



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

Jaime Augusto Ducuara Valenzuela

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá D.C, Colombia

2017

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

Jaime Augusto Ducuara Valenzuela

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Automatización Industrial

Director:

Ph.D. Eduardo Alirio Mojica Nava

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá D.C., Colombia

2017

Dedicatoria

El Amor es la fuerza más grande que mueve al ser humano, te ayuda a superar, emprender, valorar y agradecer a aquellos seres que con su amor y cuidados te acompañan y te ayudan a esforzarte y a ser cada vez mejor. Hoy y siempre estaré agradecido con mis maravillosos abuelos y mamá quienes me han animado en cada proyecto que he emprendido en mi vida, también agradezco a Viviana, mi prometida, quien me ha regalado el tiempo que le pertenece y me ha dado su apoyo incondicional para poder lograr llevar a cabo este proyecto de estudio y preparación.

Agradezco a Dios su presencia en mi vida.

Agradecimientos

Al director de este proyecto Ph.D. Eduardo Alirio Mojica Nava por su paciencia, apoyo, acompañamiento y asesoría durante la ejecución de este proyecto de grado.

Resumen

La prestación del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica cada vez tiene más exigencias por parte de los usuarios finales debido a la importancia de la misma en la vida cotidiana ya sea residencial, comercial y/o industrial, por tal motivo se hace necesario investigar nuevas formas de garantizar los estándares de las características de la señal de voltaje; frecuencia, forma de onda y/o amplitud dentro valores óptimos, en el presente trabajo, se expone una manera novedosa de realizar dicha tarea aprovechando los beneficios de la teoría de grafos y utilizando Generadores Distribuidos quienes serán los actuadores y con los cuales se pretende mitigar los *Hundimientos de Tensión* y *Elevación de Tensión*.

Las perturbaciones expuestas en el presente trabajo se basan en la reducción o alza del valor nominal de la señal de tensión, el diseño del controlador será por medio de un grafo dirigido y con la respuesta obtenida del consenso se pretende mantener los valores nominales de la señal de tensión dentro de los estándares exigidos en Colombia (Creg 024) y en el Estándar IEEE 1159.

Palabras clave: 1. Grafo Dirigido, 2. Hundimientos de Tensión, 3. Elevación de Tensión, 4. Generación Distribuida

Abstract

The provision of electricity distribution and commercialization service has more and more demands from end users due to its importance in everyday life, be it residential, commercial and/or industrial, for this reason it is necessary to investigate new ways to guarantee the standards of the characteristics of the voltage signal; frequency, waveform and/or amplitude within optimal values, in the present work, is presented a novel way of performing this task, taking advantage of the graph theory's benefits and using Distributed Generators who will be the actuators and with whom it is intended to mitigate the SAG and SWELL disturbances.

The disturbances exposed in the present work are based on the reduction or increase of the nominal value of the voltage signal, the design of the controller will be by means of a directed graph and with the response obtained from the consensus it is intended to maintain the nominal values of the signal of tension within the standards required in Colombia (Creg 024) and in the IEEE 1159 Standard.

Palabras clave: 1. Directed Graph, 2. SAG, 3. SWELL, 4. Distributed Generation

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Abstract	X
Lista de tablas	XV
1. Introducción	1
2. Marco Conceptual	3
2.1 Teoría de grafos y control cooperativo	3
2.1.1 Grafos y sus aplicaciones	4
2.1.2 Matrices de grafos.....	7
2.1.3 Protocolo de consenso aplicados a control distribuido	9
3. Perturbaciones que afectan la calidad de potencia	11
3.1 Clasificación de las perturbaciones de calidad de potencia	12
3.2 Perturbaciones de calidad de potencia objeto de estudio del presente proyecto	14
3.2.1 Hundimiento de tensión (SAG).....	15
3.2.1.1 Métodos de mitigación para hundimientos de tensión	17
3.2.2 Elevación de Tensión (SWELL).....	19
4. Generación Distribuida	21
4.1 Clasificación y ventajas de las plantas de generación Distribuida	21
4.2 Implementación de un proyecto de Generación Distribuida	25
4.2.1 Mercado Eléctrico	25
4.2.2 Confiabilidad para un sistema eléctrico de potencia	26
4.2.3 Contramedida para expansiones de red.....	26
4.2.4 Aspectos ambientales	26
4.3 Generación Distribuida en Colombia.....	27
4.3.1 Regulación en Colombia	28
5. Modelo del sistema de control y simulación	31
5.1 Control de mitigación sistema de distribución eléctrico	31
5.1.1 Voltaje objetivo del sistema – Agente líder	32
5.1.2 Voltaje nodos del sistema – Agente seguidor.....	32
5.1.3 Consenso del sistema eléctrico de distribución	33

5.2	Análisis del modelo del sistema de control para el circuito compuesto por 4	
	Nodos.....	36
5.2.1	Simulación de perturbaciones en el sistema IEEE 4 Node Test Feeder	38
5.2.1.1	Perturbación trifásica para el sistema IEEE 4 Node Test Feeder.....	39
5.2.1.2	Perturbación bifásica para el sistema IEEE 4 Node Test Feeder.....	45
5.2.1.3	Perturbación monofásica para el sistema IEEE 4 Node Test Feeder...	48
5.3	Análisis del modelo del sistema de control para el circuito compuesto por 34	
	Nodos.....	50
5.3.1	Perturbación trifásica para el sistema IEEE 34 Node Test Feeder.....	52
6.	Conclusiones y recomendaciones	63
6.1	Conclusiones.....	63
6.2	Recomendaciones.....	64
A.	Anexo: IEEE 4 Node Test Feeder	65
B.	Anexo: IEEE 34 Node Test Feeder	67
	Bibliografía	71

Lista de figuras

Figura 1: Modelo de grafo dirigido fuertemente conectado.	4
Figura 2: Modelo de grafo no dirigido completo.	5
Figura 3: Modelo de grafo de formación (Árbol).....	6
Figura 4: Modelo de grafo ciclo a) Dirigido b) No Dirigido.....	6
Figura 5: Grafo de 3 Nodos – Ejemplo <i>Matriz Laplaciana</i>	8
Figura 6: Clasificación de los <i>Hundimiento de Tensión (SAG) - Elevaciones de Tensión (SWELL)</i> según IEEE Std 1159 – 2009 [33].....	15
Figura 7: <i>Hundimiento de Tensión (SAG)</i> de categoría instantáneo, duración entre 0.5 – 30 ciclos.	16
Figura 8: Descripción de un hundimiento de tensión [27].	17
Figura 9: Transformador de Tensión Constante.	18
Figura 10: Voltaje SWELL de categoría instantáneo, duración entre 0.5 – 30 ciclos.	20
Figura 11: Clasificación por potencia de las Plantas de Generación Distribuida [36].	22
Figura 12: Topología de operación del modelo del sistema de control para la mitigación de perturbaciones (<i>Hundimientos/Elevaciones de Tensión</i>) en las redes de distribución – IEEE 4 Node Test Feeder.	33
Figura 13: Diagrama de flujo esquema de control para la mitigación de perturbaciones <i>Hundimientos/Elevaciones de Tensión</i> en las redes de distribución de energía eléctrica.	34
Figura 14: Simulación SAG sistema con un (1) nodo.....	35
Figura 15: Simulación SWELL sistema con un (1) nodo.	36
Figura 16: IEEE 4 Node Test Feeder implementación Matlab/Simulink.	38
Figura 17: Resultado Fase T – Profundidad de hundimiento de 0.18 pu.	41
Figura 18: Resultado Fase S – Profundidad de hundimiento de 0.1812 pu.....	41
Figura 19: Resultado Fase R – Profundidad de hundimiento de 0.1815 pu.	42
Figura 20: Resultado Fase T – Profundidad de hundimiento de 0.303 pu.....	43
Figura 21: Resultado Fase S – Profundidad de hundimiento de 0.3042 pu	44
Figura 22: Resultado Fase R – Profundidad de hundimiento de 0.3045 pu.	44
Figura 23: Resultado Fase T – Profundidad de hundimiento de 0.1942 pu.....	46
Figura 24: Resultado Fase S – Perturbación en las fases R y T.....	47
Figura 25: Resultado Fase R – Profundidad de hundimiento de 0.237 pu.	47
Figura 26: Resultado Fase T – Perturbación en la fase S.....	49
Figura 27: Resultado Fase S – Profundidad de hundimiento de 0.2236 pu.	49
Figura 28: Resultado Fase R – Perturbación en la fase S.	50
Figura 29: Topología de operación del modelo del sistema de control para la mitigación de perturbaciones (<i>Hundimientos/Elevaciones de Tensión</i>) en las redes de distribución – IEEE 34 Node Test Feeder.....	52
Figura 30: IEEE 34 Node Test Feeder implementación Matlab/Simulink.	55
Figura 31: Resultado Nodo 862 – Profundidad de hundimiento de 0.235 pu.	58
Figura 32: Resultado Nodo 852 – Profundidad de hundimiento de 0.2024 pu.	58

Figura 33: Resultado Nodo 850 – Profundidad de hundimiento de 0.1625 pu.	59
Figura 34: Resultado Nodo 840 – Profundidad de hundimiento 0.2424 pu.	59
Figura 35: Resultado Nodo 862 – Elevación de tensión eficaz de 1.206 pu.	60
Figura 36: Resultado Nodo 852 – Elevación de tensión eficaz de 1.247 pu.	60
Figura 37: Resultado Nodo 850 – Elevación de tensión eficaz de 1.305 pu.	61
Figura 38: Resultado Nodo 840 – Elevación de tensión eficaz de 1.206 pu.	61
Figura 39: IEEE 4 Node Test Feeder.	65
Figura 40: IEEE 4 NodeTest Feeder – Configuración redes de distribución.	65
Figura 41: IEEE 34 Node Test Feeder.	67
Figura 42: IEEE 34 NodeTest Feeder – Configuración redes de distribución [16].	69

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Clasificación de las perturbaciones de calidad de potencia [33].	12
Tabla 2: Categorías y características de las perturbaciones de calidad de potencia [33].	14
Tabla 3: Resultados sistema <i>IEEE 4 Node Test Feeder</i> sin sistema de mitigación de perturbaciones.	40
Tabla 4: Resultados sistema <i>IEEE 4 Node Test Feeder</i> con sistema de mitigación de perturbaciones.	40
Tabla 5: Resultados de Tensión durante el evento trifásico de <i>Hundimiento de Tensión</i> .	40
Tabla 6: Resultados sistema <i>IEEE 4 Node Test Feeder</i> sin sistema de mitigación de perturbaciones.	42
Tabla 7: Resultados sistema <i>IEEE 4 Node Test Feeder</i> con sistema de mitigación de perturbaciones.	42
Tabla 8: Resultados de Tensión durante el evento trifásico de <i>Hundimiento de Tensión</i> .	43
Tabla 9: Características transformador circuito IEEE 4 Node Test Feeder [16].	66
Tabla 10: Características carga circuito IEEE 4 Node Test Feeder [16].	66
Tabla 11: Longitud y tipo de configuración de las redes de distribución circuito IEEE 34 Node Test Feeder [16].	68
Tabla 12: Características técnicas de las configuración de las redes de distribución circuito IEEE 34 Node Test Feeder [16].	68
Tabla 13: Características carga circuito IEEE 34 Node Test Feeder [16].	70

1.Introducción

La calidad de potencia para cualquier mercado eléctrico es de suma importancia debido a que como cualquier producto o prestación de servicio debe contar con calidad, más así para un insumo tan importante para el desarrollo de la economía de un país, diferentes técnicas de mitigación o corrección han sido expuestas a lo largo de los años para las diferentes perturbaciones que se pueden presentar en las redes de distribución de energía eléctrica.

Los equipos utilizados en la industria son muy sensibles a los cambios de voltajes los cuales pueden llegar a causar pérdidas financieras [31] representadas en horas de los empleados no trabajadas, materia prima dañada e incluso en daño de equipos electrónicos, por tal razón el estar monitoreando constantemente los valores nominales de las diferentes variables del sistema es de suma importancia dado que la toma de la decisión de la corrección de algún parámetro [28] no da espera debido a los factores económicos que hacen parte de los costos de cualquier industria.

Para garantizar la disponibilidad del servicio de energía eléctrica a los usuarios finales y bajo los parámetros de confiabilidad, calidad y bienestar social, los operadores de red deben estar en la capacidad de mitigar las perturbaciones que se puedan presentar en las redes de distribución, adicionalmente se propone utilizar los elementos de la Generación Distribuida como los actuadores fundamentales mediante los cuales se pretende corregir las desviaciones que presente el valor nominal de la señal de voltaje según lo especificado en [1] [33], lo anterior teniendo como premisa los avances que se presentan con la eficiencia, inversiones de construcción de redes, costos de mantenimiento y operación [9].

Basado en lo anterior se propone un nuevo método para mitigar las perturbaciones conocidas como *SAG* y *SWELL* mediante un sistema multi-agente con estructura *Líder – Seguidor* a partir de un consenso, una vez los límites superior o inferior de la señal de voltaje es superado se activa la toma de decisión del sistema teniendo en cuenta la posición (valor de voltaje en un instante de tiempo) de la fase o fases que están presentando el evento y de las demás con el fin de no llegar a afectar la continuidad del servicio en el resto del sistema, los nodos representan la medición de los puntos eléctricos del sistema y las aristas el sistema de comunicación que existirá entre el líder y los seguidores.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido.

Entonces el objetivo principal de este trabajo es diseñar un sistema de control el cual sea capaz de corregir las desviaciones de la señal de voltaje y de esta manera garantizar que en cualquier instante de tiempo se cuente con el nivel de voltaje establecido por el operador de red y comercializador de energía, la verificación de la eficacia se realiza a través de diferentes simulaciones para distintos tipos de falla y/o evento que afecte el valor nominal de la señal de voltaje ya sea monofásica, bifásica y/o trifásica en distintos sistemas de distribución según lo expuesto en [16], estos circuitos son escogidos porque hacen parte de los alimentadores de prueba de la IEEE adicionalmente tienen las características propias de un sistema de distribución tal como desbalance de carga, longitudes prolongadas de la red eléctrica y diferentes tipos de clientes (Industriales y/o residenciales), diferentes tipos de conexión, monofásica, bifásica y trifásica en delta y en Y.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido.

2.Marco Conceptual

Dada la importancia de la teoría de grafos para el desarrollo del presente proyecto en este capítulo se realizará una revisión de la operación y funcionamiento de los sistemas multi-agentes para luego definir, calcular y mitigar las caídas de tensión o sobretensiones que se presentan en los sistemas eléctricos de distribución de energía eléctrica que afectan al usuario final (cliente) ya sea residencial, comercial y/o industrial.

2.1 Teoría de grafos y control cooperativo

El control cooperativo se dedica al estudio de los sistemas multi-agente que se encuentran conectados unos con otros a través de un grafo de comunicación, el grafo representa la información que existe entre los diferentes agentes que pertenecen al sistema. El objetivo del control cooperativo es diseñar protocolos de control para los agentes individuales con los cuales se pueda garantizar un comportamiento sincronizado de todos los agentes.

El comportamiento fundamental del sistema estará basado en el flujo de información que se permita entre los agentes y sus vecinos, cada agente (Nodo) será modelado matemáticamente por un sistema lineal invariante en el tiempo [20]. Según lo expuesto anteriormente las tecnologías de la información tienen aplicaciones en las redes eléctricas, convirtiéndolas en redes inteligentes, lo cual representa una revolución del uso de la información que puede ser adquirida de los diferentes agentes que componen las redes tal como [19]:

1. Centrales Generadoras.
2. Subestación de transformación.
3. Líneas de transmisión.
4. Redes de distribución de media y baja tensión.
5. Transformadores de distribución.
6. Medidores de energía inteligentes.

7. Generación mediante energía renovable.

2.1.1 Grafos y sus aplicaciones

Un grafo consiste de dos conjuntos finitos, V y E , cada elemento de V es llamado vértice o nodo y cada elemento de E es llamado aristas las cuales conectan pares de vértices o nodos de manera no ordenada, la comunicación de la red es modelada como un grafo con sus aristas dirigidas correspondientes al flujo de información permitida en el sistema [13] [20], de lo anterior queda:

$$G = (V, E) \quad (1 - 1)$$

Con:

$$V = \{v_1, \dots, v_N\} \quad (1 - 2)$$

$$E = (v_i, v_j) \quad (1 - 3)$$

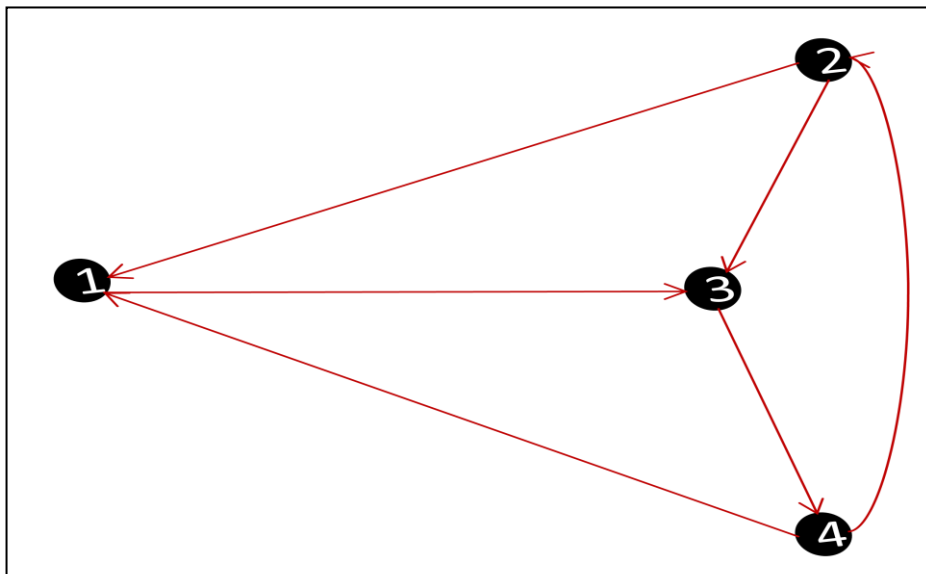


Figura 1: Modelo de grafo dirigido fuertemente conectado.

La **Figura 1** corresponde a la representación de un grafo en la que se puede observar que cada elemento de V es representado por un círculo y cada elemento de E es representado por una línea entre dos elementos de V .

Los grafos tienen diferentes tipos de topologías dependiendo de la conexión de sus vértices a través de las aristas que pueden ser dirigidas y no dirigidas, a continuación se detallarán algunas topologías comunes de conexión [20] [22]:

- Grafo Dirigido:

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

En este tipo de grafo las aristas cuentan con una dirección definida tal como se observa en **Figura 1** formando un par ordenado (v_i, v_j) entre los nodos del sistema.

- Grafo No Dirigido:

En este tipo de grafos las aristas no cuentan con una dirección definida tal como se puede observar en la **Figura 2**, básicamente consiste en un conjunto de aristas conectadas entre cada par de vértices.

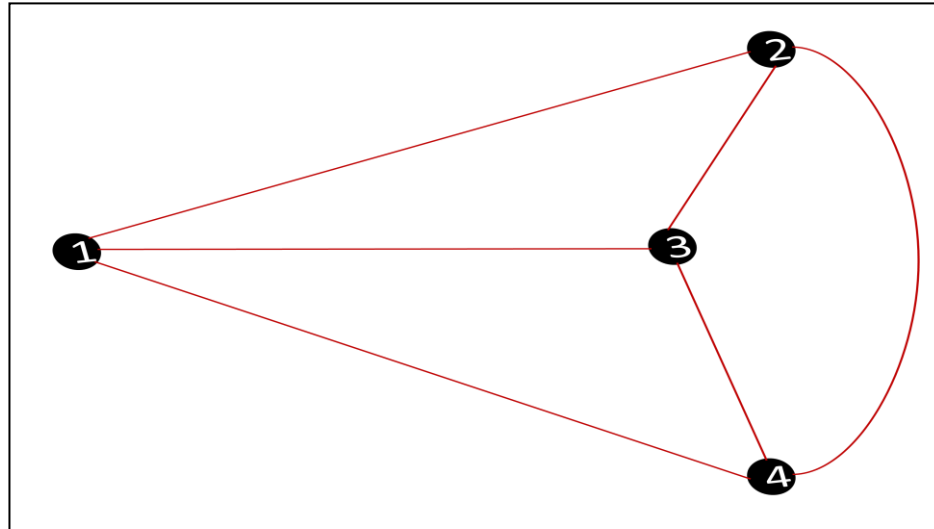


Figura 2: Modelo de grafo no dirigido completo.

- Grafo Completo:

En este tipo de grafo existe una arista que conecta cada par de vértices, básicamente cada par de vértices está interconectado entre sí, la **Figura 2** también es un claro ejemplo de ello.

- Grafo fuertemente conectado:

Un grafo es fuertemente conectado sí entre cada par de distintos vértices existe una arista dirigida que garantiza un camino (v_i, v_j) y (v_j, v_i) , la **Figura 1** es un claro ejemplo de ello.

- Grafo de formación (Árbol):

En este tipo de grafos se tiene un vértice que será el líder y conectados a este por medio de aristas se encuentran los vértices que son los seguidores, la **Figura 3** es un claro ejemplo de ello.

- Grafo ciclo:

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

Este es un tipo de grafo cerrado en donde no existe ningún vértice que se repita, se denota como C_n y su número de vértices es igual a su número de aristas, puede ser dirigido y no dirigido, la **Figura 4** es un claro ejemplo de ello.

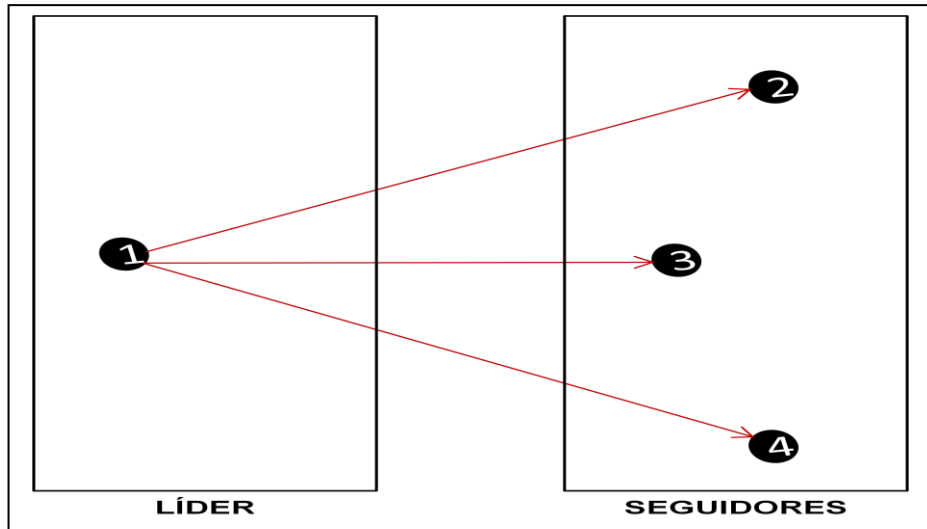


Figura 3: Modelo de grafo de formación (Árbol).

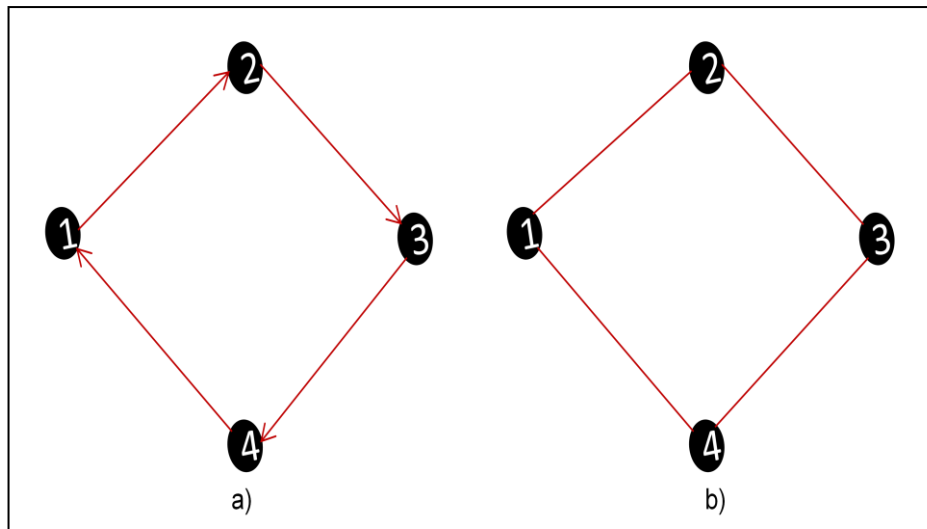


Figura 4: Modelo de grafo ciclo a) Dirigido b) No Dirigido.

2.1.2 Matrices de grafos

Para el análisis de las propiedades de un sistema representado mediante grafos es posible estudiarlo explorando las propiedades de ciertas matrices asociadas al sistema, entonces dados los pesos de cada arista que une dos vértices (a_{ij}) un grafo puede ser representado por una matriz de adyacencia o matriz de conectividad la cual es simétrica de tamaño $n \times n$ para grafos no dirigidos y se define como [20]:

$$A = [a_{ij}] \quad (1 - 4)$$

Con pesos:

$$a_{ij} > 0 \text{ sí } (v_i, v_j) \in E$$

$$a_{ij} = 0 \text{ para otros casos}$$

De esta manera es posible construir las relaciones entre un número finito de objetos y al mismo tiempo tener la representación gráfica directa en términos de vértices y aristas [13].

