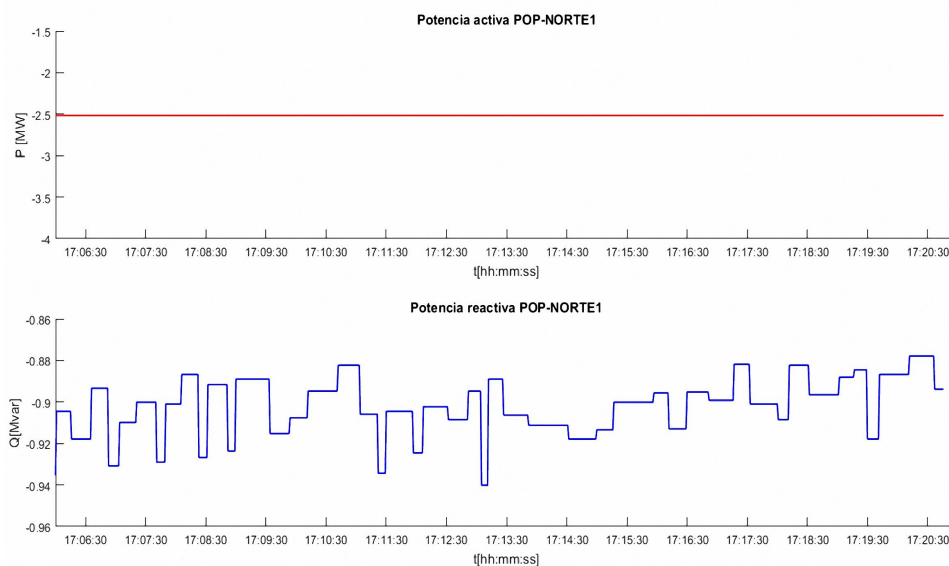


Fuente: Elaboración propia

### Equivalente de red POP\_NORTE1

El equivalente de red que representa la subestación Popayán Norte1, se ha configurado como un nodo PV y suministra una potencia de 2.516 MW operando a un voltaje de 13.2 kV, esto explica el comportamiento constante de la curva de potencia activa presentada en la figura 2.8, que además es negativa correspondiendo al comportamiento real del circuito donde la subestación Popayán Norte1 alimenta como respaldo a la subestación Centro1, así mismo se observa que la curva de potencia reactiva es negativa, lo cual indica que esta potencia también está inyectándose a la red.

**Figura 2.8:** Potencia activa y reactiva en POP\_NORTE1



Fuente: Elaboración propia

Con base en los resultados de potencia obtenidos en los equivalentes de red FLORIDA2 y POP\_NORTE1, se puede determinar que el primero aporta en promedio a la red un porcentaje del 0.8245% de la potencia activa que genera y un 0.0945% de potencia reactiva, mientras que el segundo aporta el 100% de la potencia activa que fluye a través de esta subestación y un 34.5151% de la potencia reactiva, esto se debe a que la subestación Norte1 actúa como apoyo para la subestación Centro1, suministrándole a la red un total de 2.516 MW que compensa el porcentaje de tensión en los nodos POP\_PPAL2 y POP\_CENTRO1 y POP\_CENTRO2, permitiéndoles alcanzar el voltaje nominal requerido de 34.5 kV y 13.2 kV, así como entregar el 100% de este en los mismos.

Por otro lado, el bajo porcentaje de potencia activa provisto por la subestación FLORIDA2 en relación a la cantidad de potencia entregada por POP\_NORTE1, se debe a que la potencia generada en Florida 2 (19.9 MW) es mayor que la de Norte 1 (2.516 MW) y alimenta a una parte mayor de la red.



## Capítulo 3

---

### Efecto de cargas no lineales en el circuito 32 de la ciudad de Popayán

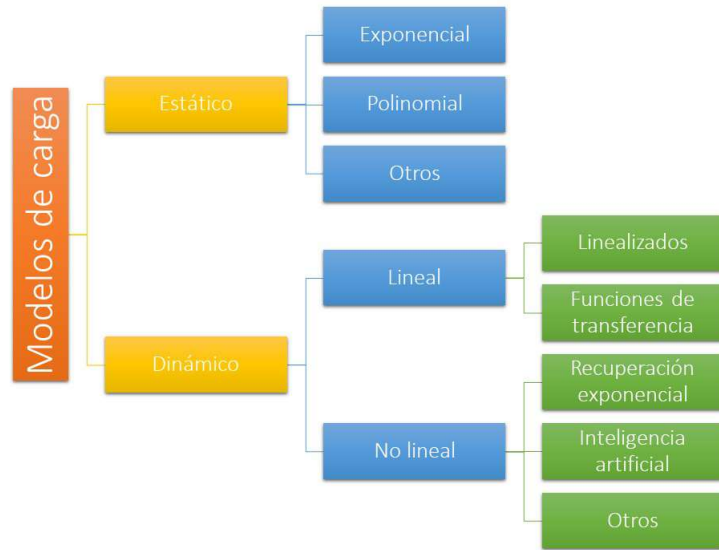
---

En este capítulo se explica el modelo matemático de las cargas no lineales y se analiza su comportamiento en el circuito 32 de la ciudad de Popayán, ante la conexión de 4 cargas diferentes, que son típicas en los sectores residenciales; además, se hace una clasificación de las perturbaciones que ocurren ante diferentes eventos y fallas provocadas en la red por medio de simulación en NEPLAN.

#### **3.1. Modelo de cargas no lineales**

Un modelo de carga, es la representación matemática de la potencia activa y reactiva consumida por un elemento de carga, en función de las variables que afectan su respuesta, las cuales corresponden a la tensión del barraje al que se encuentra conectada y a la frecuencia de la red [24]. De igual manera, este modelo debe buscar cumplir con una correspondencia física y de flexibilidad, es decir que las ecuaciones deben representar la realidad en todo instante de tiempo y ser capaz de definir el mayor número de tipos de cargas [25]. Los modelos de carga son esenciales para diseñar planear y operar los sistemas eléctricos de potencia [25], además, se pueden clasificar por sus características estáticas y dinámicas [24], como se presentan en la figura 3.1.

**Figura 3.1:** Tipos de modelo de carga



Fuente: Modelos de carga y sus efectos en estudios sistémicos: aplicaciones al SING [25]

### 3.1.1. Modelo estático de carga

Los modelos estáticos de carga expresan las características de las cargas (potencia activa y reactiva) en cualquier instante de tiempo como funciones algebraicas de la magnitud de la tensión en un barraje y de la frecuencia. Generalmente, las componentes de potencia activa y reactiva se consideran separadas, ya que no presentan correlación [24]. Uno de los modelos estáticos de carga más comunes es el exponencial, el cual se describe a continuación.

#### 3.1.1.1. Modelo exponencial

El modelo exponencial permite separar la dependencia de potencia activa reactiva ante variaciones de tensión consumida por la carga y representarla como se muestra en (3.1) y (3.2), respectivamente [24] [25]:

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (3.1)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (3.2)$$

Donde  $P_0$  y  $Q_0$  son las potencias activa y reactiva nominales,  $V_0$  es la tensión nominal del barraje,  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la carga exponencial que varían con los elementos que se encuentran conectados al barraje [24]; se debe agregar que a tensión nominal estos exponentes  $\alpha$  y  $\beta$  son similares a las pendientes  $(dP/dV)$  y  $(dQ/dV)$  respectivamente; al respecto conviene decir que los valores de  $\alpha$  oscilan entre 0.5 y 1.8, mientras que  $\beta$  está entre 1.5 y 6 [25].

Es importante dejar claro que, cuando los exponentes  $\alpha$  y  $\beta$  valen 0, 1 o 2, el modelo corresponde a cargas eléctricas de tipo: potencia constante, corriente constante e impedancia constante, respectivamente [24]. Sin embargo, el comportamiento real de las cargas eléctricas no se encuentra asociado exactamente a un valor típico como 0, 1 o 2, dada su compleja composición y la dependencia de todas sus componentes. No obstante, se asocia un comportamiento de impedancia constante a una ampolla incandescente, y un comportamiento a potencia constante a un motor. De igual forma, una carga residencial se asemeja a un comportamiento de impedancia constante, y una carga industrial se acerca más a una de potencia constante [25].

La Tabla 3.1 Muestra los valores característicos para algunas cargas residenciales en los sistemas eléctricos.

**Tabla 3.1:** Valores de  $\alpha$  y  $\beta$  de cargas residenciales típicas

<b>Carga</b>	$\alpha$	$\beta$
Lámpara incandescente	1.6	0
Lámpara fluorescente	1	3
Lámpara de mercurio	2.5	2.2
Aire acondicionado	0.3	1.8
Refrigerador	0.8	2.5
Televisor	2	3.3
Calentador resistivo	2	0

Fuente: Estimación de parámetros de un modelo de carga de recuperación exponencial empleando técnicas meta heurística [24]

### 3.1.2. Modelo dinámico de carga

Por otro lado, en el modelo dinámico la potencia activa y reactiva consumida por la carga, dependen de los valores de las tensiones en el tiempo y su modelado se realiza a partir de ecuaciones diferenciales o de ecuaciones en diferencia (tiempo discreto), relacionando la potencia activa y reactiva con la magnitud del voltaje y la frecuencia de la red [24] [25].

Uno de los modelos dinámicos de carga ampliamente utilizado es el modelo de recuperación exponencial, el cual se basa en el modelo anteriormente descrito y es empleado en este documento para definir las características dinámicas de las cargas de estudio.

#### 3.1.2.1. Modelo de recuperación exponencial

En el modelo de carga de recuperación exponencial (ERL, *Exponential Load Recovery*), la potencia activa y reactiva consumida por la carga tienen una respuesta de tipo exponencial ante una variación de tipo escalón unitario en la tensión. Este comportamiento se modela a partir de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden, expresadas de la siguiente manera [24]:

$$T_P \frac{dx_p}{dt} = -x_p + P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_s} - P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_t} \quad (3.3)$$

$$P_d = x_p + P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_t} \quad (3.4)$$

$$T_q \frac{dx_q}{dt} = -x_q + Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\beta_s} - Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\beta_t} \quad (3.5)$$

$$Q_d = x_q + Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\beta_t} \quad (3.6)$$

Donde:

$x_p, x_q$	Variables de estado asociadas a la potencia activa y reactiva.
$x_p, x_q$	Variables de estado asociadas a la potencia activa y reactiva.
$P_0, Q_0$	Potencia activa y reactiva nominales consumidas por la carga.
$\alpha_s, \beta_s$	Exponentes asociados a la respuesta estacionaria de la carga.
$\alpha_t, \beta_t$	Exponentes asociados a la respuesta transitoria de la carga.
$T_p, T_q$	Constantes de tiempo asociadas a los tiempos de recuperación de la respuesta exponencial.
$V, V_0$	Magnitud del voltaje de nodo y magnitud del voltaje nominal del sistema.

### 3.2. Selección de cargas de prueba

El circuito 32 de la ciudad de Popayán esta dividido en 2 sectores: institucional y residencial, donde los principales consumos de energía se dan por refrigeración, iluminación, aire acondicionado y otros equipos como de laboratorio, de oficina y médicos. [26].

En [27] se evidencia que el mayor porcentaje de consumo eléctrico en los 4 edificios que conforman el sector de Santo Domingo en el centro histórico de la ciudad, está constituido por dispositivos de iluminación, equipos ofimáticos, electrodomésticos y acondicionamiento, como se observa en la Tabla 3.2

Teniendo en cuenta la información anterior, se seleccionan las cargas no lineales: lampara fluorescente, televisor, refrigerador y aire acondicionado, para ser simuladas con base en el modelo de recuperación exponencial con los parámetros de  $\alpha$  y  $\beta$  definidos en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.2:** Estimación de consumo eléctrico edificios sector Santo Domingo

Edificio	Consumo total [KWh]	Consumo mensual por grupo				
		Iluminación [KWh]	Equipos ofimáticos [KWh]	Electrodomésticos [KWh]	Acondicionamiento [KWh]	Otros [KWh]
Claustro El Carmen	6600.22	4767.22 (72 %)	1607.22 (25 %)	218.98 (3 %)	0 (0 %)	6.8 (0 %)
Unidad de Salud	2489.12	849.28 (34 %)	1047.07 (42 %)	255.36 (10 %)	248.4 (10 %)	89 (4 %)
Casa Rosada	1309.13	941.22 (72 %)	354.39 (27 %)	12.61 (1 %)	0.9 (0 %)	0 (0 %)
Claustro Santo Domingo	9900.14	6463.71 (65 %)	2748.72 (28 %)	541.81 (6 %)	103.7 (1 %)	42.2 (0 %)

Fuente: Guía de estudio del potencial de ahorro eléctrico [27]

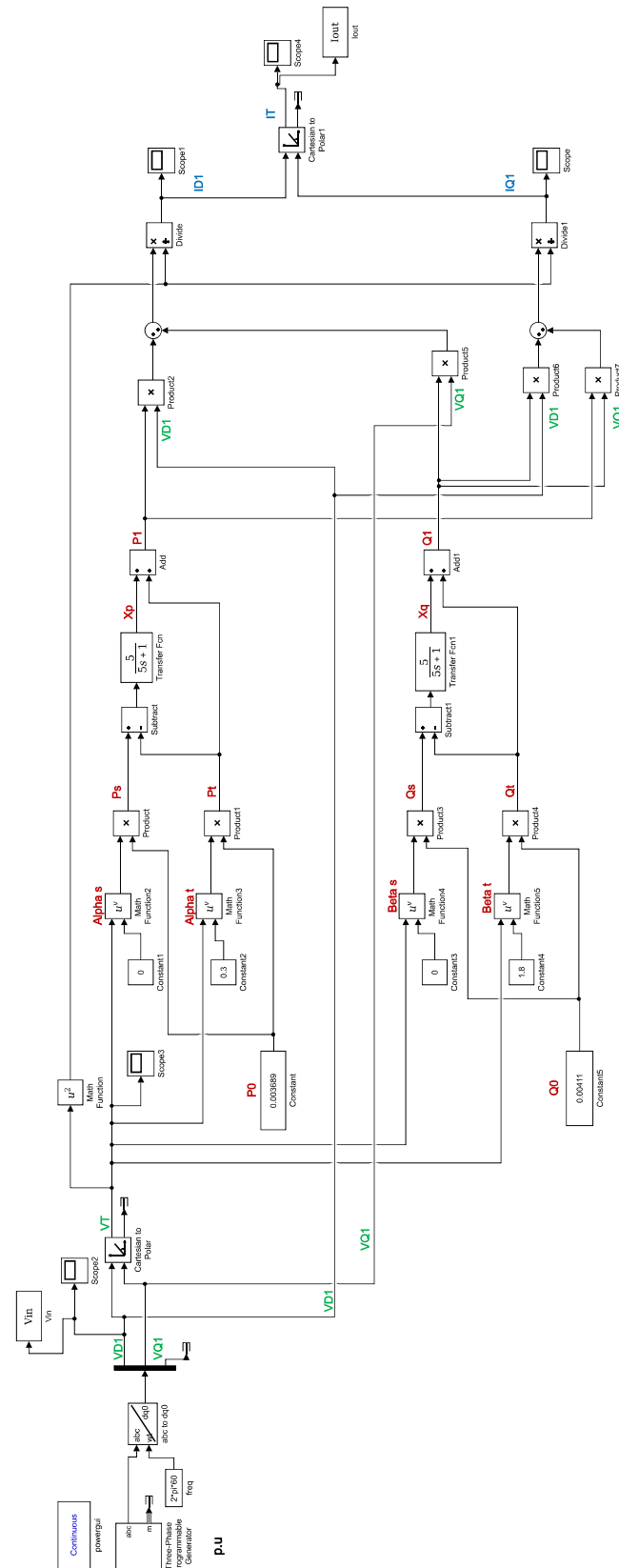
### 3.3. Simulación del modelo de recuperación exponencial en Simulink-Matlab

Para demostrar la naturaleza no lineal del modelo ERL se construye el esquema en diagramas de bloques en el software Simulink de Matlab presentado en la figura 3.2, con el propósito de determinar el comportamiento exponencial de las cargas seleccionadas; este modelo consta de un generador trifásico programable que alimenta el sistema con una señal de voltaje senoidal en las fases a,b,c, de magnitud 0.7071 pu con una frecuencia de 60 Hz. El uso de este elemento requiere la presencia del bloque *powergui*, el cual se precisa cuando se hace uso de algún elemento del toolbox *Simscape Power Systems*<sup>10</sup>, como el generador anteriormente mencionado; *powergui* se configura en el método “continuo” para resolver el circuito.

Las fases de voltaje generadas se transforman al marco de referencia DQ0, obteniendo los componentes de voltaje VD1 y VQ1 y se calcula la magnitud VT del voltaje a partir de los mismos; cabe mencionar que VT equivale a la magnitud del voltaje (V/V0) de la ecuaciones (3.3) y (3.5); posteriormente, se estima la potencia activa P1 y reactiva Q1 a partir de los valores P0,  $\alpha$  y Q0,  $\beta$  respectivamente. Para esta prueba, los parámetros P0 y Q0 se mantienen constantes para cada carga, mientras que  $\alpha$  y  $\beta$  varían de acuerdo a los exponentes presentados en la Tabla 3.1. Finalmente se obtienen los componentes de corriente ID e IQ y la corriente de salida del sistema, que corresponde a la magnitud IT calculada a partir de los mismos.

<sup>10</sup> **Simscape Power Systems:** producto de MATLAB que proporciona bibliotecas de componentes y herramientas de análisis para modelar y simular sistemas de energía eléctrica.

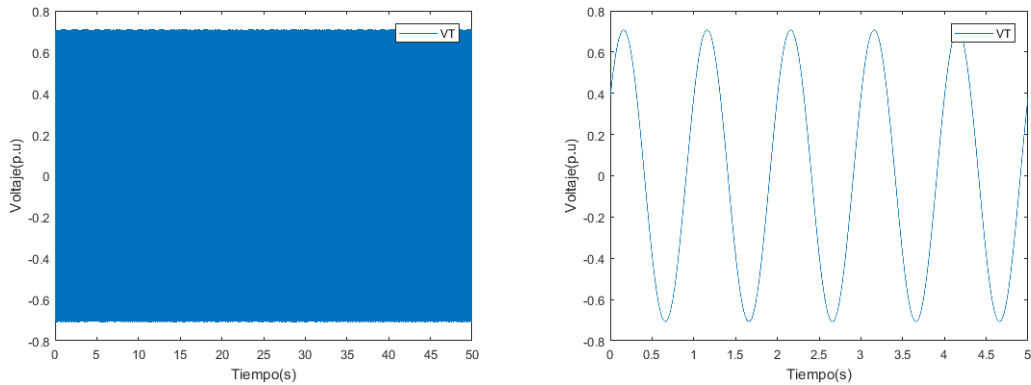
Figura 3.2: Modelo de carga de recuperación exponencial en Simulink



Fuente: Elaboración propia

La figura 3.3 presenta el comportamiento de la señal de tensión de entrada del modelo simulado, donde (a) atañe a la magnitud del voltaje VT y (b) exhibe su comportamiento senoidal.

**Figura 3.3:** Magnitud de voltaje VT de modelo de carga no lineal



(a) Voltaje de entrada al sistema

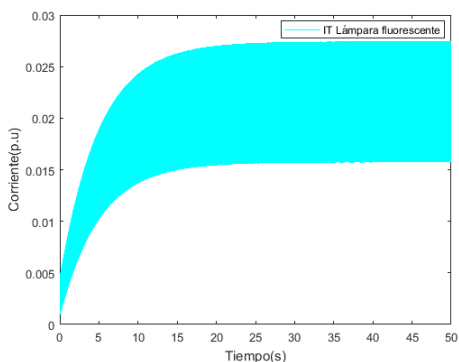
(b) Señal senoidal del voltaje de entrada

Fuente: Elaboración propia

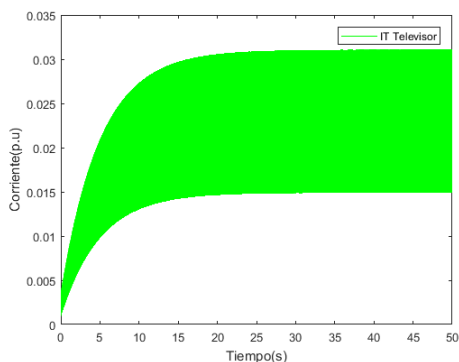
Por otro lado, la figura 3.4 corresponde a la respuesta en corriente del sistema con los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la lámpara fluorescente (a), el televisor (b), el refrigerador (c) y el aire acondicionado (d) respectivamente, para una constante de tiempo de recuperación de 5 segundos, evidenciando el comportamiento exponencial del modelo, de esta manera se demuestra que el modelo de recuperación exponencial seleccionado para este caso de estudio, realmente exhibe un comportamiento no lineal deseado para la carga, dado que, la no linealidad de una carga radica en que la señal de voltaje de entrada tiene una forma de onda diferente a la señal de corriente de salida; puede notarse que la amplitud de la corriente varía de acuerdo a los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  asignados a la carga.



