



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA SISTEMAS  
Y TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA INGENIERÍA ELÉCTRICA  
2015**

**CÁLCULO Y SIMULACIÓN DE TECNOLOGÍA D-FACTS PARA MEJORAR LA  
REGULACIÓN Y ESTABILIDAD DE TENSIÓN EN LA LÍNEA TRONCAL PAMC2  
DE CENS.**

**AUTOR  
EDWIN FABIÁN MORA TIBAMOZA**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA SISTEMAS  
Y TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA INGENIERÍA ELÉCTRICA  
PAMPLONA, COLOMBIA  
2015**

**CÁLCULO Y SIMULACIÓN DE TECNOLOGÍA D-FACTS PARA MEJORAR LA  
REGULACIÓN Y ESTABILIDAD DE TENSIÓN EN LA LÍNEA TRONCAL PAMC2  
DE CENS.**

**AUTOR:  
EDWIN FABIÁN MORA TIBAMOZA**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**DIRECTOR:  
EDISON ANDRÉS CAICEDO PEÑARANDA  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**CO-DIRECTOR:  
MARCO ANTONIO CAICEDO  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA SISTEMAS  
Y TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA INGENIERÍA ELÉCTRICA  
PAMPLONA, COLOMBIA  
2015**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Pamplona, Norte de Santander 15 de Diciembre de 2015

PROGRAMA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

MODALIDAD		JO DE GRADO
<input type="checkbox"/> DOCENCIA	<input type="checkbox"/> REALIZACIÓN DE DIPLOMADO	<input type="checkbox"/> PASANTIA DE INVESTIGACIÓN
<input type="checkbox"/> PRACTICA INTEGRAL	<input type="checkbox"/> PRÁCTICA EMPRESARIAL	<input type="checkbox"/> RECITAL DE GRADO
<input type="checkbox"/> INVESTIGACIÓN		

**EL JURADO CALIFICADOR CONFORMADO POR:** (Nombres, apellidos y documento de identidad).

JURADO 1: \_\_\_\_\_ /C.C: \_\_\_\_\_

JURADO 2: \_\_\_\_\_ /C.C: \_\_\_\_\_

JURADO 3: \_\_\_\_\_ /C.C: \_\_\_\_\_

EN SU SESIÓN EFECTUADA EN: \_\_\_\_\_ A LAS \_\_\_\_\_ HORAS, DEL  
DÍA \_\_\_\_\_ DEL MES \_\_\_\_\_ DEL AÑO \_\_\_\_\_

Terminadas sus deliberaciones, y en cumplimiento de las normas y acuerdos de los órganos de dirección de la Universidad de Pamplona, se ha llegado a la siguiente conclusión:

**Primera Conclusión:** Otorgar la Calificación de: \_\_\_\_.

EXCELENTE ( $\geq 4.5$ )       APROBADO ( $< 4.5, \geq 3.0$ )       INCOMPLETO

AL TRABAJO DE GRADO TITULADO: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

AUTOR: \_\_\_\_\_ /C.C: \_\_\_\_\_

DIRECTOR Y/O TUTOR: \_\_\_\_\_ /C.C: \_\_\_\_\_

**Segunda Conclusión: Emitir los siguientes criterios**

Otras:

No.	DESCRIPCIÓN	RECOMENDAR	
		SI	NO
1.	Recomendar para presentar en eventos.		
2.	Recomendar para publicación.		
3.	Recomendar para ser continuado en otros trabajos.		

---

**Tercera Conclusión: Avalar el cumplimiento del Trabajo de Grado, para optar por el Título de**

***Firmas del Jurado Calificador:***

---

**JURADO 1**

---

**JURADO 2**

---

**JURADO 3**

---

**Director Comité Trabajo de Grado**

---

**Director Unidad Académica**

### **Dedicatoria**

Dedico esta meta más conquistada a Dios, y mi madre que desde el cielo me dieron la fuerza y voluntad durante todo este tiempo.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradecimientos a mi familia, que me han apoyado en estos años de sacrificios, de dudas y de luchas, porque además de acompañarme calladamente hicieron un sacrificio juntos para permitirme ausentar como hijo, hermano y padre buscando esta meta.*

*Agradecimientos a Centrales Eléctricas del Norte de Santander CENS, que desde mis inicios como liniero me brindaron el apoyo y la oportunidad de aprender hacer con el trabajo diaria y de afianzar los conocimientos adquiridos en la Universidad de Pamplona brindándome su apoyo durante estos años de labor.*

*Agradecimientos a mis amigos por brindarme un mano, su apoyo en muchos ámbitos de mi vida que me permiten crecer día a día como persona.*

## **RESUMEN**

Este trabajo consiste en la selección, cálculo y simulación de una tecnología D-FACTS que mejora la regulación y estabilidad de tensión en el circuito de la celda 2 de la ciudad de Pamplona que corresponde al nombre de "PAMC2", para ello se realizó el análisis del flujo de potencia con las magnitudes eléctricas medidas y almacenadas por el sistema scada de la empresa Centrales eléctricas de Norte de Santander (CENS) del último año, el flujo de potencia es simulado en el software PowerFactory – DlgSILENT, la solución D-FACTS seleccionada mejora los niveles de regulación y estabilidad de tensión de la línea troncal considerando el comportamiento de la demanda proyectada a mediano plazo. Dentro del proceso de cálculo se analizan el proceso de selección de la ubicación, características de la solución D-FACTS, análisis técnico-económicos, análisis de los perfiles de tensión.

## **ABSTRACT**

This work is the selection, calculation and simulation of a D-FACTS technology that improves the regulation and voltage stability in the circuit cell 2 of the city of Pamplona which corresponds to the name "PAMC2", for it was held analysis of power flow with electrical parameters measured and stored for the SCADA system of the power plants business of Norte de Santander (CENS) last year, the power flow is simulated in the PowerFactory software - DlgSILENT, the solution D-FACTS selected improved levels of regulation and voltage stability of the trunk considering the behavior of the projected demand over the medium term. Within the process of calculating the selection of the location, characteristics of the solution D-FACTS, technical-economic analysis, analysis of voltage profiles are analyzed.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	9
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	13
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	14
INTRODUCCIÓN .....	16
JUSTIFICACIÓN .....	16
DELIMITACIÓN.....	17
OBJETIVO GENERAL .....	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
ACOTACIONES .....	17
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	18
1.1 Marco legal de la regulación de tención en Colombia.....	18
1.2 Análisis de transmisión de potencia.....	19
1.3 Sistemas flexibles de transmisión AC (FACTS) .....	20
1.3 Tipos de (FACTS) .....	21
1.3.1 Compensadores en derivación .....	21
<b>1.3.2 Compensadores serie</b> .....	26
1.3.3 Compensador por ángulo de fase.....	30
1.3.4 Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC).....	31
<b>1.4 Criterios de selección de la tecnología FACTS compensador</b> .....	32
1.5 Estado del Arte.....	34
CAPÍTULO 2. METODOLOGIA.....	36
2.1 Análisis del Marco regulatorio .....	36
2.2 Diagnóstico inicial .....	37
2.2.1 Estado actual del alimentador.....	37
2.2.2 Alimentador PAMC2 .....	37
2.3 Análisis del comportamiento de la regulación de tensión.....	39
2.4 Simulación en DIgSILENT power Factory.....	42
2.4.1 Interfaz de usuario .....	42
<b>2.4.2 Funciones de simulación Power Factory</b> .....	43

<b>2.4.3 Configuración de datos de una subestación.....</b>	44
2.4.4 Flujos de carga en DIgSILENT .....	44
<b>2.4.5 Configuración de Reguladores en la red.....</b>	47
2.5 Selección de la tecnología FACTS.....	54
2.5.1 Beneficios y perjuicios para la empresa Distribuidora del uso de reguladores de tensión .....	54
2.5.2 Prejuicios: .....	55
2.5.3 Corrección de la regulación de voltaje en los sistemas eléctricos. ....	55
<b>2.5.4 Solución con Regulador de Tensión:.....</b>	55
<b>2.5.5 Beneficios de regulación con unidades monofásicas versus trifásicas:.....</b>	56
<b>2.5.6 Diagrama esquemático y descripción de funcionamiento .....</b>	56
<b>2.5.7 Funcionamiento del regulador de voltaje monofásico de 32 pasos</b>	58
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS .....</b>	60
<b>3.1 Ubicación de los reguladores de tensión: .....</b>	60
<b>3.1.1 Evaluación de simulación en el primero de los puntos seleccionados .....</b>	62
<b>3.1.2 simulación en el segundo punto .....</b>	63
3.1.3 simulación en el tercer punto .....	64
3.1.4 simulación en el cuarto punto .....	65
3.1.5 simulación en el quinto punto .....	66
3.2 conclusión de la simulación .....	68
3.3 punto ideal para la instalación y características del regulador comercial adecuado para la instalación y mejora de la tensión del circuito. ....	69
3.3.1 componentes del regulador VR-32 .....	70
3.3.2 Funcionamiento del regulador de voltaje monofásico de 32 paso .....	72
3.3.3 conexión del regulador.....	72
3.3.4 Sistema de puesta a tierra .....	73
3.3.5 Características específicas del regulador de tensión monofásico VR-32: .....	78
3.4 Proyección de la potencia. ....	80
3.4.1 Proyección de la demanda .....	81

3.5 Análisis económico .....	81
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES .....	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 . Límites de regulación de voltaje [23] .....	36
Tabla 2 Estado del alimentador PAMC2 en condiciones actuales de máxima carga .....	37
Tabla 3 Estado de PAMC2 en estado actual.....	37
Tabla 4 Tensiones en el alimentador PAMC2 en estado actual.....	38
Tabla 5 Tabla de datos circuito PAMC2 .....	39
Tabla 6 caracterización del circuito. ....	40
Tabla 7 resultados sin compensación simulación 0 .....	60
Tabla 8 Resultados de la simulación 1 .....	63
Tabla 9 resultados de la simulación 2 .....	64
Tabla 10 Resultados simulación en el cuarto punto .....	66
Tabla 11 Resultados simulación en el quinto punto .....	67
Tabla 12 resultados de las simulaciones realizadas .....	68
Tabla 13 potencias en los diferentes puntos de simulación .....	69
Tabla 14 valores de referencia para sistemas de puesta a tierra .....	73
Tabla 15 Proyección de la potencia año 2024.....	80
Tabla 16 Valores compensación CREG 097 .....	82
Tabla 17 Valor de las pérdidas recuperadas .....	82
Tabla 18 Tiempo de retorno de la inversión .....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Sistema de potencia con dos máquinas.....	19
Figura 2 Diagrama fasorial sistema de potencia [10]. .....	20
Figura 3 Potencia en función del ángulo $\delta$ .....	20
Figura 4 Compensador en derivación ideal.....	22
Figura 5 Potencia en función del ángulo $\delta$ .....	23
Figura 6 Diagrama fasorial del compensador en derivación ideal [10]. .....	23
Figura 7 Línea de transmisión seccionada en cuatro segmentos [11]......	24
Figura 8 Análisis de voltaje vs potencia en un Sistema radial a) Sin compensación de reactivos b) Con compensación de reactivos [11]. .....	25
Figura 9 Compensado serie ideal.....	26
Figura 10 Diagrama fasorial .....	27
Figura 11 Potencia en función del ángulo $\delta$ .....	28
Figura 12 a) Sistema radial de potencia con compensación. b) Análisis de voltaje vs potencia el sistema radial [11]. .....	29
Figura 13 Concepto e implementación básica de un regulador de voltaje [11]. ....	30
Figura 14 Concepto e implementación básica de un regulador ángulo de fase [11]. .....	31
Figura 15 . Grupo de los controladores FACTS controlados por tiristores [11]. ....	32
Figura 16 Grupo de los controladores FACTS basados en convertidores de voltaje [11]. .....	32
Figura 17 Tensión vs Potencia a) Compensación en derivación b) Compensación serie [10]......	33
Figura 18 Comparación de compensadores Siemens.....	34
Figura 19 Plano red MT circuito PAMC2 .....	38
Figura 20 Perfil de tensión circuito PAMC2 .....	39
Figura 21 Sectores por caída de tensión.....	41
Figura 22 Características de la ventana principal.....	43
Figura 23 subestación luego del flujo de carga [25] .....	44
Figura 24 <i>Opción de cálculo de flujo de carga.</i> .....	45
Figura 25 <i>Configuración del flujo de carga.</i> .....	45
Figura 26 Selección de la opción Feeder Load Scaling. ....	46
Figura 27Flujo de carga con convergencia. ....	46
Figura 28 Actualizar la base de datos. ....	46
Figura 29Herramienta de transformador de 2 devanados.....	47
Figura 30Configuración del regulador en la red. ....	48
Figura 31 Edit data del transformador. ....	48
Figura 32 Ventana de configuración del regulador.....	49
Figura 33 Selección del tipo de transformador. ....	49

Figura 34 Ruta del regulador ideal. ....	50
Figura 35 Selección del regulador ideal en la librería.....	51
Figura 36 Opción de configuración del regulador.....	51
Figura 37 Ventana de configuración del regulador.....	51
Figura 38 Ajuste del Tap del regulador. ....	52
Figura 39 Flujo de carga con Feeder load Scaling para el regulador. ....	52
Figura 40 Regulador en Tap (+2). ....	53
Figura 41 Regulador en Tap (-2). ....	53
Figura 42 diagrama de cargas [24].....	55
Figura 43 cargas con regulador incluido [24] .....	56
Figura 44 autotransformador .....	57
Figura 45 auto transformador monofásico tab´s [24].....	57
Figura 46 funcionamiento del regulador de voltaje.....	58
Figura 47 contactos móviles y fijos del regulador.....	58
Figura 48 reducción y aumento de tensión en los reguladores .....	59
Figura 49 explicación del funcionamiento de los TAB´s del regulador .....	59
Figura 50 Ubicación reguladores simulados PAMC2 .....	61
Figura 51 Perfil de tensión simulación 1 .....	62
Figura 52 Datos de resultados 1 .....	62
Figura 53 Perfil de tensión simulación 2.....	63
Figura 54 Datos de resultados 2 .....	63
Figura 55 Perfil de tensión simulación 3.....	64
Figura 56 Datos de resultados 3 .....	64
Figura 57 Perfil de tensión simulación 4.....	65
Figura 58 Datos resultados 4 .....	66
Figura 59 Perfil de tensión simulación 5.....	67
Figura 60 Datos resultados 5 .....	67
Figura 61 Regulador de tensión [24] .....	70
<b>Figura 62.</b> Funcionamiento del regulador de voltaje monofásico de 32 pasos ....	72
Figura 63 Conexión Estrella aterrizada .....	72
Figura 64 Diseño una varilla.....	75
Figura 65 Diseño dos varillas .....	75
Figura 66 Diseño 3 varillas.....	76
Figura 67 Diseño malla tipo uno.....	76
Figura 68 Diseño malla tipo dos .....	76
Figura 69 Diseño de malla tipo tres.....	77
Figura 701. Montaje de reguladores de tensión .....	79
Figura 71 Perfil de tensión año 2024.....	80
Figura 72 Escenarios de proyección de demanda nacional de energía eléctrica.[26] .....	81

## **INTRODUCCIÓN**

El principal problema presentado en este circuito PAMC2 consiste en la regulación a niveles de tensión por fuera de los límites regulatorios de tensión, que se traduce en la prestación de un servicio de suministro eléctrico con baja calidad y pérdidas económicas para la empresa CENS; de forma adicional se debe considerar la tendencia en el incremento de la carga que conllevaría al aumento de la problemática generando inestabilidad de tensión en el circuito y a su vez repercute en la vida útil de los electrodomésticos del usuario final debido a que su funcionamiento se va dar sobre unos valores de tensión para los cuales no fueron diseñados, esto redundara en la baja confiabilidad del circuito, y llegado al caso del incumplimiento de la resolución CREG 024 de 2005 en cuanto a regulación de tensión [1]

## **JUSTIFICACIÓN**

La transmisión de la energía eléctrica en corriente alterna (AC) comenzó a finales del siglo XIX, dicha transferencia de energía en grandes distancias presentó problemas en el control del voltaje y la estabilidad causados por el desbalance en la potencia reactiva del sistema [2]. Para mitigar dichos efectos es necesario aplicar un control sobre las variables que se presentan en el sistema de transmisión como son la impedancia de la red y las variables de operación como los voltajes y las corrientes, mediante el uso de controladores FACTS (de flexible ac transmission systems o sistemas flexibles de transmisión ca) los cuales son dispositivos basados en electrónica de potencia que mediante su conmutación controlan los parámetros de la línea de transmisión garantizando una conducción de potencia más cercana a sus especificaciones térmicas nominales [3].