La matriz de grado para un sistema no dirigido para cualquier vértice dado está definida como la cardinalidad del conjunto de vecinos que tiene ese vértice, es decir es igual al número de vértices que son adyacentes al vértice (v_i) dicho de otra manera es:

$$d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} \quad (1 - 5)$$

$$D = \text{diag}\{d_i\} \quad (1 - 6)$$

Por último se tiene la matriz Laplaciana la cual está definida como:

$$L = D - A \quad (1 - 7)$$

Donde D es la matriz de grado, que se encuentra descrita en la *Ecuación (1-6)*, y A es la matriz de adyacencia, que se encuentra descrita en la *Ecuación (1-4)*, los elementos de la matriz Laplaciana L están dados por:

$$\begin{cases} d_i & \text{Sí } i = j \\ -1 & \text{Sí } i \neq j \text{ y } v_i \text{ es adyacente a } v_j \\ 0 & \text{Para otros casos} \end{cases}$$

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

A continuación se muestra un ejemplo de lo expuesto anteriormente con el fin de dar claridad a las ecuaciones expuestas anteriormente, entonces se define un sistema el siguiente sistema de grafo tal como se muestra en la **Figura 5**.

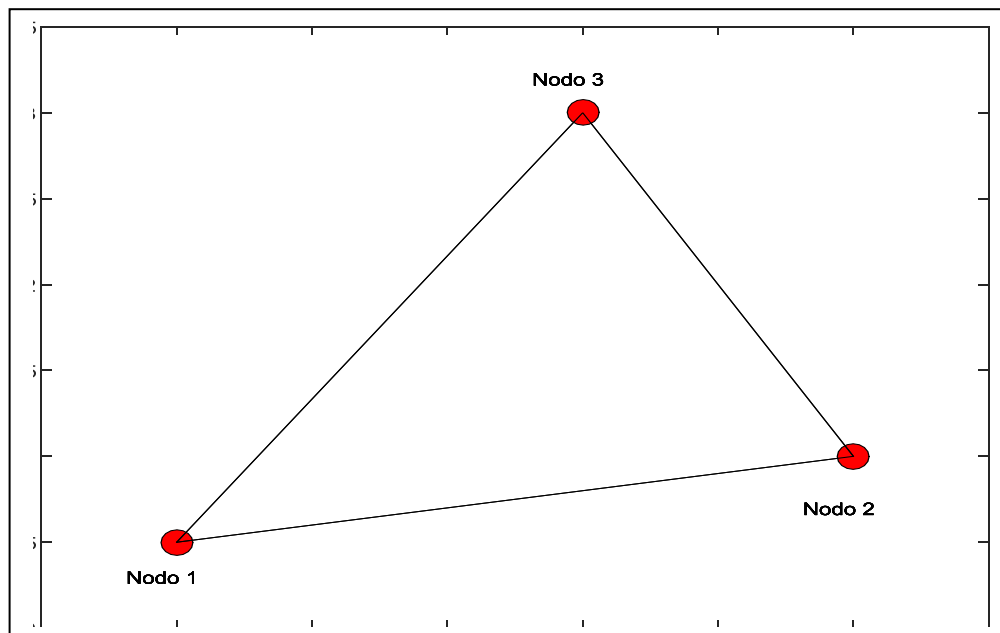


Figura 5: Grafo de 3 Nodos – Ejemplo *Matriz Laplaciana*

Una vez el sistema es definido tal cual como se encuentra especificado en la **Figura 5** se procede con el cálculo de las matrices de que componen el sistema como se muestra a continuación:

1. Matriz de *Adyacencia*:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

2. Matriz de *Grado*:

$$D = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Una vez son calculadas las matrices de *Adyacencia* y *Grado* es posible calcular la *Matriz Laplaciana* la cual se encuentra definida en la *Ecuación (1-7)*

3. Matriz Laplaciana:

$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

Una vez calculada la *Matriz Laplaciana* se tiene que la suma de sus filas es igual a cero (0), muchas de las propiedades de un grafo pueden ser estudiadas en términos de su grafo laplaciano, de hecho esta matriz es de suma importancia en el estudio de sistemas dinámicos multi-agentes y cuenta con las siguientes características:

1. La matriz Laplaciana es siempre definida positiva.
2. Todos los grafos no dirigidos tienen una matriz Laplaciana simétrica y por lo tanto sus valores propios son reales.
3. Los grafos de ciclos dirigidos de longitud N tienen N valores propios uniformemente espaciados alrededor de un círculo en el plano S centrado.
4. Grafo en formación (Árbol) tienen todos los valores propios distintos de 0 en $S = 1$.
5. Los grafos completos (Totalmente conectados) con N nodos tienen todos los valores propios distintos de cero en $S = N$.

Finalmente la matriz Laplaciana se define como:

$$L = D - A \quad (1 - 7)$$

2.1.3 Protocolo de consenso aplicados a control distribuido

El control distribuido de sistemas multi-agentes a gran escala actualmente son facilitados por los avances tecnológicos en diferentes áreas de la ingeniería tal como:

1. Comunicaciones.
2. Sistemas inteligentes de computación.
3. Fácil implementación.

El objetivo de los sistemas multi-agentes es el de transformar un sistema de gran tamaño y complejo en pequeños sistemas que tienen comunicación y coordinaciones mutuas y que tienen la particularidad que son sencillos de gestionar, sin embargo existe un problema para la realización del diseño y consiste en el uso eficiente de los recursos computacionales y sistemas de comunicación [35].

Para el desarrollo de este proyecto de grado se considerara que todos los vértices del grafo tienen como dinámica un único integrador para el desarrollo del control cooperativo y el cual será definido como:

$$\dot{X}_i = u_i \quad (1 - 8)$$

Con $x_i, u_i \in R$ esto corresponde a proporcionarle memoria a cada agente o nodo.

Se considera protocolos de control locales para agente i

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

$$u_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} (x_j - x_i) \quad (1-9)$$

Con a_{ij} como los pesos de las aristas del grafo, este control es considerado distribuido dado que este sólo depende de sus vecinos inmediatos N_i del vértice i en la topología del grafo, esto se define como protocolo de votación local dado que la entrada de control de cada nodo depende de la diferencia entre su estado y todos sus vecinos, note que si estos estados son todos iguales entonces $\dot{X}_i = u_i = 0$; de hecho se puede observar que bajo ciertas condiciones este protocolo lleva todos los estados a el mismo valor [20].

Se puede mostrar que el protocolo (1-9) soluciona el problema del consenso y determina el valor consensuado alcanzado, la dinámica de lazo cerrado se escribe como:

$$\dot{X}_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} (x_j - x_i) \quad (1-10)$$

$$\dot{X}_i = -x_i \sum_{j=1}^N a_{ij} + \sum_{j=1}^N a_{ij} (x_j) = -d_i x_i + [a_{i1} \dots a_{iN}] \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad (1-11)$$

Entonces la dinámica global del sistema está dada por:

$$\dot{X} = -Dx + Ax = -(D - A)x \quad (1-12)$$

$$\dot{X} = -Lx \quad (1-13)$$

Nótese que el vector de entrada de control global $u = [u_1 \dots u_N]^T \in R^N$ está dado por:

$$u = -Lx \quad (1-14)$$

De las ecuaciones anteriores se observa que utilizando la ecuación (1-9) la dinámica de lazo cerrado que corresponde a la ecuación (1-13) depende de la matriz Laplaciana, ecuación (1-7), L del grafo, entonces como la dinámica de cada vértice en la red es llevada hacia los estados de los vértices vecinos por tal motivo se puede decir que asintóticamente todos los vértices alcanzarán una media ponderada de sus estados iniciales la cual también corresponde al punto fijo de su dinámica colectiva [20] [22].

3. Perturbaciones que afectan la calidad de potencia

La calidad de potencia se refiere a diferentes fenómenos electromagnéticos que determinan la forma de onda del voltaje y la corriente en cualquier instante de tiempo dado en un sistema de potencia eléctrico, entonces una excelente calidad de potencia es identificada por el cliente cuando puede percibir o notar una forma de onda constante, sin variaciones del nivel de tensión ni la frecuencia [15] [33].

El incremento de equipos electrónicos en los sistemas de potencia puede causar perturbaciones electromagnéticas, adicionalmente que estos también son sensibles a este tipo de fenómenos [33], lo anterior hace que el mantener los estándares de la señal de tensión y corriente sea prioridad tanto para los usuarios finales como para las empresas comercializadoras y distribuidoras de energía porque el deterioro en el desempeño del sistema hace que se incremente la demanda de generación [18]. Sin embargo los equipos electrónicos no son los únicos que causan algún tipo de perturbaciones en los sistemas de potencia también las fallas de línea, arranques de motores de inducción, soldadoras, energización de transformadores [25] son causantes de cambios en la forma de onda o magnitud de las señales de voltaje y corriente.

En Colombia a través de las resoluciones [1] [2] se establecen las definiciones y los *Métodos de Medida de los Indicadores de Calidad de la Potencia* y se considera que:

a. Hundimiento de Tensión:

Fluctuación de tensión caracterizada por producir una depresión transitoria de tensión respecto de la onda estándar, en un punto del SIN.

Se considera que existe un hundimiento de tensión cuando la tensión se encuentra por debajo del 90% y por encima del 10% de la tensión deslizante, U_{sr} , seguido por un retorno a un valor más alto que el 90% de la tensión deslizante, en un tiempo que va desde 0,5 ciclos a 1 minuto. Se debe determinar de acuerdo con el método de medida Clase A establecido en el numeral 5.4 del Estándar IEC 61000-4-30 de 2008.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

b. Elevación de Tensión:

Fluctuación de tensión caracterizada por producir un aumento transitorio de tensión respecto de la onda estándar, en un punto del SIN.

Se considera que existe una elevación de tensión cuando la tensión se encuentra por encima del 110% de la tensión deslizante, U_{sr} , seguido por un retorno a un valor más bajo que el 110% de la tensión deslizante, en un tiempo que va desde 0,5 ciclos a 1 minuto. Se debe determinar de acuerdo con el método de medida Clase A establecido en el numeral 5.4 del Estándar IEC 61000-4-30 de 2008.

3.1 Clasificación de las perturbaciones de calidad de potencia

Las perturbaciones de calidad de potencia pueden ser clasificadas en diferentes grupos según su naturaleza tal como se muestra en la **Tabla 1**.

Grupo	Perturbación
Baja Frecuencia	Armónicos, Interarmónicos
	Línea eléctrica portadora
	Fluctuaciones de voltaje
	Voltaje SAG
	Desequilibrio de voltaje
	Variaciones de frecuencia
	Voltajes inducidos
	Redes de convertidores DC - AC
Fenómenos radiados de baja frecuencia	Campo magnético
	Campo eléctrico
Fenómenos conducidos en alta frecuencia	Corrientes y voltajes inducidos por ondas continuas
	Transitorios unidireccionales
	Transitorios oscilatorios debido a conmutación de bancos de condensadores
Fenómenos radiados en alta frecuencia	Campos magnéticos
	Campos eléctricos
	Campos electromagnéticos
	Ondas continuas
	Transitorios

Tabla 1: Clasificación de las perturbaciones de calidad de potencia [33].

Las perturbaciones que afectan la forma de onda de la señal de voltaje que se propagan por el sistema de potencia pueden ser clasificadas dependiendo su origen, es de suma

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

importancia poder distinguir el tipo de perturbación que se presenta en un instante de tiempo ya que de una buena clasificación depende la solución o mitigación del mismo, en la **Tabla 2** se pueden observar las categorías que afectan la calidad de potencia.

Categorías	Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud típica de voltaje
1. Transitorios. 1.1 Impulsivo. 1.1.1 Nanosegundos. 1.1.2 Microsegundos. 1.1.3 Milisegundos. 1.2 Oscilatorios. 1.2.1 Baja frecuencia. 1.2.2 Media frecuencia. 1.2.3 Alta frecuencia.	5 ns 1 μ s 0.1 ms < 5kHz 5 - 500kHz 0.5 – 5 MHz	< 50 ns 50ns – 1ms > 1 ms 0.2 – 50 ms 20 μ s 5 μ s	 0 – 4 pu 0 – 8 pu 0 – 4 pu
2. Variaciones de corta duración RMS 2.1 Instantánea. 2.1.1 Sag. 2.1.2 Swell. 2.2 Momentánea. 2.2.1 Interrupción. 2.2.2 Sag. 2.2.3 Swell. 2.3 Temporal. 2.3.1 Interrupción. 2.3.2 Sag. 2.3.3 Swell.		 0.5-30 Ciclos 0.5-30 Ciclos 0.5 Ciclos -3 s 30 Ciclos - 3 s 30 Ciclos – 3 s >3 s – 1 min >3 s – 1 min >3 s – 1 min	 0.1-0.9 pu 1.1-1.8 pu < 0.1 pu 0.1-0.9 pu 1.1-1.4 pu < 0.1 pu 0.1-0.9 pu 1.1-1.2 pu
3. Variaciones de larga duración RMS. 3.1 Interrupciones sostenidas. 3.2 Sub-voltajes. 3.3 Sobre-voltajes. 3.4 Corrientes de sobrecarga.		 > 1 min > 1 min > 1 min > 1 min	 0.0 pu 0.8-0.9 pu 1.1-1.2 pu
4. Desequilibrios. 4.1 Voltajes. 4.2 Corrientes.		EE ¹ EE ¹	0.5 – 2% 1.0 – 30%
5. Distorsiones de forma de onda. 5.1 Compensación DC. 5.2 Armónicos. 5.3 Interarmónicos. 5.4 Notching. 5.5 Ruido.	 0 – 9 kHz 0 – 9 kHz BandaAncha	EE ¹ EE ¹ EE ¹ EE ¹ EE ¹	0 – 0.1% 0 – 20% 0 – 2% 0 - 1%
6. Fluctuaciones de voltaje	< 25 Hz	Intermitente	0.1 – 7%

7. Variaciones de frecuencia		< 10 s	+/- 0.1 Hz
------------------------------	--	--------	------------

Tabla 2: Categorías y características de las perturbaciones de calidad de potencia [33].

Una vez definidos los límites de los fenómenos electromagnéticos por los estándares internacionales [33] para los diferentes tipos de perturbaciones que se pueden presentar en un sistema de potencia entonces ya es posible identificarlos, sin embargo se requiere de monitoreo correcto y en todo instante de tiempo con su respectivo análisis asociado con el fin de brindar soluciones que mitiguen o corrijan los efectos que las perturbaciones pueden llegar a causar en los sistemas de potencia.

El objetivo principal del presente trabajo es establecer un sistema de control capaz de mitigar dos fenómenos de perturbaciones de calidad de potencia utilizando técnicas de control basado en sistemas de teoría de grafos, las perturbaciones a las que se harán referencia en los siguientes apartados y las que se pretende aplicar el sistema de control para mitigar y así de esta manera garantizar los estándares enumerados en la **Tabla 2** son los fenómenos conocidos como *Hundimientos de Tensión - SAG* (Caída de voltaje eficaz que se encuentra por debajo del 90% y por encima del 10% del voltaje de referencia y cuya duración se encuentra entre 0.5 ciclos y 1 minuto) y *Elevaciones de Tensión - SWELL* (Incremento de voltaje eficaz que se encuentra por encima del 110% del voltaje de referencia y cuya duración se encuentra entre 0.5 ciclos y 1 minuto).

3.2 Perturbaciones de calidad de potencia objeto de estudio del presente proyecto

Las redes eléctricas de distribución están expuestas a diferentes tipos de eventos los cuales pueden ocasionar que en algún punto del sistema los niveles de tensión eficaz estacionaria puedan salirse de los rangos definidos tal como se encuentran establecidos en [1] [2] [33], estos están clasificados según la magnitud y su duración y están definidas en la **Tabla 2** y la cual se resume en la siguiente **Figura 6** para los *Hundimientos de Tensión* y *Elevación de Tensión*:

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

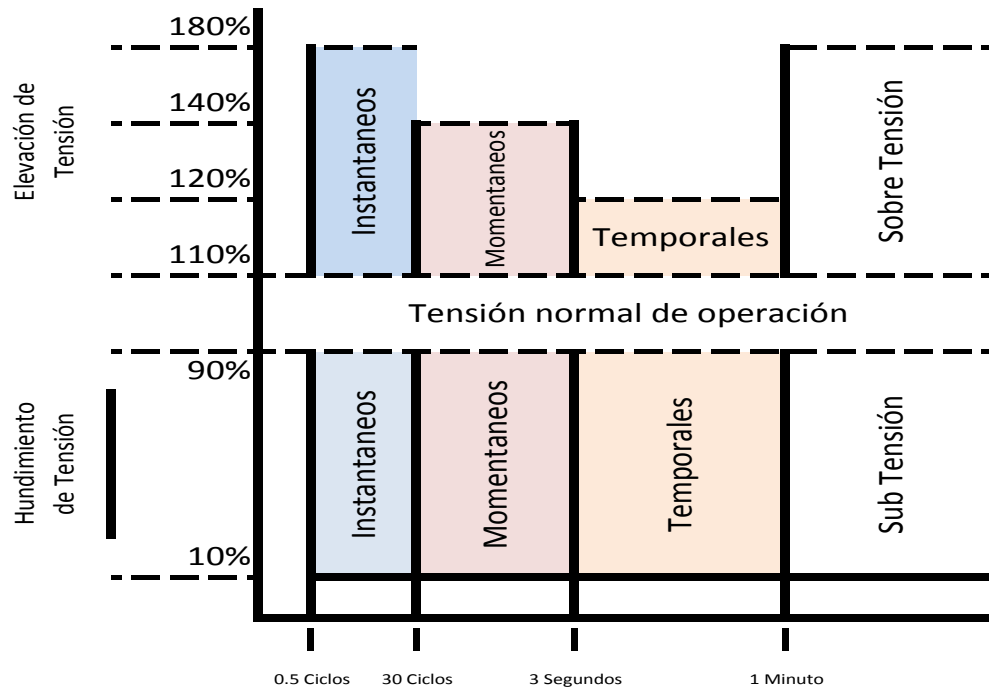


Figura 6: Clasificación de los *Hundimiento de Tensión (SAG) - Elevaciones de Tensión (SWELL)* según IEEE Std 1159 – 2009 [33]

En este apartado se presenta una introducción general a los fenómenos que afectan la calidad de potencia y que son el principal objeto de estudio del presente proyecto, en este capítulo se expondrán de manera detallada las características, formas de onda, el por qué se presentan en los sistemas de distribución de redes eléctricas y la propuesta de mitigación de estos fenómenos la cual se realizará con lo expuesto en el capítulo 1.

3.2.1 Hundimiento de tensión (SAG)

El *Hundimiento de Tensión (SAG)* se define como la reducción momentánea del valor eficaz del voltaje nominal y que típicamente se encuentra entre 0.1 y 0.9 en pu, la duración puede ser desde 0.5 ciclos a 1 minuto [27] [29] [33] tal como se puede verificar en la **Tabla 2**, este tipo de perturbación puede ser originado bajo los siguientes casos:

1. Contacto de las redes eléctricas con árboles.
2. Descargas Atmosféricas.
3. Contacto de animales con partes energizadas del sistema en líneas aéreas aves y en líneas subterráneas roedores.
4. Falla simple monofásica a tierra.
5. Arranque de motores de inducción.
6. Maniobras efectuadas sobre la red eléctrica por parte de la empresa distribuidora.
7. Incrementos de corriente de corta duración.
8. Conmutación de cargas de gran potencia que se conectan al sistema.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

9. Fallas en sistemas alimentadores paralelos que se encuentren conectados al mismo barraje.
10. Energización o conexión de transformadores.
11. Por causa de terceros tal como vandalismo, construcciones y accidentes vehiculares.

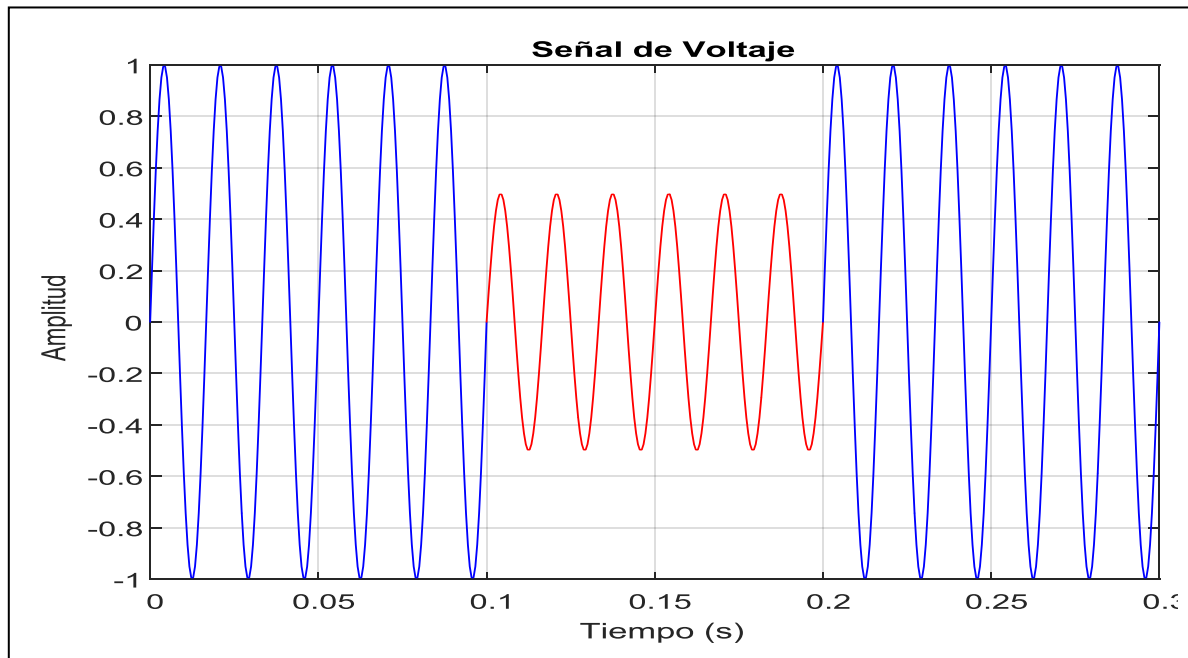


Figura 7: *Hundimiento de Tensión (SAG)* de categoría instantáneo, duración entre 0.5 – 30 ciclos.

En la **Figura 7** se puede observar el comportamiento de la señal de voltaje cuando es sometida a alguno de los casos enunciados anteriormente produciendo un decremento en el valor eficaz de la señal de tensión.

Generalmente el *Hundimiento de Tensión (SAG)* es caracterizado por dos valores, la magnitud del hundimiento que es la diferencia porcentual entre la referencia y el mínimo valor del evento o por su valor residual de tensión y la duración del evento, la mayoría de las veces se prefiere utilizar la profundidad del hundimiento en vez de la magnitud con el fin de interpretar correctamente los indicadores, la profundidad del hundimiento es calculada como el valor de la referencia en voltios o en pu menos la tensión residual tal como se muestra en la siguiente **Figura 8** [27].

La magnitud del *Hundimiento de Tensión (SAG)* es uno de los índices más utilizados para evaluar la calidad de potencia, ya que los cambios bruscos de tensión se pueden afectar el funcionamiento normal de los instrumentos y equipos electrónicos y reducir su vida útil [X].

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

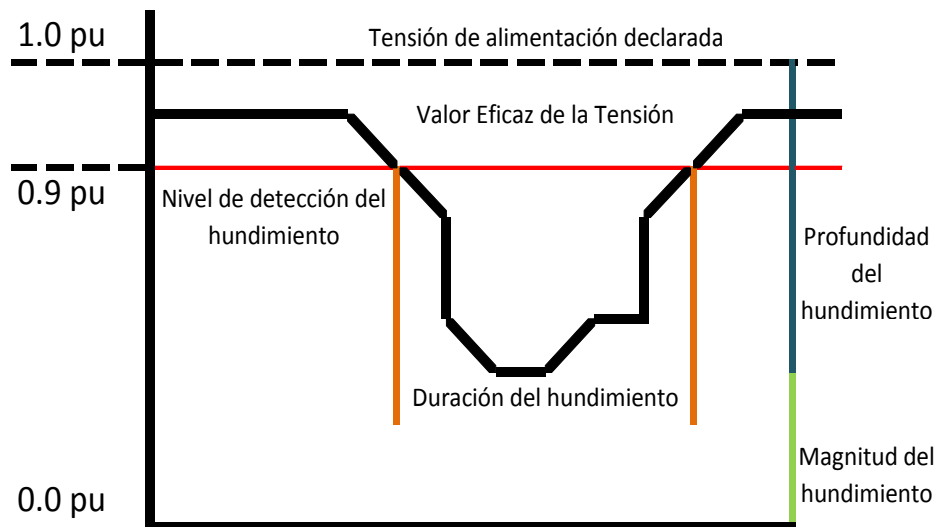


Figura 8: Descripción de un hundimiento de tensión [27].