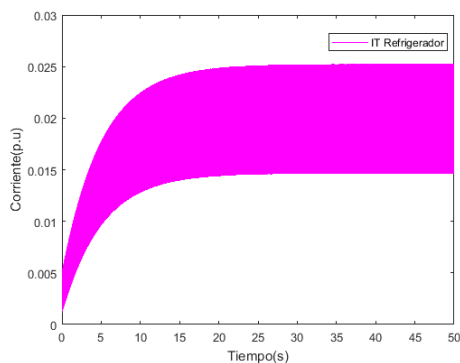
**Figura 3.4:** Comportamiento exponencial de la magnitud de la corriente IT para cada carga



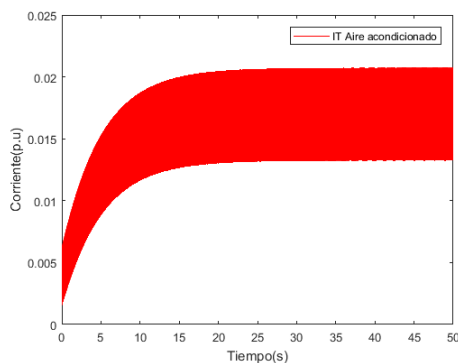
(a) Magnitud de la corriente IT de la lámpara



(b) Magnitud de la corriente IT del televisor



(c) Magnitud de la corriente IT del refrigerador



(d) Magnitud de la corriente IT del aire acondicionado

Fuente: Elaboración propia

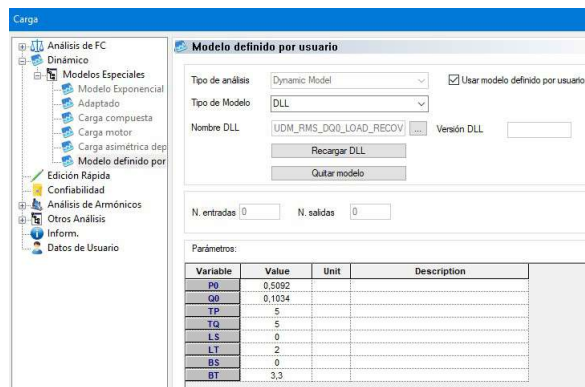
### 3.4. Simulación del circuito 32 en presencia de una carga no lineal

Al nodo POP\_CENTRO2 del circuito implementado en la figura 2.3 fueron conectadas 2 ramas en paralelo, cada una de ellas conformadas por un interruptor en serie a una carga como se muestra en la figura 3.5, donde una de las cargas se configura como puramente resistiva, teniendo un comportamiento lineal; mientras que, la otra se define como no lineal asignándole un modelo de recuperación exponencial; esta modificación se hace con el objetivo de analizar el comportamiento del circuito ante la conexión y desconexión de la carga no lineal. Los parámetros de los elementos agregados al circuito se presentan en la sección A.2. del Anexo A.



cial y permite asignar valores numéricos de  $P_0$ ,  $Q_0$  (en por unidad) y de los exponentes  $\alpha_S$ ,  $\alpha_T$ ,  $\beta_S$ ,  $\beta_T$  de las ecuaciones (3.3) y (3.5), los cuales se denominan dentro de la librería como LS, LT, BS, BT respectivamente. La figura 3.6 muestra la configuración del modelo dinámico de la carga en NEPLAN a través del archivo UDM\_RMS\_DQ0\_LOAD\_RECOVERY.dll, disponible en la carpeta de ejemplos para la simulación dinámica de aplicaciones eléctricas del software, en cuya interfaz se admite la modificación de los parámetros del modelo.

**Figura 3.6:** Interfaz del modelo definido por usuario en NEPLAN



Fuente: Elaboración propia

La asignación de los parámetros (para el análisis de flujo de carga) de la lampara fluorescente, el refrigerador, el televisor y el aire acondicionado; se realizó a partir del factor de potencia típico de estas carga, como se presenta en [28] y la potencia aparente, la cual se varia en tres porcentajes diferentes (10 %, 50 %, 90 %) de potencia consumida por la carga respecto a la capacidad instalada del transformador 18T01; al mismo tiempo se varia la proporción de potencia aparente consumida por la carga RESISTIVA, de manera que se compense esta variable por ambas cargas y se trabaje al 100 % de la capacidad instalada; finalmente, el factor de potencia para esta carga se establece como 1.

Antes de continuar, debe decirse que la conexión de la carga se realizó directamente a la red de 13,2 kV con el propósito de representar la multiplicidad de las cargas no lineales enlazadas a la misma, comprendiendo todos los circuitos de 110 V y 220 V que conforman el sistema simulado. Además, cuando se hace referencia a una carga no lineal (televisor, refrigerador, lampara fluorescente y aire acondicionado) conectada según los 3 porcentajes de variación de potencia consumida (10 %, 50 %, 90 %), se está representando la presencia masiva de

este tipo de cargas; un ejemplo de esto, es el caso de la conexión de lámparas fluorescentes de 26 W estándar que consumen 23.7 W [28] individualmente, donde un porcentaje del 10 % de carga instalada equivale a tener 51.687 lámparas vinculadas aproximadamente.

Cabe señalar que el modelo de la librería requiere los valores de P0 y Q0 en por unidad, haciendo necesario el cálculo estos valores, a partir de la potencia activa y reactiva nominales consumidos por la carga, en vista de que es un sistema trifásico los valores en por unidad se calculan a partir de las ecuaciones (3.7) y (3.8). Definiendo la potencia aparente del transformador 18T01 como la potencia base ( $S_{base}$ ).

$$P0[p.u] = \frac{P[Watt]}{\sqrt{3}S_{base}} \quad (3.7)$$

$$Q0[p.u] = \frac{Q[VAr]}{\sqrt{3}S_{base}} \quad (3.8)$$

La Tabla 3.3 presenta los parámetros calculados para cada carga no lineal en los 3 porcentajes de potencia aparente establecidos.

**Tabla 3.3:** Parámetros de cargas no lineales para modelo de recuperación exponencial

Tipo de carga	FP	% Carga No lineal	Sbase [MVA]	Scarga [MVA]	P [MW]	P0 [p.u]	Q [MVAr]	Q0 [p.u]
TV LCD 32"	0.98	10	12.5	1.25	1.225	0.0566	0.249	0.0115
		50	12.5	6.25	6.125	0.2829	1.244	0.0574
		90	12.5	11.25	11.025	0.5092	2.239	0.1034
Aire acondicionado	0.9	10	12.5	1.25	1.125	0.05196	0.545	0.0252
		50	12.5	6.25	5.625	0.2598	2.724	0.1258
		90	12.5	11.25	10.125	0.4676	4.904	0.2265
Lámpara Fluorescente	0.67	10	12.5	1.25	0.838	0.0387	0.928	0.0429
		50	12.5	6.25	4.1875	0.1934	4.64	0.2143
		90	12.5	11.25	7.538	0.3482	8.352	0.3858
Refrigerador	0.42	10	12.5	1.25	0.525	0.0242	1.134	0.0524
		50	12.5	6.25	2.625	0.1212	5.672	0.2620
		90	12.5	11.25	4.725	0.2182	10.21	0.4716

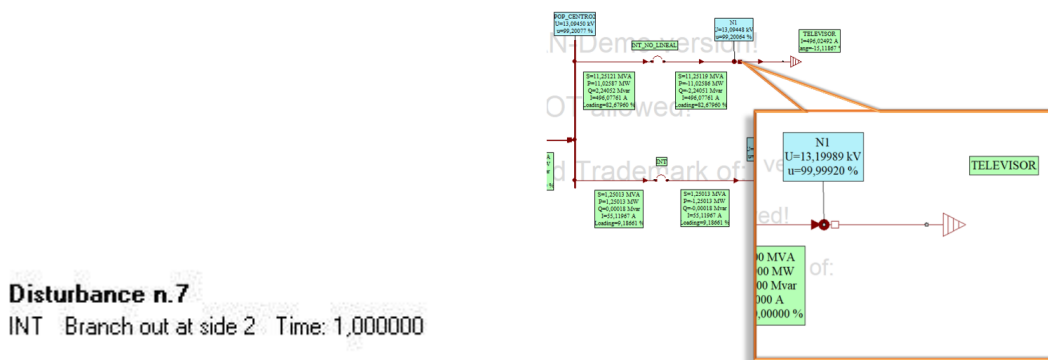
Fuente: Elaboración propia

### 3.5. Perturbaciones en el circuito 32 en presencia de cargas no lineales

Para la toma de datos en el software de simulación NEPLAN se efectúan diversas pruebas, con el propósito de estudiar el comportamiento del circuito 32 ante la conexión de los diferentes tipos de cargas no lineales, para ello se compara la respuesta del sistema con la carga lineal conectada y en ausencia de ella. Los resultados se obtienen haciendo uso de los módulos: análisis de flujo de carga, análisis de armónicos y simulador dinámico disponibles en el software, para el último se configuraron 3 eventos: **a**, **b** y **c**, que son descritos a continuación.

**Evento a:** Apertura del interruptor INT conectado a la carga típica, a 1 segundo del tiempo de simulación, creando una perturbación en el modulo de Simulación Dinamica, como se muestra en la figura 3.7 (a). Posteriormente se realiza la conexión y desconexión de la carga no lineal a través del switch lógico que acopla la carga al nodo N1 del circuito, como se muestra en (b), esta última dinámica se realiza con el objeto de determinar el efecto de la carga no lineal sobre el sistema, al comparar los resultados obtenidos para la carga típica con los valores arrojados por el software al conectar cualquiera de las cargas no lineales (lámpara fluorescente, televisor, aire acondicionado o refrigerador).

Figura 3.7: Evento a



(a) Apertura del interruptor INT

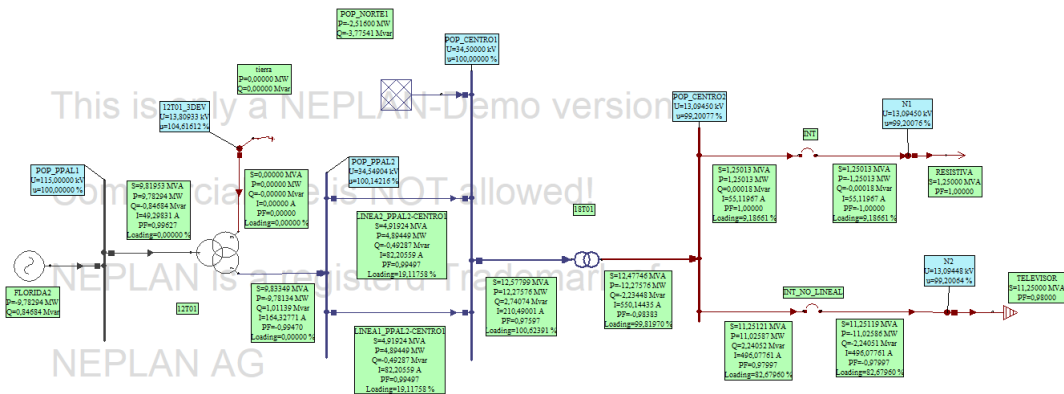
(b) Apertura switch lógico de la carga no lineal en NEPLAN

Fuente: Elaboración propia

**Evento b:** Se configura el circuito como se muestra en (a) de la figura 3.8 y se genera la perturbación (b) la cual consiste en abrir y cerrar el interruptor

INT\_NO\_LINEAL conectado a la carga de prueba, de manera que se conecte y desconecte la carga no lineal directamente.

**Figura 3.8: Evento b en NEPLAN**



(a) Diagrama unifilar para evento b en NEPLAN

**Disturbance n.10**

INT\_NO\_LINEAL Branch out at side 2 Time: 1.000000  
 INT\_NO\_LINEAL Branch in at side 2 Time: 2.000000

(b) Perturbación apertura y cierre del INT\_NO\_LINEAL

Fuente: Elaboración propia

**Evento c:** Para la configuración circuital propuesta en el evento anterior, se procede a operar sobre el interruptor INT\_NO\_LINEAL, provocando la secuencia apertura, cierre y apertura de este interruptor, como se observa en la figura 3.9

**Figura 3.9: Evento c en NEPLAN**

**Disturbance n.11**

INT\_NO\_LINEAL Branch out at side 2 Time: 1.000000  
 INT\_NO\_LINEAL Branch in at side 2 Time: 2.000000  
 INT\_NO\_LINEAL Branch out at side 2 Time: 3.000000

Fuente: Elaboración propia

### **3.5.1. Armónicos**

#### **3.5.1.1. Armónicos de tensión**

Para realizar un análisis de armónicos en el software NEPLAN, inicialmente se establece cada carga no lineal (televisor, refrigerador, lámpara fluorescente y aire acondicionado) como una fuente de armónicos, para ello se toma de [12] [29] la información de la configuración armónica para cada tipo de carga, la cual se encuentra disponible en el Anexo B.

Posteriormente se ejecuta el cálculo de armónicos en el software y se recopilan los datos de THDv del sistema, junto al mayor armónico individual (Dv) y el orden armónico en el que ocurre con la carga no lineal conectada, como se presenta en la Tabla 3.4, se registran los resultados obtenidos al variar el porcentaje de potencia consumida por cada tipo de carga no lineal en los diferentes puntos de la red de distribución que compone el circuito 32.

Los datos consignados en la Tabla 3.4 se analizan relacionándolos con los límites permisibles establecidos para armónicos de tensión consignados en la Tabla 1.2, de acuerdo con el nivel de voltaje de cada nodo y se demarca en color rojo los valores que superan estos límites.

De la tabla 3.4, se puede concluir que la distorsión armónica individual y total de tensión aumenta proporcionalmente a medida que se incrementa el porcentaje de potencia demandada por cargas de carácter no lineal utilizadas por los usuarios, así mismo, se observa que los nodos con mayor afectación son los cercanos a la carga no lineal, donde también se acrecienta el valor de los parámetros mencionados.

Respecto a las cargas evaluadas se infiere que los límites solo son sobrepasados por el televisor cuando se tienen porcentajes de 50 % y 90 % de potencia consumida, cuyo armónico individual que mayor distorsión de tensión genera es el 5. Para el caso del 90 % de carga instalada se violan los límites de Dv y THDv en todos los nodos, mientras que en el caso del 50 % se exceden los valores de referencia (3.0 % y 5 % para niveles de tensión de 34.5 kV y 13.2 kV) a partir del nodo POP\_PPAL2.

**Tabla 3.4:** Máxima distorsión armónica individual de tensión y distorsión armónica total.

Nodo	Nivel de tensión [kV]	10 %		50 %		90 %					
		THDv [%]	h	Max. Dv [%]	THDv [%]	h	Max. Dv [%]	THDv [%]	h	Max. Dv [%]	
TV	POP_PPAL1	115	0.290	5	0.22	1.490	5	1.16	1.490	5	1.16
	POP_PPAL2	34.5	0.770	5	0.60	4.020	5	3.12	4.020	5	3.12
	12T01_3DEV	13.2	0.530	5	0.41	2.760	5	2.14	2.760	5	2.14
	POP_CENTRO1	34.5	0.97	5	0.76	5.090	5	3.95	5.090	5	3.95
	POP_CENTRO2	13.2	2	5	1.48	10.450	5	7.69	10.450	5	7.69
	N1	13.2	2	5	1.48	10.450	5	7.69	10.450	5	7.69
	N2	13.2	2	5	1.48	10.450	5	7.69	10.450	5	7.69
	REF	POP_PPAL1	115	0.04	5	0.05	0.28	5	0.2	0.52	5
POP_PPAL2		34.5	0.14	5	0.1	0.74	5	0.53	1.4	5	0.98
12T01_3DEV		13.2	0.1	5	0.07	0.53	5	0.38	1	5	0.7
POP_CENTRO1		34.5	0.17	5	0.13	0.94	5	0.68	1.24	5	1.77
POP_CENTRO2		13.2	0.37	5	0.25	1.96	5	1.31	3.67	5	2.41
N1		13.2	0.37	5	0.25	1.96	5	1.31	3.67	5	2.41
N2		13.2	0.37	5	0.25	1.96	5	1.31	3.67	5	2.41
CFL		POP_PPAL1	115	0.01	7	0.01	0.07	7	0.05	0.13	7
	POP_PPAL2	34.5	0.04	7	0.03	0.19	7	0.14	0.35	7	0.25
	12T01_3DEV	13.2	0.03	7	0.02	0.14	7	0.1	0.25	7	0.18
	POP_CENTRO1	34.5	0.04	7	0.03	0.14	7	0.17	0.45	7	0.32
	POP_CENTRO2	13.2	0.16	3	0.06	0.81	3	0.66	1.48	3	1.19
	N1	13.2	0.16	3	0.13	0.81	3	0.66	1.48	3	1.19
	N2	13.2	0.16	3	0.13	0.81	3	0.66	1.48	3	1.19
	AAC	POP_PPAL1	115	0.05	5	0.04	0.28	5	0.2	0.52	5
POP_PPAL2		34.5	0.14	5	0.1	0.74	5	0.53	1.4	5	0.98
12T01_3DEV		13.2	0.1	5	0.07	0.53	5	0.38	1	5	0.7
POP_CENTRO1		34.5	0.17	5	0.13	0.94	5	0.68	1.77	5	1.24
POP_CENTRO2		13.2	0.37	5	0.25	1.96	5	1.31	3.67	5	2.41
N1		13.2	0.37	5	0.25	1.96	5	1.31	3.67	5	2.41
N2		13.2	0.37	5	0.25	1.96	5	1.31	3.67	5	2.41

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.1.2. Armónicos de corriente

De acuerdo con la norma NTC 5001, los armónicos de corriente deben evaluarse según la relación **Isc/IL**, que considera la reciprocidad entre la corriente de cortocircuito (Isc) y la corriente de demanda máxima (IL), lo cual proporciona una idea del comportamiento de la impedancia de la red y su capacidad para manejar los armónicos. Entre más grande sea el valor de Isc en comparación con IL, menor es la probabilidad de que el circuito sea afectado por la presencia de armónicos. En este caso Isc/IL se calcularon teniendo en cuenta lo siguiente:



- **Isc** se obtiene de hacer el análisis de cortocircuito de la red con el nodo en falla definido como POP\_CENTRO2 y tiene un valor de 7172,45200 A.
- **IL** se obtiene de la implementación de la carga no lineal al 100 % en el software de simulación y corresponde a la corriente RMS en el lado 2 del transformador 18T01.

En la Tabla 3.5 se presentan los valores de Isc, IL e Isc/IL obtenidos para cada carga no lineal conectada a la red individualmente. Cabe destacar que la corriente de demanda máxima en el punto de conexión común IL, cambia dependiendo de la configuración armónica de la carga a usar, mientras que la mínima corriente de cortocircuito Isc se mantiene constante para cualquier carga, ya que se evalúa en el PCC.

**Tabla 3.5:** Relación Isc/IL para cada carga

<b>Carga</b>	<b>Isc[A]</b>	<b>IL[Arms]</b>	<b>Isc/IL</b>
Refrigerador	7172.452	552.22	12.98839593
Lámpara fluorescente	7172.452	550.1	13.03845119
TV	7172.452	774.5	9.260751453
Aire acondicionado	7172.452	552.2	12.98886635

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 3.6 presenta los máximos valores de distorsión armónica individual de corriente Dh, extraídos a partir de la simulación, así como el orden armónico en el que ocurrieron, además se muestra la distorsión armónica total de corriente THDi de cada elemento junto al valor de distorsión total de demanda TDD, calculado para cada caso.

De acuerdo con los datos adquiridos durante el experimento, se estableció que entre Isc e IL existe una baja correspondencia, lo cual indica que la corriente de cortocircuito no es lo suficientemente grande con respecto a la corriente de demanda máxima (12.988, 13.0388, 9.261 y 12.989), incrementando la posibilidad de padecer armónicos de corriente en la red.

En consonancia con los valores de referencia especificados en la Tabla 1.3 se analizan los resultados para cada nivel de tensión de acuerdo con el valor de Isc/IL (<20 en la Tabla) y el orden armónico, con el fin de diagnosticar si los parámetros Dh y TDD de la Tabla 3.6 superan el margen establecido, el cual en caso

positivo se resalta en rojo dentro de la Tabla.

Con base en los valores calculados mediante simulación, se determina que para la mayoría de las cargas, las distorsiones armónicas (corriente y voltaje) son particularmente elevadas en los armónicos impares, como se observa en la Tabla 3.6 donde se evidencia que los valores de distorsión armónica individual y de demanda total que exceden los límites establecidos son de orden 1, 3, 5 y 7. Ahora bien, durante la prueba para cada una de las cargas en diferentes proporciones de potencia instalada, se obtuvo que el televisor es el caso en el que más se presenta este fenómeno debido a la configuración armónica asignada; la lámpara fluorescente por el contrario constituye una fuente armónica más pequeña, ya que solo supera los límites establecidos si la potencia se ve incrementada por encima del 50%. Respecto al aire acondicionado se observa que al incrementar la carga al 90% los valores de  $D_h$  y TDD se atenúan esto puede deberse a la cancelación de armónicos.

También, fue posible comprobar que los armónicos inyectados por las cargas no lineales se propagan, afectando en mayor medida a los nodos y elementos más cercanos a la carga, lo cual constituye un perjuicio para el funcionamiento de la red de Popayán, dados los efectos nocivos de este tipo de disturbio.