Al obtener el cálculo de un compensador de reactivos adecuado, a las necesidades de regulación del circuito PAMC2 se mejoraría en corto plazo los perfiles de tensión desde el punto seleccionado para su instalación llegando a estar al nivel de tensión de la salida de la subestación, sin requerir de una inversión económica grande y de largo plazo entre las que se podrían nombrar la remodelación de la red con el aumento del calibre del conductor, o la construcción de una nueva subestación.

Con el desarrollo de este proyecto se busca obtener una mejora en la calidad de la energía en el circuito PAMC2 de CENS de la subestación Pamplona y por ende una reducción en las pérdidas de energía, al conseguir un perfil de tensión estable el cual cumpla con lo exigido por la norma aplicable y se satisfaga al usuario final.

## **DELIMITACIÓN**

### **OBJETIVO GENERAL**

Calcular y simular una tecnología D-FACTS (Distributed - Flexible AC Transmission System) en la línea troncal PAMC2 de CENS que permita garantizar los niveles de regulación y estabilidad de tensión.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar el comportamiento de la regulación de tensión en función de la potencia reactiva y factor de potencia de la línea troncal PAMC2 basados en los datos estadísticos facilitados por CENS.
- Seleccionar la tecnología D-FACTS y ubicación dentro del circuito, en función del mejoramiento de la regulación de la tensión según el análisis previo y los criterios técnico-económicos.
- Calcular la tecnología D-FACTS seleccionada aplicable en la solución de los problemas identificados en la línea troncal PAMC2.
- Simular la solución D-FACTS en el punto seleccionado en línea troncal PAMC2 mediante el uso de un software especializado.
- Analizar el comportamiento de la regulación de tensión de la línea troncal PAMC2 con la solución D-FACTS calculada.

### **ACOTACIONES**

- El desarrollo de este proyecto se ejecutara sobre el circuito PAMC2 de la regional Pamplona de Centrales Eléctricas del Norte de Santander "CENS".
- El software para la simulación es SPARD y Power Factory.
- El tiempo de la base de datos es bajo disposición de CENS siendo el histórico facilitado de 1 año.
- Las medidas de tensión, corriente y potencia son suministradas por las bases de datos de CENS.

## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 1.1 Marco legal de la regulación de tensión en Colombia

LA normativa Colombia tiene una fundamentación fuerte de las normativas internacionales en lo cual la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), tiene lineamientos institucionales con el fin de garantizar, calidad en sus servicios. En Colombia se cuenta con un marco regulatorio de energía que exige que las tensiones en estado estacionario no podrán ser inferiores al 90% de la tensión nominal, ni ser superiores al 110% de esta durante un periodo mayor a un minuto, por lo tanto todos los agentes con actividad en el Sistema Interconectado Nacional (SIN), deberán cumplir con esta prescripción para evitar sanciones. Los sistemas de Transmisión Regional y/o Distribución Local se clasifican por niveles, en función de la tensión nominal de operación, según la siguiente definición [2]

Pero en el análisis del 10% de regulación en la normativa internacional es términos de la calidad de la energía y no es un valor regulatorio de la tensión en el estado estacionario.

Nivel IV: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 62 kV

Nivel III: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 30 kV y menor de 62 kV

Nivel II: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 1 kV y menor de 30 kV

Nivel I: Sistemas con tensión nominal menor a 1 kV

Para la onda de tensión se estableció que los operadores de red deberán cumplir con unos límites máximos de distorsión de voltaje los cuales se muestran en la tabla 1 y están basados en el estándar IEEE 519 [1], [5]:

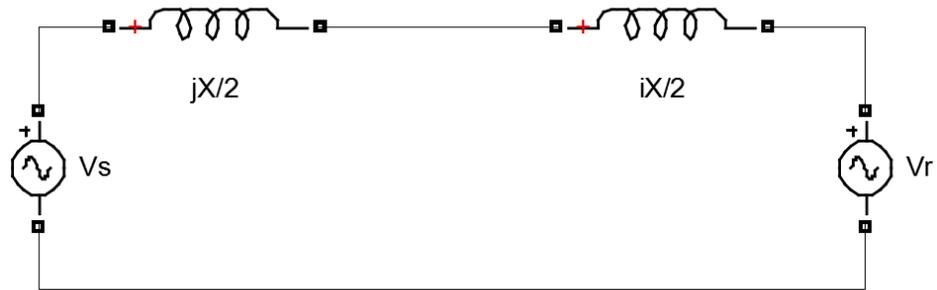
*Tabla 1. Límites máximos de Distorsión Total de Voltaje*

<b>Tensión del Sistema</b>	<b>THDV Máximo (%)</b>
<i>Niveles de tensión 1,2 y 3</i>	<i>5.0</i>
<i>Nivel de Tensión 4</i>	<i>2.5</i>
<i>STN</i>	<i>1.5</i>

Las empresas electrificadoras tienen el deber de prestar un servicio al cliente final con todas las variables del sistema optimizadas según lo establecido por CREG, pero debido al aumento en la demanda energética, y a las pérdidas presentes propias del sistema al momento de transportar y distribuir la energía eléctrica se ha optado por la implementación de control estático y dinámico de las redes denominados "FACTS" (Flexible AC Transmission System) los cuales abarcan a los dispositivos y sistemas basados en electrónica de potencia y utilizados para la

transmisión de la energía en corriente alterna (AC) en las redes eléctricas de transporte y distribución[6]. Las variables sobre las cuales se busca permanecer en estabilidad de funcionamiento en el sistema de potencia son los voltajes, el ángulo y la potencia de la red eléctrica.

## 1.2 Análisis de transmisión de potencia.



**Figura 1** Sistema de potencia con dos máquinas

Modelando la operación del sistema de potencia mostrado en la (figura 1) en el cual la impedancia de línea es dividida en dos secciones iguales, se puede determinar las características de la potencia activa y reactiva en función del voltaje, impedancia y ángulo ( $\delta$ ) de desfase de los voltajes  $V_s$  y  $V_r$  mostrado en la figura 2, para ello se consideran las magnitudes de las tensiones iguales  $|V_s| = |V_r| = V$  y el sistema de potencia sin pérdidas, los resultados son las ecuaciones 1 y 2 [9],[10],[11].

La notación utilizada intenta facilitar la visualización del flujo de potencia siendo  $V_s$  el voltaje de la fuente o generado, y  $V_r$  es el voltaje del receptor o de la carga.

$$P = \frac{V^2 \text{sen}(\delta)}{X} \quad (1)$$

$$Q = \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta) \quad (2)$$

Dónde:

P= potencia activa

Q=potencia reactiva

V= magnitud de la tensión

X=Reactancia de línea

$\delta$ = ángulo de desfase de los voltajes  $V_s$  y  $V_r$

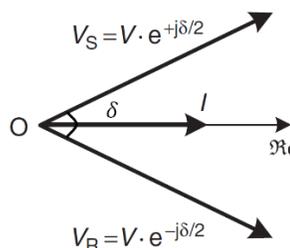


Figura 2 Diagrama fasorial sistema de potencia [10].

El diagrama fasorial (figura 2), del sistema de potencia es presentado en la figura 2, en él se visualiza de forma precisa el ángulo ( $\delta$ ) de desfase de los voltajes  $V_s$  y  $V_r$ , y la igualdad de las magnitudes de tensión.

A partir de las ecuaciones 1 y 2, se genera la gráfica mostrada en la figura 3, que describe el comportamiento de la potencia activa y reactiva en función del ángulo  $\delta$ , la figura 3 es la referencia necesaria para realizar la comparación del sistema de potencia sin compensación con un sistema de potencia que cuente con compensadores de reactivos de cualquier tipo [9], [10], [11].

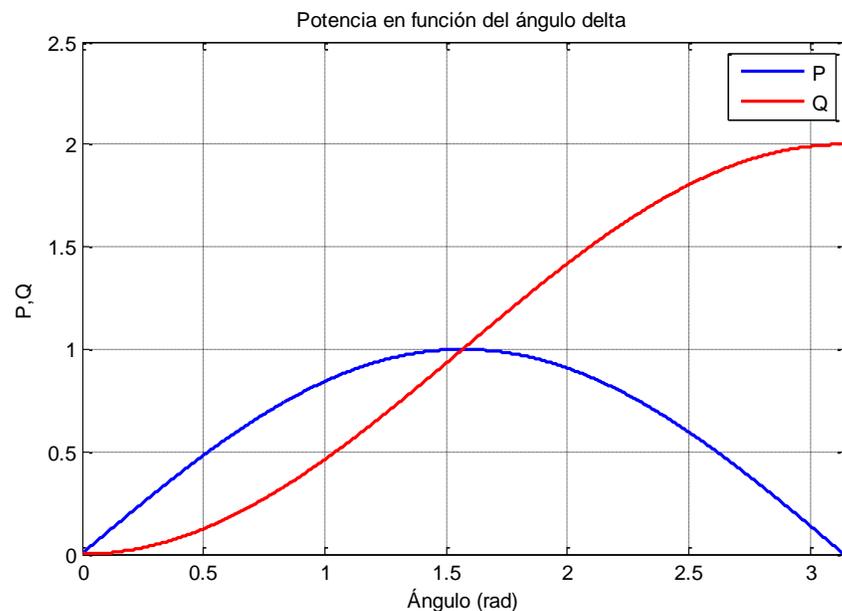


Figura 3 Potencia en función del ángulo  $\delta$

La importancia de la expresión de la potencia en función del Angulo del voltaje suministrado y recibido facilita el análisis de la estabilidad del sistema de potencia.

### 1.3 Sistemas flexibles de transmisión AC (FACTS)

Para la comprensión de las tecnologías D-FACTS se debe partir de una definición precisa de los siguientes términos:

**Flexibilidad en la transmisión de energía:**

La habilidad de acomodar cambios en el sistema de transmisión; o la habilidad de acomodar diferentes condiciones operativas, manteniendo márgenes suficientes en estado estable y transitorio [8].

### **Sistema de Transmisión AC flexible (FACTS):**

Sistemas de transmisión que incorpora controladores estáticos basados en electrónica y otras fuentes para mejorar la capacidad de control y aumentar la capacidad de transferencia de potencia [2].

### **Controlador FACTS**

Un sistema basado en electrónica de potencia y equipo estático adicional que proporciona control a uno o más parámetros del sistema de transmisión a corriente alterna [8].

## **1.3 Tipos de (FACTS)**

Existen diversos tipos de compensación de reactivos en los cuales existe una diversidad de técnicas de control en lo cual en principio existen cuatro tipos de sistemas compensadores los cuales son:

- Compensadores en derivación
- Compensadores serie
- Compensador por ángulo de fase
- Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC)

### **1.3.1 Compensadores en derivación**

En un sistema de potencia la compensación de reactivos por derivación cumple los objetivos de suministrar potencia reactiva, aumentar la capacidad de potencia transmisible, y mejorar la compatibilidad de la potencia generada con la demanda de la carga [9], [11].

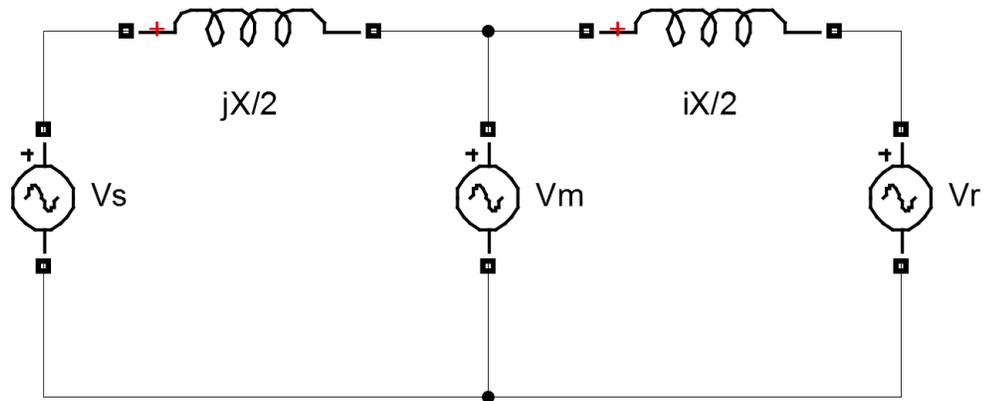


Figura 4 Compensador en derivación ideal

El compensador en derivación ideal no tiene pérdidas, por lo cual la potencia activa suministrada es igual a la potencia activa recibida, modelando comportamiento del sistema de potencia mostrado en la figura 4, con la impedancia de línea dividida en dos secciones iguales y un compensador ideal en derivación en el centro de la línea, en el sistema se puede determinar las características de la potencia activa y reactiva en función del voltaje, impedancia y ángulo ( $\delta$ ), considerando la igualdad de las magnitudes de las tensiones mediante las ecuaciones 3 y 4 las cuales son comparables con las ecuaciones del sistema sin compensación ya que cuentan con las mismas variables.