3.2.1.1 Métodos de mitigación para hundimientos de tensión

Debido a que los *Hundimiento de Tensión (SAG)* son más comunes que una interrupción completa en un sistema de distribución, existen métodos para corregir las desviaciones que se puedan presentar en el valor eficaz de la señal de tensión particularmente para aplicaciones industriales, de manera general los métodos no se encuentran enfocados en proporcionar energía de respaldo sino en garantizar la restauración del valor eficaz de la señal de tensión [34], lo anterior de suma importancia debido a que se pueden mitigar los impactos negativos de estos eventos en la industria debido a que en esta se tienen equipos sensibles que pueden llegar a tener un mal funcionamiento llegando a ocasionar pérdidas económicas a las empresas.

A continuación se enumeran los métodos de mitigación que benefician tanto a las empresas distribuidoras de energía y al usuario final.

3.2.1.1.1 Transformadores de tensión constante

Este equipo consiste en un regulador ferroresonante que se compone de un inductor lineal y no lineal, así como un condensador en un circuito resonante paralelo con el inductor no lineal.

Estos elementos generalmente se incorporan en una configuración de transformador de aislamiento junto con un filtrado adicional para eliminar los armónicos autoinducidos. Ese filtrado puede manejar un nivel razonable de distorsión armónica en la salida inducida por una carga no lineal sin embargo sí existe un exceso de armónicos se puede producir sobre calentamiento, el equipo se sintoniza con la tensión y frecuencia del sistema.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

La función de los transformadores ferroresonantes

es mantener una tensión de salida constante para un amplio rango de tensiones de entrada, sin embargo este tiene como característica inherente la limitación de corriente, lo cual limita la corriente máxima a plena salida de tensión, lo anterior puede llegar a ser una limitación al arrancar motores o unidades de procesamiento central de la computación.

Este dispositivo cuenta con una pequeña cantidad de energía almacenada y circulara a través de interrupciones de aproximadamente un ciclo, siempre que la interrupción no sea producida por un evento cercano de la entrada dado que se consumiría toda la energía almacenada, sin embargo este dispositivo sería capaz de soportar hasta 50% de la caída de tensión durante un tiempo de 0.5 segundos con lo cual es probable que la falla sea despejada y no afecte el sistema, estos reguladores son grandes y pesados debido a su construcción pero son sencillos y confiables, en la siguiente **Figura 9** se puede observar el diagrama eléctrico.

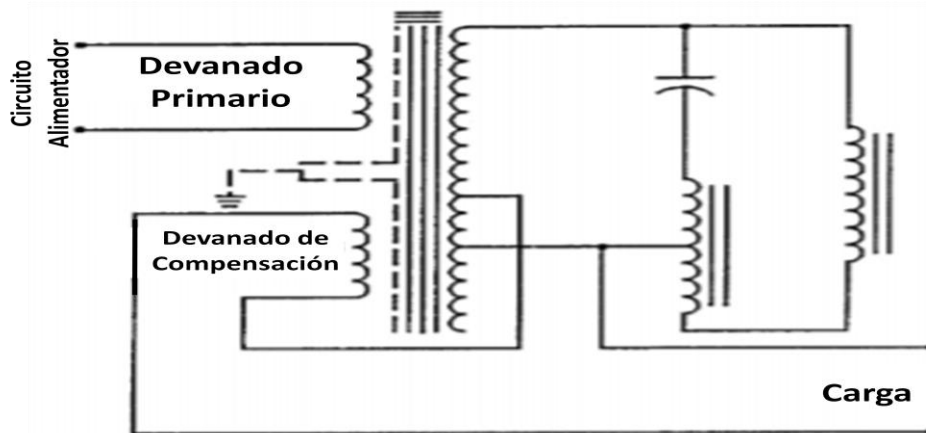


Figura 9: Transformador de Tensión Constante.

3.2.1.1.2 Motor – Generador

Los equipos que están compuestos de Motor – Generador consisten en motores eléctricos que accionan los generadores de corriente alterna, la carga es suministrada por el generador y está se encuentra aislada eléctricamente de la red de distribución. Los generadores tienen la capacidad de aislar la carga de los impulsos, hundimientos y elevaciones de tensión para cambios de más o menos 20% o en algunos casos más permitiendo de esta manera que mantenga el nivel de tensión eficaz en la carga.

El equipo tiene la capacidad para minimizar las interrupciones severas, lo anterior es debido a que la inercia que tiene sea capaz de abarcar interrupciones hasta por 0.3 segundos, pero es posible que soporte interrupciones superiores a 0.3 segundos agregando inercia por medio de un volante de inercia, siguiendo lo anterior este tiempo

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

adicional brinda protección mientras el evento es despejado del sistema de distribución eléctrico.

Sus inconvenientes se encuentran principalmente en el lado de la carga por la alta impedancia de salida del generador que puede llegar a causar caídas de tensión como respuesta a cambios bruscos de la carga, otro de sus inconvenientes radica en que su eficiencia es relativamente baja por lo que los costos de energía eléctrica a lo largo de su vida útil pueden ser sustanciales.

Se debe tener en cuenta las características físicas del equipo en el momento de pensar en este como solución para mitigar los *Hundimientos de Tensión* dado que este requerirá disipar calor, un lugar construido para su instalación debido a su peso y de espacio debido a su tamaño adicionalmente de contar con la posibilidad de ruido durante su funcionamiento, el mantenimiento preventivo es fundamental para su correcto funcionamiento. La confiabilidad que tienen estos equipos es alta.

3.2.1.1.3 Acondicionador/Regulador de tensión activo

Los Acondicionadores/Reguladores de tensión son acondicionadores de potencia basados en inversores de bajo voltaje, estos están diseñados para proporcionar capacidad de desplazamiento de caída de tensión a equipos trifásicos industriales.

Las unidades más pequeñas se encuentran entre los 10kVA hasta los 200kVA y generalmente dependen únicamente de los componentes electrónicos, sin embargo los de mayor capacidad que están entre los 200kVA hasta los 10MVA y estos pueden utilizar un transformador de inyección, sus principales ventajas son su eficiencia, potencia nominal, profundidad de la curva de tensión permisible y el tiempo de corrección, generalmente estos equipos se encuentran dimensionados para las caídas de tensión hasta con un 30% de profundidad.

3.2.2 Elevación de Tensión (SWELL)

Las *Elevaciones de Tensión (SWELL)* son definidas como un incremento momentáneo del valor eficaz del voltaje nominal que típicamente se centra entre 1.1 y 1.8 en pu, la frecuencia con la que se presenta esta perturbación es baja en comparación con el voltaje SAG, la duración puede ser desde 0.5 ciclos a 1 minuto [29] [33] tal como se puede verificar en la **Tabla 2** y en la **Figura 6**, este tipo de evento se puede presentar bajo los siguientes casos:

1. Falla simple monofásica a tierra puede causar que las fases no falladas tengan un incremento en su valor de tensión eficaz.
2. Descargas atmosféricas.
3. Conmutación de cargas de gran potencia que se descuentan del sistema.
4. Ajustes incorrectos de los tap de los transformadores.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

5. Deslaste de carga en el sistema de potencia.

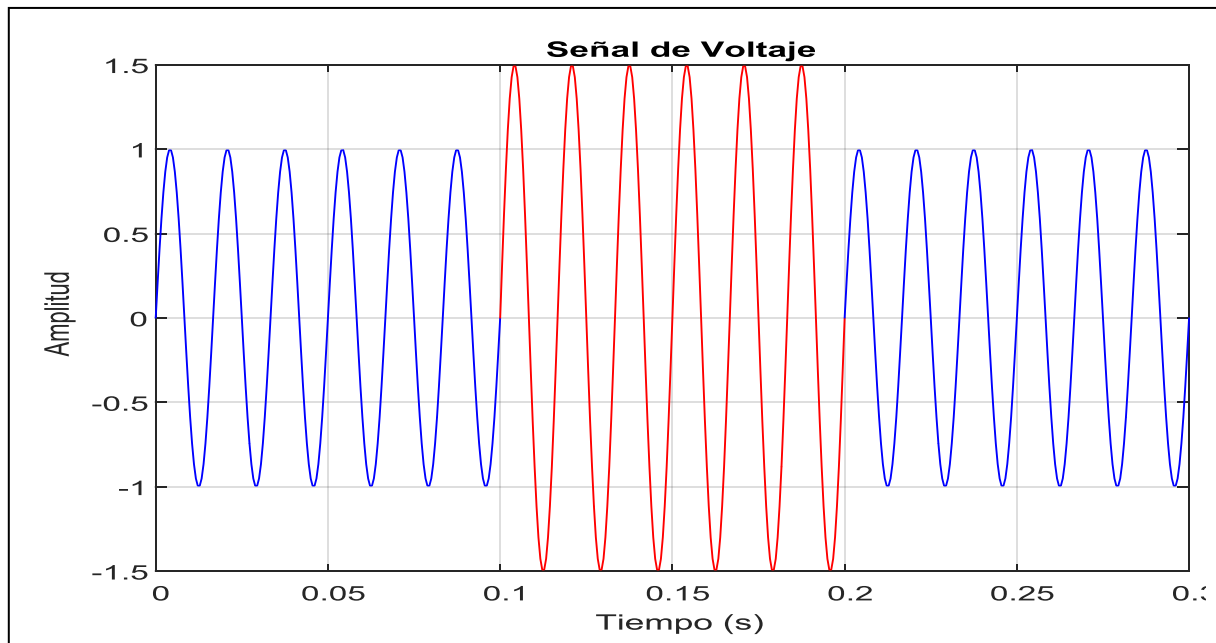


Figura 10: Voltaje SWELL de categoría instantáneo, duración entre 0.5 – 30 ciclos.

En la **Figura 10** se puede observar el comportamiento de la señal de tensión cuando es sometida a alguno de los casos enunciados anteriormente produciendo un incremento en el valor eficaz de la señal de tensión.

El equipo Motor – Generador tiene la capacidad de aislar la carga de los impulsos, hundimientos y elevaciones de tensión para cambios de más o menos 20% o en algunos casos más permitiendo de esta manera que mantenga el nivel de tensión eficaz en la carga, así mismo los Acondicionadores/Reguladores de Tensión Activos también tienen la capacidad de mitigar las *Elevaciones de Tensión (SWELL)* regulando la salida de tensión que va a la carga a la cual se le está garantizando la señal de tensión.

En este capítulo se definieron las características y forma de mitigar los hundimientos y elevaciones de tensión, sin embargo el propósito del presente trabajo es plantear una propuesta con la cual sea posible garantizar el valor de operación para los usuarios y el sistema eléctrico por lo cual se propone utilizar equipos de generación distribuida que se encuentren en un sistema de distribución y que se encontraran comunicados a través de los valores de tensión que se encuentren en cualquier instante de tiempo en el sistema.

Lo anterior se propone dado que los grupos de generación distribuida pueden llegar a encontrarse instalados en el sistema y pueden provenir de cualquier fuente de energía ya sea combustible fósil, eólica y/o solar, biomasa, PCH's, etc. Dado lo anterior estas quizá sean la solución para mantener un nivel de tensión eficaz en el sistema de distribución y así garantizar una calidad de la potencia para los usuarios finales, en el siguiente capítulo se detalla el escenario para la generación distribuida y lo que actualmente rige en Colombia.

4. Generación Distribuida

La Generación Distribuida puede ser definida como pequeñas fuentes, renovables o convencionales que son diferentes al generador principal del sistema eléctrico y que pueden ser ubicadas cerca a los principales centros de carga o incluso en los puntos de medición de cargas sensibles o especiales de los sistemas de distribución, el impulso de la generación distribuida radica en la existencia de tecnologías que permiten bajas potencias de forma eficiente, confiable y con calidad [9] [36].

Según la definición anterior se pretende explotar las características de la generación distribuida para el desarrollo de la estrategia con la cual se mitigara las perturbaciones de calidad de potencia para lo cual se propone utilizar generadores distribuidos, simulados en este proyecto como fuentes ideales de tensión, con los cuales se pretende atenuar el efecto al que es sometida la señal de tensión y mantenerla dentro de los estándares exigidos en [1] y cuyos parámetros y/o características se encuentran especificados en la **Tabla 2**.

4.1 Clasificación y ventajas de las plantas de generación Distribuida

Las plantas de Generación Distribuida se clasificarían en función de su potencia instalada tal como se puede observar en la **Figura 11** [36].

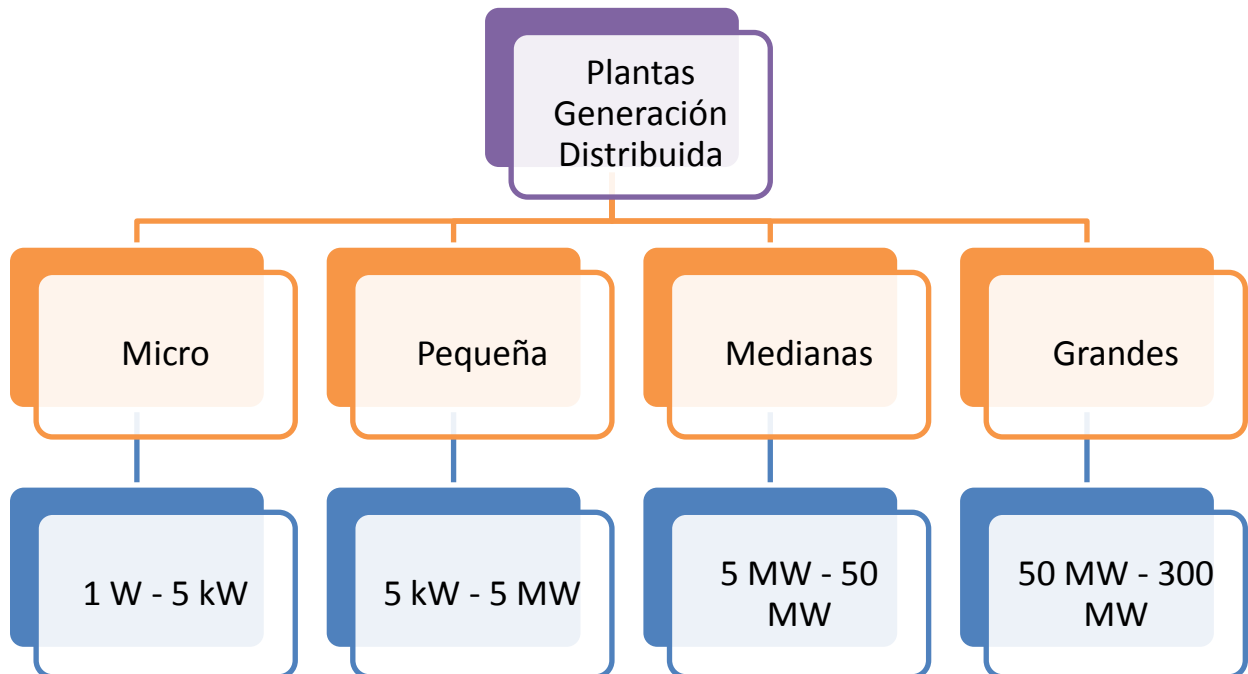


Figura 11: Clasificación por potencia de las Plantas de Generación Distribuida [36].

En la Generación Distribuida existen diferentes gamas de tecnologías para el desarrollo de las plantas eléctricas, a continuación se enumeran [26]:

1. Grupos electrógenos a base de diesel, gas natural, biomasa o biogás.
2. Cogeneración.
3. Paneles fotovoltaicos.
4. Turbinas eólicas.
5. Micro turbinas.
6. Turbinas de combustión.
7. Baterías.
8. Bobinas superconductoras.
9. Celdas de combustible.

Dado que los estándares de calidad y confiabilidad de la señal de tensión con la cual se suministra el servicio de energía eléctrica a los usuarios conectados a la red de distribución se debe mantener a lo largo del tiempo ha hecho que para las empresas distribuidoras y comercializadoras de energía eléctrica sea primordial cumplir con los estándares exigidos por sus clientes y que se apoyan en normas nacionales e internacionales, entonces existen beneficios acerca de la implementación de un sistema

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

de Generación Distribuida en un sistema de distribución de energía eléctrica [6] [9] [14] [17] y son expuesto a continuación:

1. La Generación Distribuida puede ser considerada como un complemento a las redes de distribución eléctrica con el fin de garantizar un servicio continuo a los usuarios finales.
2. Provee seguridad al sistema eléctrico en cuanto a apagones causados por terrorismo, causas propias del sistema como mantenimientos programados o fallas por deterioro de materiales y/o intervención de terceros sin la autorización de la empresa distribuidora.
3. Es capaz de compensar las deficiencias de estabilidad que se presentan en los sistemas de distribución de energía eléctrica cuando se presenta un evento y a través de esta se puede proporcionar energía de emergencia con el fin de restablecer el suministro a clientes importantes del sistema, lo anterior una vez se haya aislado la falla que se encontraba en el sistema y que impedía garantizar el suministro de energía al resto del alimentador.
4. Aumento de la flexibilidad y calidad de energía del sistema de distribución de energía.
5. No se requiere de grandes subestaciones de distribución evitando inversiones económicamente ineficientes.
6. Las pérdidas técnicas son inferiores a las que se presentan actualmente en las redes clásicas.
7. Reduce la contaminación electromagnética de las líneas de transmisión de Alta Tensión al reducirse la construcción de estas.
8. Un rendimiento energético estimado entre el 65% y el 95% y dependiendo la tecnología usada puede ser clasificado como generación de energía limpia o renovable.
9. En términos económicos es capaz de terminar con los monopolios naturales que actualmente se presentan para los distribuidores de energía eléctrica al introducir competencia al mercado eléctrico debido a que las inversiones pueden llegar a ser asequibles para inversionistas independientes y tiempos de construcción cortos.
10. Aumento de la capacidad de potencia firme en los sistemas de distribución garantizando el desarrollo económico sostenible de un país.
11. Eficaz al resolver el problema de suministro de energía eléctrica en zonas remotas o no interconectadas con las principales redes de un país.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

12. Refuerzos o suplencias a las redes de distribución con el fin de evitar la saturación o congestión de las redes por el aumento de la demanda.
13. Evita o aplaza inversiones en transmisión y distribución.
14. Minimiza el riesgo ante variaciones en el precio de la energía eléctrica suministrada por el comercializador.
15. Suponen cortos plazos de construcción en comparación con la mayoría de las centrales eléctricas más grandes.

Una vez expuestas las ventajas de la utilización de plantas de Generación Distribuida se detallan los inconvenientes que conlleva la implementación y uso de estas tecnologías y requiere de planificación con el fin de ajustarse a la implementación y puesta en producción [14] [17] [23], a continuación se detallan las desventajas:

1. Inconvenientes con los niveles de voltaje (Altos, Bajos y Desbalances).
2. Excesivas operaciones del sistema cuando la fuente de energía es solar o eólica que pueden llegar a interrumpir el funcionamiento normal del sistema haciendo operar los dispositivos de regulación de voltaje por tal motivo se requiere de una sincronización entre la red de distribución y el equipo de interconexión; incluso en casos extremos es necesario la instalación de un equipo de compensación estática.
3. Cuando una planta de Generación Distribuida es incluida en un sistema de distribución tradicional los parámetros eléctricos del sistema cambian aumentando la corriente de corto circuito y siendo necesario nuevos estudios de flujos de potencia los cuales pueden presentar problemas de regulación cuando existen condiciones de flujo de potencia inversa.
4. Impacto en la coordinación de protecciones del sistema y esto se debe a que la red de distribución sin la planta era netamente pasiva con la inclusión de la misma se convierte en una red activa vista desde la nueva fuente de alimentación cambiando la corriente de corto circuito, el tiempo en el que el sistema estará en falla, incertidumbre en los flujos de potencia cambiando de dirección el cual era unilateral desde la barra de alimentación principal del sistema aumentando la gestión del sistema de distribución.
5. Impacto en la planificación de la red.
6. Inconvenientes de optimización y control de las redes de distribución debido a la aparición de nuevos nodos de generación.
7. Determinación de una estructura razonable de las redes de distribución debido a los diferentes tipos de generación con los cuales se cuenta y que pueden ser incorporados al sistema.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

8. Resistencia pública a la construcción de cierto tipo de centrales de generación tal como eólica.

Una vez repasados las ventajas y las desventajas de los sistema de generación distribuida se determina que en un sistema de transmisión convencional el flujo de potencia es estable, sin embargo cuando al sistema es incluido un sistema de Generación Distribuido hará que este se encuentre en constante cambio por lo cual la protección y el control debe ser lo suficientemente robusto para garantizar los nuevos requisitos del sistema [14].

4.2 Implementación de un proyecto de Generación Distribuida

Tal como se indico en el capitulo anterior el motivo de incluir proyectos de *Generación Distribuida* en el presente proyecto es crear la propuesta que a través de estás fuentes de alimentación conectadas al sistema este pueda ser capaz de mitigar eventos que ocurran sobre las redes de distribución y que finalmente se pueda desencadenar en un *Hundimiento o Elevación de la Tensión eficaz* del sistema

Con el fin de realizar un proyecto de implementación de Generación Distribuida sobre una infraestructura eléctrica existente se deben contemplar diferentes variables los cuales dependen del entorno, la regulación propia de cada país, aspectos ambientales, diseño del esquema de protecciones, confiabilidad, calidad de potencia, posible expansión y crecimiento de la carga del sistema [6].

En los siguientes apartados se expondrá de manera general las variables a tener en cuenta para la posible implementación de un grupo de *Generación Distribuida* sobre un sistema de distribución de energía eléctrica.

4.2.1 Mercado Eléctrico

La *Generación Distribuida* es un nicho de mercado no explorado y en este momento los clientes están en busca de un servicio eléctrico más adecuado que se ajuste a las necesidades particulares de cada cliente, adicional que permite a los agentes del sector eléctrico actuar de manera más flexible y permitirá responder a las condiciones cambiantes del mercado de una manera más eficaz [6].

Sin embargo es conveniente identificar las condiciones técnicas de interconexión para estos nuevos generadores que permitan mantener los niveles de confiabilidad establecidos. A continuación, se consolidan las causas de la evolución de la *Generación Distribuida* en Colombia [6] [9]:

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

1. El desarrollo de nuevas tecnologías.
2. Las restricciones para el trazado de nuevas líneas de transmisión.
3. El aumento de la demanda de electricidad confiable.
4. La liberación del mercado energético.
5. Las políticas ambientales derivadas del cambio climático.

4.2.2 Confiabilidad para un sistema eléctrico de potencia

Un factor importante para la utilización de Generación Distribuida es la confiabilidad que ofrece a los sistemas eléctricos de distribución cuando se presente una interrupción sostenida en el sistema sin embargo se debe educar a los clientes con respecto al valor del aumento de la confiabilidad que se está entregando en el sistema, lo anterior es debido a que al aumentar la confiabilidad implica altos costos de inversión, mantenimiento para la red y para la infraestructura de generación [6].

Sin embargo tener una alimentación constante y confiable es de suma importancia en general para la sociedad y para la industria, debido a que los últimos no encuentran la suficiente confiabilidad en la red eléctrica decide hacer inversiones en grupos de *Generación Distribuida* con el fin de garantizar su propia confiabilidad sin depender de un tercero [6]. Un aspecto importante es la calidad de potencia entonces se determina que sí se tiene un sistema confiable por ende se tiene un sistema con óptima calidad de potencia, por ejemplo puede ser utilizado para generar potencia activa para estabilizar la frecuencia debido a un aumento repentino de demanda o también de potencia reactiva para garantizar los niveles de voltaje.

4.2.3 Contramedida para expansiones de red

La *Generación Distribuida* podría llegar a sustituir parcialmente las inversiones para los sistemas de transmisión y/o distribución o como suplencia alterna en caso de cortes programados o eventos con afectación del servicio para los usuarios, lo anterior se puede realizar siempre y cuando los recursos adicionales, combustible, estén disponibles sin embargo si uno de los combustibles fuera gas podría llegar a afectar el suministro de una región ocasionando inconvenientes en otros sectores.

4.2.4 Aspectos ambientales

Actualmente, a nivel mundial, las políticas ambientales son probablemente el principal impulso para la implementación de grupos de *Generación Distribuida* dado que estas

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

obligan a los agentes del mercado eléctrico a buscar soluciones energéticas limpias, también pueden ser utilizadas por aquellas empresas que requieren de calor para sus procesos, cogeneración, y de esta manera se puede optimizar el consumo de energía.

También es posible que estos grupos de generación puedan ser utilizados para la quema de gas que se produce en los vertederos de basura o de residuos orgánicos aprovechando de esta manera una fuente de generación de metano que si no es aprovechado se convierte en fuente de contaminación.

4.3 Generación Distribuida en Colombia

Para realizar un proyecto de Generación Distribuida se debe tener en cuenta el estándar *IEEE 1547 - Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems* [17] se establecen los requisitos y especificaciones para la interconexión de proyectos de Generación Distribuida con el sistema de distribución de energía eléctrica, es de suma importancia entender que los sistemas de interconexión son diseñados e implementados para proporcionar la funcionalidad necesaria y el correcto funcionamiento del sistema.