**Tabla 3.6:** Distorsión de demanda total y máxima distorsión armónica individual de corriente

Carga	Elemento	10 %				50 %				90 %			
		h	Dh	THDi	TDD	h	Dh	THDi	TDD	h	Dh	THDi	TDD
TV	FLORIDA2	1	4.419	10.08	0.6580	1	22.009	51.34	3.7108	1	39.754	94.25	8.2446
	12T01	1	4.419	10.08	2.1935	1	22.009	51.34	12.3700	1	39.754	94.25	27.4804
	LINEA1_PPAL2_CENTRO1	1	7.366	10.08	1.0968	1	36.682	51.33	6.1848	1	66.256	94.21	13.7380
	LINEA2_PPAL2_CENTRO1	1	7.366	10.08	1.0968	1	36.682	51.33	6.1848	1	66.256	94.21	13.7380
	POP_NORTE	1	0.126	0.28	0.0188	1	0.6304	1.16	0.0943	1	1.139	1.75	0.1716
	18T01	1	14.857	8.15	5.7802	1	22.09	51.34	32.3309	1	133.638	74.17	70.4763
	INT	5	7.255	1.88	1.1966	5	20.927	276.03	3.4998	5	7.706	18.1	1.3089
	RESISTIVA	5	7.255	1.88	1.1965	5	20.927	9.82	3.4994	5	7.706	18.1	1.3089
	INT_NO_LINEAL	1	39.061	99.82	9.9730	1	193.885	98.78	49.2472	1	349.418	98.58	88.6647
	TV	1	39.061	99.83	9.9740	1	193.885	98.79	49.2496	1	349.418	98.59	88.6686
REF	FLORIDA2	5	0.3809	0.69	0.0784	5	1.978	3.65	0.4151	5	3.641	6.77	0.7711
	12T01	5	0.3809	0.69	0.2614	5	1.978	3.65	1.3835	5	3.641	6.77	2.5703
	LINEA1_PPAL2-CENTRO1	5	0.6348	0.35	0.1326	5	3.296	1.82	0.6895	5	6.068	3.39	1.2849
	LINEA2_PPAL2-CENTRO1	5	0.6348	0.35	0.1326	5	3.296	1.82	0.6895	5	6.068	3.39	1.2849
	POP_NORTE	5	0.0109	0.01	0.0038	5	0.0564	0.03	0.0114	5	0.1039	0.06	0.0227
	18T01	5	0.3809	0.69	0.6931	5	6.638	3.67	3.6425	5	12.221	6.81	6.7971
	INT	5	1.242	0.3	0.2970	5	3.581	0.91	0.9010	5	1.319	0.34	0.3366
	RESISTIVA	5	1.242	0.3	0.2970	5	3.581	0.91	0.9010	5	1.319	0.34	0.3366
	INT_NO_LINEAL	3	6.6	1.43	1.4159	3	32.76	7.09	7.0371	3	59.04	12.77	12.7460
	REF	3	6.6	1.43	1.4159	3	32.76	7.09	7.0371	3	59.04	12.77	12.7460
CFL	FLORIDA2	5	0.082	0.17	0.0194	5	0.4259	0.9	0.1027	5	0.7842	1.68	0.1917
	12T01	5	0.082	0.17	0.0646	5	0.4259	0.9	0.3422	5	0.7842	1.68	0.6389
	LINEA1_PPAL2-CENTRO1	5	0.1367	0.09	0.0342	5	0.7099	0.45	0.1711	5	1.307	0.84	0.3194
	LINEA2_PPAL2-CENTRO1	5	0.1367	0.09	0.0342	5	0.7099	0.45	0.1711	5	1.307	0.84	0.3194
	POP_NORTE	5	0.0023	0	0.0000	5	0.122	0.01	0.0038	5	0.0224	0.01	0.0038
	18T01	5	0.2754	0.17	0.1690	6	1.43	0.91	0.9058	5	2.632	1.69	1.6881
	INT	5	0.2674	0.08	0.0795	7	0.9086	0.23	0.2286	7	0.3408	0.09	0.0894
	RESISTIVA	5	0.2674	0.08	0.0795	7	0.9086	0.23	0.2286	7	0.3408	0.09	0.0894
	INT_NO_LINEAL	3	6.05	1.12	1.1132	3	3.03	5.57	5.5445	3	54.12	10.05	10.0389
	CFL	3	6.05	1.12	1.1132	3	3.03	5.57	5.5445	3	54.12	10.05	10.0389
AAC	FLORIDA2	5	0.3809	0.69	0.0784	5	1.978	3.65	0.4151	3	59.04	12.77	12.7464
	12T01	5	0.3809	0.69	0.2614	5	1.978	3.65	1.3836	5	3.641	6.77	2.5704
	LINEA1_PPAL2-CENTRO1	5	0.6348	0.35	0.1326	5	3.296	1.82	0.6896	3	59.04	12.77	4.8402
	LINEA2_PPAL2-CENTRO1	5	0.6348	0.35	0.1326	5	3.296	1.82	0.6894	5	6.068	3.39	1.2849
	POP_NORTE	5	0.0109	0.01	0.0099	5	0.0564	0.03	0.0298	5	6.068	3.39	1.2842
	18T01	5	1.279	0.7	0.6931	5	6.638	3.67	3.6426	5	12.221	6.81	6.7973
	INT	5	1.242	0.3	0.2970	5	3.581	0.91	0.9010	5	3.641	6.77	0.7712
	RESISTIVA	5	1.242	0.3	0.2970	5	3.581	0.91	0.9010	5	1.319	0.34	0.3366
	INT_NO_LINEAL	3	6.6	1.43	1.4160	3	32.76	7.09	7.0374	5	1.319	0.34	0.3366
	ACC	3	6.6	1.43	0.5417	3	32.76	7.09	2.6863	5	0.1039	0.06	0.0599

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2. Variaciones de tensión de estado estable

Para el estudio de este disturbio, descrito en la sección 1.4.5, se deshabilita el switch lógico del evento a y se consignan los resultados correspondientes al voltaje de nodo U(kV) y al porcentaje u[%] del mismo con respecto al voltaje nominal para la carga típica, los cuales se computan mediante el modulo de análisis de

flujo de carga disponible en el software; seguidamente se conecta la carga no lineal a la red habilitando nuevamente el switch y se registran los datos calculados, a partir de los cuales se estima el efecto de la presencia de la carga no lineal respecto a esta perturbación.

La tabla 3.7 presenta los valores obtenidos de U[kV] y u[%] para 10 %, 50 % y 90 % de carga no lineal en cada uno de los nodos del circuito, mientras que en la Tabla C.1 Anexo C se documentan para la carga resistiva.

**Tabla 3.7:** Variaciones de tensión en los nodos del circuito

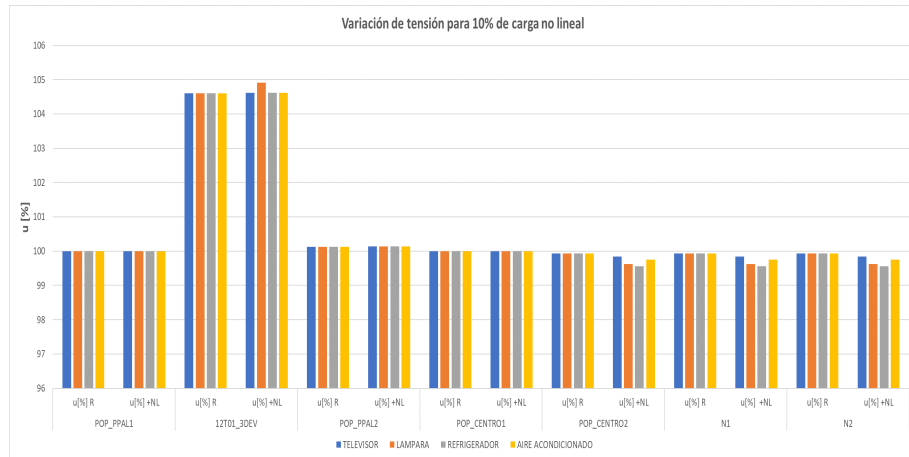
Carga	Nodo	10%		50%		90%	
		U[kV]	u[%]	U[kV]	u[%]	U[kV]	u[%]
TV	POP_PPAL1	115	100	115	100	115	100
	12T01_3DEV	13.80834	104.60862	13.80376	104.57395	13.79871	104.53571
	POP_PPAL2	34.54362	100.12642	34.51916	100.05553	34.49361	99.98147
	POP_CENTRO1	34.5	100	34.5	100	34.5	100
	POP_CENTRO2	13.19136	99.93456	13.19735	99.97993	13.19989	99.9992
	N1	13.19136	99.93456	13.19735	99.97993	13.19989	99.9992
	N2	13.19135	99.93444	13.19734	99.97986	13.19989	99.99919
REF	POP_PPAL1	115	100	115	100	115	100
	12T01_3DEV	13.80884	104.61242	13.80648	104.59453	13.80417	104.57704
	POP_PPAL2	34.54636	100.13437	34.53341	100.14276	34.52115	100.0613
	POP_CENTRO1	34.5	100	34.5	100	34.5	100
	POP_CENTRO2	13.14245	99.56404	12.95092	98.113	12.75292	96.613
	N1	13.14245	99.56402	12.9509	98.11292	12.75289	96.61284
	N2	13.14244	99.56393	12.95091	98.11294	12.75291	96.61298
CFL	POP_PPAL1	115	100	115	100	115	100
	12T01_3DEV	13.8091	104.91438	13.80785	104.61371	13.80667	104.59598
	POP_PPAL2	34.5478	100.13856	34.54084	100.13698	34.53434	100.09953
	POP_CENTRO1	34.5	100	34.5	100	34.5	100
	POP_CENTRO2	13.150710	99.62661	12.99383	99.04809	12.833	97.2197
	N1	13.15071	99.62659	12.99382	99.04801	12.83298	97.21954
	N2	13.15071	99.6265	12.99382	99.04803	12.833	97.21969
AAC	POP_PPAL1	115	100	115	100	115	100
	12T01_3DEV	13.80933	104.6161	13.80901	104.61371	13.79871	104.61151
	POP_PPAL2	34.54908	100.14227	34.54726	100.13698	34.49361	100.13211
	POP_CENTRO1	34.5	100	34.5	100	34.5	100
	POP_CENTRO2	13.16648	99.74604	13.07435	99.04809	12.98095	98.34035
	N1	13.16648	99.74602	13.07434	99.04801	12.98093	98.34035
	N2	13.16646	99.74593	13.07434	99.04803	12.98094	98.34049

Fuente: Elaboración propia

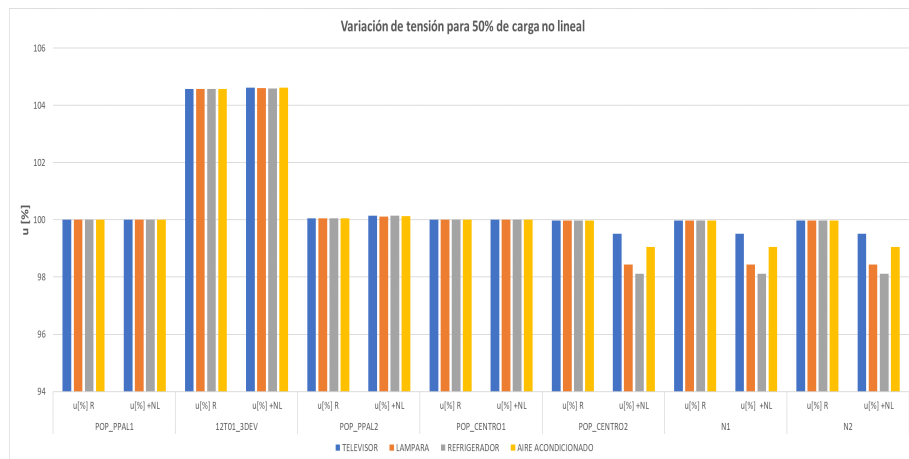
Según los registros consignados en la tabla 3.7 al variar el porcentaje de la carga no lineal, se encuentra que todos los datos están dentro del margen establecido en la Tabla 1.11; no obstante, se observa que la presencia de la carga no lineal afecta significativamente a los elementos conectados cerca de ella, ocasionando una disminución en la magnitud del voltaje de los barrajes desde la subestación POP\_CENTRO2, la cual se acentúa al elevar el porcentaje de carga instalada de tipo no lineal. Así mismo, se nota que el factor de potencia de las cargas no lineales afecta la respuesta del sistema, produciéndose una mayor disminución en las variables  $u[\%]$  y  $U[kV]$  para aquellas cargas con bajo factor de potencia como el refrigerador ( $FP=0.42$ ) y lámpara fluorescente ( $FP=0.67$ ).

La figura 3.10 presenta la comparación de los voltaje  $u[\%]R$  y  $u[\%]+NL$  para cada nodo de la red, donde el primero indica que solo esta conectada la carga resistiva, mientras que el segundo corresponde a la conexión de la carga no lineal, la comparación se realiza para las 4 cargas establecidas. En (a),(b) y (c) se presentan las variaciones para tres porcentajes de carga conectada (10 %, 50 % y 90 %).

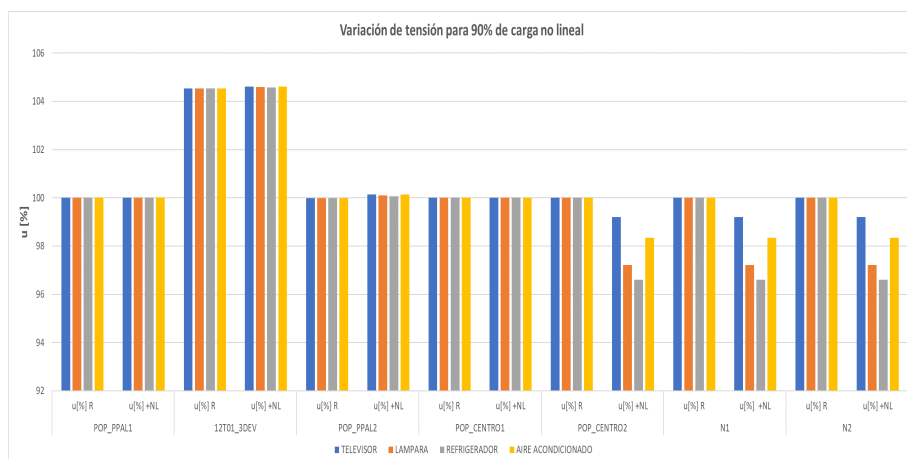
**Figura 3.10: Variaciones de tensión con y sin carga no lineal**



(a) Variación de tensión ante el 10 % de carga no lineal



(b) Variación de tensión ante el 50 % de carga no lineal



(c) Variación de tensión ante el 90 % de carga no lineal

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3. Desbalances de tensión

Por otro lado, la norma NTC 5001 advierte que el porcentaje de desbalance de voltaje según el nivel de tensión, debe ser menor o igual que 1.5 % para 115 kV y 2.0 % para 13.2 kV y 34.5 kV, como se señala en la Tabla 1.8 de la sección 1.4.12; sin embargo no formula ecuaciones para calcularlo.

Para efectos de este trabajo, se tiene en cuenta la norma IEEE 1159 donde se proponen las ecuaciones (3.9) y (3.10) para el cálculo de este factor, como sigue:

$$\%Desbalance = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100 \% \quad (3.9)$$

Donde:

$$\beta = \frac{|V_{AB}|^4 + |V_{BC}|^4 + |V_{CA}|^4}{(|V_{AB}|^2 + |V_{BC}|^2 + |V_{CA}|^2)^2} \quad (3.10)$$

Los valores de tensión de fase línea a línea  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  y  $V_{CA}$ , contemplados en las ecuaciones (3.9) y (3.10) se obtienen en cada nodo del circuito, a partir del análisis de flujo de carga para una red asimétrica sin balance de carga; así mismo, se presentan los valores de  $\beta$ , calculados a partir de la ecuación (3.10) y el desbalance de tensión en cada nodo. En la Tabla 3.8 se refieren los porcentajes de desbalance de tensión con la carga no lineal conectada y en la Tabla C.2 del Anexo C se apuntan los factores de desbalance calculados para la carga típica. Esta prueba se hace con el switch lógico como se describe en el evento a.

En la figura 3.11 se comparan los porcentajes de desbalance de tensión, cuando se agregan las diferentes cargas no lineales a la red para el 10 %, 50 % y 90 % de potencia instalada, los cuales se muestran en las subfiguras (a), (b) y (c). Se evidencia que la inserción de una carga no lineal al sistema afecta los niveles de desbalance de tensión, porque a medida que se aumenta la magnitud de la potencia instalada de la carga no lineal se incrementa el desbalance de voltaje, a diferencia del factor de potencia, donde se incrementa el factor de desbalance cuando el FP es pequeño, como en los casos de la lámpara y el refrigerador representados por las barras amarilla y azul en la figura 3.11.

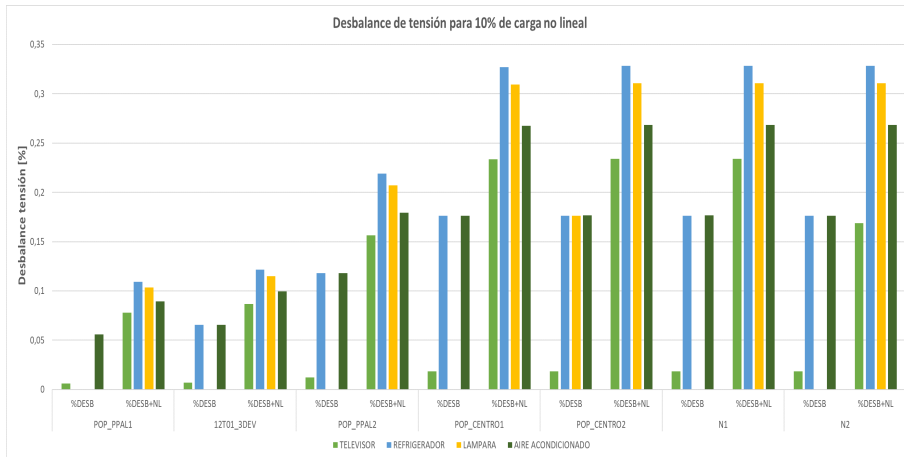
**Tabla 3.8: Porcentaje de desbalance de tensión en cada nodo del circuito**

Carga	Elemento	Fase	10 %			50 %			90 %			
			voltaje fase [kV]	$\beta$	Desbalance [%]	voltaje fase [kV]	$\beta$	Desbalance [%]	voltaje fase [kV]	$\beta$	Desbalance [%]	
TV	POP_PPAL1	L1L2	115.04589	0.33333	0.078	115.07145	0.33333	0.1215	115.09473	0.33334	0.16133	
		L2L3	114.91031			114.86023			114.81448			
		L3L1	115.04386			115.06845			115.09101			
	12T01_3DEV	L1L2	13.82439	0.33333	0.0868	13.8332	0.33333	0.1352	13.84027	0.33334	0.1795	
		L2L3	13.80751			13.80688			13.80532			
		L3L1	13.80548			13.80375			13.8012			
	POP_PPAL2	L1L2	34.61027	0.33333	0.1564	34.64639	0.33334	0.2436	34.67452	0.33334	0.32334	
		L2L3	34.56743			34.57955			34.58566			
		L3L1	34.51674			34.50065			34.48105			
	POP_CENTRO1	L1L2	34.56486	0.33334	0.2335	34.60117	0.33334	0.3639	34.63443	0.33335	0.48306	
		L2L3	34.50911			34.51417			34.51873			
		L3L1	34.42617			34.38501			34.34745			
	POP_CENTRO2	L1L2	13.21604	0.33334	0.2341	13.19608	0.33334	0.3658	13.17126	0.33335	0.48699	
		L2L3	13.1632			13.11372			13.06194			
		L3L1	13.18263			13.1441			13.10242			
	N1	L1L2	13.21604	0.33334	0.2341	13.19607	0.33334	0.3658	13.17125	0.33335	0.48704	
		L2L3	13.1632			13.11371			13.06192			
		L3L1	13.18263			13.14409			13.1024			
	N2	L1L2	13.21603	0.33334	0.1689	13.19607	0.33334	0.3658	13.17126	0.33335	0.48699	
		L2L3	13.18261			13.11371			13.06194			
		L3L1	13.18261			13.14409			13.10242			
	REF	POP_PPAL1	L1L2	115.06436	0.33333	0.1092	115.16821	0.33334	0.2835	115.27625	0.33335	0.4629
			L2L3	114.87443			114.67397			114.46774		
			L3L1	115.06131			115.15851			115.25785		
12T01_3DEV		L1L2	13.8296	0.33333	0.1215	13.8613	0.33334	0.3155	13.89402	0.33335	0.5148	
		L2L3	13.80598			13.80001			13.79405			
		L3L1	13.80313			13.79256			13.78182			
POP_PPAL2		L1L2	34.63033	0.33334	0.2189	34.75627	0.33335	0.5681	34.8873	0.33339	0.9268	
		L2L3	34.57034			34.60022			34.63191			
		L3L1	34.49939			34.41623			34.33205			
POP_CENTRO1		L1L2	34.59088	0.33334	0.327	34.73689	0.33338	0.849	34.88832	0.33346	1.386	
		L2L3	34.51272			34.53269			34.5527			
		L3L1	34.39668			34.23229			34.06394			
POP_CENTRO2		L1L2	13.19387	0.33334	0.3285	13.08668	0.33338	0.864	12.97545	0.33347	1.4308	
		L2L3	13.11987			12.89431			12.66078			
		L3L1	13.14728			12.96792			12.78514			
N1		L1L2	13.19386	0.33334	0.3285	13.08667	0.33338	0.864	12.97543	0.33347	1.4308	
		L2L3	13.11986			12.8943			12.66076			
		L3L1	13.14728			12.96791			12.78512			
N2		L1L2	13.19385	0.33334	0.3285	13.08668	0.33338	0.8641	12.97544	0.33347	1.4307	
		L2L3	13.11985			12.8943			12.66078			
		L3L1	13.14726			12.96791			12.78514			
CFL		POP_PPAL1	L1L2	115.06083	0.333334	0.103316	115.14922	0.333338	0.252851	115.2364	0.333344	0.399868
			L2L3	114.8812			114.70925			114.5402		
			L3L1	115.05807			115.14208			115.22478		
	12T01_3DEV	L1L2	13.82882	0.333334	0.114964	13.8573	0.333339	0.281308	13.88417	0.333347	0.444699	
		L2L3	13.80646			13.80257			13.79761			
		L3L1	13.80378			13.79604			13.78737			
	POP_PPAL2	L1L2	34.62765	0.333336	0.207132	34.74237	0.33335	0.506586	34.84999	0.333376	0.800552	
		L2L3	34.57089			34.6038			34.629			
		L3L1	34.50377			34.43914			34.37037			
	POP_CENTRO1	L1L2	34.58597	0.33334	0.309336	34.71107	0.333372	0.75703	34.83496	0.333429	1.197219	
		L2L3	34.51204			34.52924			34.54571			
		L3L1	34.40224			34.26117			34.12303			
	POP_CENTRO2	L1L2	13.19959	0.33334	0.310641	13.11655	0.333373	0.768242	13.02528	0.333434	1.228872	
		L2L3	13.12959			12.9451			12.75384			
		L3L1	13.15545			13.0098			12.85852			
	N1	L1L2	13.19959	0.33334	0.310641	13.11654	0.333373	0.768242	13.02526	0.333434	1.228874	
		L2L3	13.12959			12.94509			12.75382			
		L3L1	13.15545			13.00979			12.8585			
	N2	L1L2	13.19958	0.33334	0.310689	13.11655	0.333373	0.768249	13.02528	0.333434	1.228872	
		L2L3	13.12957			12.9451			12.75384			
		L3L1	13.15543			13.00979			12.85852			
	AAC	POP_PPAL1	L1L2	115.05259	0.333334	0.089385	115.10502	0.333335	0.178658	115.1597	0.333338	0.271841
			L2L3	114.89722			114.79456			114.6874		
			L3L1	115.05027			115.1007			115.15353		
12T01_3DEV		L1L2	13.82639	0.333334	0.099488	13.84325	0.333336	0.19881	13.86185	0.333339	0.302355	
		L2L3	13.80704			13.80455			13.80294			
		L3L1	13.80472			13.79997			13.79606			
POP_PPAL2		L1L2	34.61813	0.333335	0.179218	34.68609	0.333342	0.358028	34.76221	0.333353	0.544447	
		L2L3	34.56902			34.58769			34.61214			
		L3L1	34.51095			34.47185			34.43618			
POP_CENTRO1		L1L2	34.57435	0.333338	0.267615	34.64892	0.333352	0.534912	34.72703	0.333377	0.813888	
		L2L3	34.51043			34.52071			34.53138			
		L3L1	34.41541			34.33111			34.2433			
POP_CENTRO2		L1L2	13.20877	0.333338	0.268501	13.15925	0.333353	0.539985	13.11299	0.333379	0.82680812	
		L2L3	13.14821			13.03818			12.9287			
		L3L1	13.17051			13.08319			12.99784			
N1		L1L2	13.20877	0.333338	0.26854	13.15924	0.333353	0.539985	13.11297	0.333379	0.826809	
		L2L3	13.1482			13.03817			12.92868			
		L3L1	13.17051			13.08318			12.99782			
N2		L1L2	13.20875	0.333338	0.268501	13.15925	0.333353	0.540033	13.11299	0.333379	0.826808	
		L2L3	13.14819			13.03817			12.9287			
		L3L1	13.17049			13.08318			12.99784			