De las ecuaciones 3 y 4 se genera la gráfica mostrada en la figura 5, en la cual se percibe el comportamiento de la potencia activa y reactiva en función del ángulo  $\delta$ , en la gráfica se observa un aumento considerable en la potencia activa que puede ser suministrada con la inclusión de un compensador en derivación comparado con el sistema de potencia sin compensación de reactivos indicado por las líneas punteadas.

$$P = \frac{2V^2 \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}{X} \quad (3)$$

$$Q = \frac{4V^2}{X} \left(1 - \cos\frac{\delta}{2}\right) \quad (4)$$

Dónde:

P= potencia activa

Q=potencia reactiva

V= magnitud de la tensión

X=Reactancia de línea

$\delta$ = ángulo de desfase de los voltajes Vs y Vr

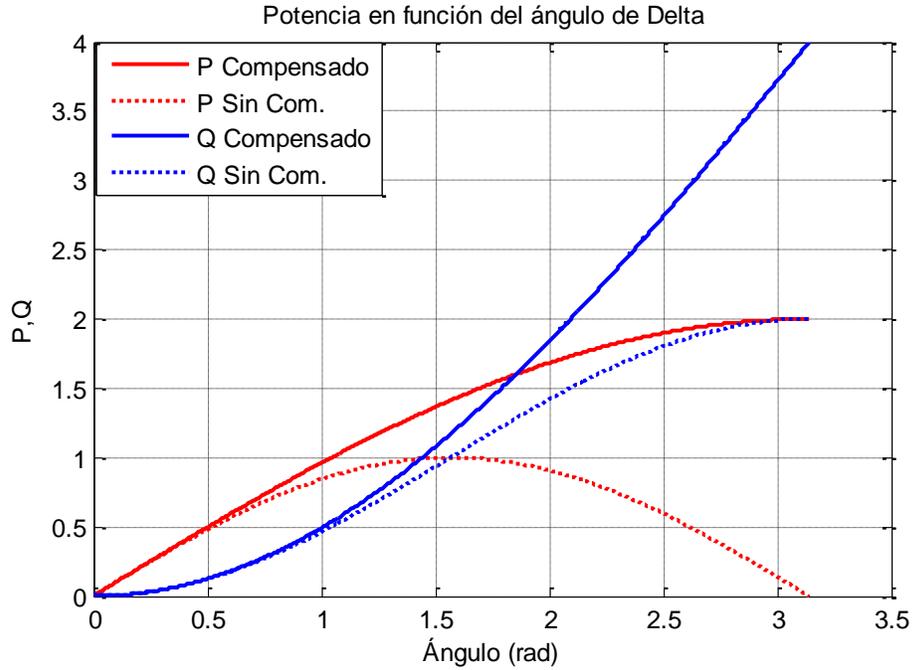


Figura 5 Potencia en función del ángulo  $\delta$

El diagrama fasorial utilizado para obtener las ecuaciones de potencia activa y reactiva del sistema de potencia en la ecuaciones 3 y 4 es mostrado en detalles en la figura 6, la compensación en el punto medio es realizada en esencia para mejorar las condiciones del sistema de transmisión, ya que en el punto medio se presenta la mayor reducción de tensión y la compensación divide la línea de transmisión en dos segmentos iguales, para cada uno de ellos la máxima potencia transmisible es igual, este principio puede ser utilizado en múltiples ocasiones para una misma línea de transmisión.

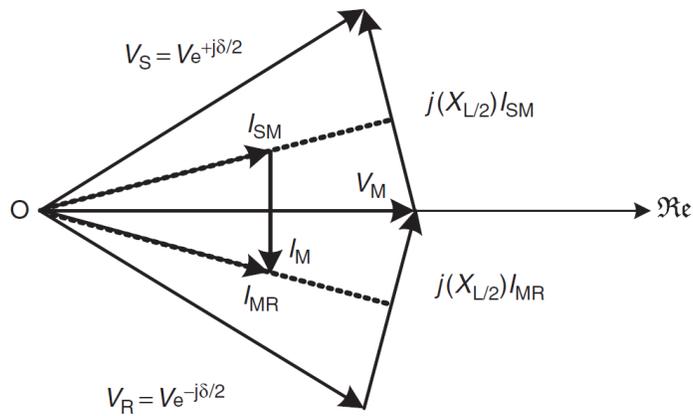


Figura 6 Diagrama fasorial del compensador en derivación ideal [10].

Una línea de transmisión puede ser seccionada, utilizando múltiples compensadores ubicados en segmentos iguales de la línea de transmisión, como se ilustra figura 7 por cuatro segmentos. La teoría indica que por cada compensador se duplicaría la potencia transmisible en los segmentos de la igual longitud de línea. Además, con el aumento del número de segmentos, la variación de voltaje a lo largo de la línea se reduce, acercándose al caso ideal de tensión constante [11].

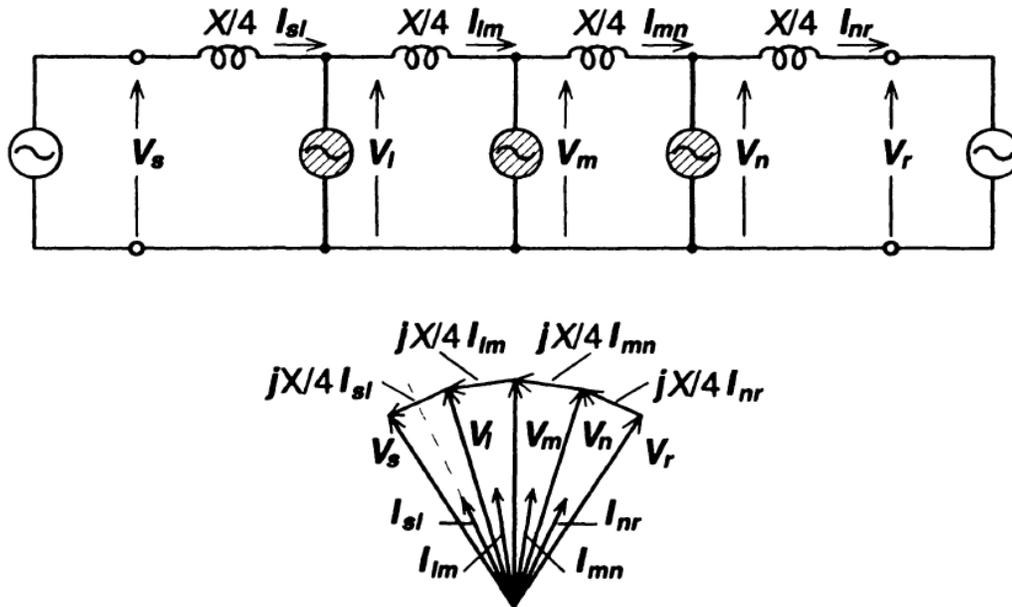


Figura 7 Línea de transmisión seccionada en cuatro segmentos [11].

La compensación de una distribución depende de la respuesta instantánea, la capacidad de generación VAR ilimitada y la absorción de los compensadores en derivación empleados, que deben permanecer en sincronía con la fase predominante de los voltajes de segmento y mantener la amplitud de la tensión de transmisión predefinida, independientemente de la variación de la carga. Sin embargo, tal sistema es demasiado complejo y costoso para ser práctico, especialmente si se consideran los requisitos de estabilidad y fiabilidad del sistema de transmisión [11].

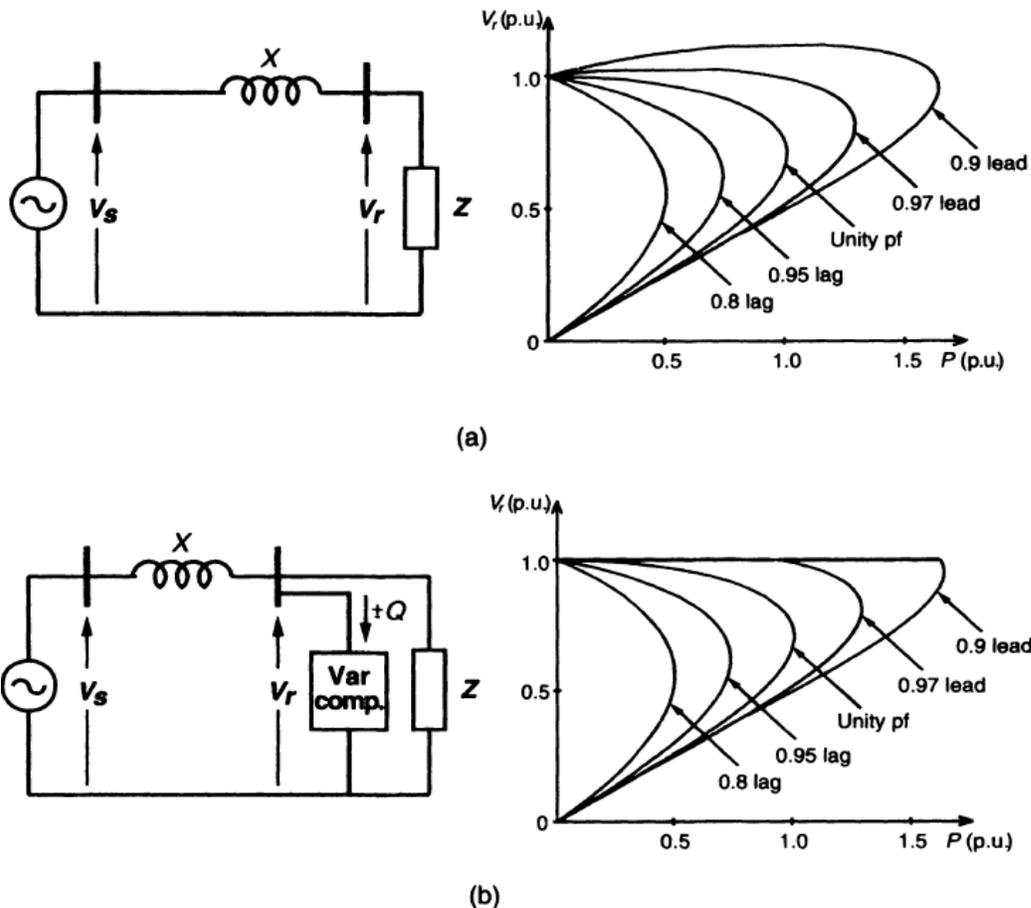


Figura 8 Análisis de voltaje vs potencia en un Sistema radial a) Sin compensación de reactivos b) Con compensación de reactivos [11].

### Compensación reactiva en el final de la línea para evitar la inestabilidad de voltaje

Un sistema radial con línea de reactancia  $X$  e impedancia  $Z$ , se muestra en la figura 8(a) en conjunto con el voltaje terminal  $V$ , versus la potencia  $P$  en varios factores de potencia, que van desde 0.8 en atraso y 0.9 en adelante. El "punto de la nariz" en cada grafica dada por un factor de potencia específica, representa la inestabilidad de voltaje correspondiente a esa condición de sistema. El límite de estabilidad de voltaje disminuye con cargas inductivas y aumenta con cargas capacitivas [11].

Las características del circuito de la estructura radial indican claramente que la compensación reactiva puede efectivamente regular el voltaje terminal y aumentar el límite de estabilidad del voltaje suministrado a la carga reactiva como se ilustra en la figura 8(b). Es evidente que para una línea radial en el final se experimenta la mayor variación de tensión, por lo cual es la mejor ubicación para el compensador. A diferencia el punto medio que es el lugar más eficaz para la línea de interconexión de dos buses del sistema de corriente alterna [11].

## Aplicación

La compensación en derivación en esencia realiza modificaciones de tensión en el sistema mediante los compensadores conectados en paralelo. El método es ampliamente utilizado en dos casos específicos que son la mejora de la estabilidad de un sistema de transmisión y en la elevación del factor de potencia y estabilidad de tensión en una carga, para ello es necesario un control adecuado.

Existen cuatro tipos de sistemas compensadores en derivación los cuales son:

- Reactor controlado por tiristor (TCR).
- Capacitor controlado por tiristor (TSC).
- Compensador de VAR estático (SVC).
- Compensador avanzado de VAR estático (STATCOM).

### 1.3.2 Compensadores serie

En principio ideal un compensador serie es un voltaje conectado en la mitad de una línea de transmisión presentado en la figura 19, como una fuente de voltaje  $V_c$ , al introducir el voltaje  $V_c$  en serie con la línea de transmisión se puede controlar el flujo de corriente, y con ello la transmisión de potencia del extremo de transmisión al extremo de recepción.

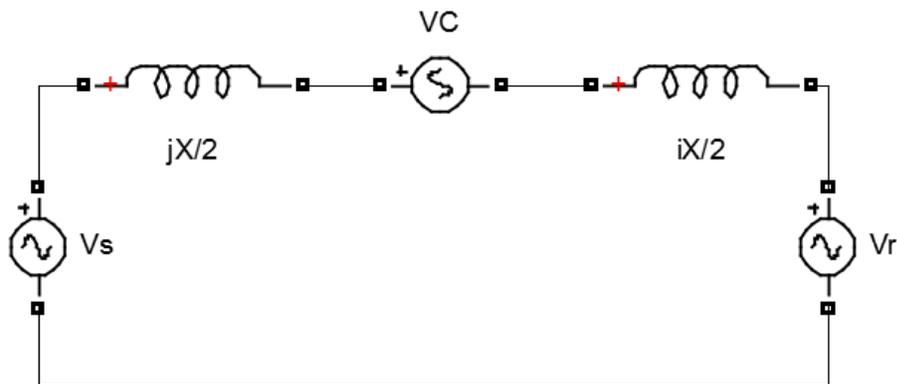


Figura 9 Compensado serie ideal

Cuando el voltaje esté en cuadratura de fase con la corriente de línea, el compensador serie no puede suministrar ni absorber potencia activa sólo suministra o consume potencia reactiva variable. Eso significa que la impedancia equivalente capacitiva o inductiva puede reemplazar a la fuente de voltaje  $V_c$ , por lo cual la

impedancia equivalente de la línea de transmisión está dada por la ecuación 12 donde  $X_{compensada}$  es positiva para una compensación capacitiva y negativo para una compensación inductiva.

$$X_{eq} = X - X_{compensada} = X(1 - r) \quad (12)$$

La variable  $r$  determina el grado de compensación donde  $0 \leq r \leq 1$  y es determinado por la ecuación 13.

$$r = \frac{X_{compensada}}{X} \quad (13)$$

Al modelar el comportamiento del sistema de potencia mostrado en la figura 11, se puede determinar las características de la potencia activa y reactiva en función del voltaje, impedancia y ángulo ( $\delta$ ) existente en los voltajes  $V_s$  y  $V_r$ , para ello se ha considerado iguales las magnitudes de las tensiones  $|V_s| = |V_r| = V$  y el sistema de potencia sin pérdidas, del diagrama fasorial y las consideraciones se obtienen las ecuaciones 14 y 15 [9],[10],[11].

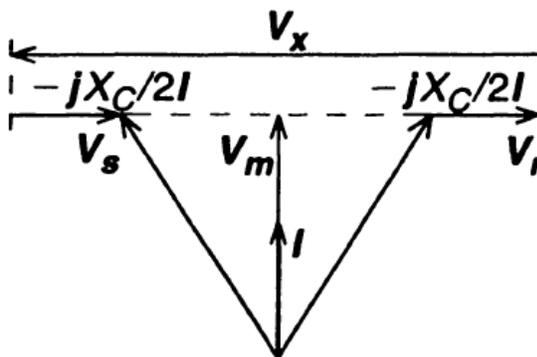


Figura 10 Diagrama fasorial

La ecuación 14 describe el aumento de la potencia activa transmisible en función del grado de compensación, este fenómeno es analizado en la figura 21 que representa una compensación capacitiva. La ecuación 14 indica que una impedancia reactiva grande en serie de una línea de transmisión larga puede limitar la transmisión de la potencia. En este caso, la impedancia del capacitor compensador serie puede anular una parte de la reactancia de la línea y en consecuencia se reduce la impedancia efectiva de transmisión.

$$P_s = \frac{V^2}{X_L(1 - r)} \text{Sen}(\delta) \quad (14)$$

$$Q_c = \frac{2V^2 r}{X_L(1-r)^2} (1 - \cos(\delta)) \quad (15)$$

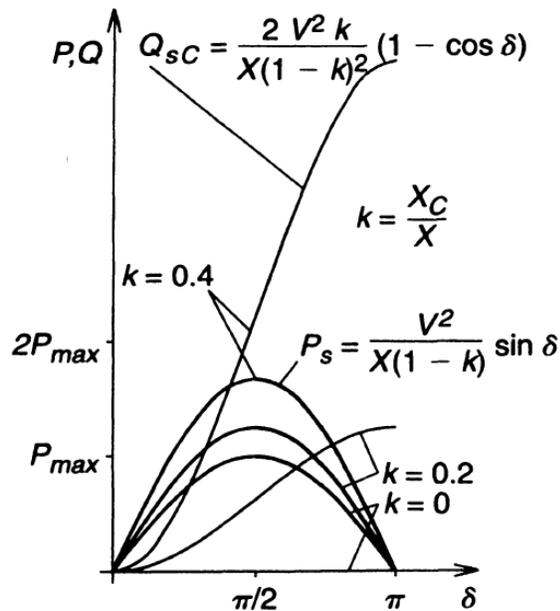


Figura 11 Potencia en función del ángulo  $\delta$

La figura 21 muestra que a mayor proporción del grado de compensación  $r$  es posible elevar la potencia que se puede transmitir drásticamente, y la potencia reactiva  $Q$  suministrada por el capacitor en serie aumenta en función de  $s$ .