El avance de la Generación Distribuida en Colombia no se está realizando de acuerdo al crecimiento energético del país, sin embargo ya existen lineamientos definidos para incentivar el uso de fuentes nuevas y renovables de energía sin embargo aún no se definen metas en las cuales se establezcan porcentajes de participación de las nuevas soluciones frente al problema energético [26].

La Generación Distribuida conlleva a nuevos retos de planificación, inversión, operación y regulación de los sistemas eléctricos tradicionales que exigen contar con un mayor número de agentes y mejores posibilidades de competencia [9] sin embargo han surgido por la iniciativa de algunas empresas y zonas no interconectadas que no tienen al alcance otra solución. El escenario energético de Colombia es analizado por el programa ESMAP del Banco Mundial y concluye que la penetración de tecnologías no convencionales en el país es menor que en otros países de Latinoamérica pero antes se debe mejorar lo siguiente [26]:

1. Creación de subsidios.
2. Costos iniciales de implementación.
3. Competencia.
4. Acceso a capacitaciones e información.
5. Riesgos financieros no determinados.
6. Falta de regulación.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

Colombia es un país con recursos hídricos y esta es su principal fuente de generación de energía, el 63,7% de la capacidad instalada está constituido en plantas hidroeléctricas, sin embargo el desarrollo de estos proyectos se están viendo sometidos a inconvenientes ambientales y sociales debido a que las construcciones son invasivas en los ecosistemas y en el cambio de mentalidad de la sociedad [9].

Para poder llevar a cabo un proyecto de Generación Distribuida en Colombia es necesario incentivar a través de estrategias económicas que sean atractivas para empresas generadoras y distribuidoras y que al final tengan un beneficio para el usuario final [26], para poder incluir a inversionistas privados en este plan de inclusión de nuevas estrategias de generación es necesario revisar la regulación y garantizar una competencia equitativa entre los agentes del sistema.

4.3.1 Regulación en Colombia

Las leyes y regulación que rigen la generación de energía eléctrica en Colombia están enmarcadas en la *Ley 142 de 1994 – Ley de servicios Públicos* y en la *Ley 143 de 1993 – Ley Eléctrica* también existen otras como la *689 de 2001* y la *1215 de 2008 – Ley de Cogeneración*, en ninguna de las anteriores se hace referencia a la Generación Distribuida como tal sin embargo incluye los conceptos de Cogeneración y Autogeneración. [26]

También se estableció que en la generación de energía eléctrica en el sistema interconectado nacional le compete al Ministerio de Minas y Energía definir los planes de expansión de la generación y de la red de interconexión además de fijar los criterios para orientar el planeamiento de la transmisión y distribución según la modificación realizada por el *Artículo 67 de la Ley 1151 de 2007 al Artículo 18 de la Ley 143 de 1994*. [9]

Debido a que actualmente se promueve el uso de fuentes alternas de energía y la mejor alternativa para su implementación es la vinculación a los sistemas actuales de Generadores Distribuidos en Colombia existe la legislación para Fuentes No Convencionales de Energía Eléctrica [9] [26], a continuación se enumeran:

1. Ley 697 de 2001:

Mediante la cual se fomenta la utilización de la energía, de tal manera que se obtenga la mayor eficiencia energética, bien sea de una forma original de energía y/o durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución y consumo de las diferentes formas de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad, vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables., se promueve la utilización de energías alternativas.

2. Ley 788 de 2002:

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

Esta ley exime del impuesto a la renta las ventas de energía con fuentes renovables durante quince años si se obtienen los certificados de reducción de emisiones de carbono previstos en el Protocolo de Kioto que generan ingresos a los 38 empresarios. El 50% de estos ingresos tiene que destinarse a programas de beneficio social para gozar de la exención del impuesto.

1. Ley 1715 de 2014:

La presente ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda.

2. Decreto 2469 de 2014:

Se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración. Simetría en condiciones de participación en el mercado mayorista entre los generadores y autogeneradores a gran escala, la CREG tendrá en cuenta que estos tengan las mismas reglas aplicables a una planta de generación con condiciones similares en cuanto a la cantidad de energía que entrega a la red. Esto incluye los derechos, costos y responsabilidades asignados en el reglamento de información, de participación en el mercado mayorista.

3. Decreto 2492 de 2014:

La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), deberá incluir en el diseño de los cargos que remuneran las actividades de transmisión y distribución, tarifas horarias y/o canasta de tarifas de forma tal que permitan incentivar económicamente el uso más eficiente de la infraestructura y la reducción de costos de prestación del servicio.

4. Decreto 2143 de 2015:

Establece criterios sobre la medición y evaluación de los recursos para la producción y utilización de energía a partir de Fuentes No Convencionales de Energía y deducción especial sobre el impuesto de renta y complementarios, exclusión del IVA, exención de gravamen arancelario, régimen de depreciación acelerada y adecuación de trámites.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

5. Resolución CREG 055 de 1994:

Por lo cual se regula la actividad de generación de energía eléctrica en el SIN.

6. Resolución CREG 024 de 1995:

Por lo cual se reglamenta los aspectos comerciales del mercado mayorista de energía en el SIN que hacen parte del reglamento de Operación.

7. Resolución CREG 025 de 1995:

Por lo cual se establece el Código de Redes, como parte del Reglamento de Operación del SIN.

8. Resolución CREG 084 de 1996:

Por lo cual se reglamentan las Actividades de Autogenerador conectado al SIN.

9. Resolución CREG 086 de 1996.

Por lo cual se reglamenta la generación con Plantas Menores de 20 MW conectadas al SIN.

10. Resolución CREG 070 de 1998:

Por lo cual se establece el Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica como parte del reglamento de operación del SIN.

En este momento el regulador Colombiano se encuentra en desarrollo, sí es comparado internacionalmente, e incluso en comparación con pares latinoamericanos como lo son Brasil y Chile [9], pero sin lugar a duda se está trabajando para hacer atractivo el uso de nuevas tecnologías en cuanto a la generación de energía y el incremento de potencia firme en el mercado Colombiano; a pesar que la mayoría de la resoluciones, decretos y leyes estén pensadas en un mercado convencional dado a que Colombia cuenta con fuentes hídricas y la base de la generación del país se encuentre respaldada en esta, con un 63,7% de generación hidroeléctrica, pero respecto a la viabilidad legislativa y regulatoria se puede identificar condiciones internacionales favorables para el desarrollo de Generación Distribuida.

5. Modelo del sistema de control y simulación

Para el desarrollo del modelo del sistema de control y su respectivo análisis de resultados se proponen dos modelos que se encuentran detallados en el artículo *Radial Distribution Test Feeders* [16], los cuales corresponden al circuito que está constituido por 4 nodos y el de 34 nodos con los cuales se realizaron las pruebas del modelo de control con el fin de establecer las ventajas y desventajas al momento de realizar alguna acción sobre el sistema de distribución eléctrico dependiendo el tipo de evento al que se encuentre sometido:

1. Monofásico.
2. Bifásico.
3. Trifásico.

En el primer apartado se expone la metodología de funcionamiento de la estrategia de control para mitigar las perturbaciones que se puedan presentar en el sistema eléctrico de distribución, en el segundo apartado se estudia el comportamiento del modelo del sistema de control para el circuito de 4 nodos con el fin de validar su funcionamiento previo al circuito de distribución de energía de 34 nodos con el cual se validara el comportamiento del modelo de control con más de un sistema de generación distribuida.

5.1 Control de mitigación sistema de distribución eléctrico

El modelo de control será presentado teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, el sistema será simulado basado en una configuración de *Trafo Dirigido* con un agente líder y sus respectivos seguidores, una vez el sistema detecta una perturbación *Hundimientos/Elevaciones de Tensión* que cumpla con lo descrito en el **Tabla 2**, se llegara a un acuerdo mediante el protocolo de consenso, a continuación se presenta el modelo del control de seguimiento del sistema multi-agente que fue diseñado para mitigar las perturbaciones de calidad de potencia.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

5.1.1 Voltaje objetivo del sistema – Agente líder

El Voltaje objetivo del sistema será considerado como el agente líder de las señales de voltaje del sistema eléctrico de distribución y por lo tanto es el encargado de mostrar el objetivo del sistema, por lo tanto se considera que existe un sistema de comunicaciones y de instrumentación el cual está verificando en cada instante de tiempo el voltaje nominal del sistema en busca de desviaciones que atenten contra la calidad de potencia del sistema además se encuentra en constante comunicación con los actuadores del sistema eléctrico de distribución, Generadores Distribuidos, con el fin de generar ordenes para mitigar las desviaciones que se puedan presentar.

El sistema multi-agente será modelado como un *Grafo Dirigido* que se define como $G = (V,E)$, en donde V corresponde a los vértices o nodos del grafo; que para este modelo es el equivalente al voltaje que se encuentra en el sistema para un sistema trifásico el cual es expresado en *por unidad (pu)* y E son las aristas que unen a los vértices o nodos con el líder del sistema, por lo tanto equivale al sistema de comunicación.

5.1.2 Voltaje nodos del sistema – Agente seguidor

El Voltaje nodos del sistema se refiere al valor que presenta la señal en un instante de tiempo y que representa una perturbación para el mismo, se asume que cada nodo o punto eléctrico del sistema tiene un sistema de comunicación y un conjunto de dispositivos capaces de hacer reportes en cada instante del tiempo del valor de la señal de voltaje que se está presentando con el fin que el sistema de control multi-agente pueda tomar decisiones, al igual que el agente líder este es representado como un vértice o nodo en el grafo y el sistema de comunicación será la arista.

Entonces según la anterior descripción el agente seguidor contra mínimo con una arista la cual es unidireccional con el agente líder, lo cual permitirá conocer el estado del sistema y de este punto verificar si la mitigación o la acción de control es necesaria; por tal razón toma importancia el sistema de comunicación porque a través de este se establecen los parámetros de inicio para alcanzar el objetivo establecido por el agente líder.

En la **Figura 12** se presenta el esquema del *Trafo Dirigido Líder – Seguidor*, en el cual se denomina como líder el valor de voltaje 1 p.u y los seguidores serán los valores de los voltajes de cada de una las fases del sistema trifásico de cada uno de los nodos o puntos eléctricos del sistema.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

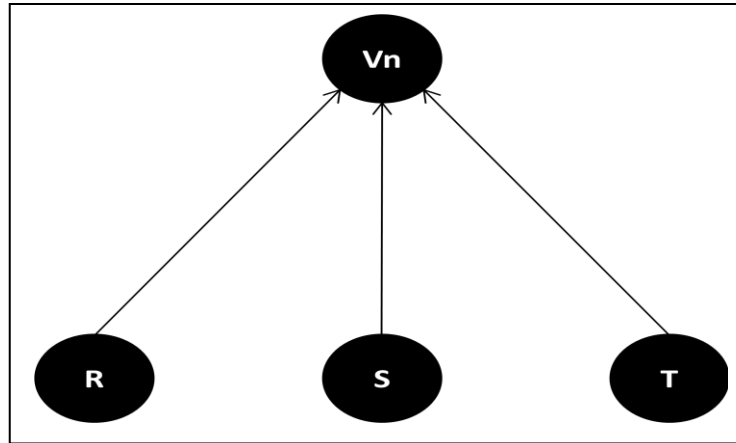


Figura 12: Topología de operación del modelo del sistema de control para la mitigación de perturbaciones (*Hundimientos/Elevaciones de Tensión*) en las redes de distribución – IEEE 4 Node Test Feeder.

5.1.3 Consenso del sistema eléctrico de distribución

El consenso es el acuerdo establecido entre los agentes el cual tiene como objetivo que cada uno de los agentes alcance su meta y el sistema se encuentre dentro de los rangos establecidos de funcionamiento, básicamente este determina que los agentes seguidores alcancen el objetivo establecido por el agente líder, para esto se utilizó:

$$\dot{X} = -Lx \quad (5 - 1)$$

Las soluciones de la ecuación diferencial (5 – 1) están dadas por la matriz de transición que es:

$$x(t) = x(t_0)e^{-L(t-t_0)} \quad (5 - 2)$$

De la ecuación anterior se obtiene:

1. L es la matriz *Laplaciana*.
2. $x(t_0)$ es la matriz de entrada, que para el desarrollo del presente proyecto equivale a los valores de tensión en pu de cada una de las fases del sistema de distribución eléctrico.

En la **Figura 13** se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del esquema de control con el cual se pretende mitigar las perturbaciones de calidad de potencia *Hundimientos/Elevaciones de Tensión*.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

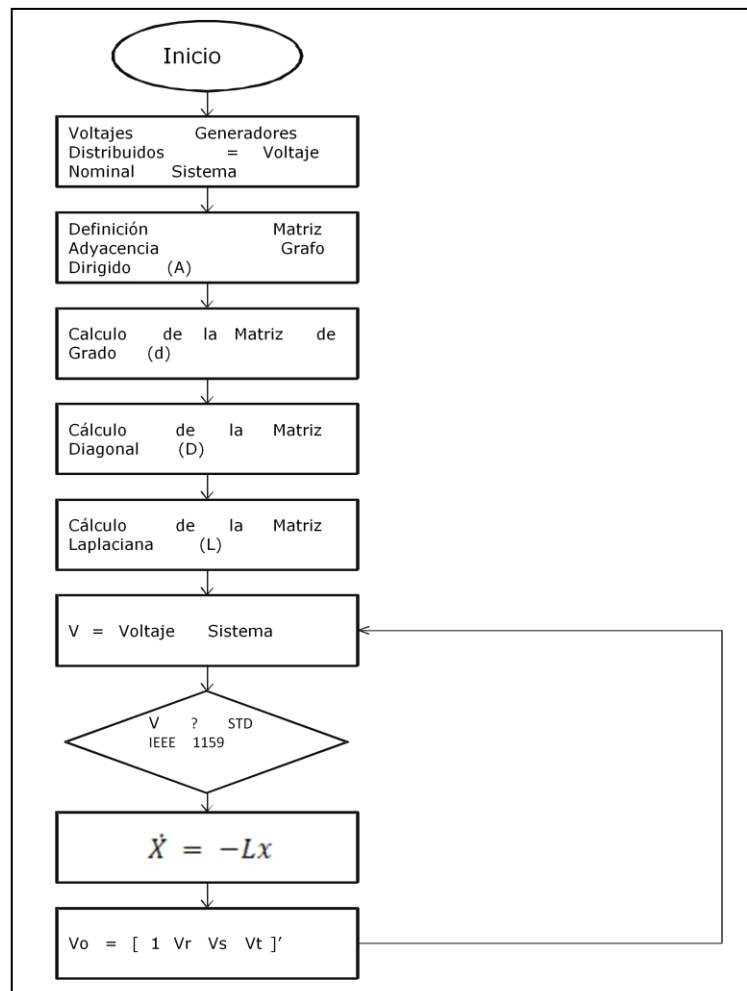


Figura 13: Diagrama de flujo esquema de control para la mitigación de perturbaciones *Hundimientos/Elevaciones de Tensión* en las redes de distribución de energía eléctrica.

Para ilustrar, a manera de ejemplo, el funcionamiento del controlador se supondrán valores iniciales de cada una de las fases, los cuales se encontraran en valores inferiores a 0.9 pu (*Hundimientos*) y superiores (*Elevaciones*) a 1.1 pu.

A continuación se presenta el detalle del ejemplo de cálculo de consenso, para el caso se asignaran valores iniciales de tensión los cuales simularan *Hundimientos/Elevaciones de Tensión* y mostrará como el sistema es capaz de alcanzar su objetivo; que para el caso del presente proyecto es mantener los valores de tensión eficaz del sistema dentro de la tensión normal de operación:

1. Simulación *Hundimiento de Tensión* sistema con un (1) nodo:

Para este caso ilustrativo se asumirá que en el sistema se está presentando un evento trifásico el cual hace que en las tres (3) fases del sistema se tengan los siguientes valores de tensión en pu:

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

- Para la fase R se supone un hundimiento con profundidad de 0.2 pu.
- Para la fase S se supone un hundimiento con profundidad de 0.3 pu.
- Para la fase T se supone un hundimiento con profundidad de 0.4 pu.

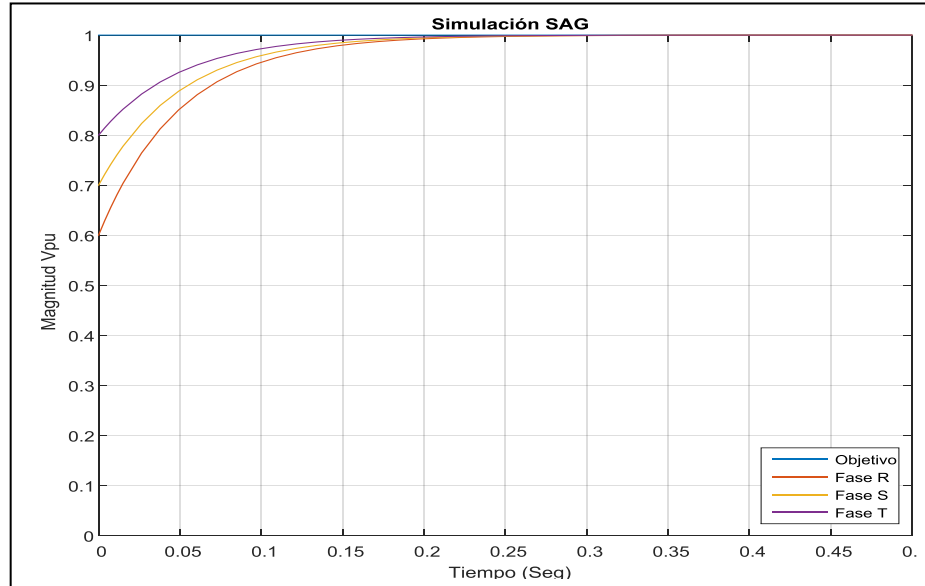


Figura 14: Simulación SAG sistema con un (1) nodo.

Para el ejemplo anterior se supuso un *Hundimiento de Tensión*, en tiempo = 0, con diferentes valores en pu para cada una de las fases del sistema de distribución eléctrico y se puede observar como el sistema se va ejecutando conforme lo descrito por la ecuación (5-2) y el resultado del sistema, a través del tiempo, va alcanzando su objetivo que es el valor de tensión 1 pu.

2. Simulación *Elevación de Tensión* sistema con un (1) nodo:

Para este caso ilustrativo se asumirá que en el sistema se está presentando un evento trifásico el cual hace que en las tres (3) fases del sistema se tengan los siguientes valores de tensión en pu:

- Para la fase R se supone una elevación con valor de 1.4 pu.
- Para la fase S se supone una elevación con valor de 1.5 pu.
- Para la fase T se supone una elevación con valor de 1.6 pu.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

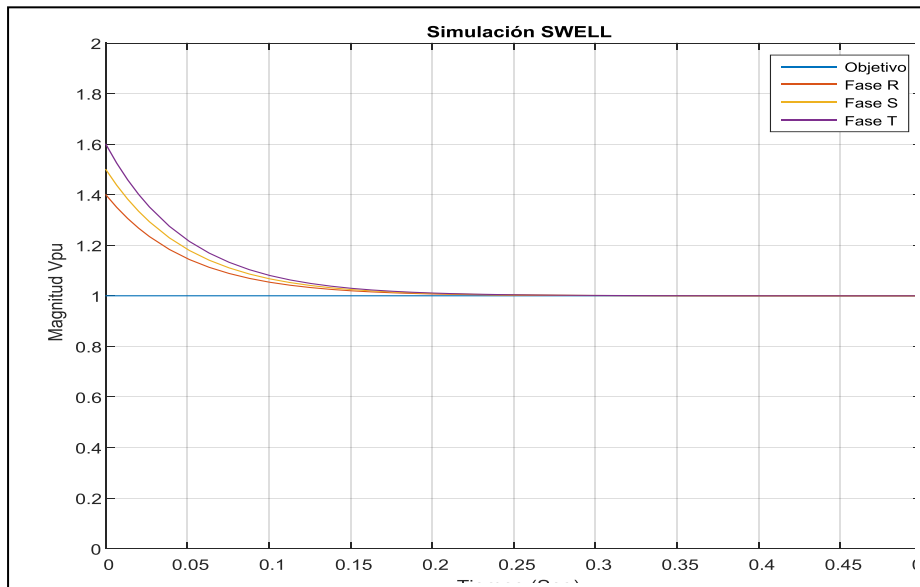


Figura 15: Simulación SWELL sistema con un (1) nodo.

Para el ejemplo anterior se supuso una *Elevación de Tensión*, en tiempo = 0, con diferentes valores en pu para cada una de las fases del sistema de distribución eléctrico y se puede observar como el sistema se va ejecutando conforme lo descrito por la ecuación (5-2) y el resultado del sistema, a través del tiempo, va alcanzando su objetivo que es el valor de tensión 1 pu.

Los anteriores resultados muestran lo que sería la respuesta del sistema de control a través de los actuadores, Generadores Distribuidos, sin embargo se debe resaltar que los circuitos de distribución de energía eléctrica tienen diferentes tipos de carga conectadas tanto como resistivas, inductivas, capacitivas, electrónicas y adicional se cuenta con los elementos que son necesarios para el transporte de la energía y su distribución tal como transformadores, cables, puestas a tierra lo que conlleva a que se presenten caídas de voltaje y pérdidas de potencia, pérdidas técnicas, que son intrínsecas de cada sistema eléctrico de potencia.

Por lo expuesto anteriormente se entiende que la respuesta del sistema de control a través de cada actuador no será como la teoría y las simulaciones anteriores lo indican dado que cuando se presente un *Hundimientos/Elevaciones de Tensión* se entiende que es una falla del sistema ya la respuesta puede variar dependiendo el tipo de falla que se esté presentando en ese momento en el sistema.

5.2 Análisis del modelo del sistema de control para el circuito compuesto por 4 Nodos.

Para el desarrollo de esta sección se planteará el modelo del sistema de control para el circuito compuesto por 4 nodos, las características de este circuito podrán ser

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

encontradas en el *Anexo A*, para el siguiente esquema se realizan varias simulaciones para mostrar cuál sería la respuesta del modelo de control y del circuito ante las perturbaciones *Hundimientos/Elevaciones de Tensión*, las cuales se encuentran detalladas en el Capítulo 3.

Para el desarrollo del modelo de control se considera un grafo dirigido con tres (3) nodos, los cuales representan la magnitudes de tensión de cada una de las fases del sistema, y son quienes intentaran alcanzar su objetivo, el cual es el de mantener la tensión normal de operación establecidos en [33] y que son descritos en la **Figura 6**, en la **Figura 12** se muestra el planteamiento enunciado.

Para este caso que se supondrá que el grupo de mitigación estará ubicado en el barraje de salida del circuito identificado como el Nodo 1 y que puede ser verificado en la **¡Error! o se encuentra el origen de la referencia.**, por tanto los resultados que se mostrarán a continuación son los que se midan en este punto eléctrico, sin embargo en casos posteriores los resultados serán medidos en diferentes puntos del sistema no necesariamente en los puntos donde se encuentra conectado los actuadores con la red de distribución.

De acuerdo con las tensiones que se encuentren en cada una de las fases, y que sean diferentes a las tensiones normal de operación, el sistema de control compensara las diferencias y garantizará los niveles de tensión a los usuarios finales.

El control de seguimiento implementado se simulo en Matlab/Simulink partiendo de un estado estacionario dentro de los parámetros eléctricos según la tensión normal de operación, el circuito implementado se puede observar en la **Figura 16**, y posteriormente ejecutando una perturbación se verifica como los seguidores, voltajes de fase, convergen al objetivo que es el valor establecido para el nodo líder en valores por unidad (pu), como esto es un sistema trifásico cada una de las fases está compuesta por magnitud y ángulo de fase, características de cada uno de los fasores, sin embargo para el desarrollo de este proyecto los valores de ángulo son fijos y la única variable a modificar es la tensión eficaz de cada una de las fases ya sea de manera individual o colectiva.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

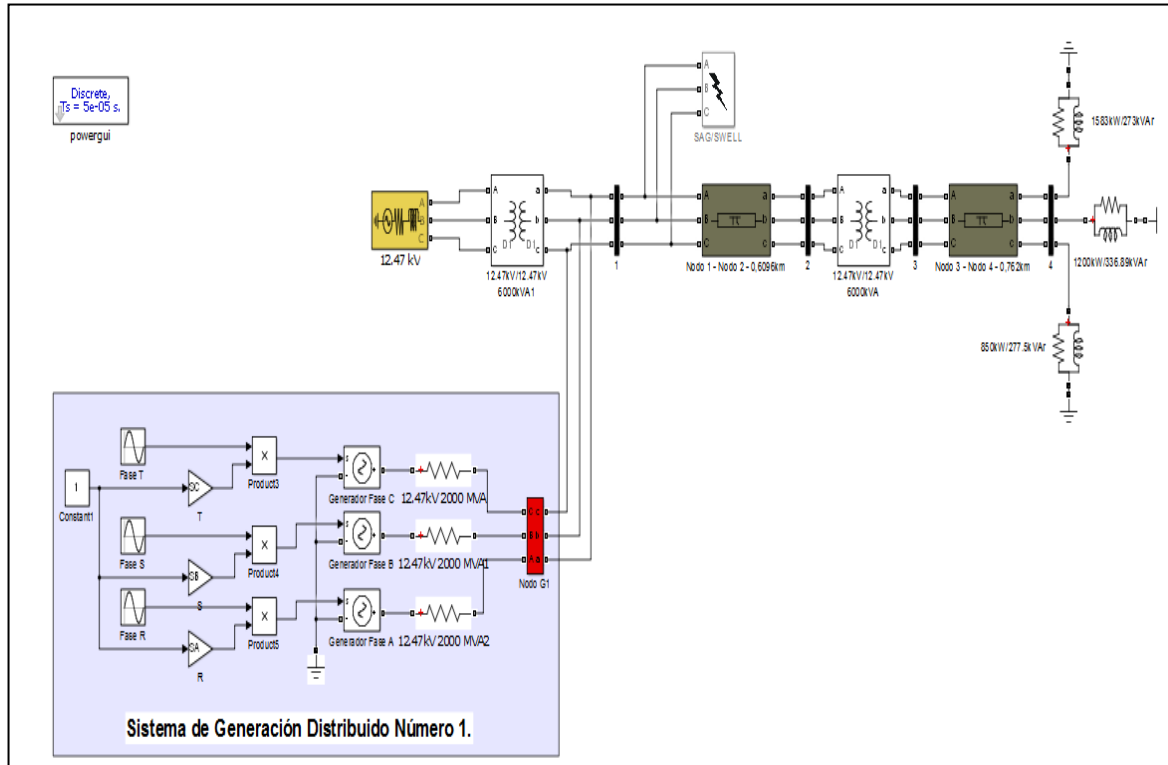


Figura 16: IEEE 4 Node Test Feeder implementación Matlab/Simulink.