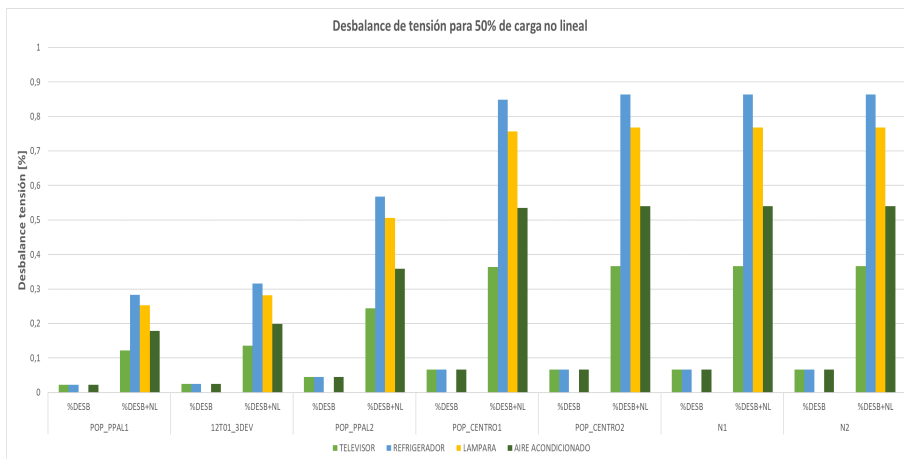
Fuente: Elaboración propia



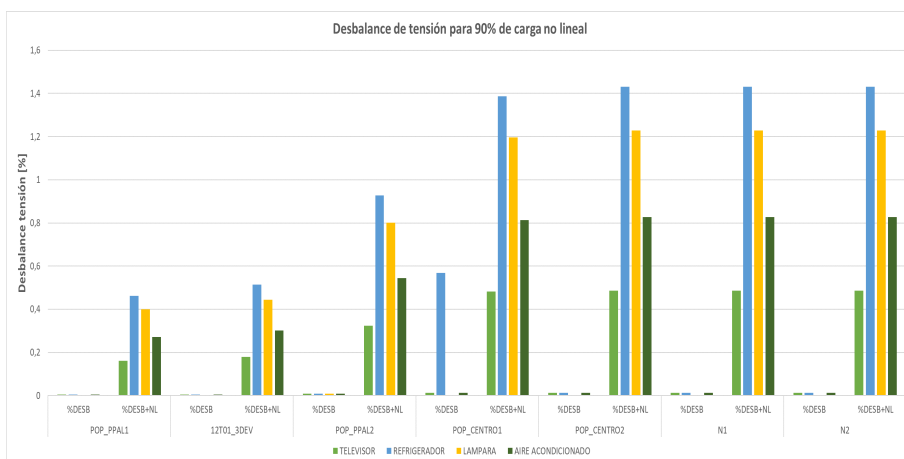
**Figura 3.11: Comparación desbalances de tensión con y sin carga no lineal**



(a) Desbalance de tensión ante un 10 % de carga no lineal



(b) Desbalance de tensión ante un 50 % de carga no lineal

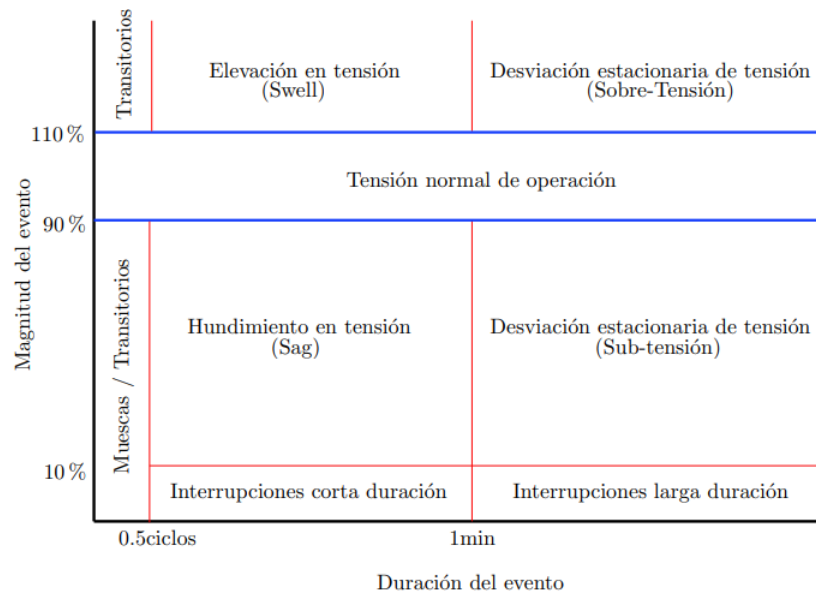


(c) Desbalance de tensión ante un 90 % de carga no lineal

Fuente: Elaboración propia

Cuando ocurre un evento en la red de distribución, el voltaje de algún punto del sistema puede salirse del rango permitido (evento en tensión), el cual está clasificado según la magnitud y la duración, dentro de alguna de las perturbaciones descritas en la figura 3.12 [30]

**Figura 3.12:** Clasificación de los eventos de tensión según estándar IEEE 1159-1995



Fuente: Diseño de una metodología para el análisis de *sags* de tensión en redes de distribución [30]

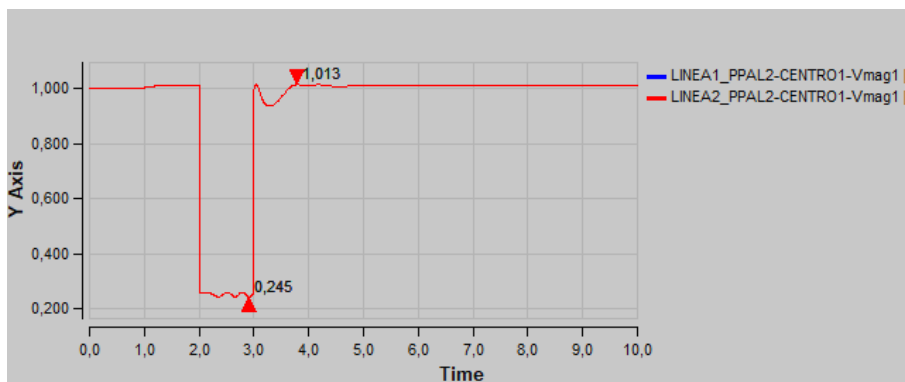
De acuerdo con la clasificación de disturbios ilustrada en la figura 3.12, se identifican las perturbaciones que se presentaron durante la simulación dinámica del circuito ante los eventos generados, esto se hace necesario ya que la norma no establece valores de referencia para estas perturbaciones y en consecuencia a partir de las gráficas obtenidas se reconoce la presencia de sobre tensiones e interrupciones de corta y larga duración.

### 3.5.4. Interrupciones de corta duración

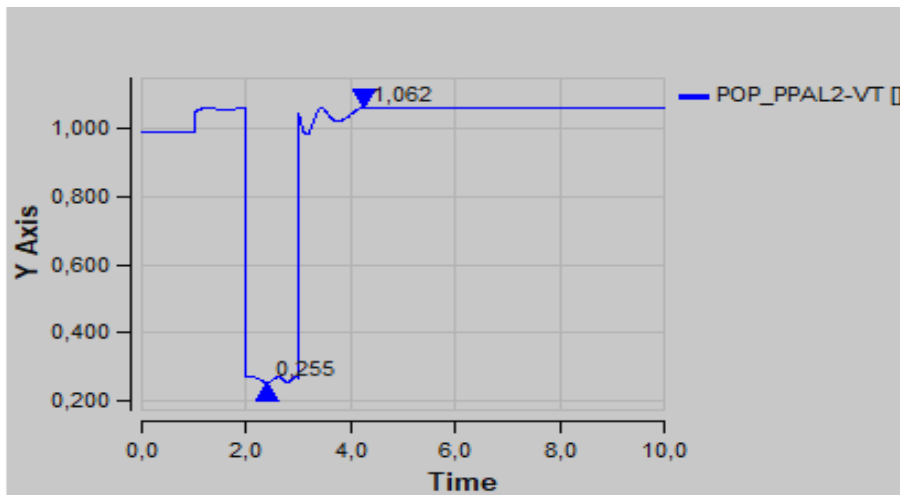
El evento c es configurado para el circuito de estudio, posteriormente se ejecuta en el simulador dinámico de NEPLAN, con el objeto de evaluar el comportamiento del sistema ante la variación de la potencia de la carga no lineal en un 10%, 50% y 90%, a partir de lo cual es posible observar la ocurrencia de una interrupción de corta duración con un tiempo de 1 segundo donde el voltaje cae por debajo del 10% de  $V_c$  como se especifica en la norma NTC 5001.

La figura 3.13 presenta los resultados de esta simulación para dos porcentajes diferentes de carga instalada; en (a) se observa la respuesta en las líneas LINEA1\_PPAL2-CENTRO1 y LINEA2\_PPAL2-CENTRO1, para la simulación del televisor con un porcentaje de carga consumida de 10 % y en (b) se expone la respuesta ante la simulación de la lampara con un 50 % de carga instalada en el nodo POP\_PPAL2.

**Figura 3.13:** Interrupciones de corta duración para cargas no lineales



(a) Interrupción de corta duración para 10 % de carga: Televisor



(b) Interrupción de corta duración para 50%:lámpara

Fuente: Elaboración propia

### **3.5.5. Variaciones de tensión de larga duración**

#### **3.5.5.1. Sobretensiones**

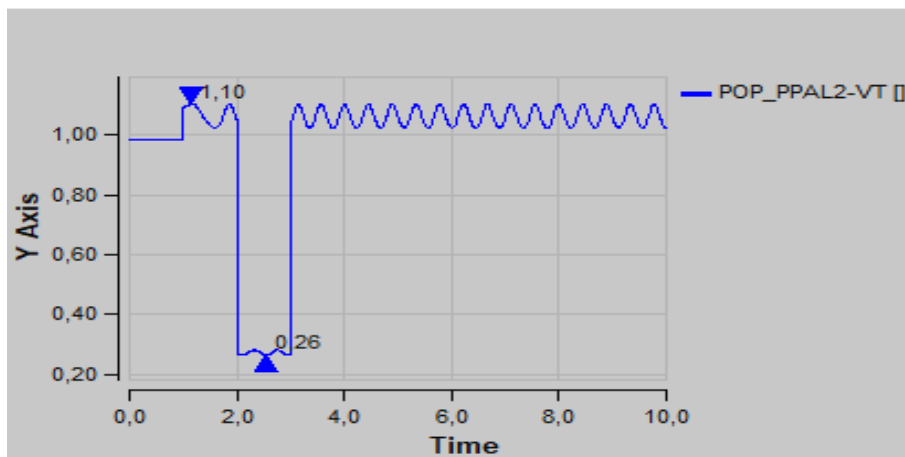
Ante la aplicación del evento b sobre el circuito 32 de la ciudad de Popayán, con las cargas en los diferentes porcentajes fue posible observar que esta perturbación descrita en la sección 1.4.10.1., ocurre cuando el refrigerador y la lámpara consumen un 90 % y 10 % de la capacidad instalada del transformador con una durabilidad mayor a un minuto. La figura 3.14 presenta la sobretensión ocurrida al desconectar la carga a través del interruptor. Donde, en (a) se indica la respuesta ante la conexión de la carga refrigerador a una potencia de 90 % de la capacidad total del sistema en el barraje POP\_PPAL2, en el cual se observa que el valor eficaz de la tensión llega a 1.10 p.u, es decir, 0.10 p.u por encima de la tensión declarada para el sistema y en (b) se muestra el valor de la respuesta obtenida en FLORIDA2, cuando se conecta la lámpara con un porcentaje de un 90 % del total de la carga consumida por el sistema, excediendo en 0.102 p.u la tensión declarada.

#### **3.5.6. Interrupciones de larga duración ( $\geq 1$ min)**

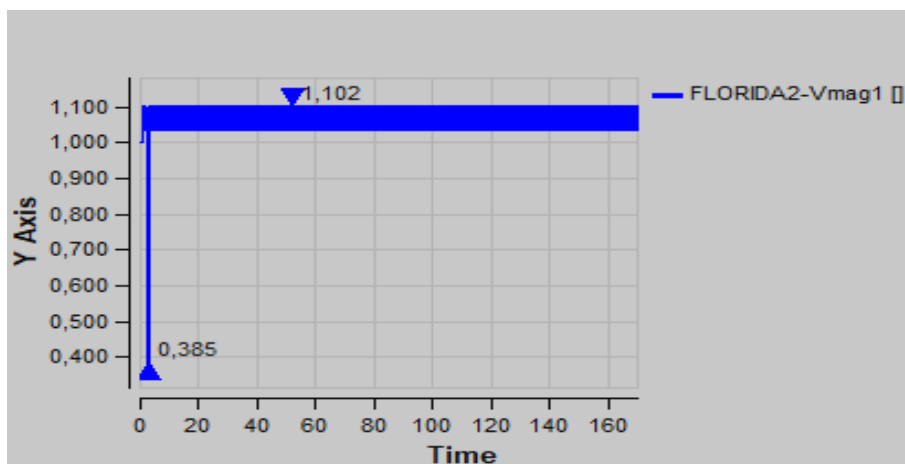
Cuando ocurre el evento b, se pudo observar mediante simulación que este tipo de perturbación se manifiesta en los casos donde se demanda un 90 % de la capacidad instalada para la lámpara fluorescente, el refrigerador y el televisor, luego de la segunda apertura del interruptor se presenta una caída de tensión próxima al 0 %, que se mantiene por un periodo mayor a un minuto como se muestra en la figura 3.15, vale la pena mencionar que en el caso de (a) y (b), el valor del voltaje no se recupera debido al evento aplicado en el cual se mantiene abierto el interruptor. Donde,

- En (a) se presenta la respuesta del voltaje en el barraje POP\_PPAL2 ante la conexión de la carga refrigerador en un 90 % de potencia consumida.
- En (b) se presenta la respuesta del barraje POP\_PPAL1 ante la conexión de 90 % de la carga lámpara fluorescente en un 90 % de potencia consumida.
- En (c) se presenta la respuesta del voltaje en la subestación FLORIDA2 ante la conexión de la carga televisor en un 90 % de potencia consumida,

**Figura 3.14:** Simulación de sobretensiones para cargas no lineales



(a) Sobretensión para refrigerador



(b) Sobretensión para lámpara

Fuente: Elaboración propia

al efectuar el evento c.

### **3.5.7. Perturbaciones no presentes en la simulación**

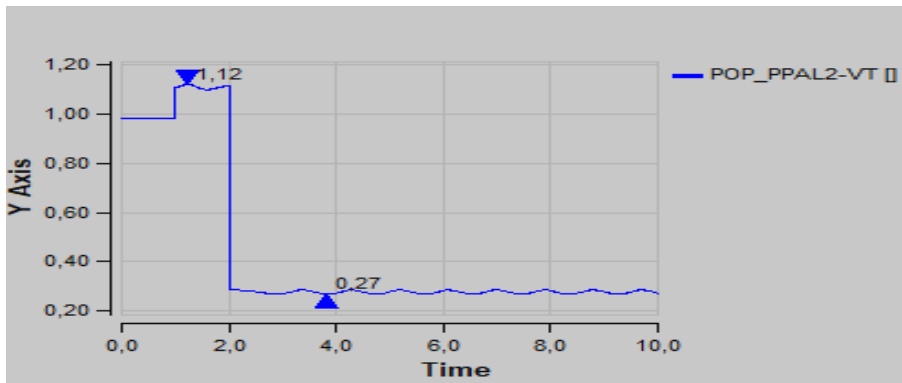
Por lo que se refiere a las muescas de tensión, variaciones de frecuencia, *flickers*, sobretensiones transitorias, hundimientos de tensión (*sags*), elevaciones de tensión (*swells*) y subtensiones, es posible decir que estas perturbaciones no se presentaron ante los eventos simulados, ni para la conexión y desconexión de la carga no lineal en sus 3 variaciones de potencia aparente, esto se debe a que estas perturbaciones no tienen como causa la presencia de cargas no lineales, al modelo dinámico elegido para la carga no lineal o al diseño de la red.

Cuando se aplicó el evento a, en la red simulada con la lampara fluorescente conectada en un 90 % se evidenció que en FLORIDA2 surge una subida de tensión tanto en (a) como en la (b) de la figura 3.16, además se evidencio que cuando se conecta la carga no lineal al circuito de 13.2 kV el valor de la magnitud de tensión es mayor, pero no se encuentra dentro de las definiciones que establece la norma para ser considerada una perturbación, debido a que no sobrepasa el valor de voltaje ni los tiempos de duración estipulados. De igual forma sucede con POPNORTE1 y 18T01, sus resultados son mostrados en el Anexo D.

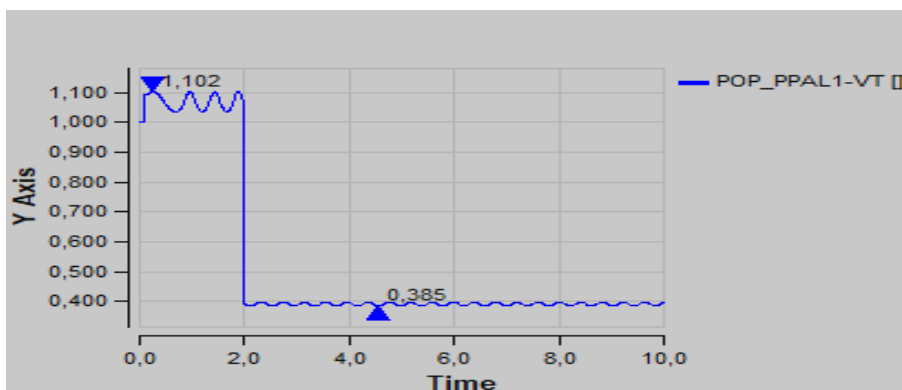
Por otro lado, se implementó el evento b en la red simulada en presencia de un 10 % de carga no lineal conectada, que en este caso fue el televisor y se observó el comportamiento de la magnitud del voltaje para FLORIDA2 presentado en las figuras 3.17 (a) y (b), donde se ven oscilaciones en la tensión durante 3.5 segundos aproximadamente, pero los valores para los máximos y mínimos obtenidos a partir de la simulación permanecieron en los rangos permitidos por la norma NTC 5001. De manera similar ocurre con los elementos POP\_PPAL1, 12T01, LINEAS POP\_PPAL1\_CENTRO1 y POP\_PPAL2\_CENTRO1, POP\_NORTE1, 18T01, POP\_CENTRO2 y LA CARGA RESISTIVA, cuyo comportamiento se presenta en la Tabla D.1 del Anexo D.