### Estabilidad del voltaje

La compensación capacitiva en serie también puede utilizarse para reducir la impedancia reactiva en serie, reduciendo la variación de tensión de recepción final y la posibilidad de colapso de tensión. Esto se observa en el análisis de un sistema radial con reactancia de la línea de alimentador  $X$ , compensando con la reactancia  $X_c$  y una impedancia de carga  $Z$  como se muestra en la figura 20(a). El voltaje terminal normalizado correspondiente  $V$ , versus la potencia  $P$  en por unidad con factor de potencia de 1, 0.5 y 0.75, la compensación capacitiva serie es presentada en la figura 20(b). El "punto de la nariz" en cada curva es presentado para un nivel específico de compensación y representa la inestabilidad de voltaje. Observe que la compensación serie capacitiva puede efectivamente aumentar el límite de estabilidad de voltaje, mediante la cancelación de una parte de la reactancia de la línea, y de este modo proporcionar una fuente de tensión con pocas variaciones para la carga. Para aumentar el límite de estabilidad de la tensión de transmisión aérea la compensación serie es mucho más eficaz que la compensación en derivación de la misma clase de MVA [11].

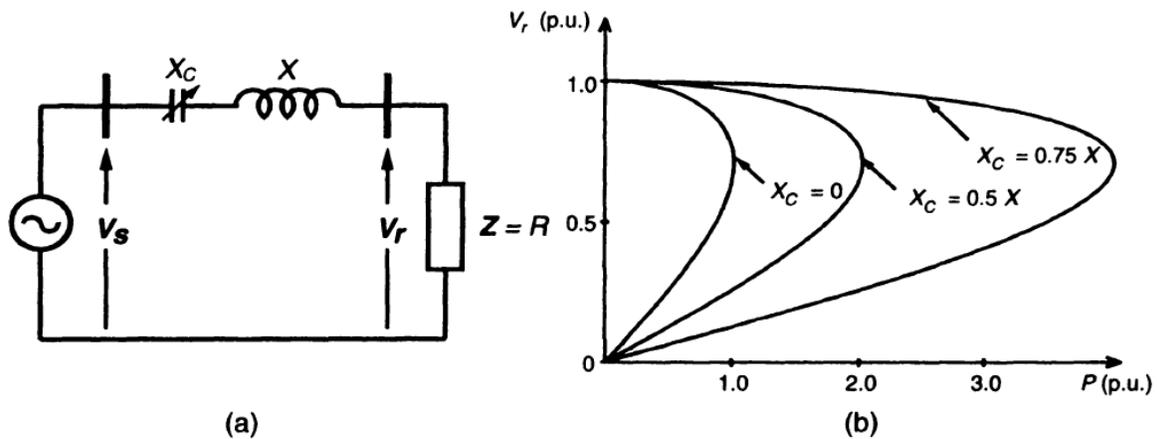


Figura 12 a) Sistema radial de potencia con compensación. b) Análisis de voltaje vs potencia el sistema radial [11].

### Aplicación:

El compensador de serie se aplica principalmente para resolver los problemas de flujo de potencia. Estos problemas pueden estar relacionados con la longitud de la línea o la estructura de la red de transmisión [11].

La compensación capacitiva serie fija o controlada también se puede utilizar para minimizar la variación de voltaje final de las líneas radiales y evitar el colapso de voltaje. La compensación Serie, controlada adecuadamente para contrarrestar los cambios de la máquina que prevalece, puede proporcionar una mejora de estabilidad transitoria significativa para los sistemas de post-falla y puede ser muy eficaz en la oscilación de potencia de amortiguación.

Apropiadamente estructurado y compensación serie controlada puede ser aplicado sin el peligro de resonancia sub-síncrono para lograr la plena utilización de líneas de transmisión [11].

Existen cuatro tipos de sistemas compensadores en serie los cuales son:

- Capacitor serie conmutado por tiristor (TSSC)
- Capacitor serie controlado por tiristor (TCSC)
- Capacitor serie controlado por conmutación forzada (FCSC)
- Compensador serie de VAR estático (SSVC)
- SSVC avanzado

### 1.3.3 Compensador por ángulo de fase

La compensación por ángulo de fase es una fuente de voltaje de con amplitud y ángulo de fase controlables en la cual el flujo de potencia se controla mediante el ángulo de fase, este compensador es un caso especial del compensador serie.

El principio de la regulación de voltaje es presentado en la figura 31 en el cual la tensión de la línea es elevada en un  $\Delta v$  de igual ángulo, causado por la variación automática de los taps de un transformador trifásico en el cual únicamente se produce una variación en la tensión como se muestra en el diagrama fasorial de la figura 31c.

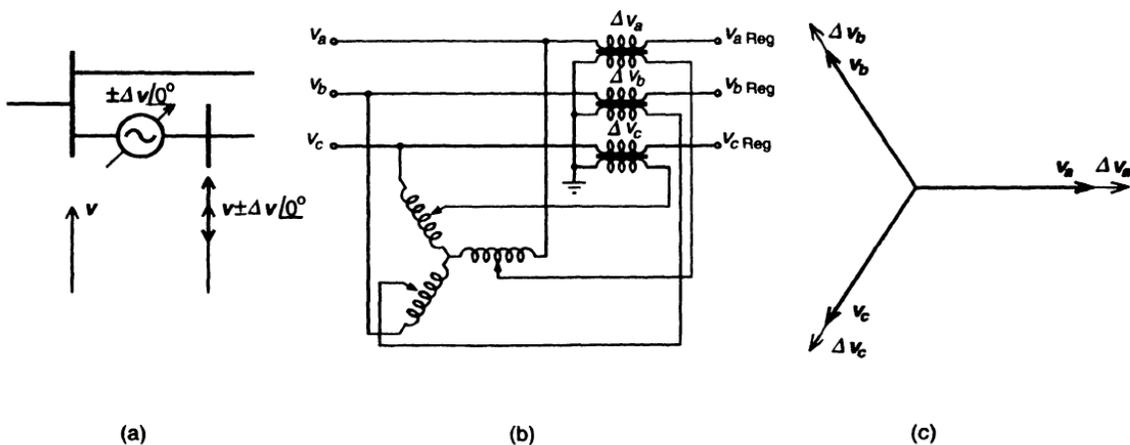


Figura 13 Concepto e implementación básica de un regulador de voltaje [11].

El control de ángulo de fase para tener se muestra en la figura 13 en el cual se realiza una de ángulo de fase de  $\pm 90^\circ$  con respecto a la tensión del sistema. Con esta disposición, la tensión inyectada va a cambiar el ángulo de fase predominante de la tensión del sistema. Una posible disposición para el control de ángulo de fase se muestra esquemáticamente en la figura 13 (b) con el diagrama de fasorial correspondiente en la Figura 13 (c). Para relativamente pequeños ajustes angulares, el cambio angular resultante es aproximadamente proporcional a la tensión inyectada, mientras que la magnitud de la tensión permanece casi constante. Sin embargo, para grandes ajustes angulares, la magnitud de la tensión del sistema aumentara apreciablemente, La magnitud de la tensión podría mantenerse independiente del ajuste angular por una disposición de devanado más complejo. Sin embargo, debido a su relativa simplicidad un transformador elevador en cuadratura (QBT) se utiliza típicamente.

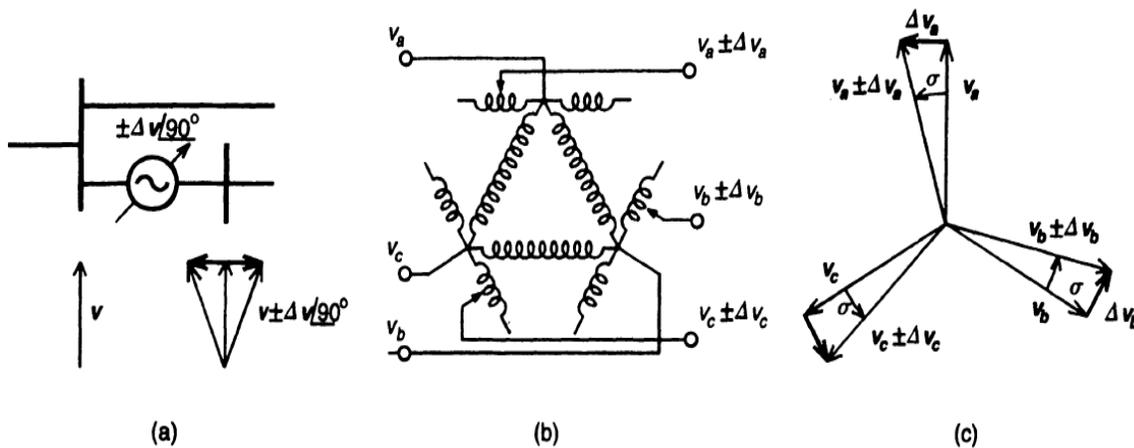


Figura 14 Concepto e implementación básica de un regulador ángulo de fase [11].

### Aplicación:

Los reguladores de ángulo de fase se aplican principalmente para la gestión de flujo de potencia, es decir, para controlar la línea de carga y mitigar los flujos de bucle. Los reguladores de tensión se utilizan para flujo de potencia reactiva y de control de voltaje terminal. Su capacidad de funcionamiento es vital para el control de flujos de potencia de bucle real y reactivo. Los reguladores de voltaje juegan un papel importante en los sistemas de sub-transmisión y distribución en el mantenimiento de los niveles de voltaje de operación. Los reguladores de ángulo de fase, con capacidad de control adecuada para contrarrestar los cambios de la máquina que prevalece, pueden mejorar la estabilidad transitoria y proporcionar energía de oscilación de amortiguación [11].

### 1.3.4 Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC)

El UPFC es el compensador de mayor complejidad, y puede funcionar en cualquiera de los modos compensadores, lo que es la razón de su nombre. En la figura 33 y 34 se ilustra la posibilidad de utilizar múltiples métodos para compensar reactivos lo que en esencia es el principio del UPF que consiste en utilizar las ventajas de los diferentes sistemas.

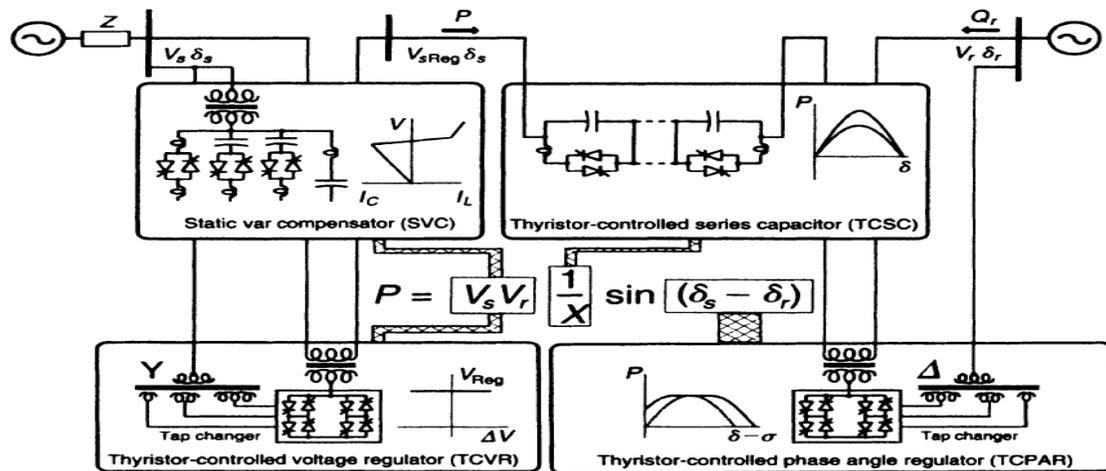


Figura 15 . Grupo de los controladores FACTS controlados por tiristores [11].

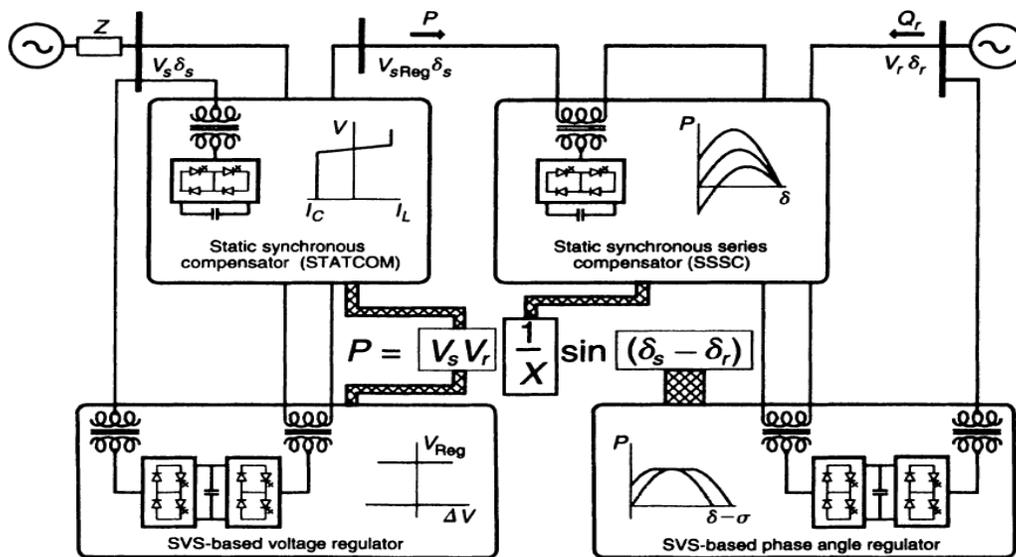


Figura 16 Grupo de los controladores FACTS basados en convertidores de voltaje [11].

#### 1.4 Criterios de selección de la tecnología FACTS compensador

Los criterios para la selección del compensador están en función de la aplicación, que en este caso es mejorar la estabilidad de la tensión en el extremo receptor y el factor de potencia, partiendo de este punto es posible eliminar gran cantidad de los compensadores analizados debido a que en la aplicación planteada el compensador

no mejoraría la operación de una línea de transmisión, la decisión se limita a seleccionar la compensación en serie o en derivación.

Los enfoques de la compensación serie y en derivación son en esencia diferentes, el compensador de serie es una recíproca del compensador en derivación. El compensador de derivación es funcionalmente una fuente de corriente reactiva controlada que está conectada en paralelo con la línea de transmisión para controlar su tensión. El compensador de serie es funcionalmente una fuente de tensión controlada, que está conectado en serie con la línea de transmisión para controlar su corriente. Esta reciprocidad sugiere que los compensadores de derivación tienen un compensador de serie correspondiente. El compensador de serie puede ser implementado ya sea como una impedancia reactiva variable o como una fuente de tensión controlada en serie con la línea. Debido a esta dualidad entre la derivación y la serie compensadores [11].