5.2.1 Simulación de perturbaciones en el sistema IEEE 4 Node Test Feeder

Para el desarrollo de las perturbaciones en el sistema de distribución de cuatro (4) nodos se establece que la mitigación se realizará con un grupo de generación distribuido ubicado en el nodo uno (1), el cual se encuentra ubicado inmediatamente después de la fuente de energía principal del sistema de distribución, el sistema de generación distribuido se considera como una fuente de voltaje ideal con la capacidad de entregar la corriente necesaria que el sistema requiera en un instante de tiempo determinado, en la **Figura 16** se enmarca el *Sistema de Generación Distribuido*. Para las simulaciones fueron utilizadas diferentes pruebas con el fin de garantizar que el modelo del sistema de control cumpla con los requerimientos especificados que garantizarán la tensión normal de operación.

Los *Hundimientos de Tensión* que se pueden percibir en los diferentes equipos que se encuentran conectados al sistema y pueden deberse a eventos de cortocircuito en cualquier punto del sistema, en los siguientes apartados se verán en detalle la respuesta del sistema ante perturbaciones trifásicas, bifásicas y monofásicas las cuales serán simuladas como fallas de cortocircuito entre cualquier fase y tierra teniendo como

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

variación la resistencia de falla con la cual se obtendrán diferentes profundidades de hundimiento.

5.2.1.1 Perturbación trifásica para el sistema IEEE 4 Node Test Feeder

Para este apartado se realiza una simulación para demostrar cuál sería la respuesta del modelo del sistema de control, según el desarrollo de la ley de control implementada, para cuando en el sistema de distribución se presente una perturbación que afecte las tres (3) fases.

A continuación se detalla el desarrollo del sistema de control capaz de mitigar, a través del sistema de generación distribuido, la perturbación que se pueda presentar en el sistema de distribución eléctrico, para el desarrollo del control se siguió la metodología expuesta en el Capítulo 2, el esquema utilizado es un dígrafo o grafo dirigido tal como se puede observar en la **Figura 12** y que da como resultado la siguiente matriz de Adyacencia:

1. *Matriz de Adyacencia:*

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2. *Matriz de Grado:*

$$d = [0 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

3. *Matriz diagonal:*

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. *Matriz Laplaciana:*

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5. *Dinámica global del sistema:*

La dinámica global del sistema se encuentra basada en la ecuación (5-1).

A continuación se presentan los resultados obtenidos para un evento que causa una perturbación trifásica que ocurre en el sistema *IEEE 4 Node Test Feeder* [16] para diferentes valores en pu cuando una perturbación se hace presente en el sistema de distribución:

En la **Figura 17**, **Figura 18** y **Figura 19** se puede observar lo siguiente de la señal de tensión:

Sistema sin mitigación Evento Trifásico				
Fase	Magnitud Hundimiento pu	Profundidad Hundimiento pu	Duración Evento Ciclos/Seg	Tipo Evento
R	0.8200	0.1800	9/0.15	Instantáneo
S	0.8188	0.1882		
T	0.8185	0.1815		

Tabla 3: Resultados sistema *IEEE 4 Node Test Feeder* sin sistema de mitigación de perturbaciones.

Sistema con mitigación Evento Trifásico				
Fase	Magnitud Hundimiento pu	Profundidad Hundimiento pu	Duración Evento Ciclos/Seg	Tipo Evento
R	0.8784	0.1216	2.5/0.042	Instantáneo
S	0.8650	0.1350		
T	0.8688	0.1312		

Tabla 4: Resultados sistema *IEEE 4 Node Test Feeder* con sistema de mitigación de perturbaciones.

Resultado Final de Tensión	
Fase	Resultado Final V pu
R	1.001
S	0.995
T	1.009

Tabla 5: Resultados de Tensión durante el evento trifásico de *Hundimiento de Tensión*.

Para este primer caso es posible concluir que el sistema propuesto para mitigar los eventos que generen *Hundimientos de Tensión* es efectivo y es capaz de mantener los niveles de tensión eficaz de operación normal del sistema de distribución, lo anterior es debido a la respuesta dinámica que se da por la ecuación (5 – 2).

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

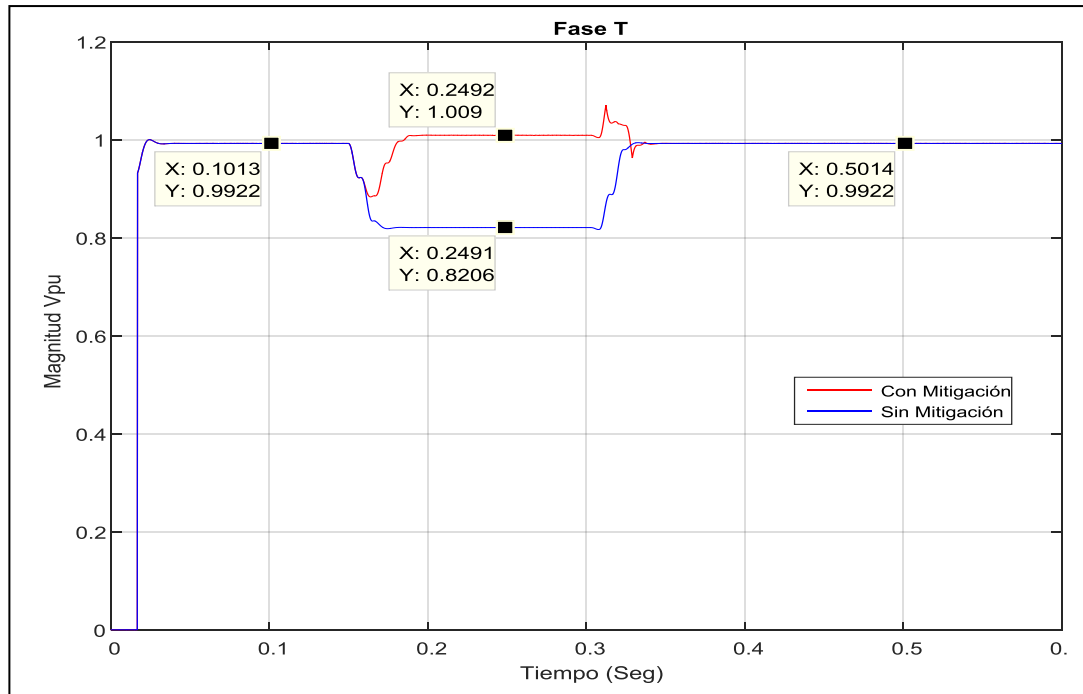


Figura 17: Resultado Fase T – Profundidad de hundimiento de 0.18 pu.

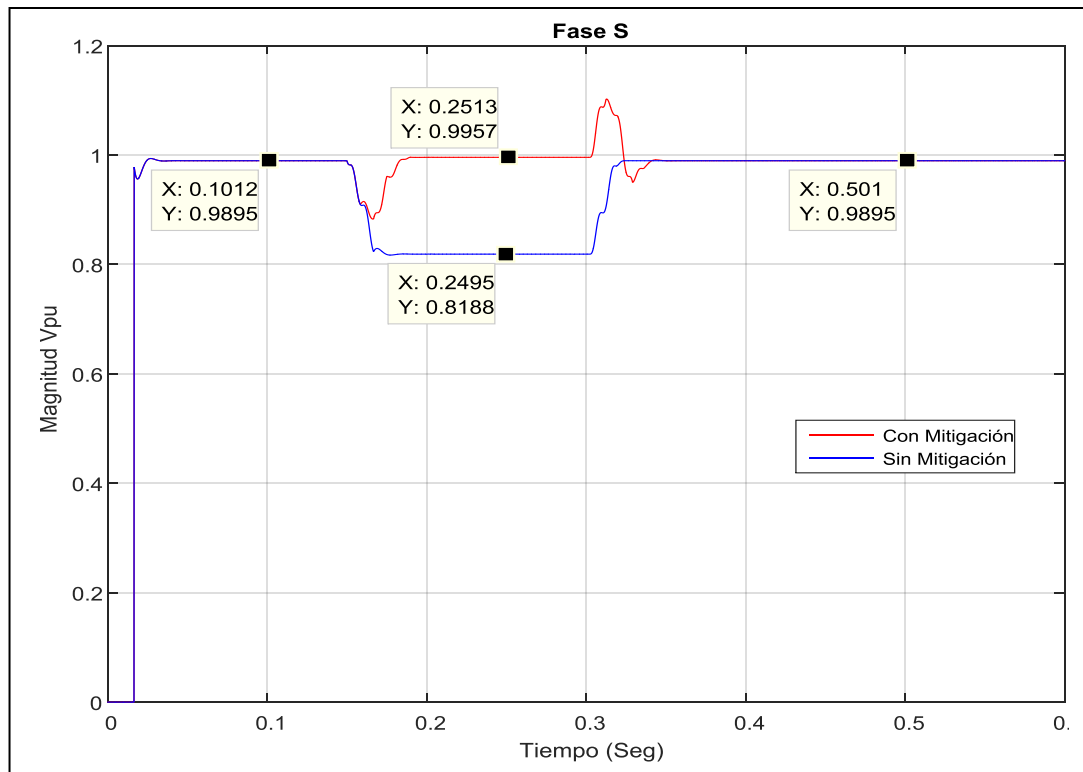


Figura 18: Resultado Fase S – Profundidad de hundimiento de 0.1812 pu..

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

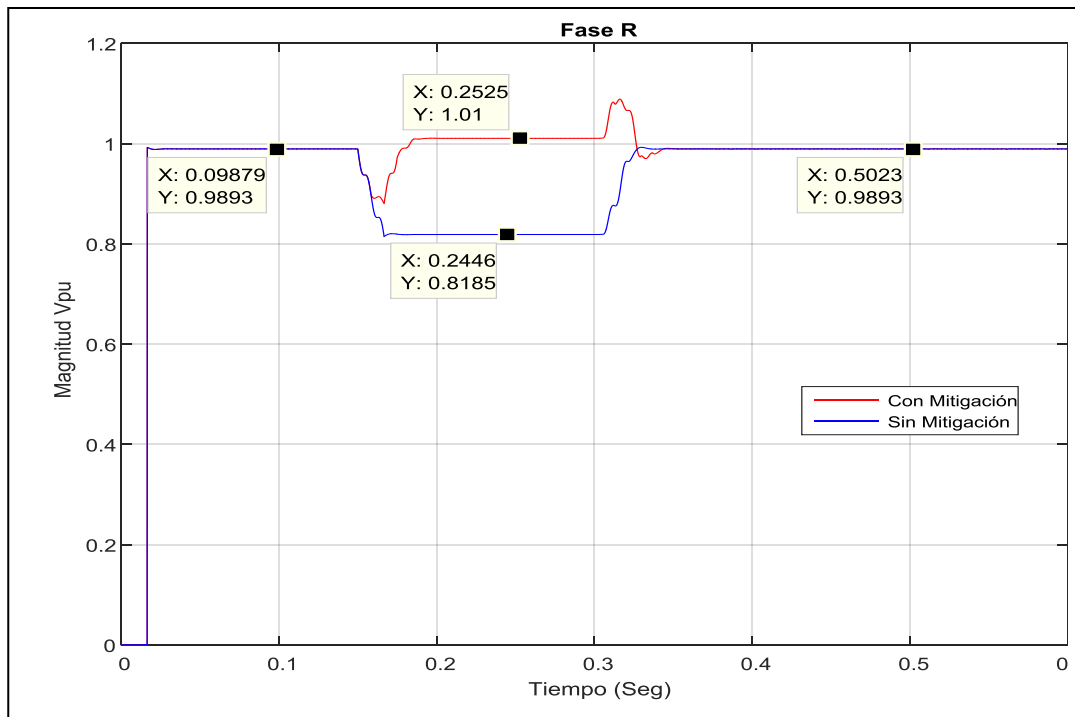


Figura 19: Resultado Fase R – Profundidad de hundimiento de 0.1815 pu.

2. Para el siguiente caso se expone una perturbación con diferente característica de profundidad de hundimiento esto con el fin de comprobar el desempeño del sistema de mitigación propuesto, en la **Figura 20**, **Figura 21** y **Figura 22** se puede observar lo siguiente de la señal de tensión:

Sistema sin mitigación Evento Trifásico				
Fase	Magnitud Hundimiento pu	Profundidad Hundimiento pu	Duración Evento Ciclos/Seg	Tipo Evento
R	0.6955	0.3045	9/0.15	Instantáneo
S	0.6985	0.3042		
T	0.6970	0.3030		

Tabla 6: Resultados sistema *IEEE 4 Node Test Feeder* sin sistema de mitigación de perturbaciones.

Sistema con mitigación Evento Trifásico				
Fase	Magnitud Hundimiento pu	Profundidad Hundimiento pu	Duración Evento Ciclos/Seg	Tipo Evento
R	0.7790	0.2210	2.9/0.05	Instantáneo
S	0.7984	0.2016		
T	0.7981	0.2019		

Tabla 7: Resultados sistema *IEEE 4 Node Test Feeder* con sistema de mitigación de perturbaciones.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

Resultado Final de Tensión	
Fase	Resultado Final V pu
R	1.030
S	0.9810
T	0.9732

Tabla 8: Resultados de Tensión durante el evento trifásico de *Hundimiento de Tensión*.

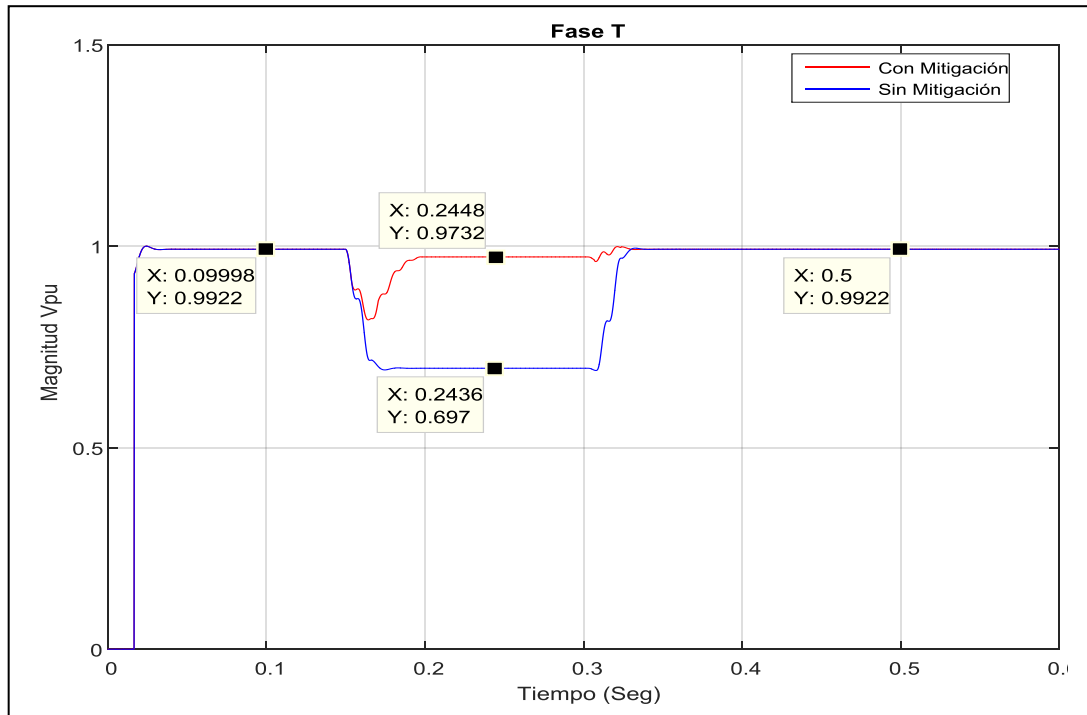


Figura 20: Resultado Fase T – Profundidad de hundimiento de 0.303 pu.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

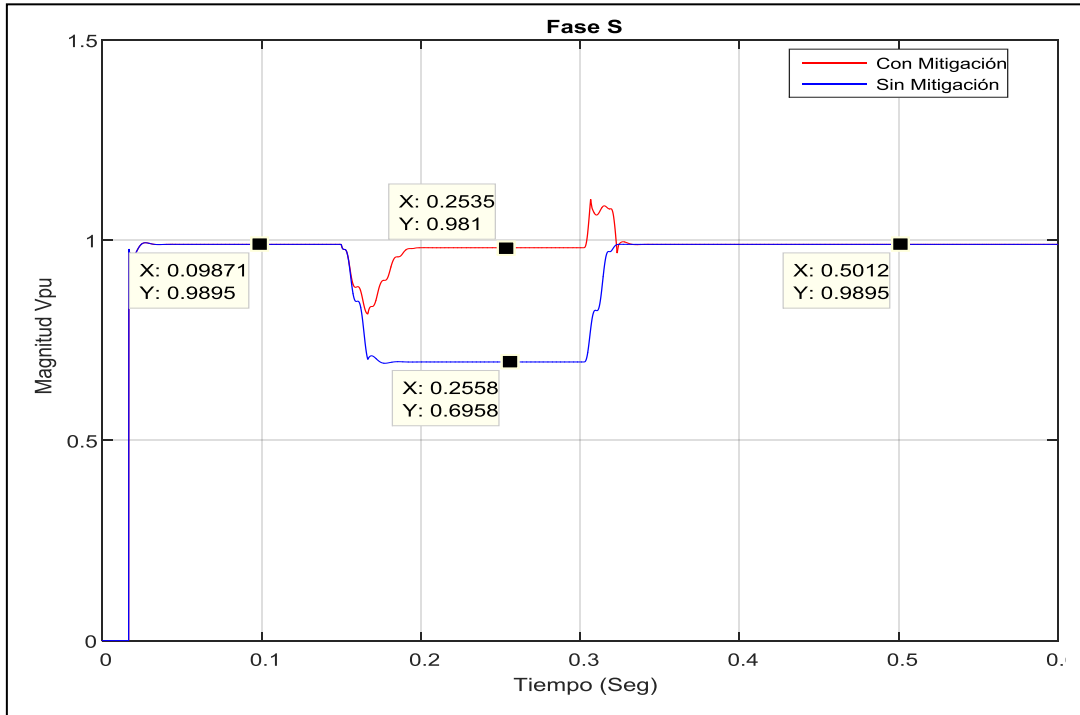


Figura 21: Resultado Fase S – Profundidad de hundimiento de 0.3042 pu

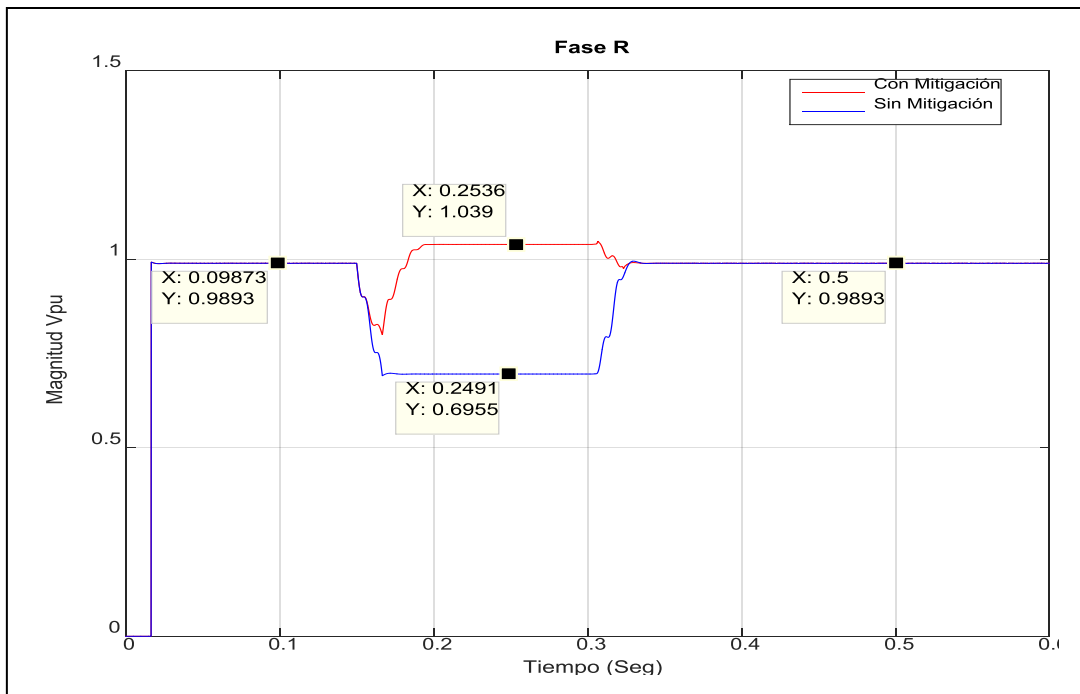


Figura 22: Resultado Fase R – Profundidad de hundimiento de 0.3045 pu.

Una vez obtenidos los resultados para diferentes profundidades de hundimiento se puede concluir que el sistema de control es capaz de mitigar las perturbaciones que se presenten en el sistema utilizando como actuador un sistema de generación distribuido ubicado en el nodo (1) del sistema.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

El desarrollo de la técnica de control mediante *Teoría de Grafos* permite llegar al objetivo que en este caso es mantener las condiciones de funcionamiento es decir mantener la tensión eficaz del sistema dentro de lo especificado en [33] y de esta manera garantizar una prestación de servicio para las empresas distribuidoras óptimo y dentro de los estándares de calidad de potencia.

Es evidente que el modelo del sistema no es necesario para implementar un sistema de control que garantice que el sistema opera dentro de las ventanas de operación de los estándares internacionales lo cual conlleva a que sea más simple su implementación y puesta en servicio dentro de un sistema de distribución.

5.2.1.2 Perturbación bifásica para el sistema IEEE 4 Node Test Feeder

En este apartado se presenta una perturbación que se da entre dos (2) fases, bifásica, con el fin de demostrar que el modelo de control es de fácil adaptación a cualquier perturbación que se presente en el sistema.

Para este caso se supone una falla bifásica a tierra a través de una resistencia de falla con la cual se obtendrán diferentes profundidades de hundimiento.

1. *Matriz de Adyacencia:*

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2. *Matriz de Grado:*

$$d = [0 \quad 1 \quad 1]$$

3. *Matriz diagonal:*

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. *Matriz Laplaciana:*

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

5. Dinámica global del sistema:

La dinámica global del sistema se encuentra basada en la ecuación (5-1).