En la figura 3.18 se presenta la comparación del voltaje en POP\_NORTE1 cuando hay presencia de carga no lineal y en ausencia de ella, cuando la carga televisor es conectada a un 90% del total de la carga instalada (a) y es posible observar que la respuesta es tipo exponencial cuando hay presencia de carga no lineal (b), esto es debido al comportamiento de esta última que está determi-

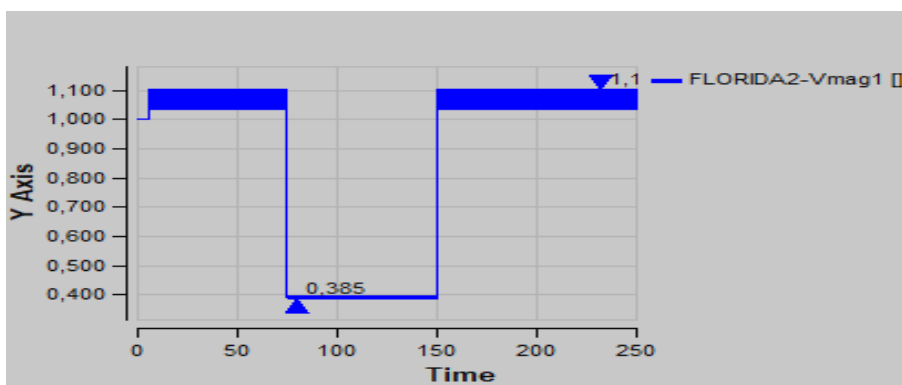
**Figura 3.15:** Simulación de interrupciones de larga duración para cargas no lineales



(a) Interrupción de larga duración ocasionada por refrigeradores



(b) Interrupción de larga duración ocasionada por lámparas

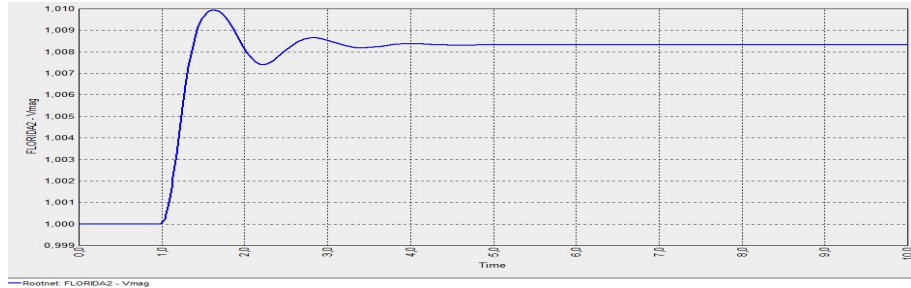


(c) Interrupción de larga duración ocasionada por televisores

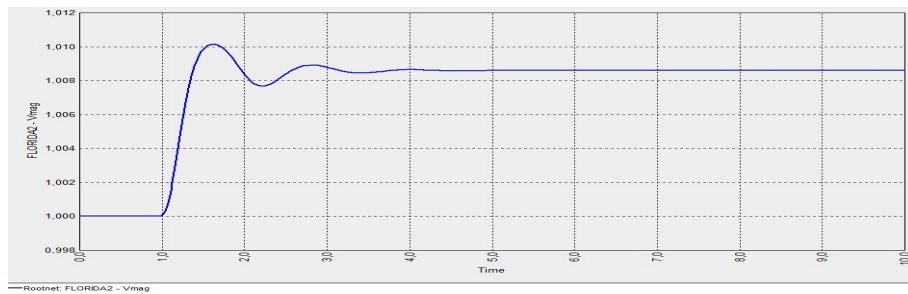
Fuente: Elaboración propia

nado por el modelo de Recuperación Exponencial.

**Figura 3.16:** Conexión de lampara fluorescente a 90 % de carga instalada



(a) Magnitud del voltaje en Florida 2 sin carga no lineal

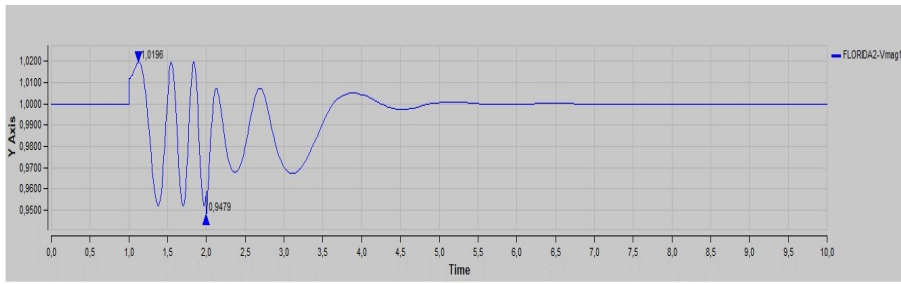


(b) Magnitud del voltaje en Florida 2 con carga no lineal

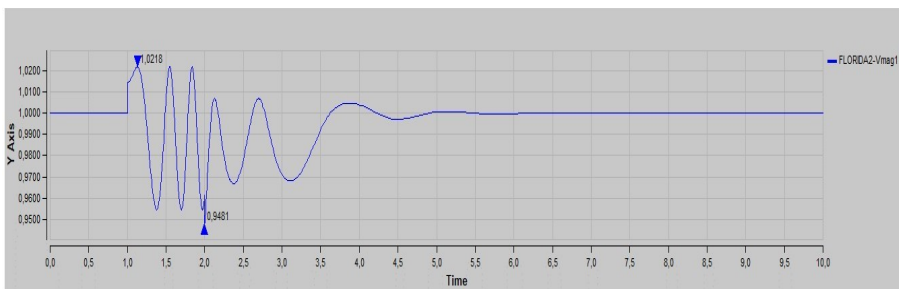
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.17: Conexión de televisor a 10% de carga instalada**



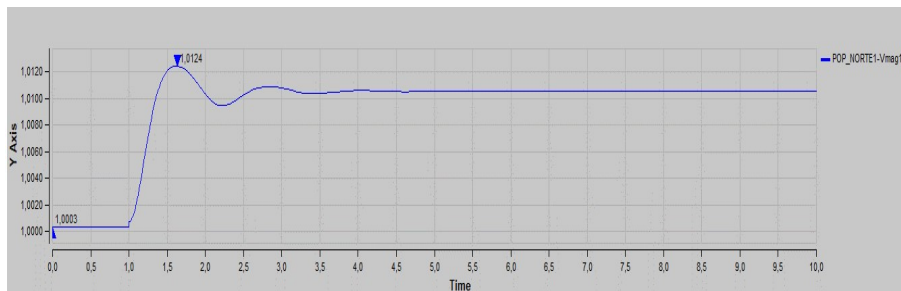
(a) Magnitud del voltaje en FLORIDA2 sin carga no lineal



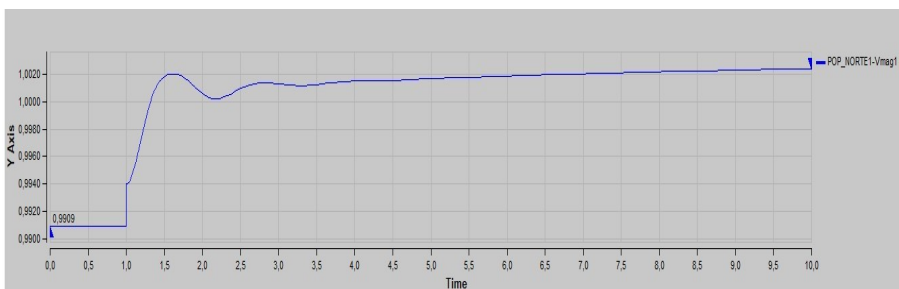
(b) Magnitud del voltaje en FLORIDA2 Con carga no lineal

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.18: Conexión de televisor a 90% de carga instalada**



(a) Magnitud del voltaje en POP\_NORTE1 sin carga no lineal



(b) Magnitud del voltaje EN POP\_NORTE1 con carga no lineal

Fuente: Elaboración propia

## Capítulo 4

---

### Cuantificación de la calidad de potencia por efecto de las cargas no lineales

---

Una vez finalizada la fase de clasificación de las perturbaciones que ocurrieron en la simulación del circuito 32 de la ciudad de Popayán, ante la presencia de cargas típicas del sector residencial sobre el software de simulación NEPLAN, es el momento de evaluar a partir de los resultados cual es el porcentaje en el que fueron excedidos los límites de cada perturbación, para las pruebas realizadas con los 3 valores de carga instalada, lo cual se presenta en este capítulo.

#### 4.1. Análisis de resultados

En los resultados presentados en la sección 3.5 se observaron casos de perturbaciones, donde al conectar la carga no lineal se infringen los valores de referencia establecidos por la norma NTC 5001; teniendo en cuenta lo anterior, las Tablas 4.1 y 4.2 muestran el porcentaje en el que fueron excedidos estos límites y el tipo de carga para los que ocurrieron, al variar la proporción de la potencia consumida por la carga no lineal (10 %, 50 % y 90 %). Vale la pena mencionar que los espacios en blanco indican que la carga en cuestión no sobrepasa los límites establecidos para el elemento o nodo.

En la Tabla 4.1 se evidencia que la única carga no lineal que sobrepasa los niveles de armónicos de tensión es el televisor, donde los porcentajes de THDv y Dv se mantienen constantes cuando se demanda un 50 % y 90 %. Además, este

comportamiento se evidencia en los nodos más cercanos al elemento en cuestión, cabe aclarar que el exceso de estos porcentajes se debe a la configuración de la fuente de armónicos ingresada, como se mencionó anteriormente.

**Tabla 4.1:** Porcentajes excedidos por nodo para armónicos de tensión

Carga	Nodo	50 %		90 %	
		% Excedido THDv	% Excedido Dv	% Excedido THDv	% Excedido Dv
	POP_PPAL2		4		4
	POP_CENTRO1	1,8	31,667	1,8	31,667
TV	POP_CENTRO2	109	156,333	109	156,333
	N1	109	156,333	109	156,333
	N2	109	156,333	109	156,333

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 4.2 se puede concluir que el televisor es la carga que más excede los límites de distorsión armónica de corriente establecidos por la norma, para las 3 pruebas realizadas de variación de la potencia aparente, además los porcentajes en que se sobrepasan estos límites son extremadamente altos al igual que en el caso de distorsión armónica de voltaje. Respecto al refrigerador es posible concluir que la presencia de armónicos de corriente es mayor en los elementos de la red que están más cercanos a la carga no lineal, en bajos porcentajes de esta última y a medida que se aumenta su presencia, los límites excedidos se extienden por los demás elementos; un caso similar ocurre con el aire acondicionado. En cuanto a la lámpara, el factor que mayor variación presenta frente a la carga no lineal es el Dh, especialmente al mayor porcentaje de carga, además los límites sobrepasados se encuentran en la rama a la que se encuentra conectada esta carga no lineal.

**Tabla 4.2:** Porcentaje de armónicos de corriente excedidos por elemento

Carga	'Elemento	10%		50%		90%	
		% Excedido Dh	% Excedido TDD	% Excedido Dh	% Excedido TDD	% Excedido Dh	% Excedido TDD
TV	FLORIDA2	120.95	48.432	1887.7	48.432	1887.7	229.784
	12T01	10.475	147.4	893.85	1137	893.85	449.608
	LINEA1_PPAL2_CENTRO1	84.15	23.696	1556.4	518.48	1556.4	174.76
	LINEA2_PPAL2_CENTRO1	84.15	23.696	1556.4	518.48	1556.4	174.76
	18T01	271.425	546.618	3240.95	3133.09	3240.95	1309.526
	INT	81.375		92.65		92.65	
	RESISTIVA	81.375		92.65		92.65	
	INT_NO_LINEAL	876.525	884.944	8635.45	4824.72	8635.45	1673.294
	TV	876.525	884.992	8635.45	4824.96	8635.45	1673.372
REF	FLORIDA2					8.975	
	LINEA1_PPAL2_CENTRO1					51.7	
	LINEA2_PPAL2_CENTRO1			65.95		51.7	
	18T01			100		205.525	35.942
	INT_NO_LINEAL	65		719	40.742	1376	154.92
	REF	65		719	40.742	1376	154.92
CFL	INT_NO_LINEAL	51.25			10.89	1253	100.778
	CFL	51.25			10.89	1253	100.778
ACC	FLORIDA2					1376	154.928
	LINEA1_PPAL2_CENTRO1					1376	
	LINEA2_PPAL2_CENTRO1					51.7	
	POP_NORTE					51.7	
	18T01			65.95		205.525	35.946
	INT_NO_LINEAL	65		719	40.748	75.935	
AAC	65		719				

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las sobretensiones, interrupciones de corta y larga duración estudiadas en el capítulo 3 no es posible determinar el porcentaje en que se exceden frente a un valor de referencia, ya que la norma NTC 5001 no define límites para estas perturbaciones.

Como se mencionó previamente, la calidad de la potencia eléctrica hace referencia al conjunto de calificadores de fenómenos inherentes a la forma de onda de la tensión y a los parámetros técnicos instaurados con el propósito de brindar al usuario una prestación del servicio eléctrico plausible; entendiéndose la falta de calidad como la desviación de esas magnitudes de su forma ideal, por lo que

cualquier desviación se considera como una perturbación o como una pérdida de calidad; es importante aclarar que los valores de referencia presentados en la norma NTC 5001 establecen las condiciones, dentro de las cuales se espera que se encuentren los parámetros del suministro de energía eléctrica, para considerar que la calidad de la potencia sea aceptable; al respecto conviene decir que para garantizar una calidad de potencia mínima todos los parámetros dispuestos dentro de la norma deben de estar dentro de los rangos establecidos. Teniendo en cuenta lo anterior es posible definir que la calidad de potencia eléctrica en la red de distribución en el nivel II a 13.2 kV del circuito simulado en presencia de cargas no lineales no es aceptable, ya que hay presencia de perturbaciones que deforman la señal de tensión sobrepasando los límites establecidos en la norma NTC 5001, como se evidenció en los armónicos de corriente y tensión en el capítulo 3.

Por otro lado, en la resolución 070 de 1998 [31], la CREG establece que las normas técnicas nacionales o en su defecto las internacionales que regulan los aspectos contenidos en esta resolución, primarán sobre las normas internas de las empresas y serán de obligatorio cumplimiento como norma mínima, definiendo las perturbaciones que incluye la calidad de potencia. Adicionalmente, la CREG en el artículo 4 de la resolución 065 de 2012 [32] establece que los OR y transmisores nacionales (TN), deben contar con un sistema de medición y registro de calidad de la potencia (SMRCP), que permita la evaluación de esta en el STN, los STR y los SDL; así mismo se debe generar un reporte mensual con la información de los indicadores de calidad de la potencia que se presentan a continuación:

- Desviación estacionaria de la tensión eficaz.
- Severidad del parpadeo de corta duración, Pst
- Relación de tensión de secuencia negativa y positiva, V2/V1.
- Distorsión armónica total de tensión, THDv
- Hundimiento de tensión
- Elevación de tensión
- Interrupción de tensión de corta duración
- Interrupción de tensión de larga duración

- Distorsión armónica total de corriente, THDi
- Distorsión total de demanda, TDD

En caso de que el operador de red incumpla los parámetros establecidos o no haga el reporte podrá ser sancionado por la CREG, de la misma manera los usuarios conectados al STN, STR o SDL no pueden introducir al sistema, en su punto de conexión, perturbaciones superiores a las establecidas en el Anexo 2 de la resolución 065 de 2012.

A pesar de que la CREG ha formulado resoluciones estipulando reglamentaciones para efectuar la evaluación de la calidad de la potencia, se observa que las estrategias y procedimientos se referencian principalmente a estándares internacionales sin tener en cuenta normas nacionales como la norma tratada en este documento, la cual se puede constituir como una herramienta facilitadora para los OR al momento de analizar la calidad de la potencia, puesto que le permite tener en cuenta otros parámetros que no se contemplan en la resolución 065 de 2012 a la hora de evaluar el producto que esta suministrándosele al usuario.

## Capítulo 5

---

### Conclusiones y trabajos futuros

---

Una vez terminada la cuantificación de los parámetros que afectan la calidad de la potencia eléctrica en presencia de cargas no lineales, es momento de evidenciar a partir de un análisis detallado las contribuciones que se obtuvieron de esta investigación y las líneas futuras de trabajo.

#### 5.1. Conclusiones

- De acuerdo con los resultados obtenidos en simulación, se observó que la calidad de la potencia eléctrica en el circuito 32 de la ciudad de Popayán se ve afectada cuando los niveles de cargas no lineales son mayores o iguales a los de la carga típica en el total de la capacidad instalada de la red. El resultado de esto se evidencia en los valores de  $D_v$  y  $THD_v$  que exceden lo estipulado por la norma NTC 5001 en 156,333 % y 109 % respectivamente, cuando se conectó un 90 % de carga instalada de tipo no lineal, mientras que con un 10 % de carga no lineal los límites de armónicos se situaron dentro de los rangos permitidos según lo presentado en la Tabla 3.4 en la prueba del televisor, siendo esta carga la única que supera los límites de armónicos.
- Las cargas que tienen mayor impacto en las perturbaciones ocurridas para la simulación del circuito 32 de la ciudad de Popayán son las que tienen un factor de potencia pequeño. En particular, se evidenció que el refrigerador

que posee el menor factor de potencia de las cargas estudiadas ( $FP=0.42$ ), arrojó índices más grandes de desbalance de tensión que la carga resistiva ( $FP=1$ ), lo cual se comprueba en el nodo subestacion centro al conectar la carga del refrigerador con un porcentaje de 90 % de la capacidad instalada. Presentándose en este caso un desbalance de 1.4307 %, mientras que en las mismas condiciones la carga resistiva presenta un porcentaje de desbalance de 0.1765 %. Siendo así, el orden de cargas según su nivel de afectación a la red eléctrica es el siguiente: en primer lugar el refrigerador (con  $FP=0,42$ ), seguido por la lampara (con  $FP=0.67$ ), continuando con el aire acondicionado (con  $FP=0.9$ ) y finalmente el televisor (con  $FP=0.98$ ).

- El contenido armónico THDi y TDD presenta valores fuera de norma (según NTC 5001), con aportes significativos de los armónicos individuales 3, 5 y 7 principalmente. Con los contenidos armónicos de corrientes presentados en la Tabla 4.2 se observa que la distorsión total de demanda para el televisor con un valor de 229.784 % (excedido sobre el valor establecido por la norma) afecta en mayor porcentaje a la subestación Florida que su equivalente en el aire acondicionado; cabe destacar que en el caso del refrigerador y la lampara fluorescente no se presentan estos excesos.
- Debido a que la inyección de armónicos en la red de distribución fue la única perturbación que superó los límites establecidos por la norma NTC 5001 ante las pruebas realizadas en el simulador Neplan, el operador de red debe tomar acciones para mitigar este fenómeno, ya que esto puede ser motivo para que la CREG establezca sanciones en su contra. Por lo tanto, es importante realizar una medición respecto a estas perturbaciones de acuerdo con las especificaciones de la norma IEC 61000-4-30, con el fin de contar con la información suficiente para tomar acciones correctivas.
- Las variaciones y desbalances de tensión se incrementan al conectar la carga no lineal a la red, como se muestra en las figuras 3.17 y 3.18, especialmente en el barraje POPCENTRO2, que es cercano a la carga no lineal; de acuerdo con los resultados obtenidos se observa que para el refrigerador con un 90 % de carga instalada, los porcentajes de voltaje respecto a la tensión de la barra disminuyen hasta 96.613 %, mientras que el nivel de desbalance de tensión alcanza valores de 1.4308 %. Es importante resal-



tar, además, que, aunque se presentan cambios en estos parámetros sus valores no sobrepasan los márgenes fijados por la norma.

- Las perturbaciones se propagan por todo el sistema afectando en mayor medida a los elementos y nodos próximos a la carga no lineal fuente del disturbio. Esto se observa, por ejemplo, en el caso de la lámpara fluorescente, donde el porcentaje de desbalance de tensión en el barraje POPPAL1 conectado al punto de generación y lejano a la carga corresponde a un 0.3999% que se incrementa hasta el 1.22887% aproximadamente en los puntos más cercanos; el mismo fenómeno ocurre con los factores de distorsión armónica de corriente calculados para esta carga, donde el TDD en el generador FLORIDA2 tiene un valor de 0.197% y en el secundario del transformador de distribución 18T01 se calcula 1.681%.

## 5.2. Trabajos futuros

- En este proyecto se desarrolló el análisis de calidad de potencia eléctrica para un circuito de 13.2kV de la ciudad de Popayán, en presencia de cargas no lineales a partir de los lineamientos que propone la norma NTC 5001; esto permitió diagnosticar el comportamiento del circuito a partir de la cuantificación de las perturbaciones presentes. Con el objetivo de establecer un análisis total del sistema de distribución y llevar a cabo acciones para corregir las perturbaciones en este, se recomienda que se haga el diagnóstico de la calidad de la potencia eléctrica a partir de la norma NTC 5001 en todos los circuitos que componen la red de la ciudad.
- Para efectos de simulación, con el fin de definir la variable que representa el valor de la potencia consumida en el sector analizado, el 4 de febrero de 2019 entre las 17:06:30 y 17:20:30 horas, se registró la curva de demanda mostrada en el centro de control de la Compañía Energética de occidente CEO. Luego, debido a que el propósito es tener una tendencia aproximada al consumo real del circuito, se recomienda tomar los valores de la curva de demanda a partir de los siguientes criterios: primero, realizar mediciones durante tiempos más extensos y segundo, llevar a cabo las mismas cuando la demanda de los usuarios es máxima, es decir en horas picos; puesto que lo anterior permitirá que la información usada sea más cercana a la real y

por ende obtener mayor precisión en el resultado.