Es decir, en la compensación en derivación el parámetro de referencia básica es la tensión de transmisión y en compensación serie es la corriente de línea. Por lo tanto, la operación del compensador de derivación se ve desde la perspectiva de la tensión de transmisión y que el compensador de serie desde la perspectiva de la corriente de línea [10].

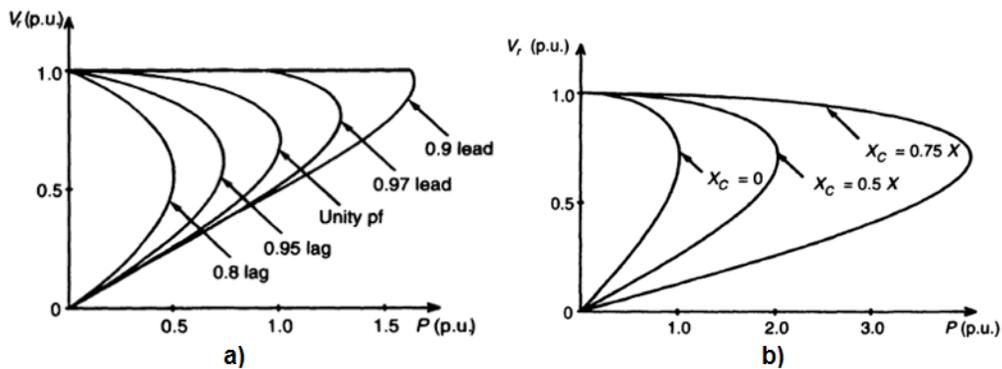


Figura 17 Tensión vs Potencia a) Compensación en derivación b) Compensación serie [10].

La teoría indica que la compensación derivación y en series elevan considerablemente la estabilidad de la tensión, pero la compensación en derivación en mayor medida que la compensación serie como se muestra en la figura 35, lo anteriormente descrito es concluido por Siemens según los estudios y practicas experimentales realizadas como se observa en la figura 36.

Principio	FACTS	Esquema	Impacto en el sistema		
			Flujo de carga	Estabilidad	Control Voltaje
Variación de la impedancia de línea : Compensación Serie	FSC		●	● ● ●	●
	TPSC		●	● ● ●	●
	TCSC		● ●	● ● ●	●
Control de Voltaje : Compensación Paralela	SVC		○	● ●	● ● ●
	STATCOM		○	● ●	● ● ●
Control flujo-carga	HVDC (B2B, LDT)		● ● ●	● ● ●	● ●
	UPFC		● ● ●	● ● ●	● ● ●

Influencia : \*

- minima
- pequeña
- ● media
- ● ● alta

\* Basado en estudios y práctica experimental

Fuente :

**Figura 18 Comparación de compensadores Siemens**

Por lo cual se puede selección la compensación en derivación como el método apropiado para implementar en la aplicación.

### 1.5 Estado del Arte

➤ En el trabajo “Modelamiento y Simulación de Dispositivos FACTS para Estudios Eléctricos de Estado Estable” presentado por Juan Pablo Rivera Barrera para optar por el título de Magíster en Ingeniería Énfasis en Energética, se realiza la selección de dispositivos FACTS tipo UPFC, (Unified Power Flow Controller) en el cual se plantea la implementación de este modelo en un software para estudios eléctricos en sistemas de potencia con flujos de cargas en el cual se describen y validan la eficiencia de los modelos obtenidos para el análisis avanzado de sistemas de potencia con dispositivos FACTS [19].

➤ En el artículo “The impact of serial controllable FACTS devices on voltage stability” presentado por Samo Gasperic y Rafael Mihalic ya se empieza a profundizar en los modelos matemáticos utilizados para el cálculo de la estabilidad de tensión en un grupo de barras de carga única, realizando la comparación entre los métodos de compensación FACTS como lo son el compensador en serie controlable (CSC) y el compensador estático síncrono en serie (SSSC) revisando su impacto en la estabilidad de tensión en un sistema y concluyendo cual presenta

mayores ventajas en los diferentes niveles de tensión[20].

➤ En el artículo Distributed FACTS—A New Concept for Realizing Grid Power Flow Control (FACTS Distribuidos Nuevo Concepto para Realización de Control de Flujo de Poder en la red eléctrica) de Deepak Divan and Harjeet Johal muestra los Sistemas de Transmisión distribuidos flexibles AC (D-FACTS), dispositivos usados al controlar el flujo de potencia en las redes de transmisión para aliviar la congestión y límites de flujo. El alto costo y preocupaciones de fiabilidad han limitado el despliegue extendido de soluciones D-FACTS. Este artículo introduce el concepto de FACTS Distribuidos (FACTS-D) como un acercamiento alternativo a la realización del control de flujo de poder rentable. A modo de ejemplo, muestran una impedancia de serie distribuida (DSI) y un compensador de serie distribuido estático (DSSC) que puede ser acortado sobre una línea de conducción eléctrica existente y puede, dinámicamente y estáticamente, cambiar la impedancia de la línea para controlar el flujo de potencia. [21]

➤ El artículo Power Flow Control with Distributed Flexible AC Transmission System D-FACTS (Control de Flujo de poder con Sistema de Transmisión de corriente alterna Distribuido Flexible D-FACTS) de los autores Catherina M. Rogers, Miembro de Estudio, IEEE, Thomas J. IEEE. Nos dan una mirada de estos dispositivos y sus beneficios potenciales para la operación del sistema de potencia. Este documento ilustra la flexibilidad de control que es alcanzable con dispositivos D-FACTS. El impacto de la instalación de dispositivos DFACTS se examina mediante el estudio de la sensibilidad de la energía, cantidades del sistema tales como la magnitud de tensión, ángulo de tensión, autobús inyecciones de energía, flujos de alimentación de línea, y las pérdidas de potencia reales con respecto a la impedancia de la línea.

Los estudios nos permiten cuantificar la cantidad de dispositivos de control D-FACTS y lugares adecuados para instalarlos el control de flujo de la línea. Logrando los objetivos de flujo de línea deseada. [22]

## CAPÍTULO 2. METODOLOGIA.

### 2.1 Análisis del Marco regulatorio

La normatividad vigente y aplicable en Colombia analiza el 10% de regulación de tensión, pero profundizando en el fundamento de la normativa se puede concluir que principalmente es debido a que referencia principal es la normativa internacional en este caso es el estándar IEEE 519 en el cual se analiza el 10% como el límite para evitar reducciones y elevaciones de tensión pero en un periodo de tiempo limitado por lo cual no es un valor regulatorio de la tensión en el estado estacionario aceptable, debido a que es demasiado elevado y más si se trata de una red de distribución en media tensión dado que no solo se deben tener en cuenta las caídas de tensión de la red de media tensión sino que a su vez se tiene que tener presentes las caídas de tensión en la red de Baja Tensión y sumadas estas dos serán el reflejo del servicio prestado al usuario final. Este es el panorama nacional y que rige a las empresas comercializadoras y prestadoras del servicio, por lo cual no es algo que garantice una buena calidad del servicio a los usuarios finales en especial a los del sector rural colombiano.

La empresa electrificadora del departamento norte de Santander CENS, para mantener un porcentaje de regulación dentro de los parámetros establecidos, introduce en su normativa los siguientes límites de regulación a los nuevos proyectos presentados:

#### Límites de Regulación de voltaje.

Nivel de tensión	Área	Límites de regulación de tensión
Circuitos de baja tensión	Zona urbana	3%
	Zona Rural	3%
	Alumbrado público	3%
	Acometidas	2 %

Nivel de tensión	Área	Límites de regulación de tensión
Circuitos de media tensión	Para expansión de redes derivadas de un circuito alimentador principal	Menor o igual al 1 % a partir del barraje de la subestación de distribución
	Para acometidas de uso exclusivo	Menor o igual al 0.03% a partir del punto de conexión

Tabla 1 . Límites de regulación de voltaje [23]

La regulación máxima desde la acometida hasta el punto más lejano del circuito ramal debe ser inferior al 5% [23].

Todo lo anterior resumido en la Tabla 1. aplica a todo diseño y proyecto a ser derivado de la red existente de CENS previendo las caídas de tensión ya existentes y propias del sistema de distribución, y para el caso que nos ocupa del circuito PAMC2 de la subestación pamplona, buscando finalmente que la suma de todas las caídas no supere el 10% normado.

## 2.2 Diagnóstico inicial

### 2.2.1 Estado actual del alimentador

En condiciones de carga máxima en el alimentador PAMC2, teniendo como base los datos estadísticos de los últimos seis meses extraídos del SPARD y el OMS donde se consolidan los consumos por usuario, la cargabilidad de los transformadores, las tensiones máximas y mínimas de la celda PAMC2, las magnitudes presentadas son las siguientes mostradas en la tabla 2 se puede destacar el factor de potencia relativamente elevado en un valor de 0.94.

CARACTERÍSTICAS	<u>PAMC2</u>
Carga instalada (KVA)	11463
S Máxima (kVA)	2643.61
P Máxima (kW)	2485
Q Máxima (kVAR)	879
Factor de potencia	0.94
Factor de carga	0.5679
Tensión en Barras (KV)	13.559

Tabla 2 Estado del alimentador PAMC2 en condiciones actuales de máxima carga

### 2.2.2 Alimentador PAMC2

La tabla 3 muestra el estado actual del circuito PAMC2 en términos de corriente, potencia activa y perdidas por conducción en los conductores de transmisión en lo cual porcentaje de perdidas es relativamente bajo.

ALIMENTADOR	Corriente (A)	Potencia (KW)	Pérdidas de Potencia kW	% Pérdidas de Potencia KW
PAMC2	116.8	2485	41.28	1.66%

Tabla 3 Estado de PAMC2 en estado actual

La tabla 4 de observar la tensión de barra o tensión promedio a la salida de la subestación pamplona comparada con la tensión más baja presentada en el circuito, y de allí el porcentaje de caída de tensión en lo cual la tensión nominal del circuito

es de 13.8kV, por lo cual se puede analizar una reducción de tensión del sistema la barra de la subestación, y es alarmante la tensión en el punto más lejano pese a que las magnitudes mostradas en las tablas 2 y 3 sugerian la no existencia de un problema.

ALIMENTADOR	ESTADO ACTUAL DEL ALIMENTADOR		
	Tensión en la barra de salida	Tensión punto más lejano kV	% Caída de voltaje en punto más lejano
PAMC2	13.559	12.3	11.1%

Tabla 4 Tensiones en el alimentador PAMC2 en estado actual.

La figura 19 muestra el plano del circuito en su totalidad en el cual se pueden discriminar la estructura del circuito radial, la dimensión y los municipios a los cuales alimenta.

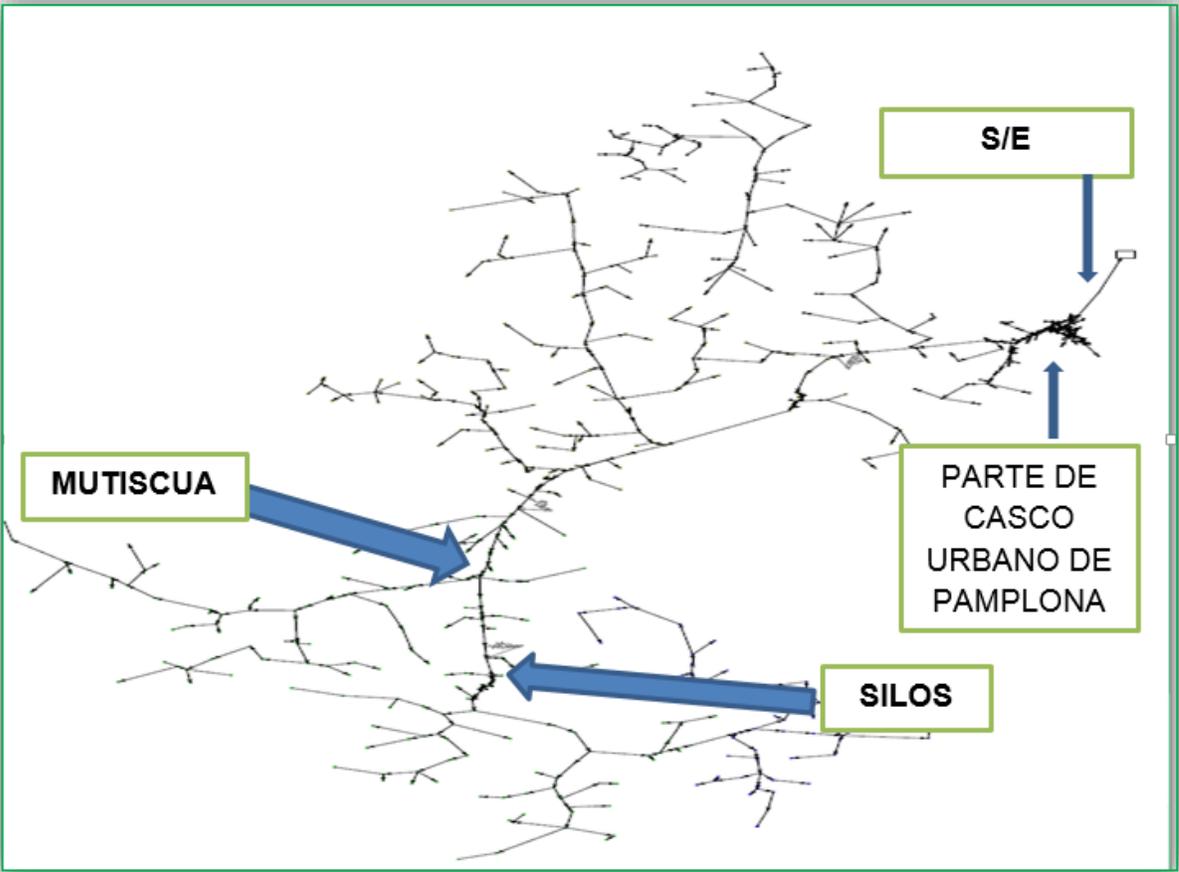


Figura 19 Plano red MT circuito PAMC2

La figura 20 detalla el perfil de tensión en función de la distancia en lo cual el mínimo punto de tensión se encuentra en el punto más lejano del circuito mostrado en la figura 19.