A continuación se presentan los resultados obtenidos para una perturbación bifásica que ocurre en el sistema *IEEE 4 Node Test Feeder* [16] para diferentes valores en pu cuando una perturbación se hace presente en el sistema de distribución:

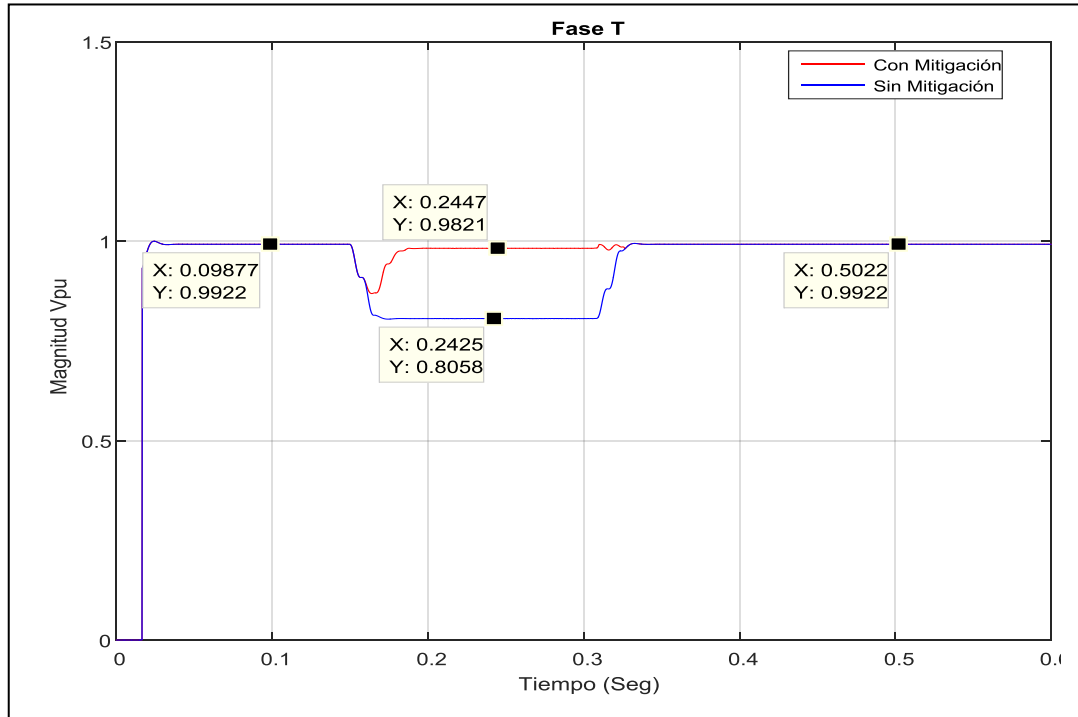


Figura 23: Resultado Fase T – Profundidad de hundimiento de 0.1942 pu.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

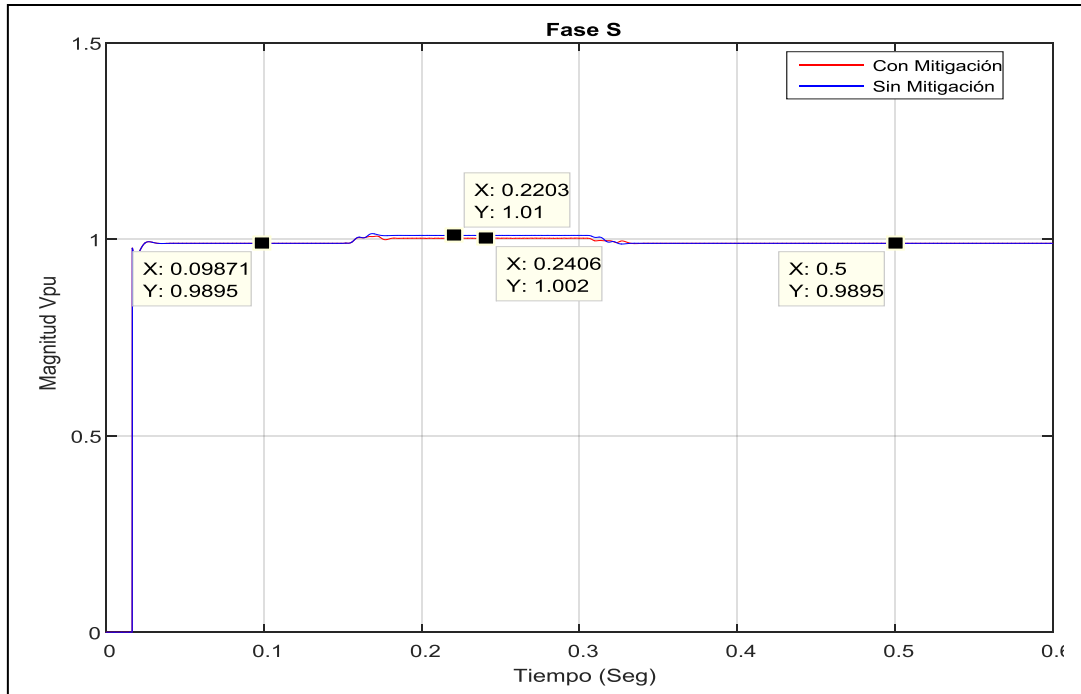


Figura 24: Resultado Fase S – Perturbación en las fases R y T.

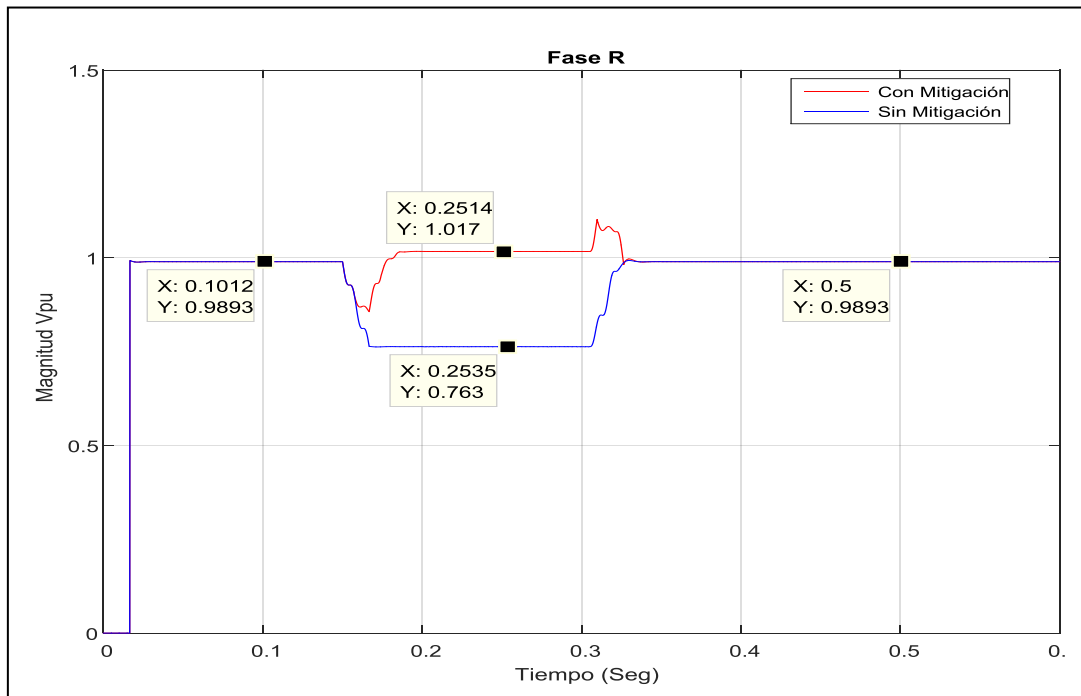


Figura 25: Resultado Fase R – Profundidad de hundimiento de 0.237 pu.

Una vez realizada la simulación para una perturbación bifásica se puede concluir que el modelo es fácilmente adaptable a cualquier situación, en este caso las perturbaciones que afectan el correcto desempeño del sistema de distribución eléctrico, se determinó que cuando se presenta una falla bifásica es necesario únicamente reducir la matriz de

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

los nodos que harán parte del sistema de matrices del *Grafo Dirigido* con las cuales se llegara al objetivo definido por el nodo líder.

5.2.1.3 Perturbación monofásica para el sistema IEEE 4 Node Test Feeder

En este apartado se presenta una perturbación que se da únicamente en una (1) de las fases, monofásica, con el fin de demostrar que el modelo de control es de fácil adaptación a cualquier perturbación que se presente en el sistema.

1. *Matriz de Adyacencia:*

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

2. *Matriz de Grado:*

$$d = [0 \quad 1]$$

3. *Matriz diagonal:*

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. *Matriz Laplaciana:*

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

5. *Dinámica global del sistema:*

La dinámica global del sistema se encuentra basada en la ecuación (5-1).

A continuación se presentan los resultados obtenidos para una perturbación monofásica que ocurre en el sistema *IEEE 4 Node Test Feeder* [16] para diferentes valores en pu cuando una perturbación se hace presente en la fase S del sistema de distribución:

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

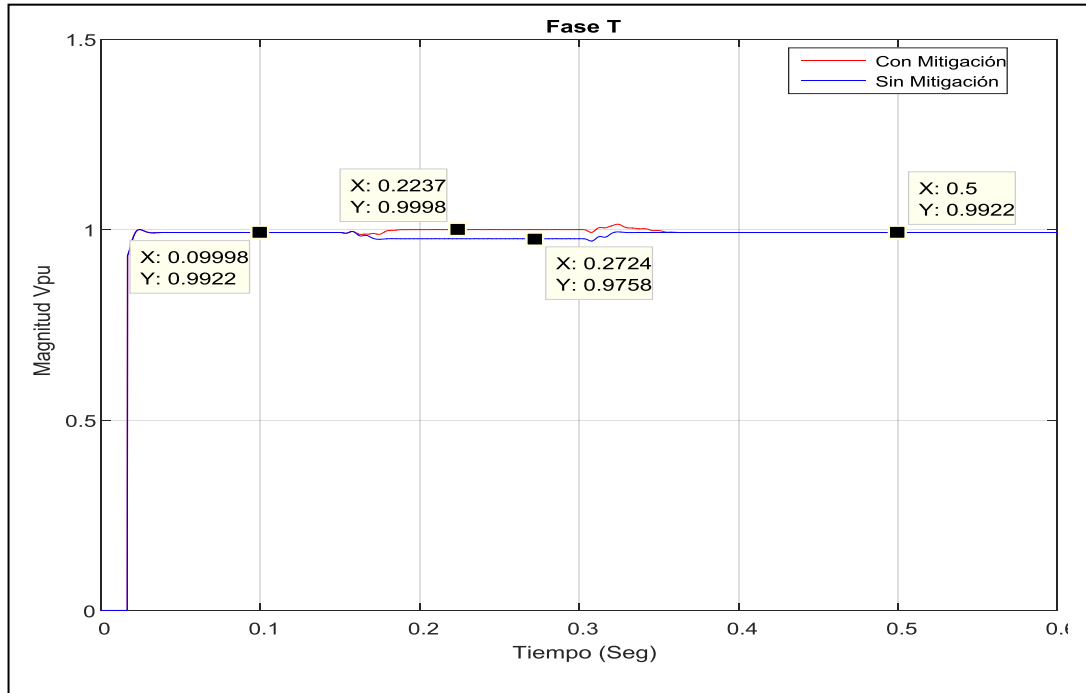


Figura 26: Resultado Fase T – Perturbación en la fase S.

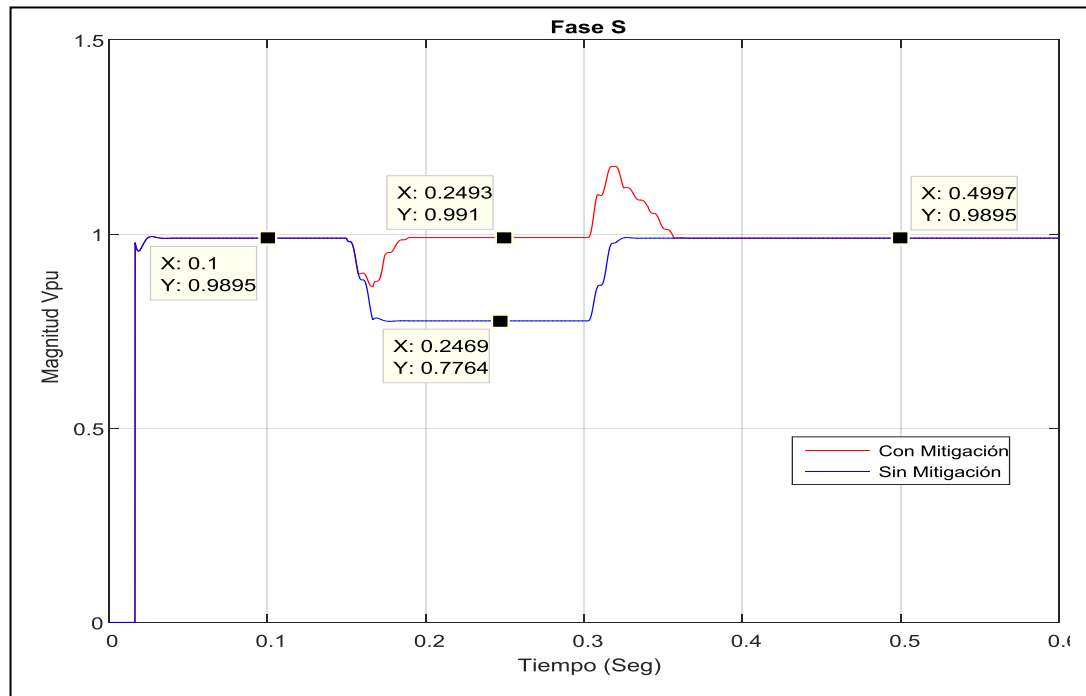


Figura 27: Resultado Fase S – Profundidad de hundimiento de 0.2236 pu.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

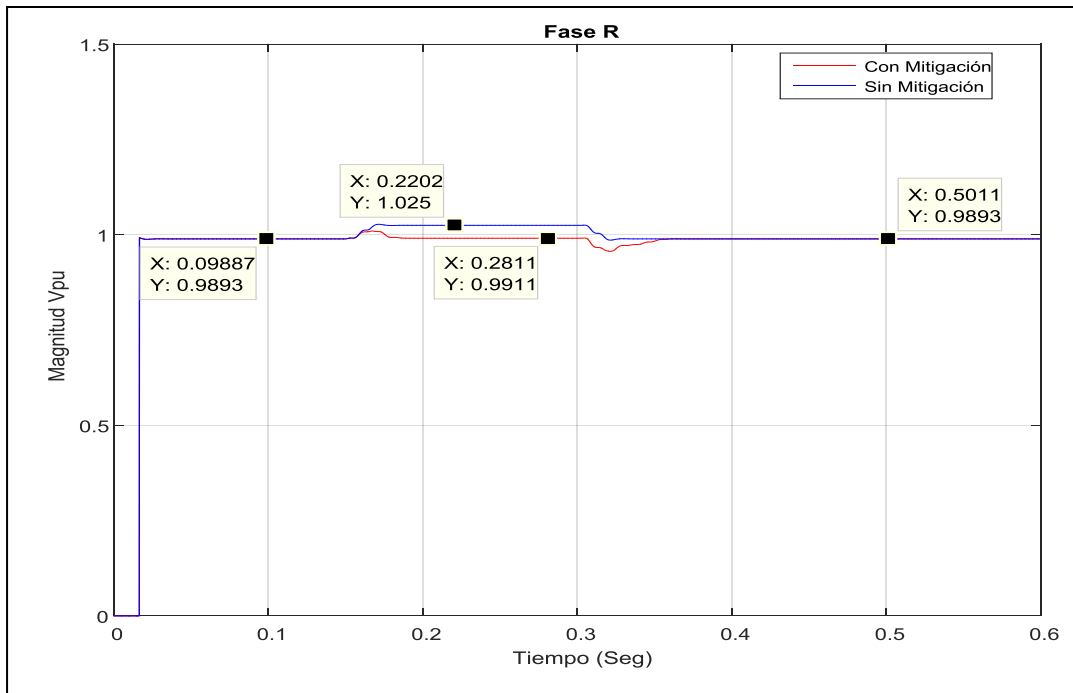


Figura 28: Resultado Fase R – Perturbación en la fase S.

Para el caso de la perturbación monofásica se comprueba que al realizar la reducción de la matriz únicamente a los nodos que presentan la falla y se puede llegar a un consenso y converger en el objetivo, que es mantener dentro de los estándares el voltaje nominal de la señal que se le entrega a los usuarios finales del sistema de distribución.

Se determina que una perturbación monofásica afecta las otras dos fases que no se encuentran directamente sometidas al evento, sin embargo con la mitigación que se realiza a la fase perturbada es suficiente para evitar sobretensiones o caídas de tensión, no significativas, pero que pueden llegar a incomodar a los usuarios dado que pueden ser percibidas como fluctuaciones de la señal de voltaje.

Dentro de los resultados del caso monofásico es posible determinar cómo actúa el modelo de control ante una perturbación *Elevación de Tensión* y es notorio en el momento en que la perturbación es despejada del sistema, sin embargo este es capaz de mitigar y evitar que se presente una sobre tensión más alta pudiendo llegar a averiar puntos del sistema o equipos en general de los usuarios finales.

5.3 Análisis del modelo del sistema de control para el circuito compuesto por 34 Nodos.

Para el desarrollo de esta sección se planteara el modelo del sistema de control para el circuito compuesto por 34 nodos, las características de este circuito podrán ser

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

encontradas en el *Anexo B*, para el siguiente esquema se realizan varias simulaciones para mostrar cuál sería la respuesta del modelo de control y del circuito ante las perturbaciones *Hundimientos/Elevaciones de Tensión*, las cuales se encuentran detalladas en el Capítulo 3.

Para este circuito se cuentan con *Generadores Distribuidos* que se encuentran instalados a lo largo del sistema de distribución, para la ubicación óptima de las instalaciones de generación se debe considerar un perfil de demanda, precios por cada nodo del circuito, maximización del beneficio social y del lucro para la empresa dueña del equipo de *Generación Distribuida*, disminución del costo de energía al consumidor; por lo expuesto anteriormente, minimización de pérdidas técnicas, mejora del perfil de tensión y confiabilidad de la red [23], por lo expuesto anteriormente la ubicación óptima de los *Generadores Distribuidos* no hace parte fundamental de este proyecto entonces se utilizará lo expuesto en [32].

Para la ubicación de los equipos de *Generación Distribuida* se tomo como parámetro únicamente el alimentador principal y los ramales que tienen como característica que están alimentados por las tres (3) fases del sistema, debido a que el número y ubicación de *Generadores Distribuidos* que se pueden tener en el circuito es variable y teniendo en cuenta lo indicado anteriormente se tomo como parámetro la ubicación de tres (3) equipos de *Generación Distribuida* en los siguientes nodos del circuito [32]:

1. 850.
2. 852.
3. 862.

Para el desarrollo del modelo de control se considera un grafo dirigido con los nodos que componen el circuito de media tensión, los cuales representan la magnitud del voltaje cada una de las fases del sistema, quienes intentaran alcanzar su objetivo con el fin de mantener el voltaje nominal dentro de los estándares establecidos en [33], en la **Figura 29** se muestra el planteamiento enunciado.

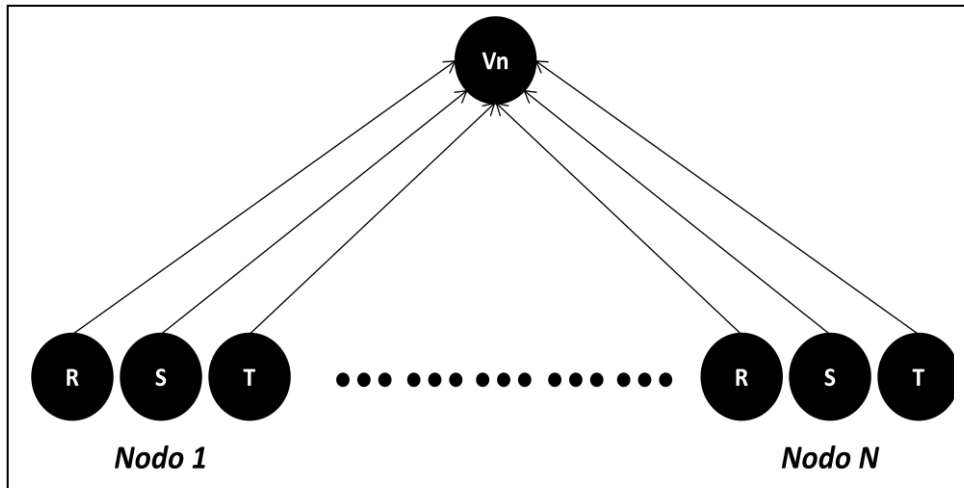


Figura 29: Topología de operación del modelo del sistema de control para la mitigación de perturbaciones (*Hundimientos/Elevaciones de Tensión*) en las redes de distribución – IEEE 34 Node Test Feeder.

Como ya se ha mencionado anteriormente se realiza un permanente escaneo de los voltajes que se encuentren en cada una de las fases el sistema de control, y si son diferentes a los estándares establecidos en [33], el sistema de control compensará las diferencias y garantizará los niveles de voltaje a los usuarios finales.

El control de seguimiento implementado se simuló en Matlab/Simulink partiendo de un estado estacionario dentro de los parámetros eléctricos según el estándar [33], el circuito implementado se puede observar en la **Figura 30**, y posteriormente ejecutando una perturbación y se verifica como los seguidores, voltajes de fase, convergen al objetivo que es el valor establecido para el nodo líder en valores por unidad (pu), como esto es un sistema trifásico cada una de las fases está compuesta por magnitud y ángulo de fase, características de cada uno de los fasores, sin embargo para el desarrollo de este proyecto los valores de ángulo son fijos y la única variable a modificar es el voltaje nominal de cada una de las fases ya sea de manera individual o colectiva.

5.3.1 Perturbación trifásica para el sistema IEEE 34 Node Test Feeder

Para este apartado se realiza una simulación para demostrar cuál sería la respuesta del modelo del sistema de control, según el desarrollo de la ley de control implementada, para cuando en el sistema de distribución se presente una perturbación que afecte las tres (3) fases. Al igual que en los apartados anteriores, para la simulación del *Hundimiento de tensión* se supondrá una falla trifásica a tierra a través de una resistencia de falla, la cual hará que se presente un *Hundimiento de tensión* y el cual el sistema de control intentará mitigar.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

Los resultados del control de mitigación serán medidos en diferentes nodos del sistema, adicionales a los nodos donde se encuentran instalados los sistemas de *Generación Distribuida*, los puntos donde se comprobará la eficacia del sistema de mitigación serán los siguientes:

1. 862.
2. 852.
3. 850.
4. 840.

A continuación se detalla el desarrollo del sistema de control capaz de mitigar, a través del sistema de generación distribuido, la perturbación que se pueda presentar en el sistema de distribución eléctrico, para el desarrollo del control se siguió la metodología expuesta en el Capítulo 2, el esquema utilizado es un dígrafo o grafo dirigido tal como se puede observar en la **Figura 30** y que da como resultado la siguiente matriz de Adyacencia:

1. *Matriz de Adyacencia:*

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & 0 \\ 1 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2. *Matriz de Grado:*

$$d = [0 \quad 1 \quad \dots \quad 1]$$

3. *Matriz diagonal:*

$$D = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. *Matriz Laplaciana:*

$$L = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

5. *Dinámica global del sistema:*

La dinámica global del sistema se encuentra basada en la ecuación (5-1).