- Las perturbaciones para el circuito 32 de la ciudad de Popayán fueron simuladas a partir de la generación de eventos en el modo dinámico del software Neplan y los módulos para realizar pruebas de cortocircuito, flujo de carga y análisis de armónicos, los cuales permitían cuantificar las perturbaciones ocurridas en el sistema, pero son despreciadas las perturbaciones que son generadas por otras fuentes como por ejemplo las descargas atmosféricas, debido a las limitaciones en cuanto al software utilizado, por esta razón se recomienda hacer el estudio de la calidad de la potencia eléctrica a partir de la norma NTC 5001, usando otras herramientas como LabView, Matlab y DIgSILENT.
- Cuatro fueron las cargas de estudio durante este proyecto (televisor, lámpara fluorescente, aire acondicionado y refrigerador), que permitieron determinar las perturbaciones ocurridas cuando estas son conectadas en gran porcentaje a una red de distribución, dando como información que los armónicos son las únicas perturbaciones que exceden los límites establecidos por la norma NTC 5001. Tanto en el sector residencial como en el sector industrial se encuentran diversas categorías de cargas de naturaleza no lineal que pueden afectar la calidad de la potencia en las redes eléctricas; en consecuencia, se hace necesario ejecutar un estudio que permita la cuantificación de los efectos de diversas cargas no lineales, además de una comparación del comportamiento de la red ante la conexión de diferentes tipos de cargas conectadas simultáneamente.



---

## Bibliografía

---

- [1] ICONTEC, “NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5001 CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA. LÍMITES Y METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN EN PUNTO DE CONEXIÓN COMÚN,” *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*, no. 2008, pp. 1–60, 2008.
- [2] P. U. Gómez, S. Betancur, and A. Díez, “Estudio de los principales problemas que afectan la Calidad de la Potencia en Colombia ( caso de aplicación en Antioquia ),” no. December 2012, 2015.
- [3] Comisión de Regulación de Energía y Gas, “Comisión de Regulación de Energía y Gas - Resolución CREG 024 2005,” vol. 024, 2005.
- [4] Comisión de Regulación de Energía y Gas, “Calidad de la potencia,” *Comisión de Regulación de Energía y Gas*, vol. CREG-017, p. 100, 2005.
- [5] IEEE, *IEEE Std 1159 - IEEE recommended practice for monitoring electric power quality*, vol. 2009. 2009.
- [6] D. Committee, I. Power, and E. Society, “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society,” *ANSI/IEEE Std. 519*, vol. 2014, 2014.
- [7] J. Puello, *Aspectos Regulatorios Sobre La Calidad De La Energía Eléctrica En Colombia*. PhD thesis, 2012.
- [8] CENELEC, “En 50160,” *European Standard*, pp. 1–20, 2005.
- [9] I. E. Commission, “International Standard IEC 61000-4-30. Electromagnetic compatibility (EMC)- Part 4-30: Testing and measurement techniques-Power quality measurement methods,” vol. 2003, 2013.

- [10] S. Ramírez Castaño and E. A. Cano Plata, *Calidad del Servicio de Energía Eléctrica*. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 1 ed., 2006.
- [11] Arcturus Zadkiel Alvarez Villegas and Allan Victoriano Gutiérrez, “Análisis de parámetros de calidad de la energía a un sistema de producción farmacéutico,” 2016.
- [12] M. A. Mora Barajas and P. Bañuelos Sánchez, “Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos Harmonic Pollution Produced by Low Power Nonlinear Loads: Mathematical Model and Practical Cases,” *Ingeniería Investigación y Tecnología. Xi. Núm*, vol. 2, pp. 189–198, 2010.
- [13] H. Rojas, “Aspectos técnicos y normativos para el monitoreo y medición de armónicos,” *Ingeniería*, vol. 19, no. 2, pp. 6–11, 2014.
- [14] M. F. Romero-L, L. E. Gallego, S. Mueller, and J. Meyer, “Characterization of non-linear household loads for frequency domain modeling,” *Ingeniería E Investigación*, vol. 35, no. 1, pp. 65–72, 2015.
- [15] Centrales Electricas del Cauca S.A.E.S.P, “Contrato de operación CEDELCA-UTEN-VATIA.”
- [16] Centrales Electricas del Cauca S.A.E.S.P, “Comercialización y distribución. Contrato de operación CEDELCA.”
- [17] Compañía energética de Occidente, “Informe anual de gestión 2017.”.
- [18] J. F. Arango Prado, J. D. Castaño Guevara, and J. H. Torres Niz, “Automatización avanzada de la red de distribución: Disminución de fallas de corta duración en el SDL de CEO.”.
- [19] Compañía energética de Occidente, “Estudio de migración de usuarios a niveles de tensión superiores- MUNTS.” 2016.
- [20] D. técnica de gestión de la energía Superintendencia Delegada para energía y gas combustible, “Informe ejecutivo de gestión Compañía Energética de Occidente S.A.S E.S.P,” 2013.
- [21] S. d. p. e. y. gas combustible Superservicios, “Evaluación integral de prestadores Compañía Energética de Occidente S.A.S E.S.P,” 2015.
- [22] C. D. S. Escobar, “Análisis del desempeño del sistema eléctrico de potencia de Cenicafé,” 2017.

- [23] Comisión de Regulación de Energía y Gas, "GESTIÓN DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA," p. 43, 2005.
- [24] L. Fernando, R. García, S. Milena, P. Londoño, J. José, and M. Flórez, "Estimación de parámetros de un modelo de carga de recuperación exponencial empleando técnicas metaheurísticas techniques," vol. 18, no. 3, pp. 453–462, 2013.
- [25] G. Olguín Parada, "Modelos De Carga Y Sus Efectos En Estudios," p. 70, 2013.
- [26] E. D. E. Mitigación and A. L. Cambio, "BASE POPAYÁN Informe final," pp. 1–177.
- [27] M. Isabel, G. Fajardo, J. Fernando, and F. Marulanda, "STUDY GUIDE OF THE POTENTIAL OF ELECTRIC," vol. 15, pp. 53–67, 2016.
- [28] I. Electromecánico, U. Nacional, D. Mar, P. Mar, I. Electricista, U. Nacional, D. Mar, P. Mar, I. Electricista, S. Laboral, U. Nacional, D. Mar, P. Mar, J. L. Strack, and S. B. Jacob, "Impacto de la Iluminación Residencial Eficiente en la Calidad de la Energía," vol. 10, pp. 9–19, 2016.
- [29] C. Carratalá Font, Benjamín; Ariño, *Modelado del efecto de los paneles fotovoltaicos y los coches eléctricos en la red eléctrica.*
- [30] M. Fernando and R. Lozano, *Diseño de una metodología para el análisis de sags de tensión en redes de distribución.* PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., 2011.
- [31] Comisión de Regulación de Energía y Gas, "Resolución 070 de 1998," 1998.
- [32] Comisión de Regulación de Energía y Gas, "Resolución 065 de 2012," *Comisión de Regulación de Energía y Gas*, 2012.

## Anexo A

---

### Parámetros de elementos y nodos del circuito 32

---

#### A.1. Diagrama unifilar de la figura 2.3

Este anexo corresponde a los valores ingresados al software de simulación NEPLAN del circuito 32 de la red de Popayán, para la puesta a punto del sistema.

**Tabla A.1:** Equivalente de red

Equivalente de red	Sk'' max [MVA]	Ik'' max [kA]	Sk'' min [MVA]	Ik'' min [kA]	Tipo FC	Tensión de operación %
FLORIDA2	20.3061	0.102	20.3061	0.102	SL	100
POP_NORTE1	2.6208	0.044	2.6208	0.044	PV	100

Fuente: Elaboración propia

**Tabla A.2:** Nodos

Nodo	Voltaje en el nodo [kV]	Frecuencia [Hz]
POP_PPAL1	115	60
POP_PPAL2	34.5	60
POP_CENTRO1	13.2	60
POP_CENTRO2	13.2	60
12T01_3DEV	13.2	60

Fuente: Elaboración propia

**Tabla A.3: Líneas**

Línea	Calibre	Long [km]	R(1) [ohm/km]	X(1) [ohm/km]	C(1) [uF/km]	R(0) [ohm/km]	X(0) [ohm/km]	C(0) [uF/km]
LINEA1_PPAL2_CENTRO1	4/0 AWG	4.08	0.1282	0.4193	0.00557	0.484	3.128	0.0044563
LINEA2_PPAL2_CENTRO1	4/0 AWG	4.08	0.1282	0.4193	0.00557	0.484	3.128	0.0044563

Fuente: Elaboración propia

**Tabla A.4: Transformador de dos devanados**

Transformador	Sr [MVA]	Vr1 [kV]	Vr2 [kV]	Zcc(1) %	Zcc(0) %	Grupo vectorial	X(0) [ohm/km]	C(0) [uF/km]
18T01	12,5	34,5	13,2	4	4	Dyn11	3.128	0.0044563

Fuente: Elaboración propia

**Tabla A.5: Transformador de tres devanados**

Transformador	Vr1 [kV]	Vr2 [kV]	Vr3 [kV]	Sr12 [MVA]	Sr23 [MVA]	Sr31 [MVA]	X(0) [ohm/km]	C(0) [uF/km]
12T01	115	34,5	13.8	60	50	50	3.128	0.0044563

Fuente: Elaboración propia

**Tabla A.5 Continuación de la tabla anterior**

Transformador	Zcc12(1) %	Zcc23(1) %	Zcc31(1) %	Zcc12(0) %	Zcc23(0) %	Zcc31(0) %	Grupo vectorial	C(0) [uF/km]
12T01	10.24	10.24	10.24	10.24	10.24	10.24	Dyn1nyn1	0.0044563

Fuente: Elaboración propia

**Tabla A.6: Cargas**

Carga	Tipo FC	S [MVA]	P [MW]	Q [Mvar]	I [kA]	cos(phi)	Grupo vectorial	C(0) [uF/km]
CARGA_CTO32	PC	3.067	2.76	1.337	0.134	0.9	Dyn1nyn1	0.0044563

Fuente: Elaboración propia



## A.2. Parámetros del circuito 32 modificado en el capítulo 3

**Tabla A.7:** Maquina sincrónica

Elemento	Vr [kV]	Sr [MVA]	Pr [MW]	cos(phi)	xd sat %	x'd sat %	xd''sat %	x(2) %	x(0) %
FLORIDA2	115	19.9	19.9	1	4	4	2	2	4

Fuente: Elaboración propia

**Tabla A.8:** Interruptores

Elemento	Voltaje	Ir [kA]	Vr máx [kV]
INT	Alto voltaje	0.6	13.4
INT_NO_LINEAL	Alto voltaje	0.6	13.4

Fuente: Elaboración propia

**Tabla A.9:** Nodos

Nodo	Voltaje de nodo [kV]	frecuencia [Hz]
N1	13.2	60
N2	13.2	60

Fuente: Elaboración propia

**Tabla A.10:** Carga típica

Elemento	cos(phi)	% Carga instalada	S [MVA]
RESISTIVA	1	10	1.25
		50	6.25
		90	11.25

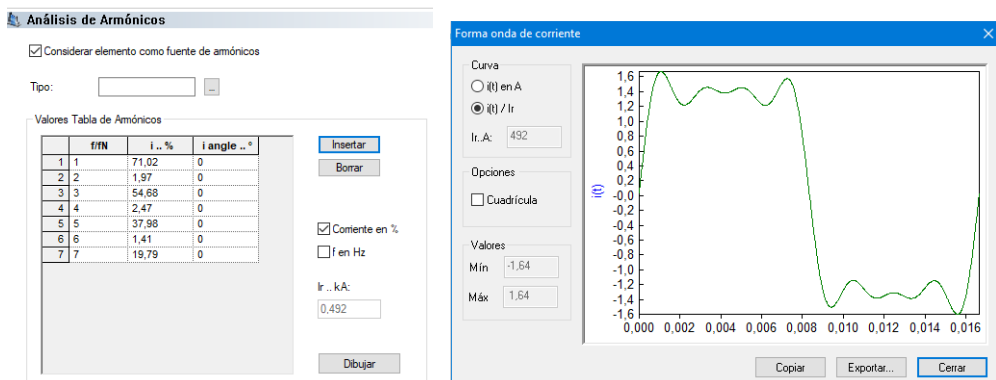
Fuente: Elaboración propia

Los parámetros pertinentes a los parámetros empleados para el análisis de flujo de carga de los diferentes porcentajes de carga no lineal se presentan en la tabla 3.3 del documento.

## Anexo B

### Configuración armónica de las cargas no lineal

Figura B.1: Fuente armónica Televisor

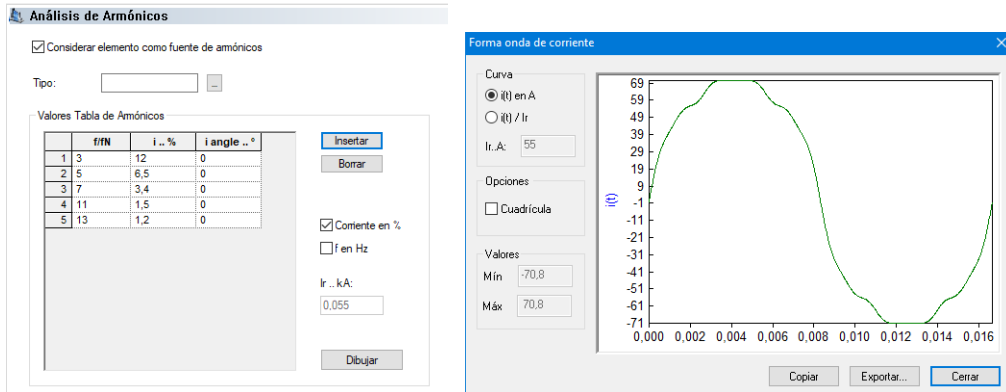


(a) Configuración armónica del Televisor

(b) Forma de onda de corriente del Televisor

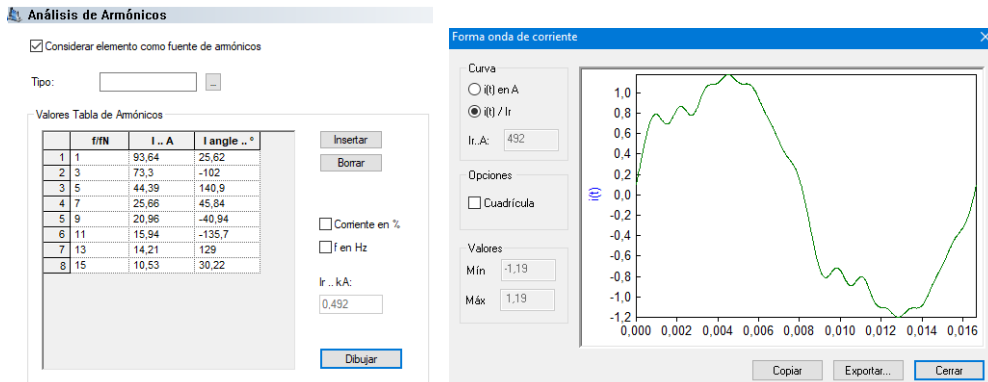
Fuente: Elaboración propia

**Figura B.2: Fuente armónica Refrigerador**



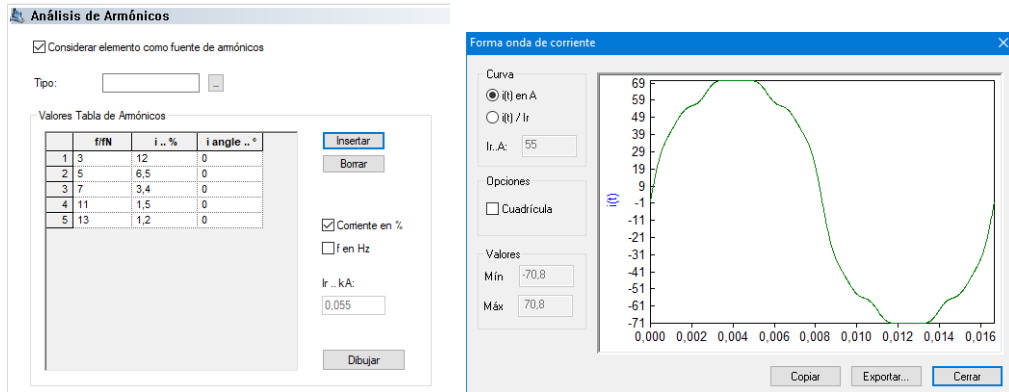
(a) Configuración armónica del Refrigerador      (b) Forma de onda de corriente del Refrigerador  
Fuente: Elaboración propia

**Figura B.3: Fuente armónica Lámpara Fluorescente**



(a) Configuración armónica de la Lámpara Fluorescente      (b) Forma de onda de corriente de la Lámpara Fluorescente  
Fuente: Elaboración propia

**Figura B.4: Fuente armónica del Aire Acondicionado**



(a) Configuración armónica del Aire Acondicionado (b) Forma de onda de corriente del Aire Acondicionado

Fuente: Elaboración propia

## Anexo C

---

### Resultados de perturbaciones para la carga típica

---

**Tabla C.1:** Variaciones de tensión para carga típica

Nodo	10%		50%		90%	
	U [kV]	u [%]	U [kV]	u [%]	U [kV]	u [%]
POP_PPAL1	115	100	115	100	115	100
12T01_3DEV	13.8094	104.61664	13.80936	104.61636	13.80933	104.61612
POP_PPAL2	34.54949	100.14344	34.54925	100.14276	34.54904	100.14216
POP_CENTRO1	34.5	100	34.5	100	34.5	100
POP_CENTRO2	13.17884	99.8397	13.1368	99.52122	13.0945	99.20077
N1	13.17884	99.83969	13.13679	99.52115	13.09448	99.20064
N2	13.17883	99.83959	13.13679	99.52116	13.0945	99.20076

Fuente: Elaboración propia

**Tabla C.2: Desbalance de tensión para carga típica**

Carga	Elemento	Fase	10%		50%		90%				
			Voltaje fase [kV]	Desbalance [%]	Voltaje fase [kV]	Desbalance [%]	Voltaje fase [kV]	Desbalance [%]			
TV	POP_PPAL1	L1L2	114.99725	0.33333	0.00446	115.01339	0.33333	0.0221	115.00376	0.33333	0.0061
		L2L3	115.00512			114.97456			114.99299		
		L3L1	114.99763			115.01206			115.00324		
	12T01_3DEV	L1L2	13.79821	0.33333	0.00496	13.80833	0.33333	0.0246	13.80020	0.33333	0.0068
		L2L3	13.79916			13.80358			13.79890		
		L3L1	13.7993			13.80294			13.79871		
	POP_PPAL2	L1L2	34.49193	0.33333	0.00895	34.53795	0.33333	0.0444	34.49993	0.33333	0.0123
		L2L3	34.49433			34.52594			34.49665		
		L3L1	34.49727			34.51142			34.49262		
	POP_CENTRO1	L1L2	34.4963	0.33333	0.01334	34.51838	0.33333	0.0663	34.50506	0.33333	0.0183
		L2L3	34.49947			34.5026			34.50072		
		L3L1	34.50422			34.47903			34.49422		
	POP_CENTRO2	L1L2	13.19877	0.33333	0.01330	13.20869	0.33333	0.0663	13.19319	0.33333	0.0183
		L2L3	13.20179			13.19367			13.18904		
		L3L1	13.20059			13.19943			13.19069		
	N1	L1L2	13.19877	0.33333	0.01330	13.20869	0.33333	0.0663	13.19319	0.33333	0.0183
		L2L3	13.20179			13.19367			13.18904		
		L3L1	13.20059			13.19943			13.19069		
N2	L1L2	13.19876	0.33333	0.01335	13.20868	0.33333	0.0663	13.19319	0.33333	0.0183	
	L2L3	13.20179			13.19366			13.18904			
	L3L1	13.20059			13.19942			13.19069			
REF	POP_PPAL1	L1L2	114.99725	0.33333	0.0045	115.01339	0.33333	0.0221	115.03484	0.33333	0.0589
		L2L3	115.00512			114.97456			114.93231		
		L3L1	114.99763			115.01206			115.03288		
	12T01_3DEV	L1L2	13.79821	0.33333	0.0050	13.80833	0.33333	0.0246	13.82014	0.33333	0.0655
		L2L3	13.79916			13.80358			13.80742		
		L3L1	13.7993			13.80294			13.80585		
	POP_PPAL2	L1L2	34.49193	0.33333	0.0090	34.53795	0.33333	0.0444	34.59190	0.33333	0.1180
		L2L3	34.49433			34.52594			34.55966		
		L3L1	34.49727			34.51142			34.52133		
	POP_CENTRO1	L1L2	34.4963	0.33335	0.5683	34.51838	0.33333	0.0663	34.54892	0.33334	0.1762
		L2L3	34.49947			34.5026			34.50690		
		L3L1	34.50422			34.47903			34.44426		
	POP_CENTRO2	L1L2	13.19877	0.33333	0.0133	13.20869	0.33333	0.0663	13.22074	0.33334	0.1765
		L2L3	13.20179			13.19367			13.18084		
		L3L1	13.20059			13.19943			13.19562		
	N1	L1L2	13.19877	0.33333	0.0133	13.20869	0.33333	0.0663	13.22074	0.33334	0.1765
		L2L3	13.20179			13.19367			13.18084		
		L3L1	13.20059			13.19943			13.19562		
N2	L1L2	13.19876	0.33333	0.0133	13.20868	0.33333	0.0663	13.22072	0.33373	2.4543	
	L2L3	13.20179			13.19366			13.18082			
	L3L1	13.20059			13.19942			13.19561			
CFL	POP_PPAL1	L1L2	114.99725	0.333333	0.004456	115.01339	0.333333	0.021645	115.03484	0.333334	0.058869
		L2L3	115.00512			114.97456			114.93231		
		L3L1	114.99763			115.01206			115.03288		
	12T01_3DEV	L1L2	13.79821	0.333333	0.004963	13.80833	0.333333	0.024631	13.82014	0.333334	0.074922
		L2L3	13.79916			13.80358			13.80742		
		L3L1	13.7993			13.80294			13.80285		
	POP_PPAL2	L1L2	34.49193	0.333333	0.008953	34.53795	0.333333	0.04443	34.5919	0.333334	0.118042
		L2L3	34.49433			34.52594			34.55966		
		L3L1	34.49727			34.51142			34.52133		
	POP_CENTRO1	L1L2	34.4963	0.333333	0.013358	34.51838	0.333334	0.066276	34.54892	0.333335	0.17625
		L2L3	34.4994			34.5026			34.5069		
		L3L1	34.50422			34.47903			34.44426		
	POP_CENTRO2	L1L2	13.19877	0.333333	0.013301	13.20869	0.333334	0.066289	13.22074	0.333335	0.176506
		L2L3	13.20179			13.19367			13.18084		
		L3L1	13.20059			13.19943			13.19562		
	N1	L1L2	13.19877	0.333333	0.013301	13.20869	0.333334	0.066289	13.22074	0.333335	0.176506
		L2L3	13.20179			13.19367			13.18084		
		L3L1	13.20059			13.19943			13.19562		
N2	L1L2	13.19876	0.333333	0.013347	13.20868	0.333334	0.066289	13.22072	0.333335	0.176499	
	L2L3	13.20179			13.19366			13.18082			
	L3L1	13.20059			13.19942			13.19561			
AAC	POP_PPAL1	L1L2	114.99725	0.333333	0.004456309	115.01339	0.333333	0.022133491	115.02384	0.333334	0.055860024
		L2L3	115.00512			114.97456			114.93231		
		L3L1	114.99763			115.01206			115.03288		
	12T01_3DEV	L1L2	13.79821	0.333333	0.004962567	13.80833	0.333333	0.024631278	13.82014	0.333334	0.065528743
		L2L3	13.79916			13.80358			13.80742		
		L3L1	13.7993			13.80294			13.80585		
	POP_PPAL2	L1L2	34.49193	0.333333	0.008943639	34.53795	0.333333	0.044430452	34.5919	0.333334	0.118041581
		L2L3	34.49433			34.52594			34.55966		
		L3L1	34.49727			34.51142			34.52133		
	POP_CENTRO1	L1L2	34.4963	0.333333	0.01334173	34.51838	0.333334	0.066276459	34.54892	0.333335	0.176249893
		L2L3	34.49947			34.5026			34.5069		
		L3L1	34.50422			34.47903			34.44426		
	POP_CENTRO2	L1L2	13.19877	0.333333	0.013300999	13.20869	0.333334	0.066288637	13.22074	0.333335	0.176505972
		L2L3	13.20179			13.19367			13.18084		
		L3L1	13.20059			13.19943			13.19562		
	N1	L1L2	13.19877	0.333333	0.013300999	13.20869	0.333334	0.066288637	13.22074	0.333335	0.176505972
		L2L3	13.20179			13.19367			13.18084		
		L3L1	13.20059			13.19943			13.19562		
N2	L1L2	13.19876	0.333333	0.013226489	13.20868	0.333334	0.066288687	13.22072	0.333335	0.176498665	
	L2L3	13.20176			13.19366			13.18082			
	L3L1	13.20059			13.19942			13.19561			