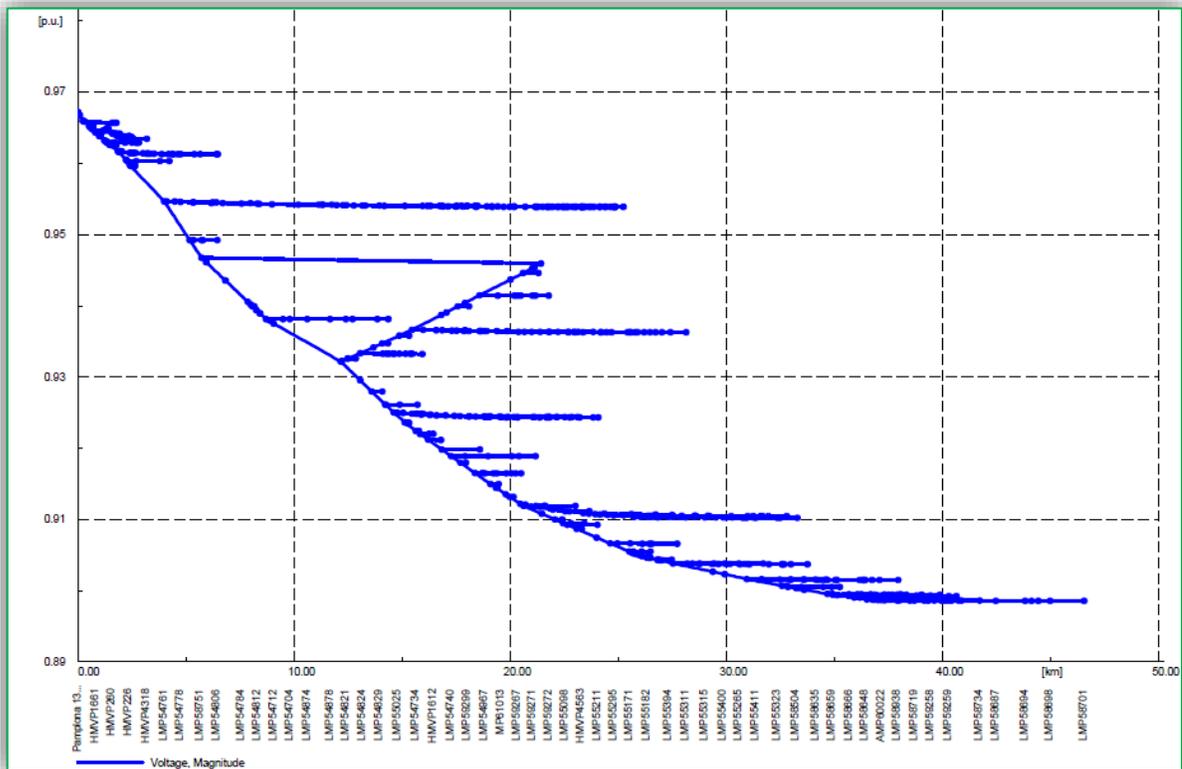


Figura 20 Perfil de tensión circuito PAMC2

La tabla 5 corresponde a la data o tabla con los datos que nos arroja el programa DlgSILENT que es el software con el que como lo mencionaba al principio se trabajara analizara y simulara todo lo concerniente al circuito.

Name	In Folder	Grid	Maximum Voltage (kV)	Maximum Voltage (p.u.)	Minimum Vol. (kV)	Minimum Voltage (p.u.)	Max. Loading (%)	Losses (MW)	Total Load, A... (MW)	Total Load, Reacti... (Mvar)	Distan... (km)	maximi... (km)	Active Power (MW)	Infeed, Active Po... (MW)	Input Current, Mag... (kA)
FEED_PAMC2-A	Feeder		13.34132	0.9667624	12.40007	0.8986557	30.73878	0.04128	2.497812	0.8875076	0.	0.	2.53910	2.539101	0.1168074
FEED_PAMC3-A	Feeder		13.34685	0.9671633	13.27941	0.9622761	39.49863	0.00965	3.27729	1.344524	0.	0.	3.28694	3.286947	0.1537474
FEED_PAMC4-A	Feeder		13.34725	0.9671923	13.12182	0.9508563	20.98388	0.00608	0.805921	0.3539702	0.	0.	0.81200	0.8120074	0.03837945

Tabla 5 Tabla de datos circuito PAMC2

### 2.3 Análisis del comportamiento de la regulación de tensión

Antes de iniciar el análisis de los datos estadísticos y los obtenidos en la simulación se caracteriza el sistema con datos constructivos más específicos que ayudan a una ubicación del contexto y complementar la información dada en lo referente al circuito

PAMC2 que vamos a estar trabajando. Este circuito cuenta con 71Km de red en media tensión a 13.8kV, tiene instalados 217 transformadores monofásicos, 73 transformadores trifásicos para un total de 290 transformadores; está ubicado en el grupo de calidad 4 Mediante la entrada en vigencia de la resolución CREG 070 de 1998, la cual dio apertura a la introducción en el sector eléctrico la reglamentación en torno a la temática de la calidad de la energía eléctrica suministrada a los usuarios para continuidad en el servicio. [4]

Actualmente la CREG establece que los Grupos de calidad se determinan con base a las siguientes reglas:

**GRUPO 1:** Circuitos, tramos o transformadores ubicados en Cabeceras municipales con una población superior o igual a 100.000 habitantes según último dato certificado por el DANE.

**GRUPO 2:** Circuitos, tramos o transformadores ubicados en Cabeceras municipales con una población menor a 100.000 habitantes y superior o igual a 50.000 habitantes según último dato certificado por el DANE.

**GRUPO 3:** Circuitos, tramos o transformadores ubicados en Cabeceras municipales con una población inferior a 50.000 habitantes según último dato certificado por el DANE.

**GRUPO 4:** Circuitos, tramos o transformadores ubicados en Suelo que no corresponde al área urbana del respectivo municipio o distrito.

LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN RURALES.	TENSIÓN KV	Km	TRAFOS		Grupo de calidad
			2F	3F	
PAMC2	13.8 KV	71	217	73	4

Tabla 6 caracterización del circuito.

Por lo tanto podemos decir que este circuito es en su mayor porcentaje rural aunque no hay que desconocer que le presta servicio en una parte mínima a la ciudad de pamplona, en su totalidad al municipio de Mutiscua y el de silos.

Apoyándonos en el software nuevamente y las facilidades que nos ofrece para el análisis grafico de los circuitos mostraremos la imagen de las zonas con voltajes bajos de acuerdo a la tabla que construimos y en la cual se muestran las tensiones tanto en KV como también en Pu.

La figura 21 muestra el comportamiento de la línea en términos de los valores en por unidad de la tensión.

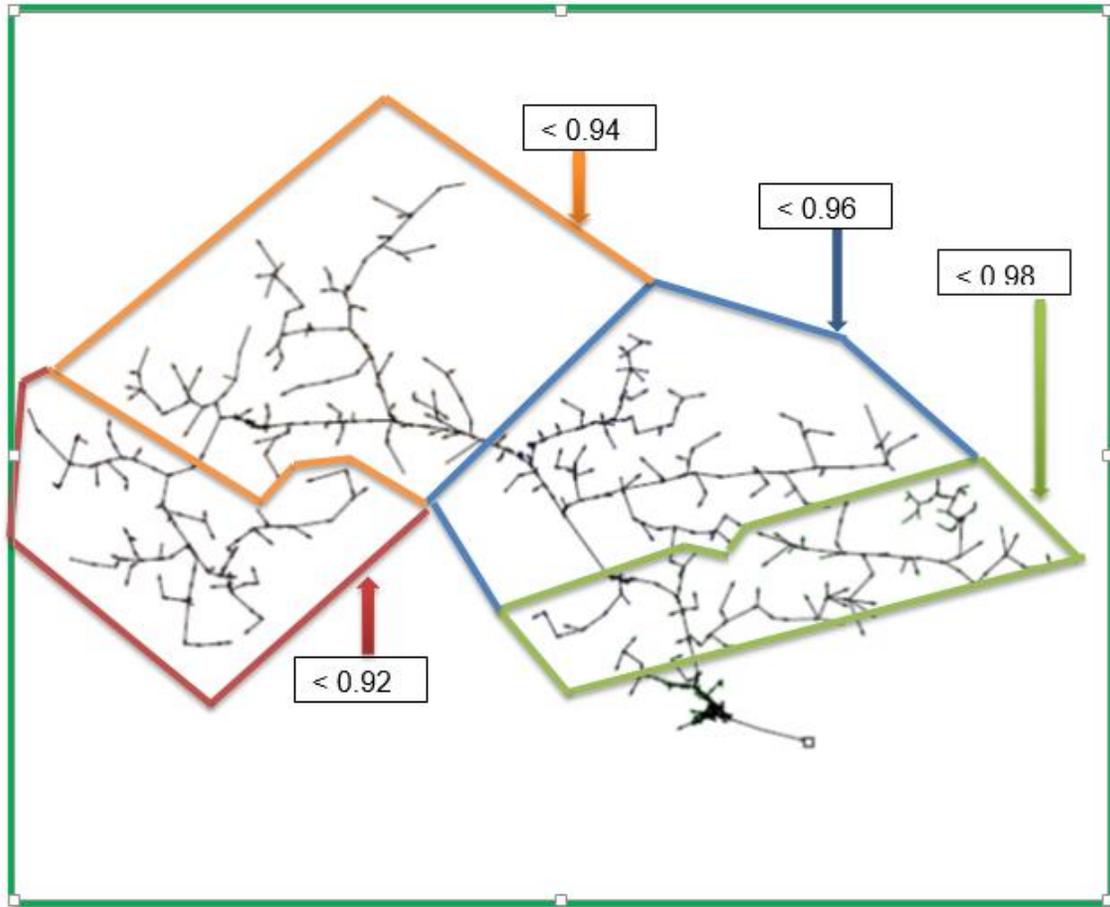


Figura 21 Sectores por caída de tensión.

De otra parte ya caracterizado nuestro circuito, de los datos estadísticos suministrados por la empresa central eléctricas del norte de Santander y luego de la simulación realizada se puede evidenciar que la potencia reactiva generada por las cargas en la red de distribución no son relativamente grandes 875 kVAR, igualmente que el factor de potencia se encuentra en 0.94 el cual es muy bueno para una línea de transmisión.

Corroborando el análisis hecho y teniendo en cuenta las sugerencias de CENS en cuanto a la manera y método de compensación se tiene establecido que se realizara compensación de potencia reactiva cuando en un circuito el factor de potencia este por debajo de 0.9, lo cual no es nuestro caso por ende no aplicaría este tipo de compensación para el circuito seleccionado.

Por lo anterior se identifica que los problemas de regulación de tensión presentados en el circuito se le pueden atribuir a dos factores, el primero el calibre de la red de

distribución, segundo a las grandes distancias del recorrido del circuito y en ambos casos sumado a la inclusión de nuevas cargas las cuales son en su mayoría resistivas para este circuito.

## **2.4 Simulación en DIgSILENT power Factory**

El software que se utilizara para la simulación y análisis de las bases de datos suministrados por centrales eléctricas del norte de Santander será el programa DIgSILENT de cálculo, ya que, es un programa con ayuda de herramienta de ingeniería para el análisis de los sistemas de energía eléctrica industrial, de servicios públicos y comerciales.

Ha sido diseñado como un paquete de software integrado e interactivo avanzado dedicada a sistema de energía eléctrica y el análisis de control con el fin de alcanzar los objetivos principales de la planificación y optimización de la operación [25].

Ahora daremos una pequeña reseña de las funciones más importante y relevante del software que vamos a utilizar por lo que abordaremos algunas de ellas para familiarizarnos con el manejo del software.

### **2.4.1 Interfaz de usuario**

La ventana principal de DIgSILENT posee las siguientes regiones:

1. Barra de la ventana principal
2. Barra de menú
3. Barra de herramientas
4. Espacio de trabajo
5. Ventana de salida
6. Barra de estado

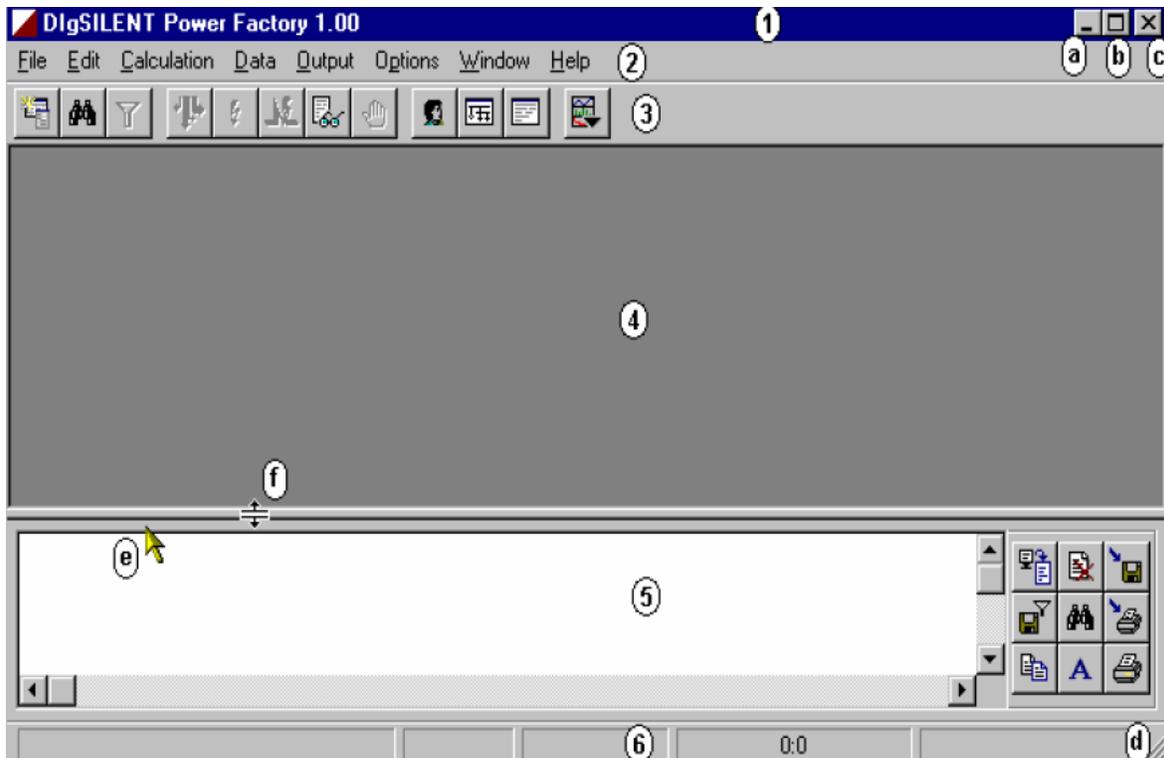


Figura 22 Características de la ventana principal

## 2.4.2 Funciones de simulación Power Factory

Power Factory incorpora una impresionante y continuamente creciente lista de funciones de simulación que incluyen:

- Carga de flujo y análisis de fallas, permitiendo de malla y se mezcla de 1, 2 y 3 fases CA y /o redes de CC.
- Análisis de Redes de Baja Tensión
- Optimización de la Red de Distribución
- IEC Cable Dimensionamiento
- Simulación dinámica
- EMT Simulación
- Análisis de valores propios
- Sistema de identificación
- Análisis de la protección
- Análisis Armónico
- Análisis de fiabilidad
- Análisis de Estabilidad de Voltaje
- Análisis de Contingencia
- Modelado de dispositivos electrónicos de potencia
- Toma de tierra
- A / D Interfaz
- Interfaz para SCADA / GIS / NIS

- Compatibilidad con otros sistemas de software como PSS / E & PSS / T
- Base de datos multiusuario y Contabilidad usuario
- Flujo de Potencia Óptimo

### 2.4.3 Configuración de datos de una subestación.

El diagrama unifilar de CENS muestra los resultados del flujo de carga una vez finalizado en las cajas de resultados de las subestaciones como se muestra en la figura 15, acercando la vista del diagrama unifilar mediante la barra de herramientas antes mencionada.