A continuación se presentan los resultados obtenidos para una perturbación trifásica que ocurre en el sistema *IEEE 34 Node Test Feeder* [16] y se verifica su respuesta en diferentes nodos del sistema tal como se muestra a continuación:

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

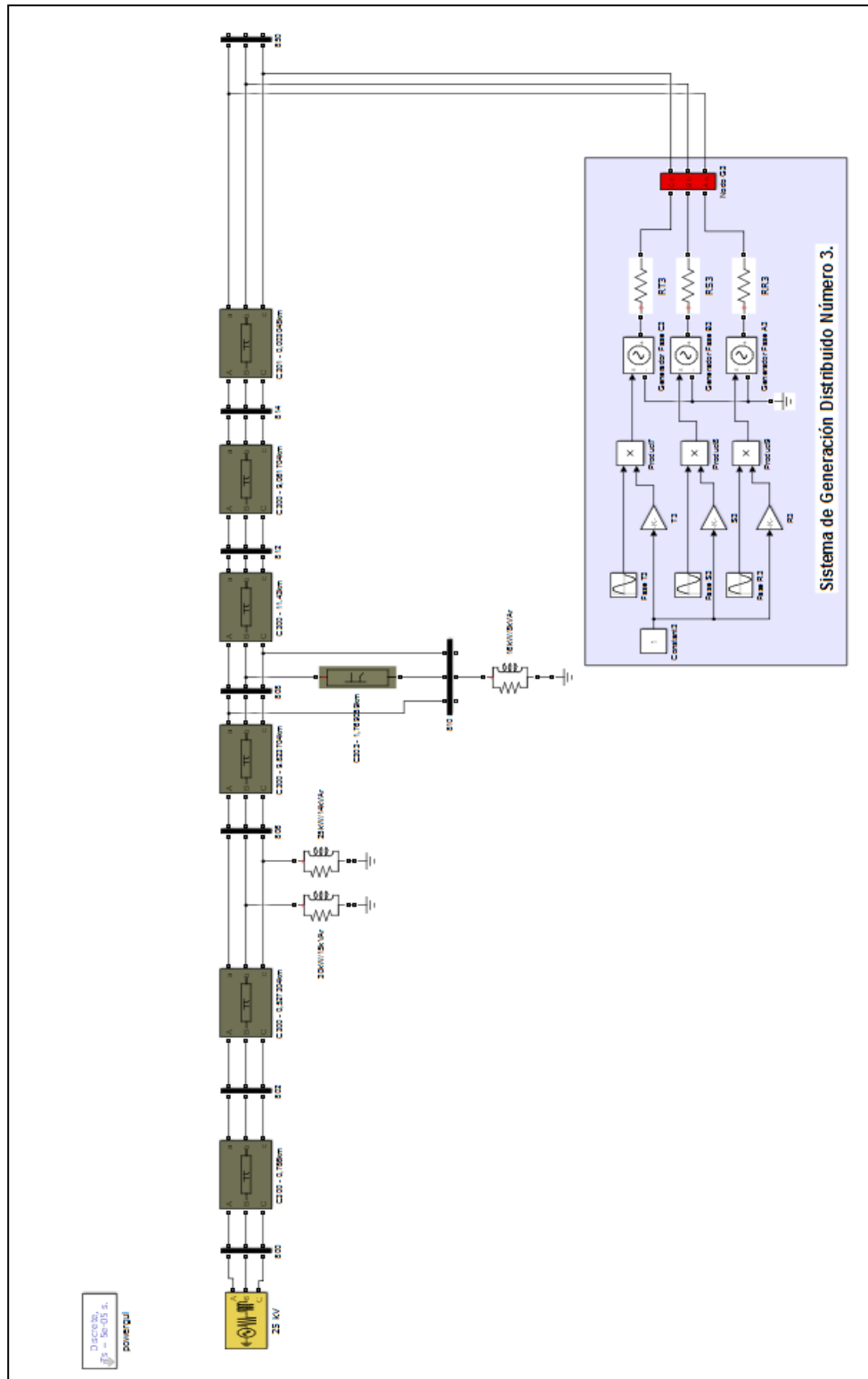
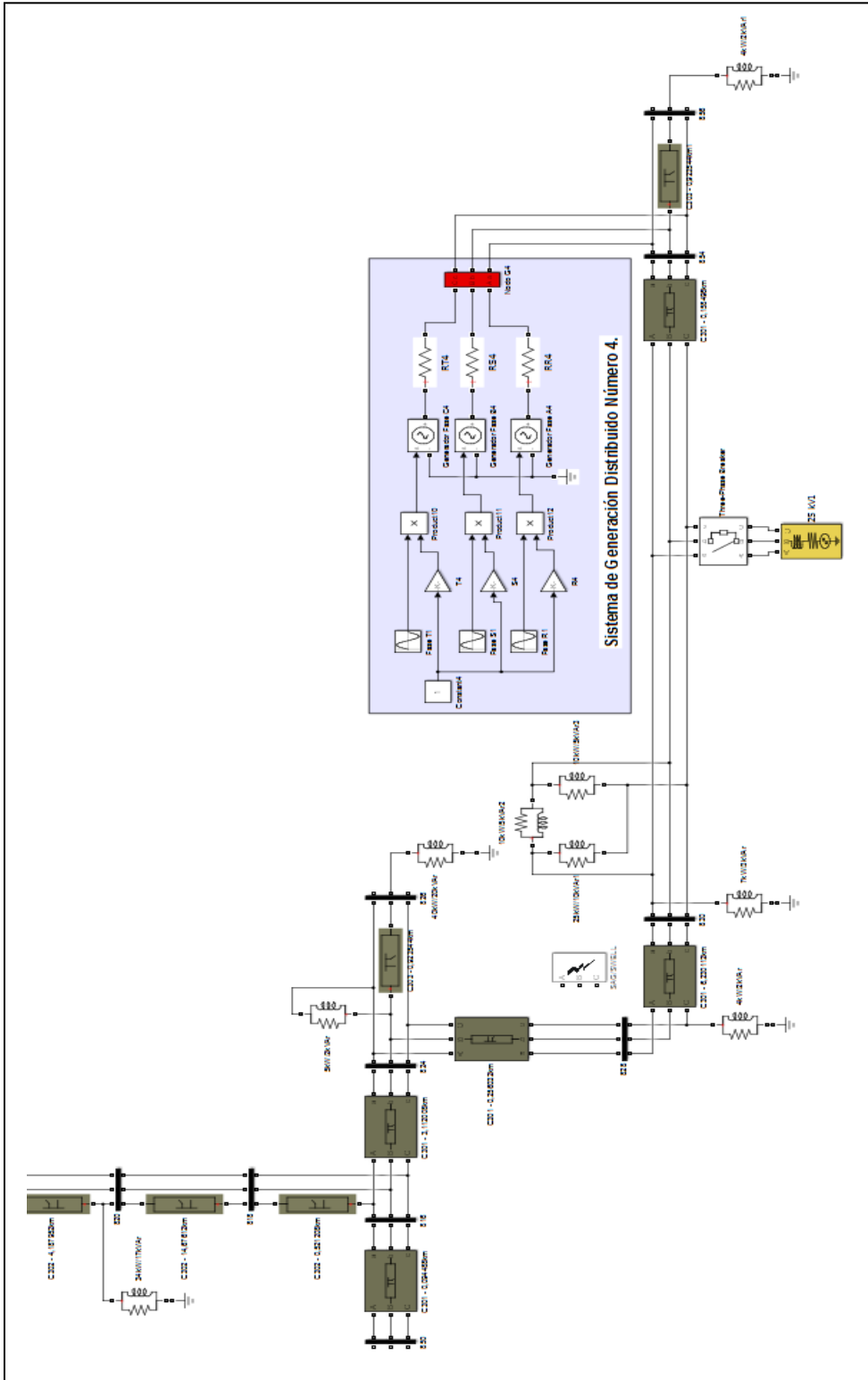
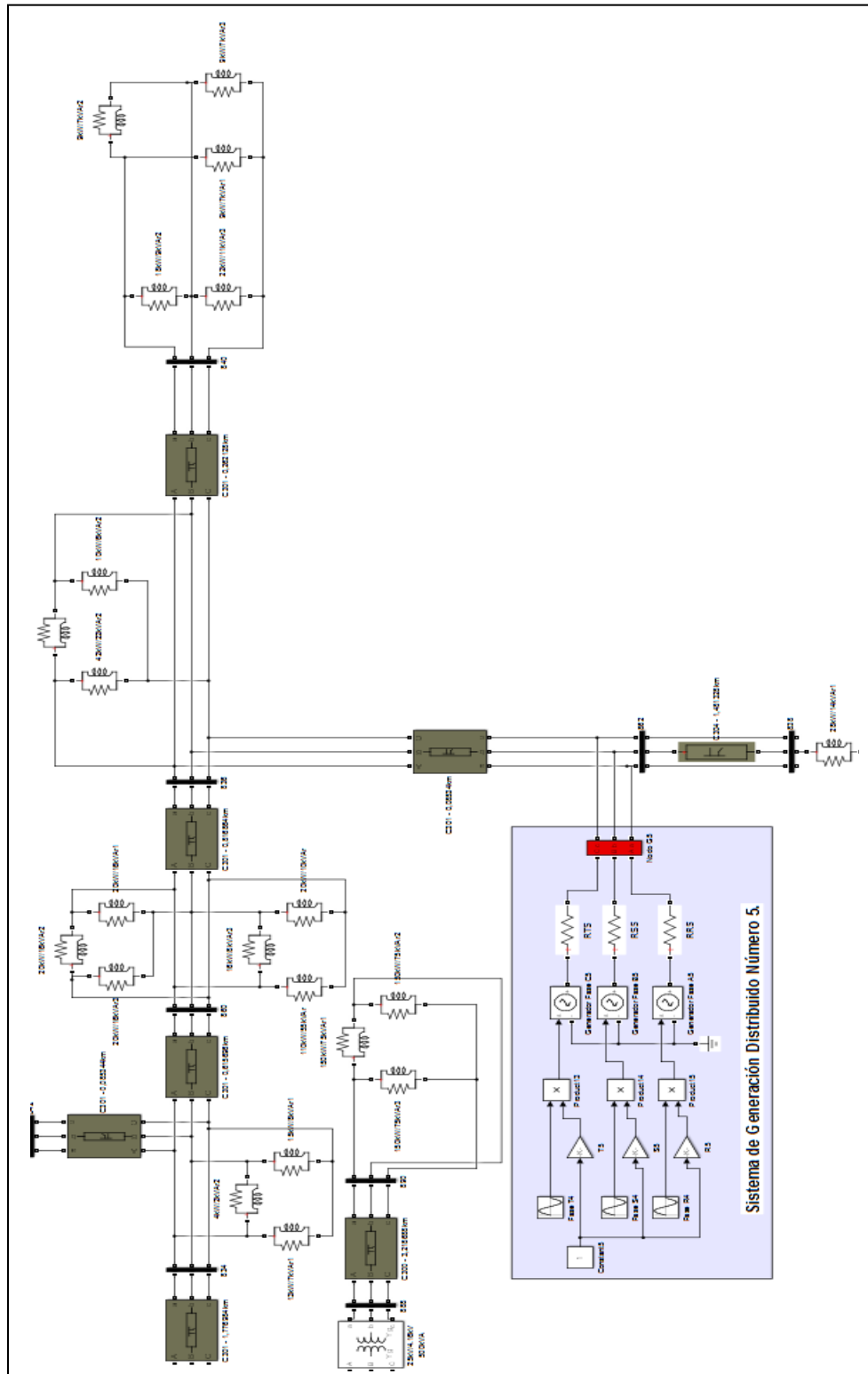


Figura 30: IEEE 34 Node Test Feeder implementación Matlab/Simulink.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido



Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido



Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

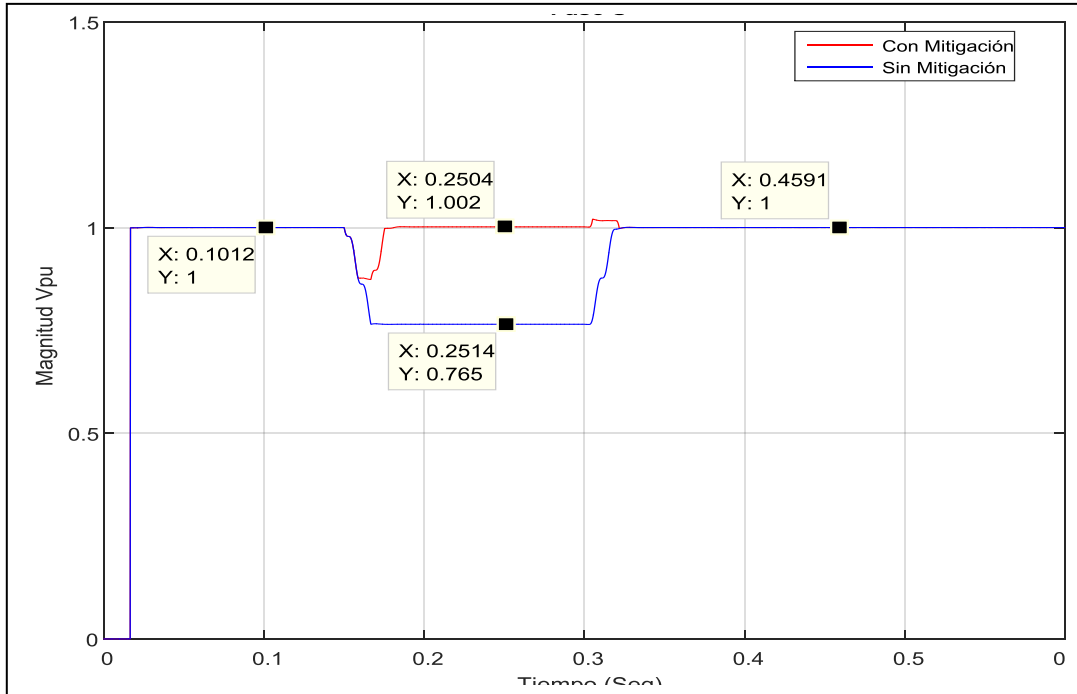


Figura 31: Resultado Nodo 862 – Profundidad de hundimiento de 0.235 pu.

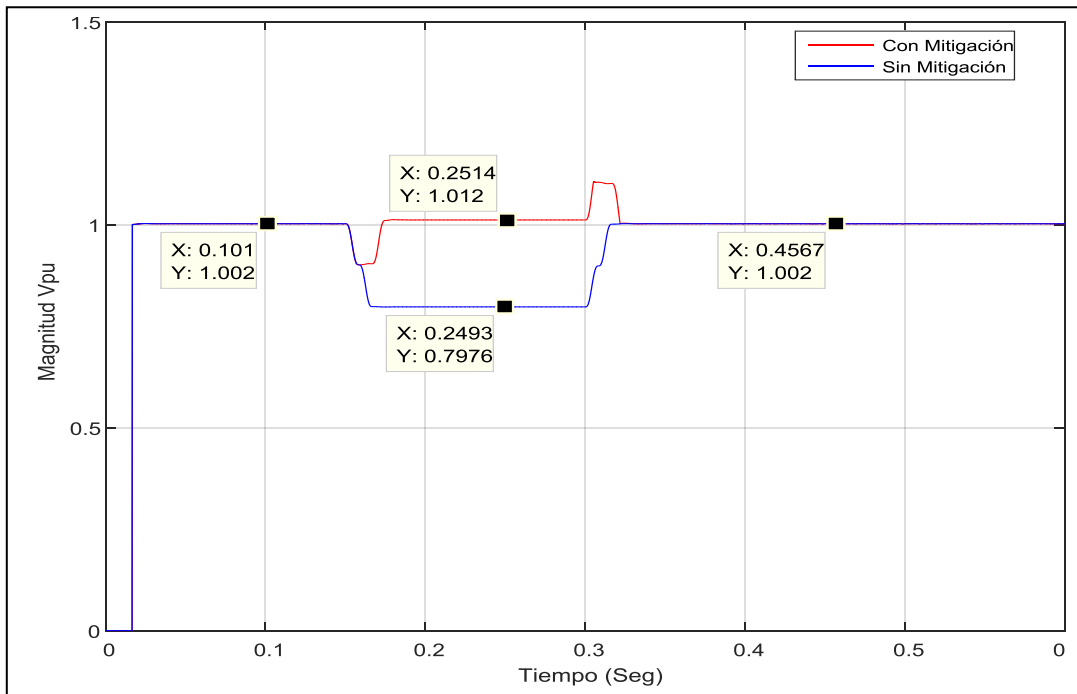


Figura 32: Resultado Nodo 852 – Profundidad de hundimiento de 0.2024 pu.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

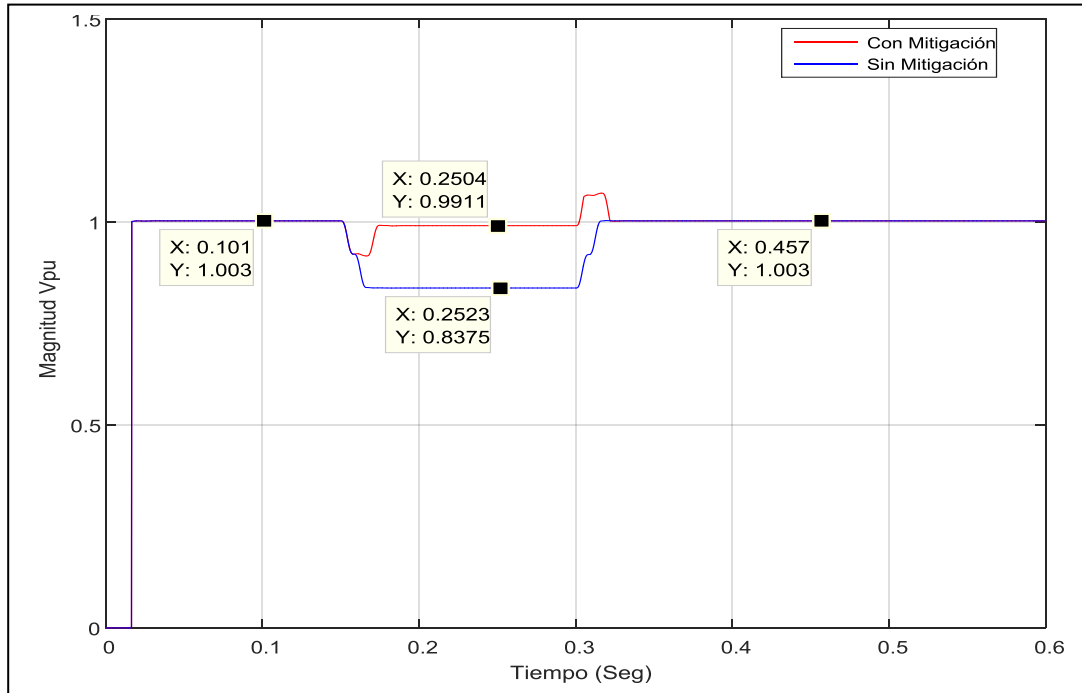


Figura 33: Resultado Nodo 850 – Profundidad de hundimiento de 0.1625 pu.

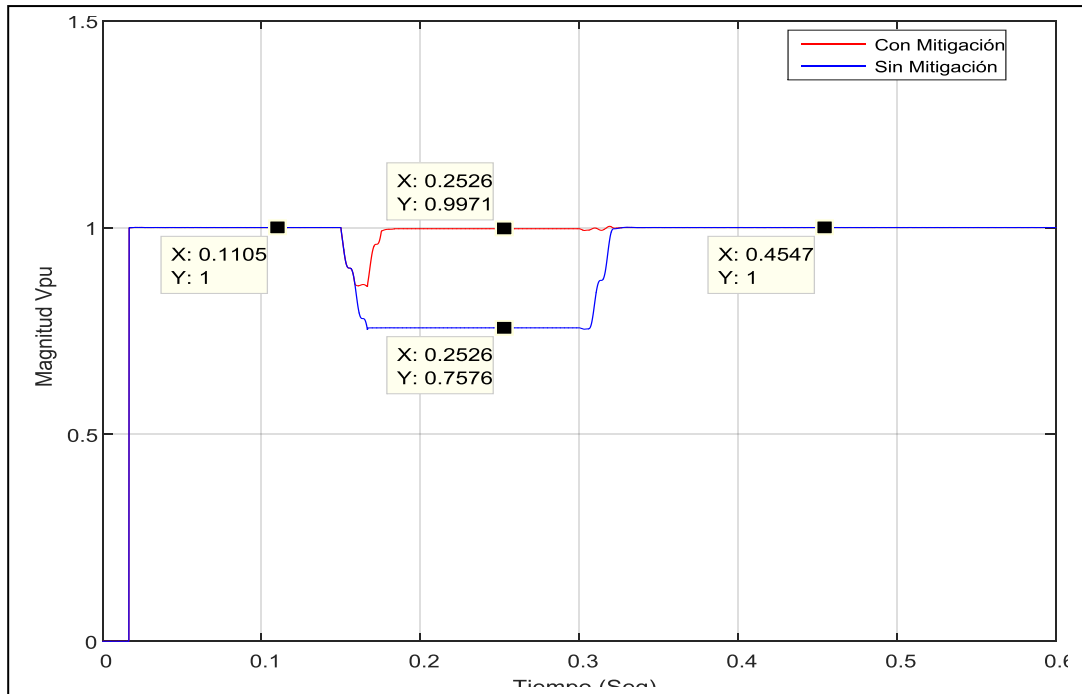


Figura 34: Resultado Nodo 840 – Profundidad de hundimiento 0.2424 pu.

Una vez realizadas las pruebas con el controlador para un sistema de distribución con Generadores Distribuidos, se logra comprobar que el sistema de control a través de los actuadores es capaz de mitigar y garantizar una correcta calidad de potencia para el sistema para cuando se presente una perturbación de tipo *Hundimiento de Tensión*.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

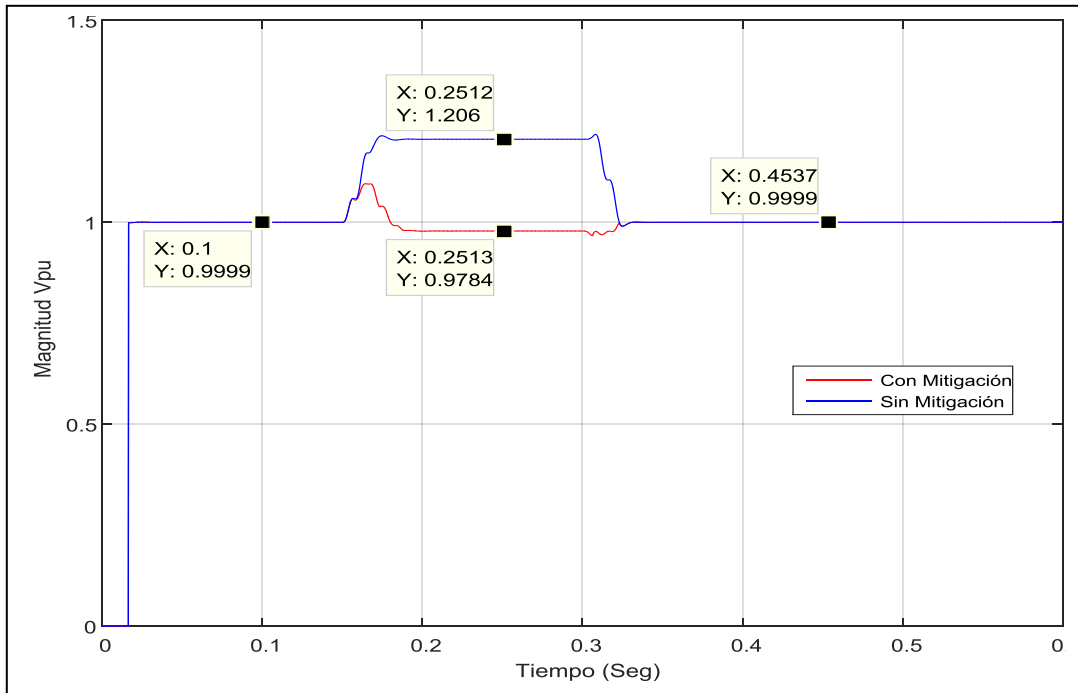


Figura 35: Resultado Nodo 862 – Elevación de tensión eficaz de 1.206 pu.

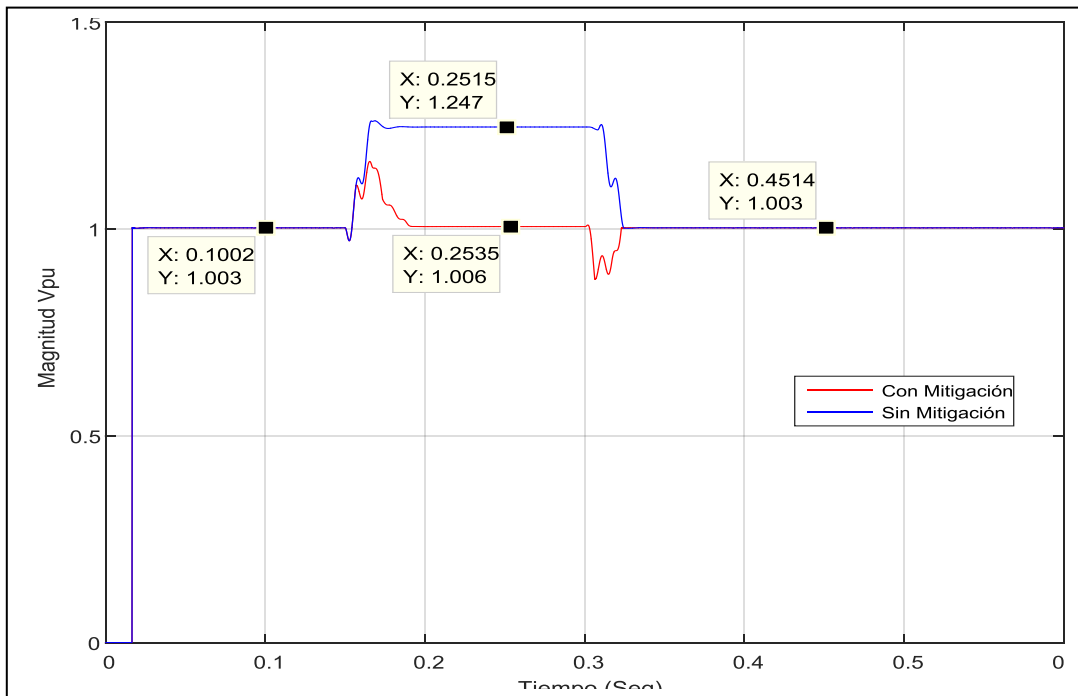


Figura 36: Resultado Nodo 852 – Elevación de tensión eficaz de 1.247 pu.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

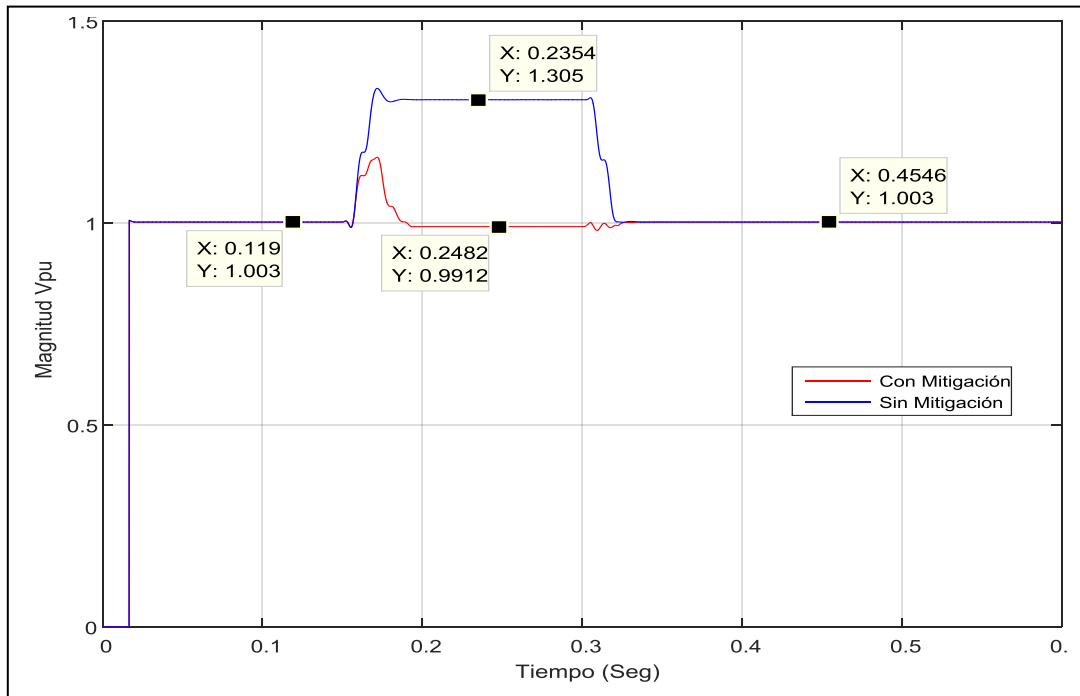


Figura 37: Resultado Nodo 850 – Elevación de tensión eficaz de 1.305 pu.