Fuente: Elaboración propia

## Anexo D

---

### Resultados del circuito 32 ante la conexión de la carga no lineal

---

En este anexo se presenta la respuesta de los elementos y nodos del circuito 32 cuando se conectan las 4 diferentes cargas no lineales.

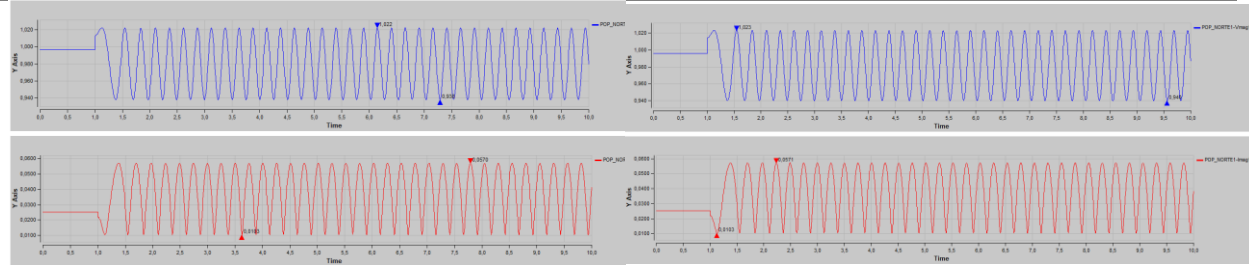
Tabla D.1: Respuesta grafica deL circuito 32 ante la conexión de cargas no lineales

% de carga	Elemento /Nodo	Carga típica	Carga típica + carga no lineal
<b>Conexión de carga TELEVISOR y la aplicación del evento a</b>			
10	FLORIDA2		
10	POP_PPAL1		
10	12T01		



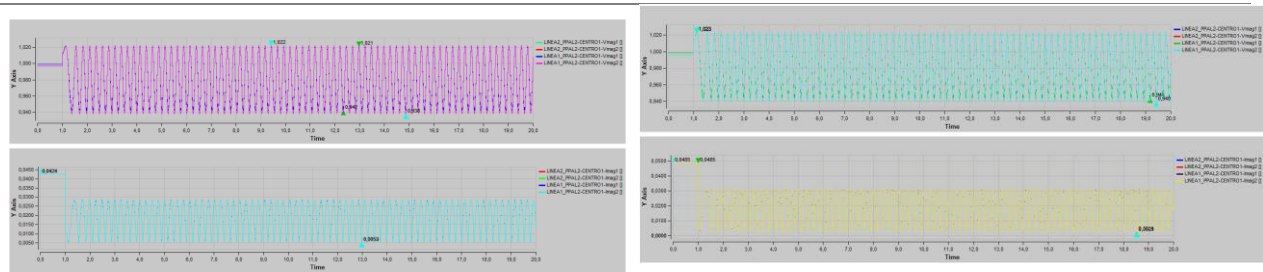
10

POP\_NORTE1



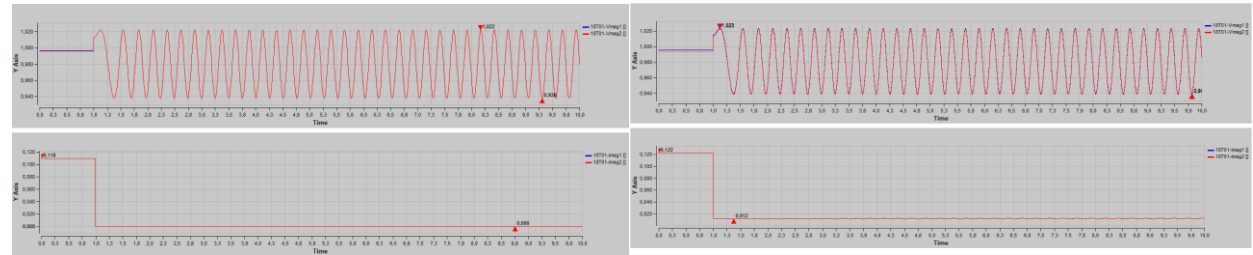
10

LINEAS  
POP\_PPAL2\_CENT  
RO1



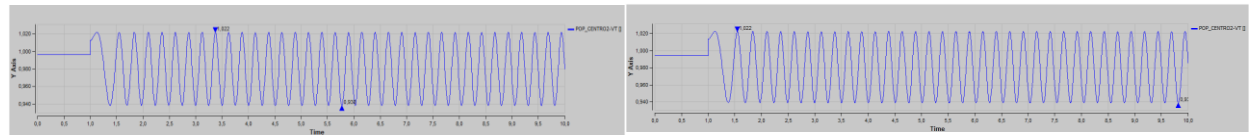
10

18T01



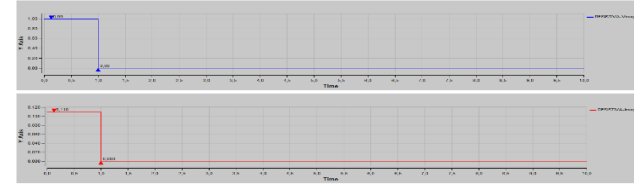
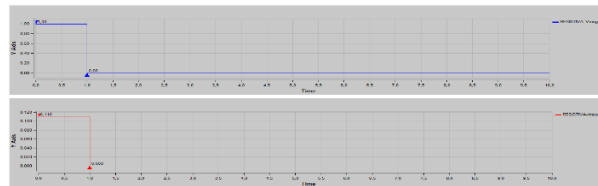
10

POP\_CENTRO2



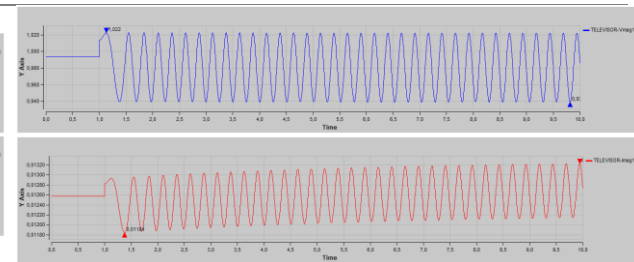
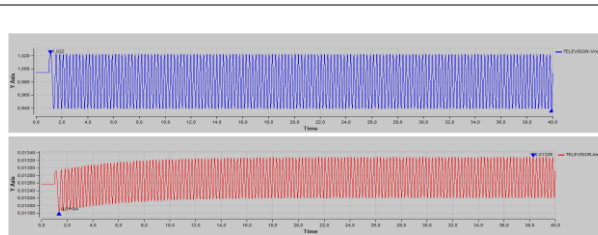
10

RESISTIVA



10

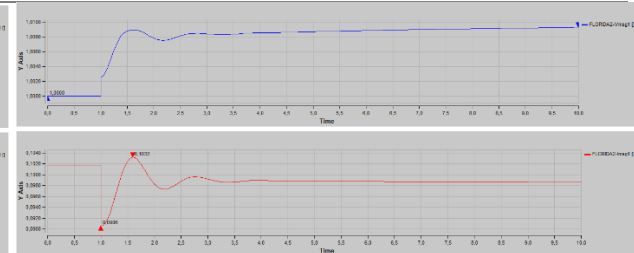
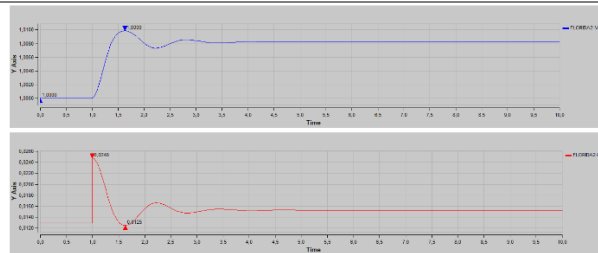
TELEVISOR



### Conexión de carga TELEVISOR y la aplicación del evento b

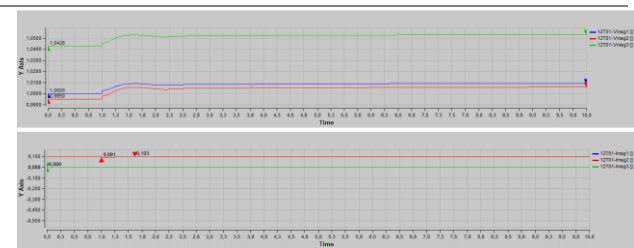
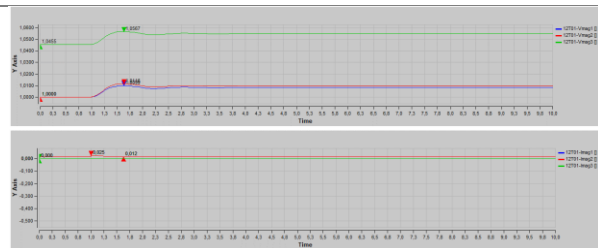
90

FLORIDA2



90

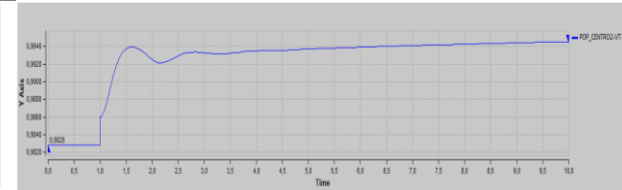
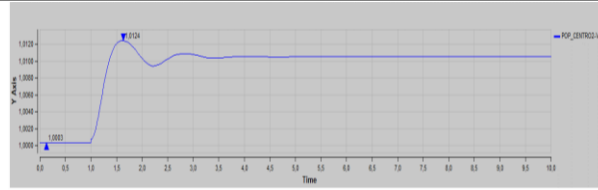
12T01





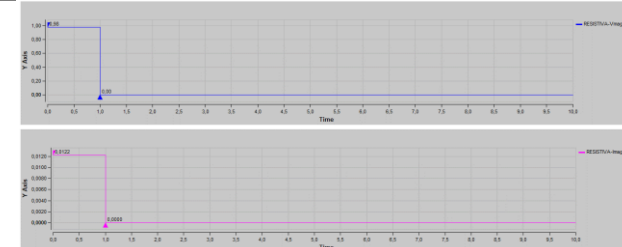
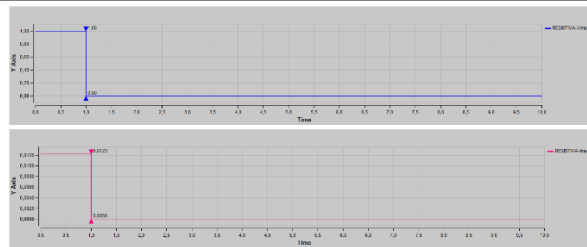
90

POP\_CENTRO2



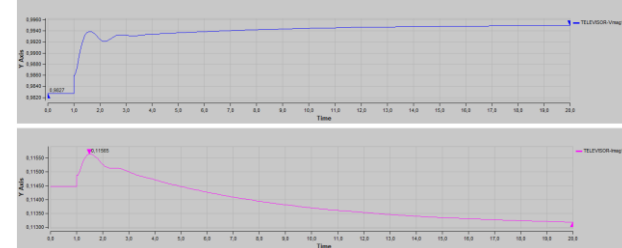
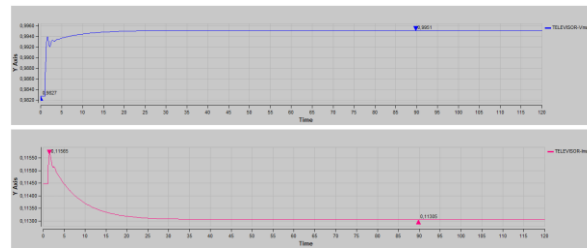
90

RESISTIVA



90

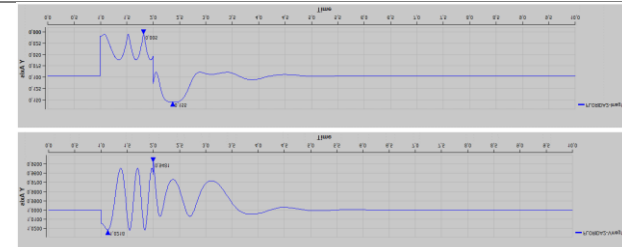
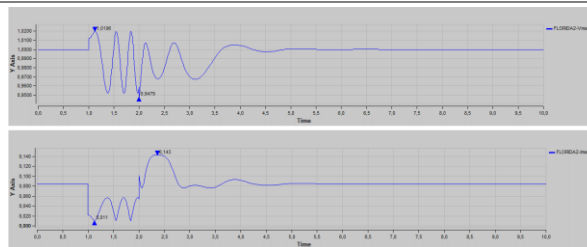
TELEVISOR



Conexión de carga TELEVISOR y la aplicación del evento c

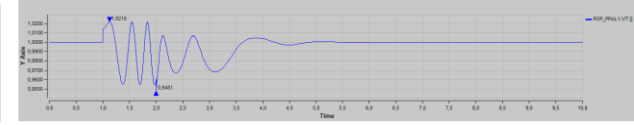
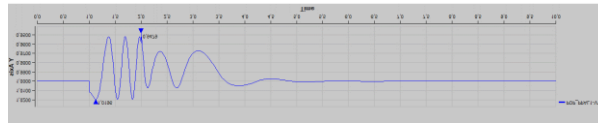
10

FLORIDA2



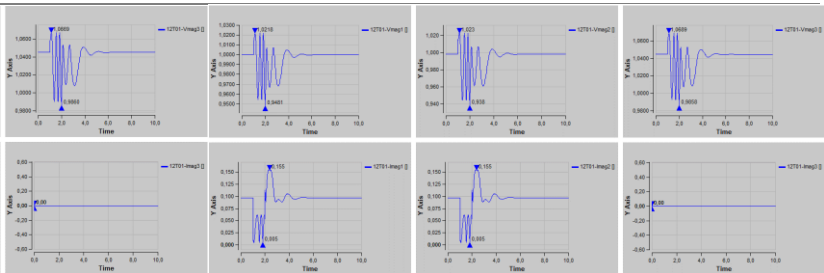
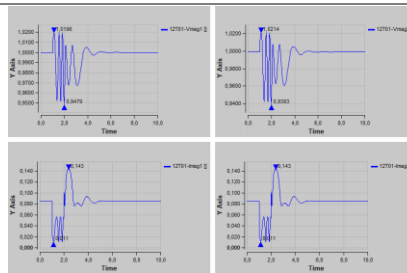
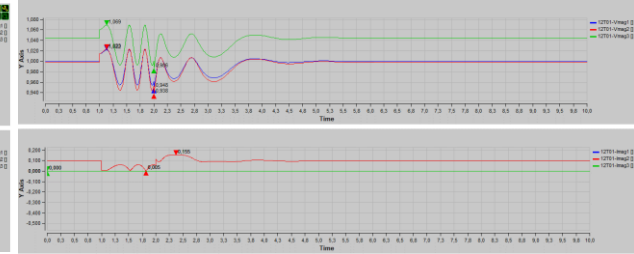
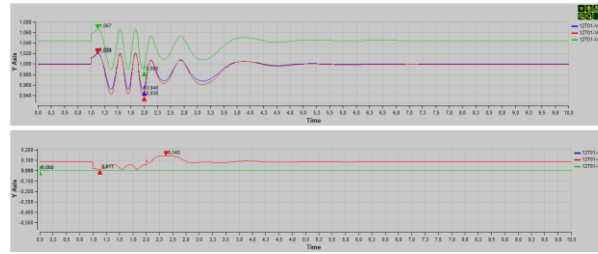
10

POP\_PPAL1



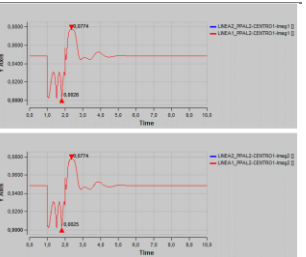
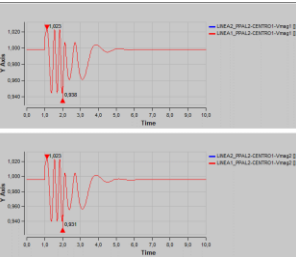
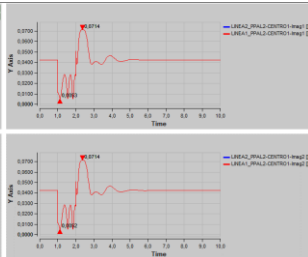
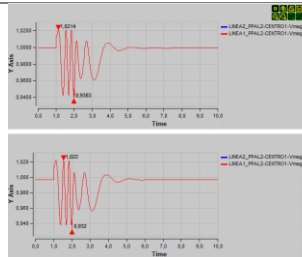
10