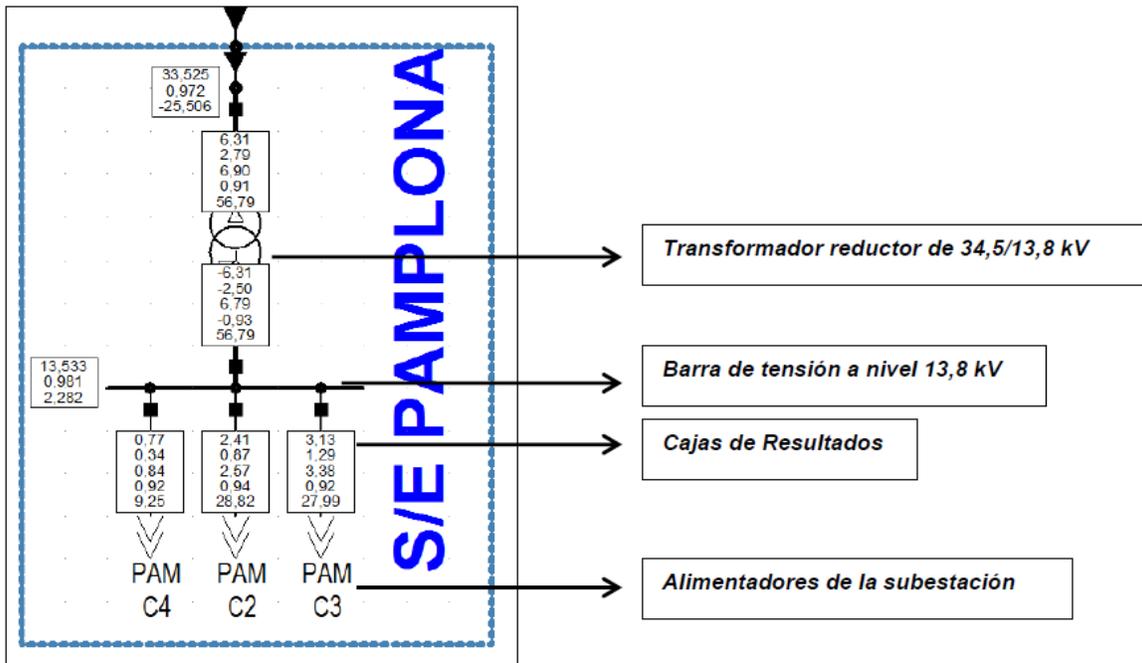


Figura 23 subestación luego del flujo de carga [25]

### 2.4.4 Flujos de carga en DigSILENT

Dentro de las diferentes funciones del Software, encontramos la de realizar el cálculo del flujo de carga, para realizar estos estudios nos dirigimos desde el menú principal y damos Click en el icono  "Calculate load flow" que podemos encontrar en la barra de herramientas principal como observamos en la figura 24.

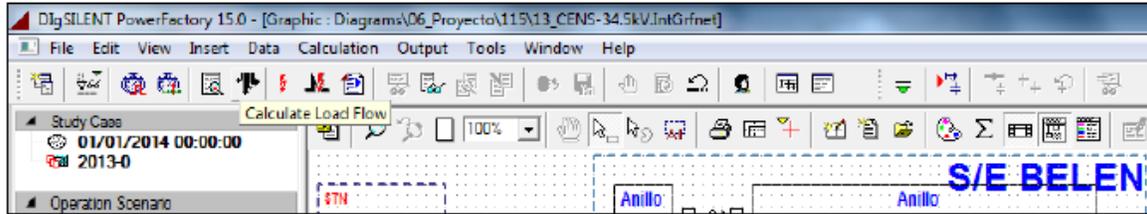


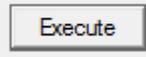
Figura 24 Opción de cálculo de flujo de carga.

Las opciones básicas del flujo de carga derivadas de abrir esta opción se pueden observar en la figura 25.

<ul style="list-style-type: none"> <li>Basic Options</li> <li>Active Power Control</li> <li>Advanced Options</li> <li>Iteration Control</li> <li>Outputs</li> <li>Load/Generation Scaling</li> <li>Low Voltage Analysis</li> <li>Advanced Simulation Options</li> </ul>	<p>Calculation Method</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="radio"/> AC Load Flow, balanced, positive sequence</li> <li><input type="radio"/> AC Load Flow, unbalanced, 3-phase (ABC)</li> <li><input type="radio"/> DC Load Flow (linear)</li> </ul>	<p><b>Representación de red:</b> Nos permite configurar el flujo de potencia balanceado en AC para una fase, desbalanceado para tres fases, o realizarlo en una carga lineal en DC.</p>
	<p>Reactive Power Control</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> Automatic Tap Adjust of Transformers</li> <li><input type="checkbox"/> Automatic Shunt Adjustment</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> Consider Reactive Power Limits</li> <li><input type="checkbox"/> Consider Reactive Power Limits Scaling Factor</li> </ul>	<p><b>Control potencia reactiva:</b> Nos permite habilitar el ajuste automático de los taps del transformador que tengan la opción de cambio automático y/o el tipo Shunt que tenga activada la opción switchable y a su vez controlar los límites de potencia reactiva.</p>
	<p>Temperature Dependency: Line/Cable Resistances</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="radio"/> ...at 20°C</li> <li><input type="radio"/> ...at Maximum Operational Temperature</li> </ul>	<p><b>Control de Temperatura:</b> Nos permite optar por una temperatura en 20°C o la máxima temperatura de operación de las líneas</p>
	<p>Load Options</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Consider Voltage Dependency of Loads</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> Feeder Load Scaling</li> <li><input type="checkbox"/> Consider Coincidence of Low-Voltage Loads</li> </ul> <p>Scaling Factor for</p> <p>Night Storage Heaters <input type="text" value="100"/> %</p>	<p><b>Opciones de carga:</b> Nos permite activar la dependencia de las cargas, escalar la carga del alimentador haciendo un cambio <i>en esta ante modificaciones en el valor medido del alimentador</i> y/o realizar el análisis de coincidencia para cargas de baja tensión.</p>

Figura 25 Configuración del flujo de carga.

Dejando nominalmente las opciones demarcadas anteriormente, realizamos el flujo de carga del sistema de CENS, el cual se realiza masivo para todas las subestaciones y distintos transformadores y alimentadores que lo conforman, dando

Click en la opción "Execute"  , para realizar el flujo de carga bajo el método de Newton Raphson.

La inclusión de nuevas cargas, transformadores, modificación en la demanda eléctrica y/o año de estudio nos hace necesario, tomar estos cambios dentro del flujo de carga o no, para tomar los cambios del sistema en un estudio de flujo de carga seleccionamos la opción "Feeder Load Scaling", como se muestra en la figura 26, para que escale la carga en búsqueda de variaciones.

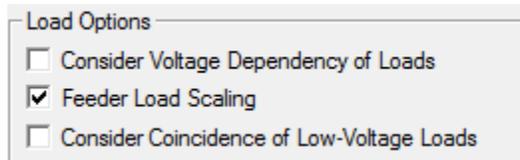


Figura 26 Selección de la opción Feeder Load Scaling.

Al iniciar un nuevo proyecto, el flujo de carga debe realizarse con esta opción para tomar la base de datos en estado nominal, luego de realizar el flujo de carga, establecerá una convergencia o no, la ventana de dialogo nos indica el resultado, en la figura 27, se puede apreciar un flujo de carga con convergencia.

```
DIGSI/info - Iteration 1: → FMVP11280_Regulado 2.06e-001  ∇ 1T08011 1.57e-004
DIGSI/info - Iteration 2: → FMVP11280_Regulado 5.92e-004  ∇ 1T08066 1.36e-005
DIGSI/info - Newton-Raphson converged with 2 iterations.
DIGSI/info - Load flow calculation successful.
-----
DIGSI/info -          Report of Control Condition for Relevant Controllers
-----
DIGSI/info -          Control conditions for all controllers of interest are fulfilled.
```

Figura 27 Flujo de carga con convergencia.

Luego de realizado el flujo de carga damos Click en “Update Database”  , para actualizar la base de datos luego del flujo de carga realizado (Fig. 28), esto solo se hace cuando exista algún cambio en el cual la carga tuvo que ser escalada.

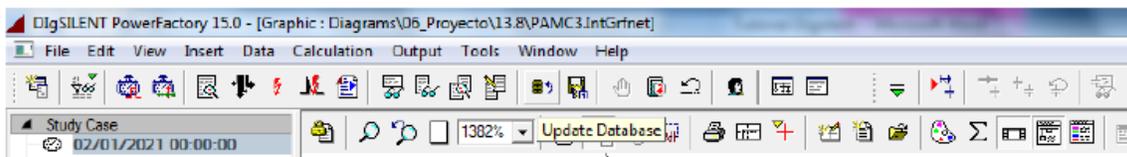


Figura 28 Actualizar la base de datos.

Para concluir revisaremos la manera de hacer la instalación de los reguladores de tensión en el programa.

## 2.4.5 Configuración de Reguladores en la red.

Para incluir un regulador en la red de nivel 2, en la parte izquierda seleccionamos dando Click a el “2- Winding Transformer” , (Fig. 29) el cual es un transformador de 2 devanados el cual será configurado como regulador.



Figura 29 Herramienta de transformador de 2 devanados.

Luego de seleccionado, lo instalamos mediante el diagrama de red del alimentador a simular el regulador, entre los 2 nodos en los cuales estará configurado el regulador como observamos en la figura 30.

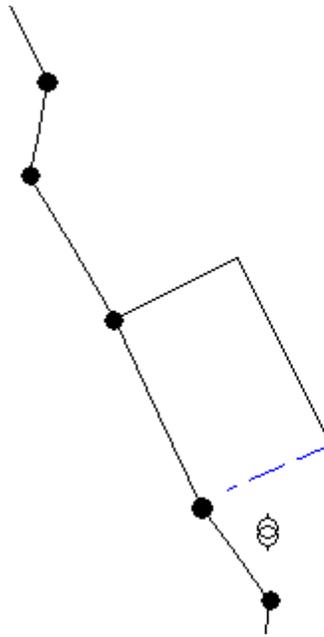


Figura 30 Configuración del regulador en la red.

Luego de haberlo instalado en los 2 nodos en los cuales se configurara el regulador, le damos Click derecho y abrimos el "Edit Data" (Fig. 31)

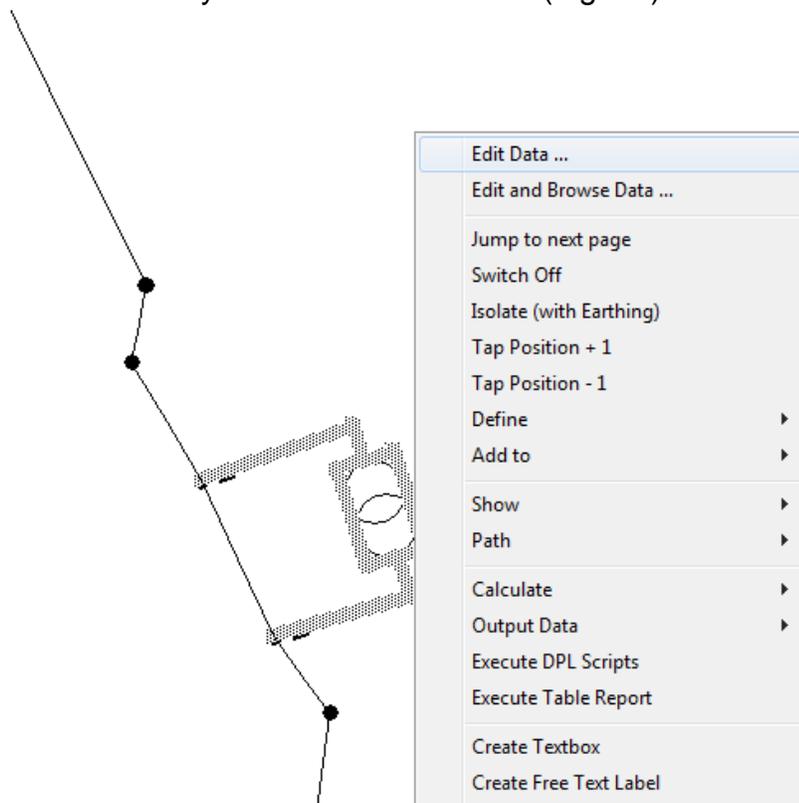


Figura 31 Edit data del transformador.

Nos desplegara la ventana de configuración del transformador de 2 devanados, y allí haremos los ajustes para la configuración del regulador (Fig. 32).

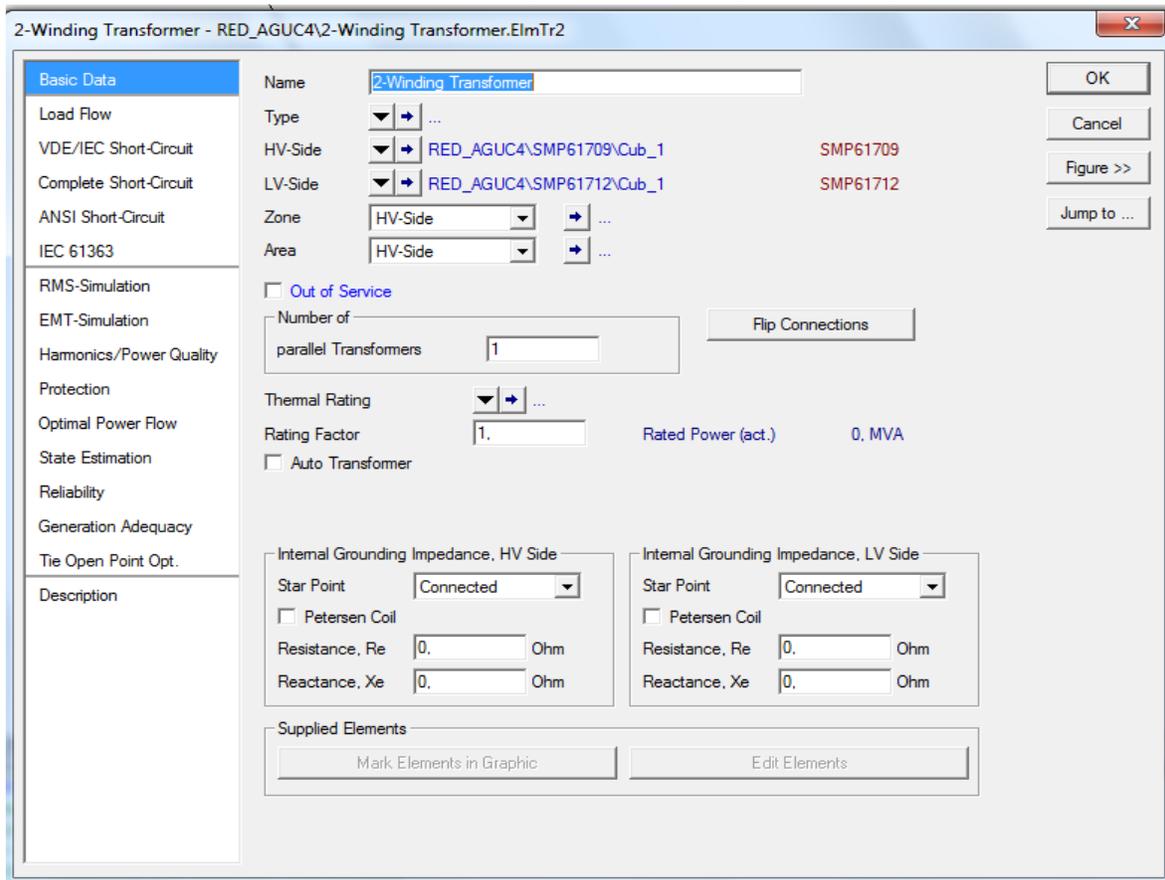


Figura 32 Ventana de configuración del regulador.

Vamos a la pestaña Type, y damos Click en la opción “Select Project Type” (Fig. 33), en la cual especificaremos que se trata de un regulador ideal.