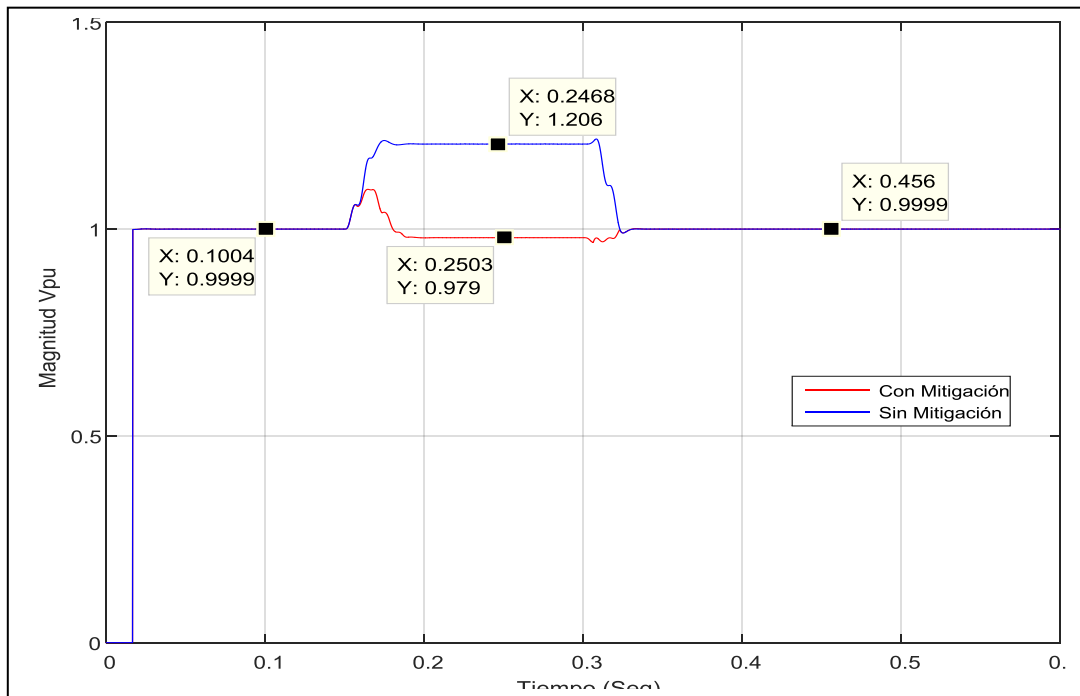


Figura 38: Resultado Nodo 840 – Elevación de tensión eficaz de 1.206 pu.

Para la mitigación de perturbaciones de *Elevación de Tensión* se demuestra que el sistema de control implementado es eficaz para mitigar también estas perturbaciones a través de los actuadores y de esta manera se garantiza la calidad de la señal de voltaje a lo largo del tiempo.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

Se realizó el análisis de la propuesta de control de seguimiento y se evaluaron las respuestas obtenidas, se determina que con lo establecido para el sistema de control es suficiente para mitigar las perturbaciones que afectan la calidad de la señal de voltaje del sistema, teniendo como ventaja que no es necesario conocer el modelo del sistema para poder implementar un controlador eficaz.

Sin embargo se plantean desventajas que son propias de los sistemas con Generación Distribuida y que podrían llegar a presentar impedimentos de implementación o actuación de los controladores ante un evento, dichas desventajas se encuentran específicas en el capítulo 4, sin embargo la más relevantes contemplan la coordinación de protecciones, el aumento del nivel de cortocircuito del sistema al tener más fuentes de energía, la ubicación óptima de los sistemas de generación en el sistema de distribución y su eficiencia en el despacho, lo enunciado anteriormente son los que se consideran más relevantes al momento de una implementación de este tipo.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

El control basado en Líder – Seguidor propuesto en este trabajo demostró que las perturbaciones *Hundimientos/Elevaciones de Tensión* pueden ser mitigadas y de esta manera garantizar una óptima calidad de la señal de voltaje en cualquier instante de tiempo, la tarea de mitigación recae sobre equipos ya dispuestos en la red eléctrica como lo son Generadores Distribuidos lo cual representa un ventaja adicional ya que no sería necesario la vinculación de equipos adicionales al sistema.

Actualmente tanto en la literatura como en sistemas reales existen diferentes tipos de estrategias para garantizar la señal de tensión adecuada, sin embargo hasta el momento no se había explorado la utilización de la *Teoría de Grafos* para resolver un problema de calidad de potencia tal como se expone en el presente trabajo.

La independencia del sistema de control del entorno muestra que sería aplicable a cualquier sistema de distribución de energía eléctrica sin tener que preocuparse por hacer cálculos independientes para cada sistema aún más con la incertidumbre del tiempo que podrá llegar a ser óptimo debido a los constantes cambios a los que son sometidos tal como expansión de la red, inclusión de nuevos clientes, salida de clientes existentes, reconfiguraciones de la red y nivel de voltaje, el único cambio y que no representa ningún inconveniente mayor es el cambio de la matriz de adyacencia debido a que esta se basa en los nodos eléctricos del sistema.

La elaboración del sistema de control se baso básicamente en los conceptos generales de *Teoría de Grafos* lo que representa una gran ventaja en el momento de realizar un estudio para la implementación de un sistema de esta envergadura dado que los esfuerzos para encontrar un controlador óptimo ya no serían necesarios debido a que con este tipo de controlador es aplicable a cualquier tipo de red de distribución.

Se crearon varios escenarios para diferentes valores de voltaje, incrementos o decrementos, y se probó el controlador propuesto el cual mostró con eficiencia la

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

corrección del defecto sin importar el tamaño de la perturbación o la configuración de la red eléctrica, por tal motivo.

Los actuadores propuestos son *Generadores Distribuidos* que se encuentren en el sistema lo cual muestra nuevos usos para los circuitos que cuenten con estos dispositivos conectados al sistema y así aprovechar la infraestructura existente solamente enfocándose en la construcción e implementación del sistema de control y comunicaciones.

6.2 Recomendaciones

La Generación Distribuida, tal como se expuso en el Capítulo 4, tiene intrínsecamente ciertas desventajas que deben ser valoradas antes de su implementación debido a que afecta las corriente de corto circuito del sistema por tal motivo el sistema de protecciones se convierte en un reto a ser resuelto por los ingenieros.

Este trabajo debe ser complementado con un estudio de identificación del tipo de falla debido a que en el sistema se tendrán más fuentes aportando a la misma, lo cual representa un riesgo para la vida y para los equipos que se encuentren conectados al sistema eléctrico.

Una comunicación limitada puede representar inconvenientes en el momento que el controlador deba tomar una decisión debido a que no contara con información suficiente, entonces esta falencia puede minimizarse con técnicas de estimación de estado para los puntos críticos del sistema.

Para Colombia se deben contemplar las variables adicionales que no contemplan ningún escenario técnico pero si de carácter legal o regulatorio con el fin de garantizar la correcta operación de los equipos y que al final puedan tener un retorno monetario equivalente a su inversión y sus costos de operación.

Se debe realizar un estudio previo para la ubicación óptima de los grupos de *Generación Distribuida* con el fin de garantizar la disminución del costo de energía al consumidor, minimización de pérdidas técnicas, mejora del perfil de tensión y confiabilidad de la red.

A. Anexo: IEEE 4 Node Test Feeder

El sistema para ser usado en los modelos de prueba se encuentra detallado en la **Figura 39** [16]:

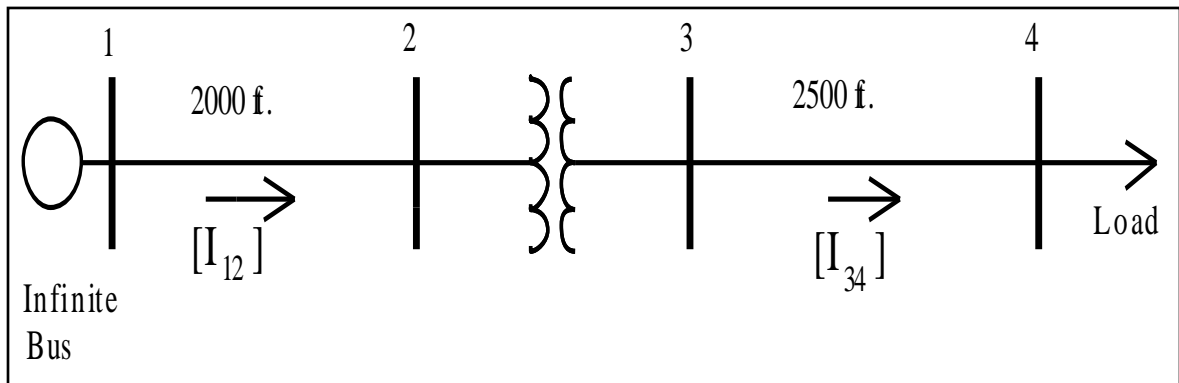


Figura 39: IEEE 4 Node Test Feeder.

Para los nodos que se encuentran aguas arriba del devanado primario del transformador de potencia, nodos 1 – 2, se utilizara la configuración de la **Figura 40**, de igual manera los nodos que se encuentran aguas abajo del devanado secundario del transformador, nodos 3 – 4, será utilizada la misma configuración.

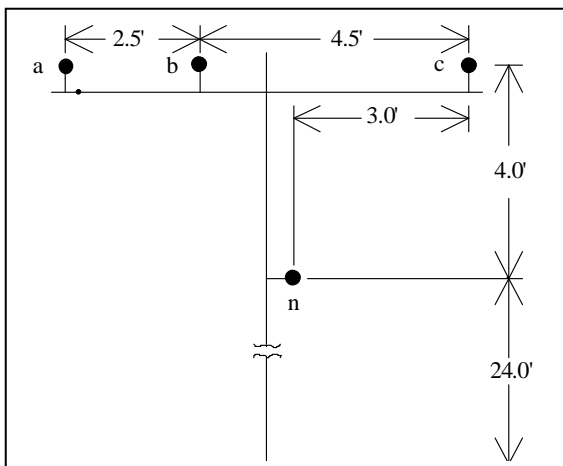


Figura 40: IEEE 4 Node Test Feeder – Configuración redes de distribución.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

Para la construcción del circuito de distribución serán tenidos en cuenta las siguientes características eléctricas de sus elementos:

1. Conductor de Fase:
 - a. Calibre del conductor 336,400.
 - b. Hilos 26/7.
 - c. GMR: 0.0244 pies.
 - d. Resistencia: 0.306 Ω /milla.
 - e. Diámetro: 0.721 pulgadas.

2. Conductor de neutro:
 - a. Calibre del conductor: 4/0.
 - b. Hilos: 6/1.
 - c. GMR: 0.00814 pies.
 - d. Resistencia: 0.592 Ω /milla.
 - e. Diámetro: 0.563 pulgadas.

3. La fuente principal tendrá un voltaje de salida de 12.47 kV_{L-L}.

4. El transformador trifásico contara con las siguientes características eléctricas:

kVA	kV _{L-L}	R - %	X - %
6000	12.47	1.0	6.0
6000	12.47	1.0	6.0

Tabla 9: Características transformador circuito IEEE 4 Node Test Feeder [16].

5. Carga del nodo 4:

Característica	Fase A	Fase B	Fase C
kW	1583	1200	850
Factor de Potencia	0.95 (Atraso)	0.9 (Atraso)	0.85 (Atraso)

Tabla 10: Características carga circuito IEEE 4 Node Test Feeder [16].

B. Anexo: IEEE 34 Node Test Feeder

El sistema para ser usado en los modelos de prueba se encuentra detallado en la **Figura 41 [16]**:

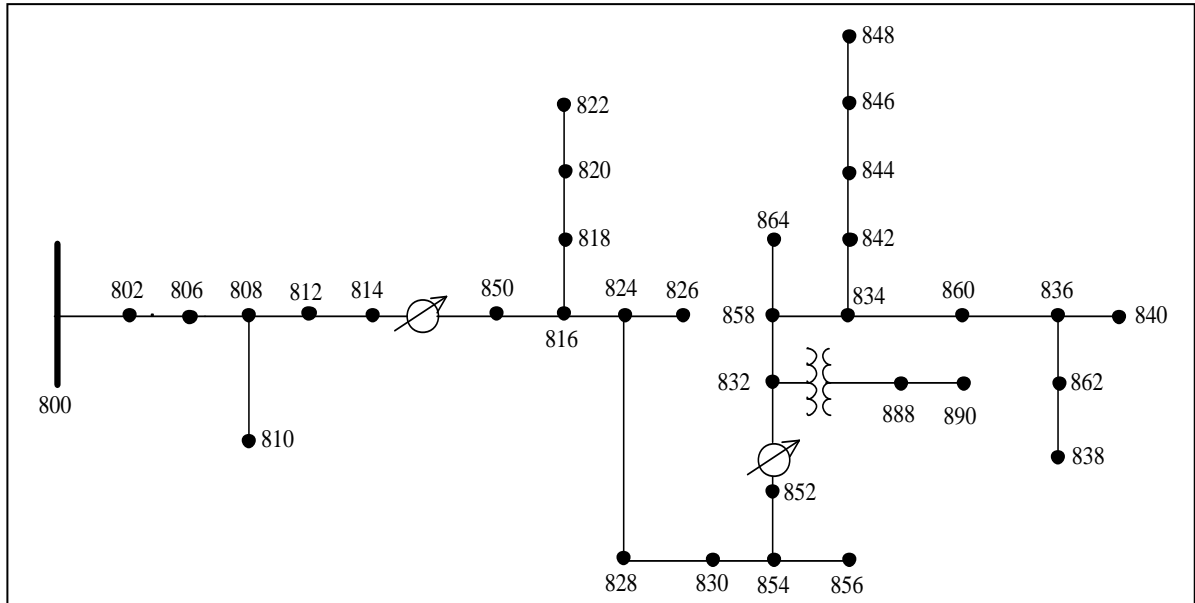


Figura 41: IEEE 34 Node Test Feeder.

Para los nodos que se encuentran aguas arriba del devanado primario del transformador de potencia, nodos 1 – 2, se utilizara la configuración de la **Figura 40**, de igual manera los nodos que se encuentran aguas abajo del devanado secundario del transformador, nodos 3 – 4, será utilizada la misma configuración.

La configuración de los nodos que pertenecen al sistema de distribución se relaciona en la **Tabla 11**:

Desde	Hacia	Longitud (Pies)	Configuración
800	802	2580	300
802	806	1730	300
806	808	32230	300
808	810	5804	303
808	812	37500	300
812	814	29730	300
814	850	10	301

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

816	818	1710	302
816	824	10210	301
818	820	48150	302
820	822	13740	302
824	826	3030	303
824	828	840	301
828	830	20440	301
830	854	520	301
832	858	4900	301
832	888	0	XFM-1
834	860	2020	301
834	842	280	301
836	840	860	301
836	862	280	301
842	844	1350	301
844	846	3640	301
846	848	530	301
850	816	310	301
852	832	10	301
854	856	23330	303
854	852	36830	301
858	864	1620	302
858	834	5830	301
860	836	2680	301
862	838	4860	304
888	890	10560	300

Tabla 11: Longitud y tipo de configuración de las redes de distribución circuito IEEE 34 Node Test Feeder [16].

La descripción de la configuración se encuentra detallada en la **Tabla 12:**

Configuración	Fases	Fases (ACSR)	Neutro (ACSR)	Configuración Redes de Distribución
300	B A C N	1/0	1/0	500
301	B A C N	#2 6/1	#2 6/1	500
302	A N	#4 6/1	#4 6/1	510
303	B N	#4 6/1	#4 6/1	510
304	B N	#2 6/1	#2 6/1	510

Tabla 12: Características técnicas de las configuración de las redes de distribución circuito IEEE 34 Node Test Feeder [16].

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

La configuración de redes de distribución 500 hace referencia a la **Figura 40**, sin embargo la configuración 510 hace referencia a la **Figura 42** tal como se detalla a continuación:

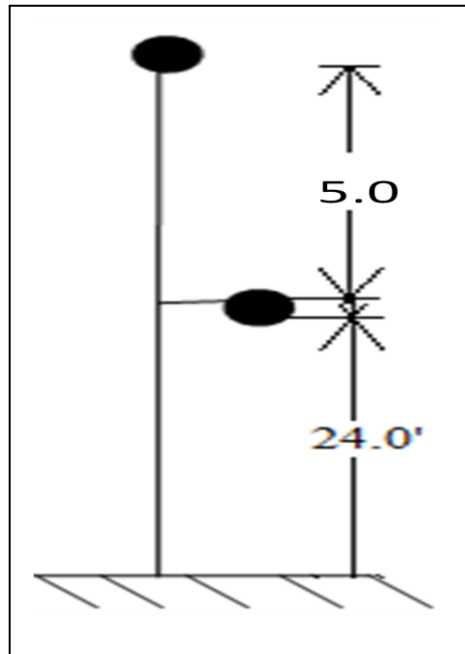


Figura 42: IEEE 34 NodeTest Feeder – Configuración redes de distribución [16].

En la **Tabla 13** se detalla la distribución de la carga que se tiene distribuida a lo largo del circuito de distribución.

Desde	Hacia	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
802	806	0	0	30	15	25	14
808	810	0	0	16	8	0	0
818	820	34	17	0	0	0	0
820	822	135	70	0	0	0	0
816	824	0	0	5	2	0	0
824	826	0	0	40	20	0	0
824	828	0	0	0	0	4	2
828	830	7	3	0	0	0	0
854	856	0	0	4	2	0	0
832	858	7	3	2	1	6	3
858	864	2	1	0	0	0	0
858	834	4	2	15	8	13	7
834	860	16	8	20	10	110	55
860	836	30	15	10	6	42	22
836	840	18	9	22	11	0	0
862	838	0	0	28	14	0	0

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

842	844	9	5	0	0	0	0
844	846	0	0	25	12	20	11
846	848	0	0	23	11	0	0
Total		262	133	240	120	220	114

Tabla 13: Características carga circuito IEEE 34 Node Test Feeder [16].

Bibliografía

- [1] (CREG), C. d. (2005). *CREG RESOLUCIÓN No 024*. Bogotá: COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS.
- [2] (CREG), C. d. (2012). *CREG RESOLUCIÓN No 065*. Bogotá: COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS.
- [3] Clews, J. (2012). ABB Power Electronics Power Quality Solutions. *IET Power Quality Seminar*.
- [4] Deckman, S., & Ferreira, A. (2002). About Voltage Sags and Swells Analysis. *10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2002*. , 145-148.
- [5] Dixon, J., & Rodríguez, J. (2005). Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review. *Proceedings of the IEEE* , 2144-2164.
- [6] Driesen, J., & Belmans, R. (2006). Distributed Generation: Challenges and Possible Solutions. *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE* , 1-8.
- [7] Famous, O. I., Fandi, G., Švec, J., Müller, Z., & Tlustý, J. (2015). Comparative Review of Reactive Power Compensation Technologies. *Electric Power Engineering (EPE), 2015 16th International Scientific Conference on* , 1-6.
- [8] Ferozuddin, R., & Khidir, M. A. (2011). Applications of Graph Theory in Computer Science. *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks* , 142 - 145.
- [9] Garcia Tirado, L. F. (2016). *Evaluación de factibilidad de implementar generación distribuida fotovoltaica que permita aumentar cobertura y confiabilidad de energía en sectores rurales del operador de red*. Bogotá D.C: Univeridad Nacional.
- [10] Giraldo, J., Mojica-Nava, E., & Quijano, N. (2013). Synchronization of Dynamical Networks Under Sampling. *European Control Conference (ECC)*. , 3839 - 3844.
- [11] Gómez Ramírez, N. E. (2014). *Metodología de gestión de potencia reactiva para mejorar el margen de estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos*

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

de potencia descentralizados. Medellín: Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática.

- [12] Gupta, S. T. (2010). Voltage Stability Improvement in Power Systems using Facts Controllers: State-of-the-Art Review.
- [13] Harris, J. M., Hirst, J. L., & Mossinghoff, M. J. (2008). *Combinatorics and Graph Theory*. Springer.
- [14] Honghai Kuang., S. L. (2011). Discussion on advantages and disadvantages of distributed generation connected to the grid. *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on* , 170-173.
- [15] Horak, J. (2006). Power Quality: Measurements of Sags and Interruptions. 1-7.
- [16] IEEE. (2001). Radial Distribution Test Feeders. *Power Engineering Society Winter Meeting* , 908-912.
- [17] IEEE Standards Coordinating Committee 21 on Fuel Cells, P. D. (2008). *IEEE Std 1547.2-2008 IEEE Application Guide for IEEE Std 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*. IEEE.
- [18] Jhampati, S., Chakraborty, J., Lahiri, S., & T., H. (2015). An Assessment of The Power Quality. *Proceedings of the 2015 Third International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT)* , 1-6.
- [19] Kiyoshi, N., & Norihiko, S. (2010). Distributed Control Based on Tie-Set Graph Theory for Smart Grid Networks. *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2010 International Congress on* , 957-964.
- [20] Lewis, F., Zhang, H., Hengster-Morvic, K., & Das, A. (2014). *Cooperative Control of Multi-Agent Systems*. Springer.
- [21] Math, B., Anders, L., Daphne, S., & Azam, B. (2016). Active harmonic filters: Control techniques review. *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016 17th International Conference on* , 36-41.
- [22] Mesbahi, M., & Egerstedt, M. (2010). *Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks*. Princeton University Press.
- [23] Padilha-Feltrin, A., López Lezama, J. M., & Gallego, L. A. (2009). UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA. *Scientia et Technica Año XV, No 41* , 75-80.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

- [24] Pava, A., Barrera, V., & Melendez, J. (2011). Power quality assessment of the Bogotá distribution network focused on voltage sag analysis. *2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe)*. , 1-8.
- [25] Poste, A., Deshmuk, B., & B.E., K. (2016). Detection, classification & characterisation of voltage sag. *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)* , 232-237.
- [26] Rodriguez Hernandez, A. (2009). *La Generación Distribuida y su posible integración al sistema Interconectado Nacional*. Bogotá D.C: Creg.
- [27] Romero Lozano, M. F. (2011). *Diseño de una Metodología para el Análisis de Sags de Tensión en Redes de Distribución*. Bogotá.
- [28] Romero, M., Gallego, L., & Pava, A. (2012). Fault zones location on distribution systems based on clustering of voltage sags patterns. *2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. , 488-493.
- [29] Sarkar, S. (2014). *Power Quality Disturbance Detection And Classification Using Signal Processing And Soft Computing Techniques*. Rourkela: National Institute of Technology.
- [30] Sayeekumar, N., Ahmed, S., Karthikeyan, S. P., Sahoo, S. K., & Raglend, J. (2015). Graph Theory and its Applications in Power Systems - A Review. *2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*. , 154 - 157.
- [31] Shah, S., Hellany, A., Nagrial, M., & Rizk, J. (2015). Review of power quality monitoring web-based techniques. *Power Engineering Conference (AUPEC), 2015 Australasian Universities* .
- [32] Silva, J. A., Funmilayo, H. B., & Bulter-Purphy, K. L. (2007). Impact of Distributed Generation on the IEEE 34 Node Radial Test Feeder with Overcurrent Protection. *Power Symposium, 2007. NAPS '07. 39th North American* , 49-57.
- [33] Society, T. a. (2009). IEEE Std 1159™-2009, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Power & Energy Society* .
- [34] Society, T. a. (2011). IEEE Std 1250™-2011, IEEE Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems. *IEEE Power & Energy Society* .
- [35] Yong, Y., Chengxiao, Z., & Lun, W. (2017). Distributed Control with Dynamic Triggering Mechanisms for Multi-Agent Systems. *Control And Decision Conference (CCDC), 2017 29th Chinese* , 2508-2512.

Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

- [36] Zahraa Abdul Kareem., W. F. (2016). A review on optimal location of distributed generation techniques in electrical network. *Power and Energy (PECon), 2016 IEEE International Conference on* , 632-636.