12T01



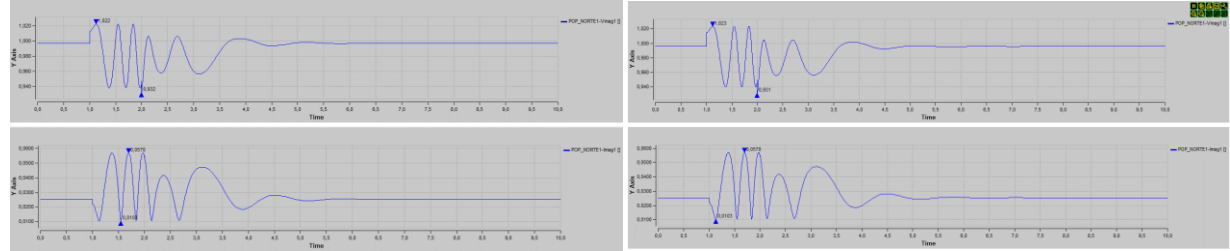
10

LINEAS



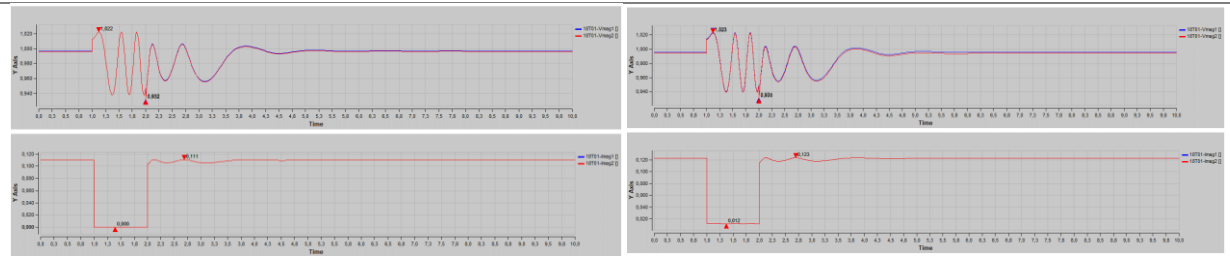
10

POP\_NORTE1



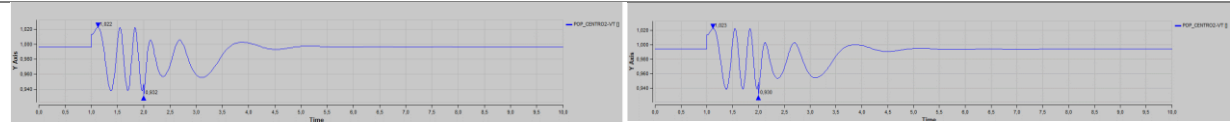
10

18T01



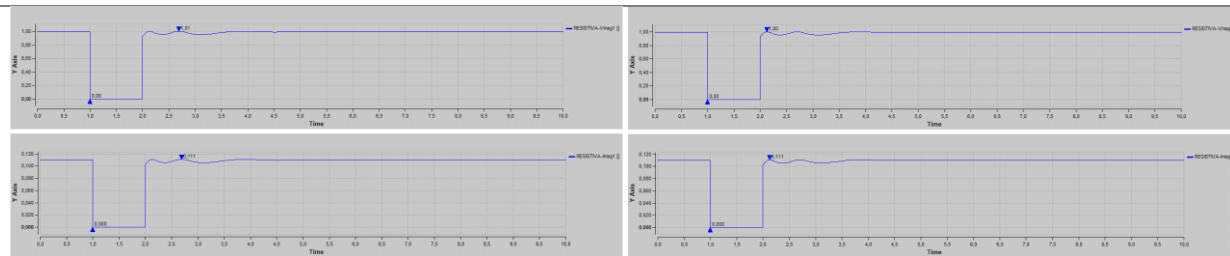
10

POP\_CENTRO2



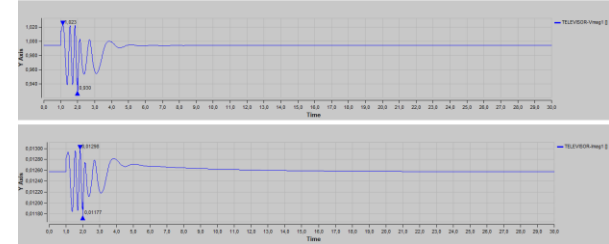
10

RESISTIVA



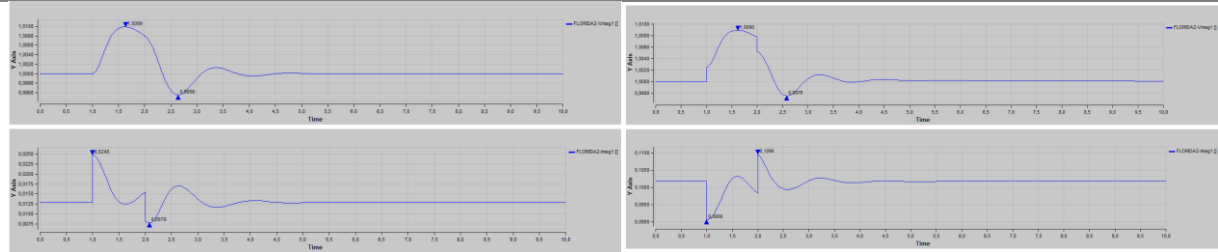
10

TELEVISOR



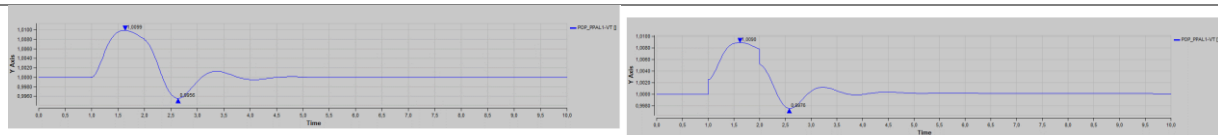
90

FLORIDA2



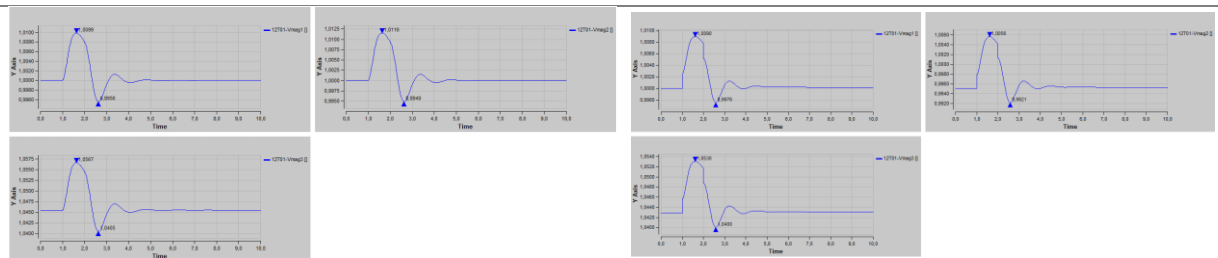
90

POP\_PPAL1



90

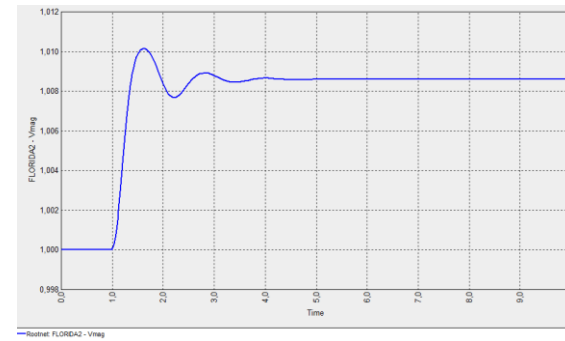
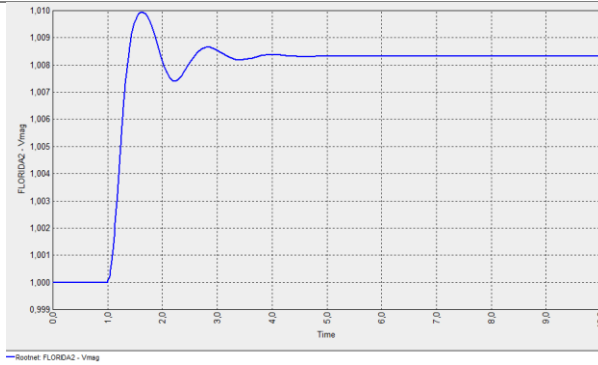
12T01



Conexión de carga LAMPARA y la aplicación del evento a

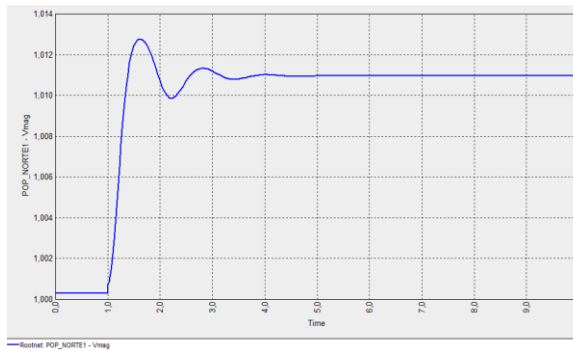
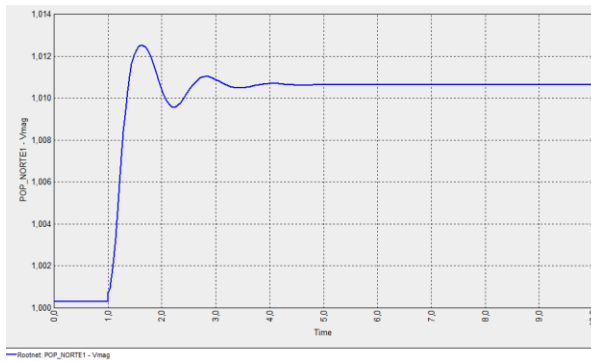
90

FLORIDA2



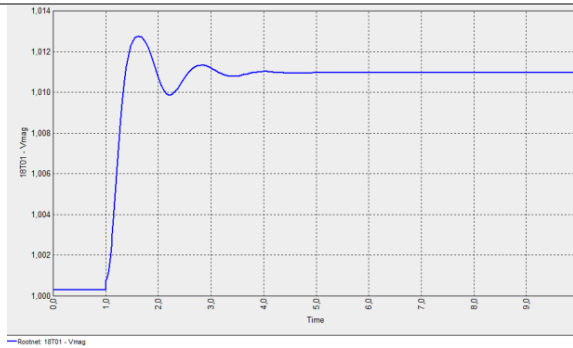
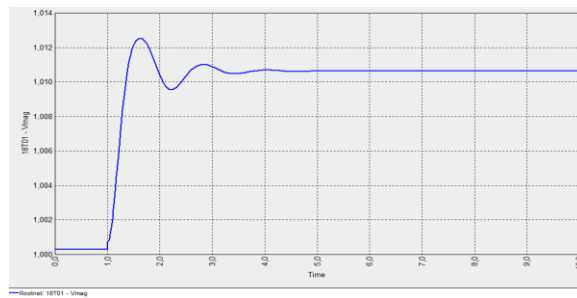
90

POP\_NORTE1



90

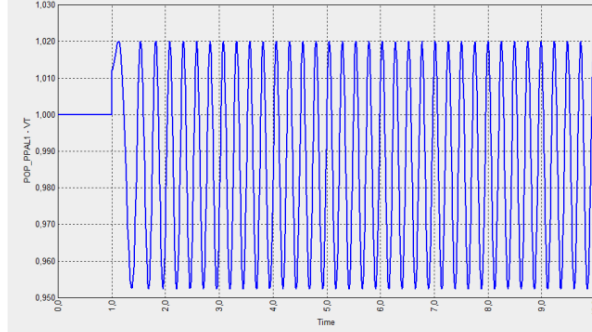
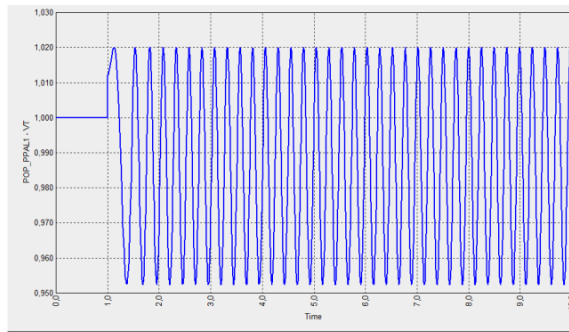
18T01





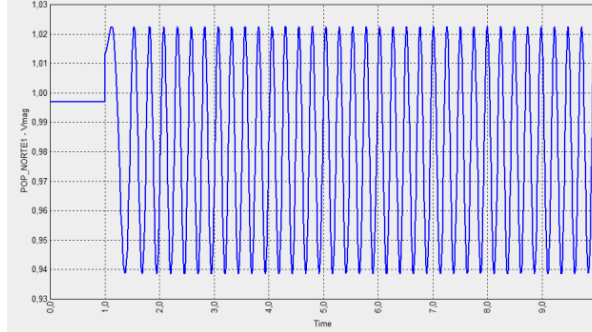
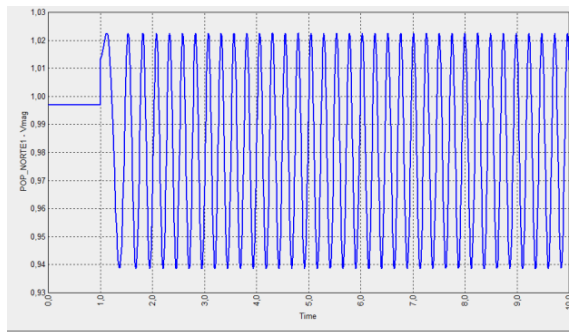
90

POP\_PPAL1



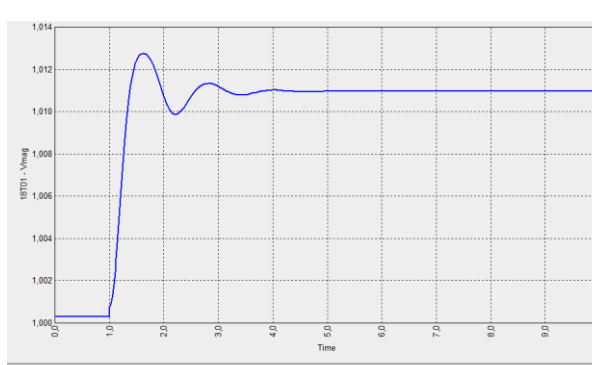
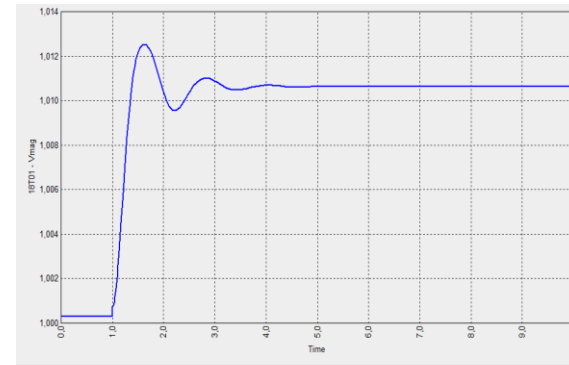
90

POP\_NORTE1

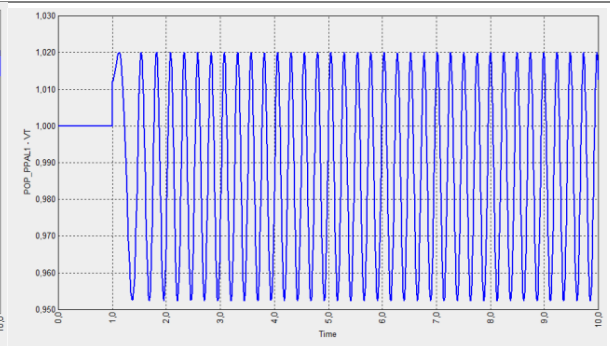
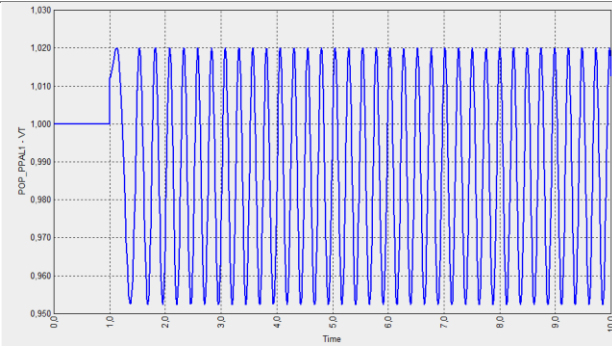


90

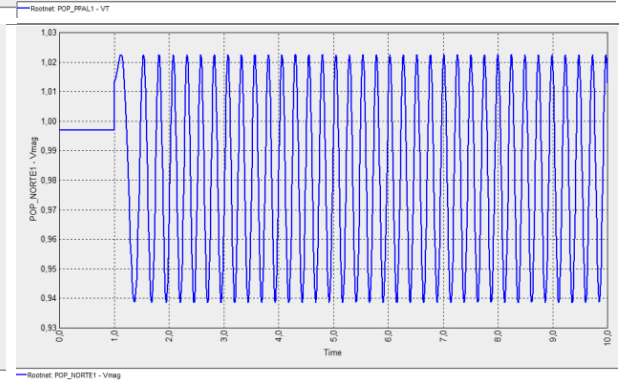
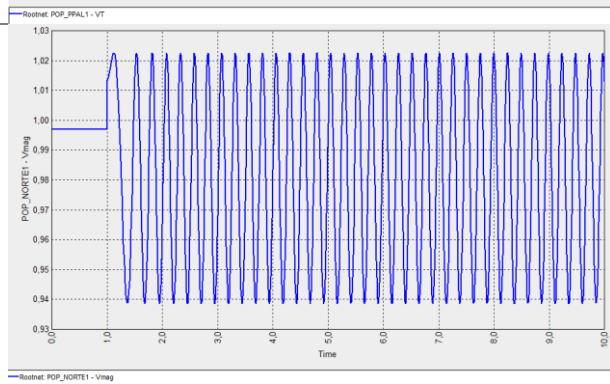
18T01



10 POP\_PPAL

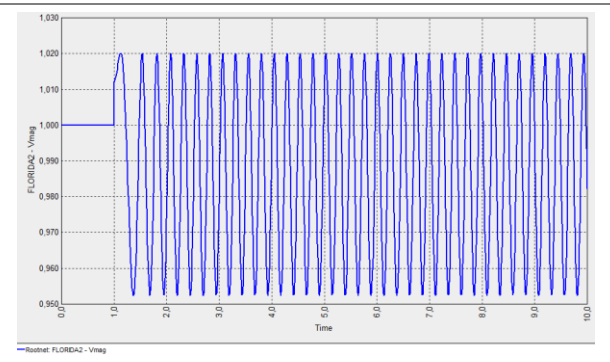
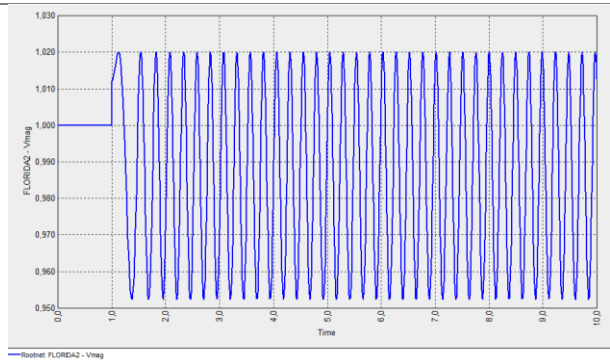


10 POP\_NORTE1



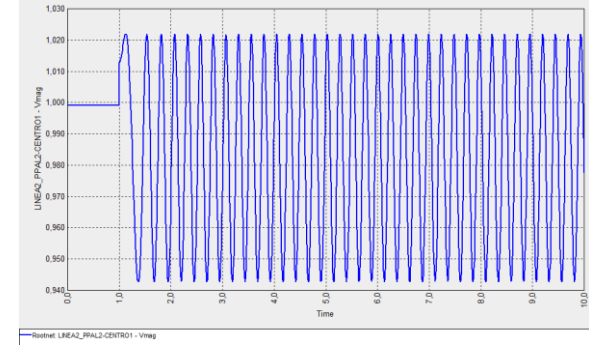
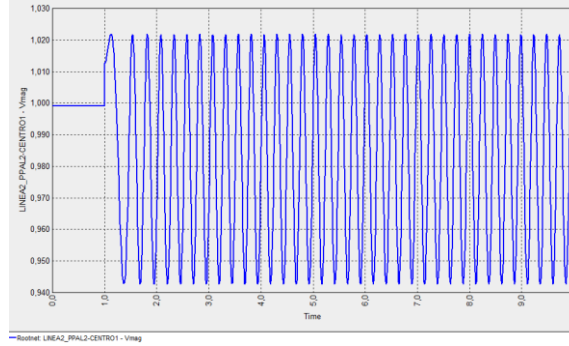
**Conexión de carga Aire acondicionado y la aplicación del evento a**

10 FLORIDA2



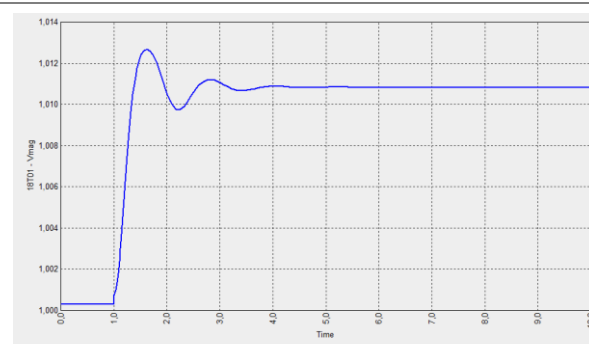
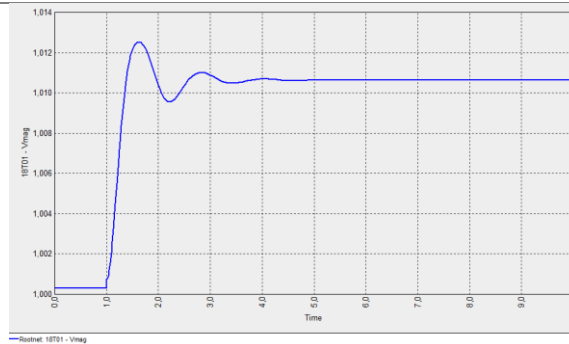
10

LINEAS



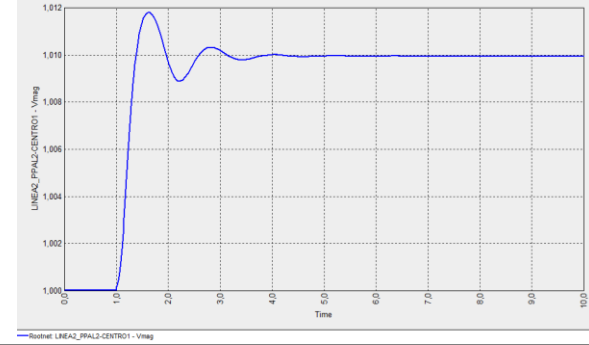
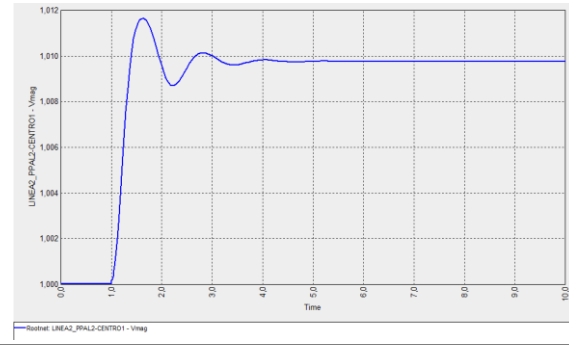
90

18T01



90

LINEAS



Fuente: Elaboración propia