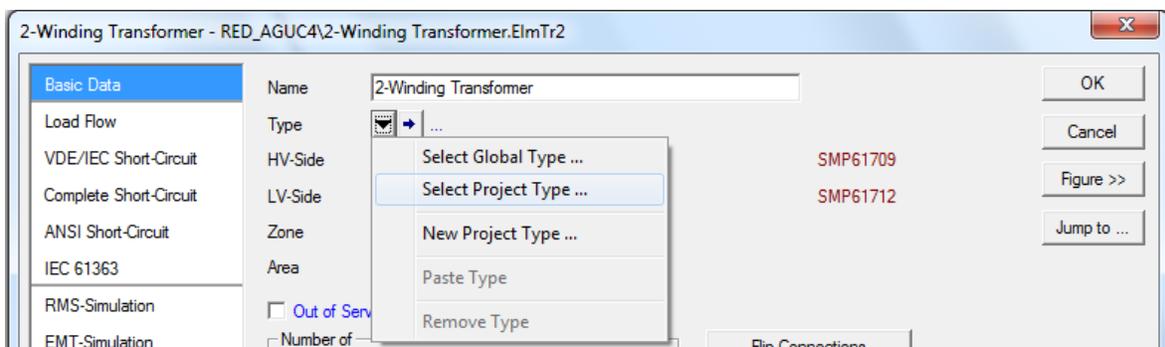


Figura 33 Selección del tipo de transformador.

Nos abrirá una ventana, en la cual desplegaremos la siguiente ruta, la opción de regulador ideal: IEB-632-13\_PE-C3NS/Library/Equipment Type Library/PROYECTO/LIB\_TFR.

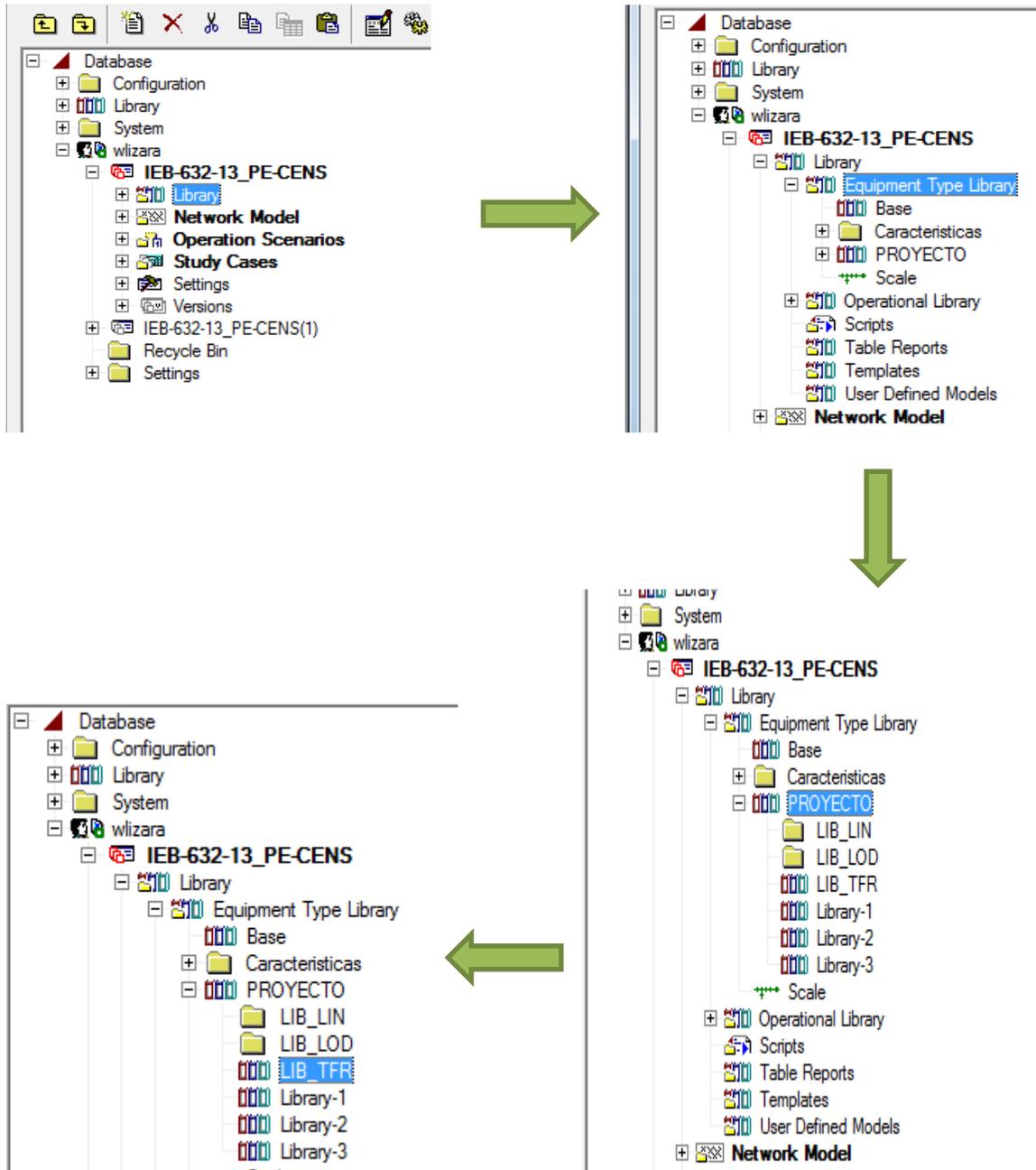


Figura 34 Ruta del regulador ideal.

Luego de encontrada la ruta del regulador ideal nos dirigimos a la parte derecha de la ventana en la cual encontraremos los tipos de trafos de acuerdo a la librería,

seleccionamos el “Regulador-Ideal” y damos Click a la opción “OK”, (Fig. 35), de esta forma quedará configurado como regulador.

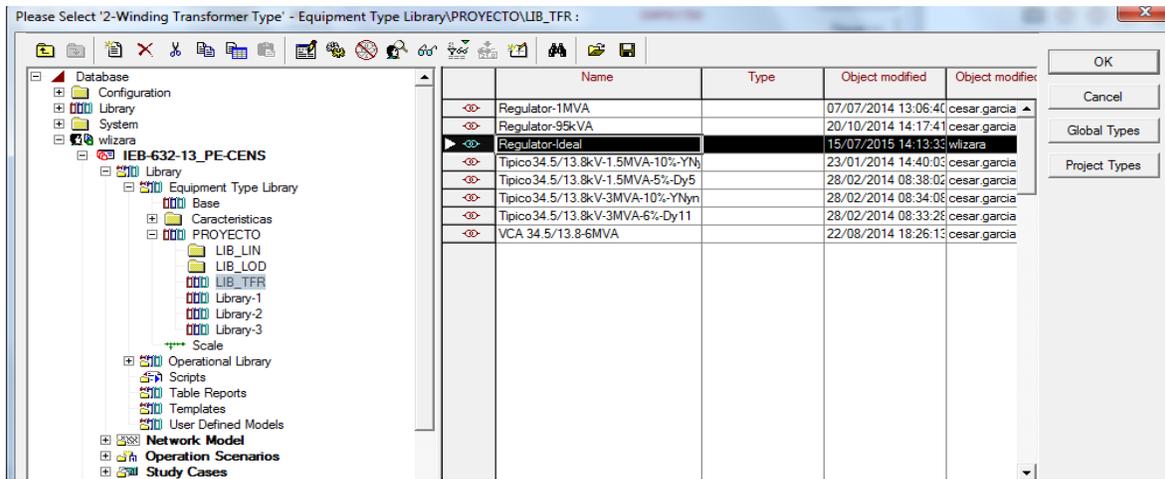


Figura 35 Selección del regulador ideal en la librería.

Luego configuramos el tamaño y frecuencia del regulador dando Click a  en la ventana principal de edición en la opción “Type”.

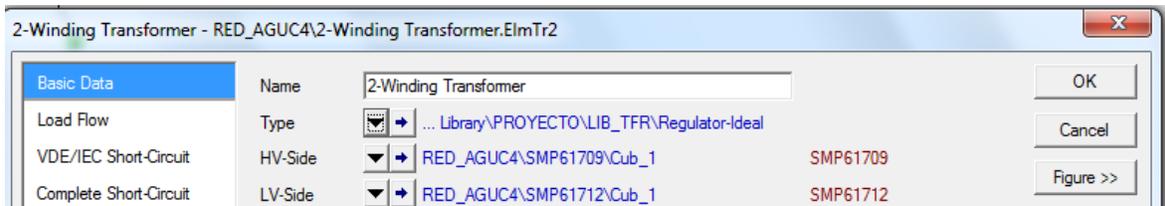


Figura 36 Opción de configuración del regulador.

Nos desplegará la ventana de la figura 37, en la cual realizamos la configuración de frecuencia y potencia del regulador, voltaje y conexión, luego de la edición damos “OK”.

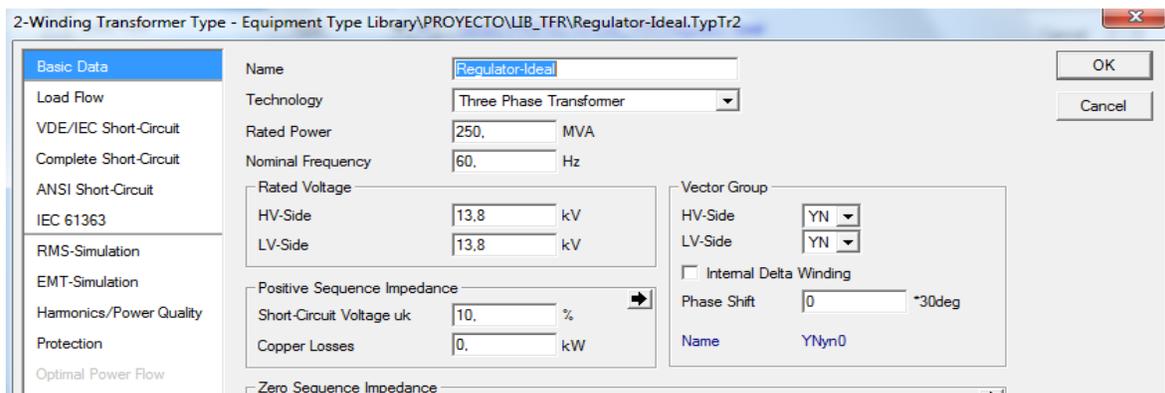


Figura 37 Ventana de configuración del regulador.

Luego nos dirigimos a la pestaña de la ventana principal de edición del regulador, en la opción “Load Flow”, y realizamos el ajuste debido de los taps del regulador, ajustándolo ya sea para su función de elevar o bajar la tensión.

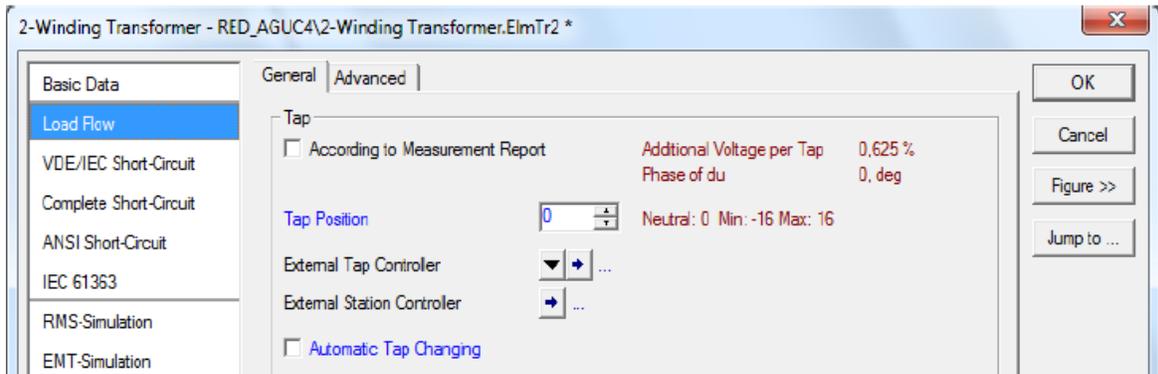


Figura 38 Ajuste del Tap del regulador.

Luego de la configuración de los taps, damos Click a la opción “Ok”, y procedemos a realizar el flujo de carga, y dentro de este consideramos la opción “Feeder Load Scaling”, para tener en cuenta la incidencia de regulador propuesto.

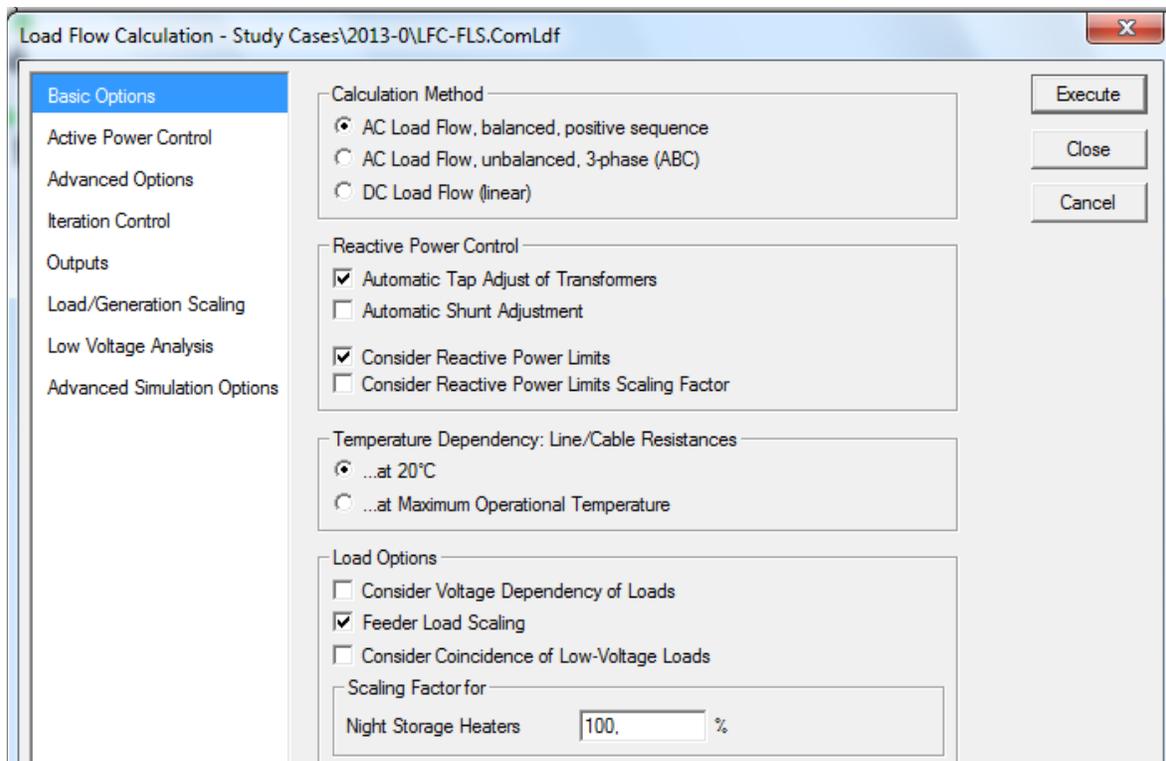


Figura 39 Flujo de carga con Feeder load Scaling para el regulador.

Luego generamos el perfil de tensión de los alimentadores, generalmente como el ejemplo de las figuras 40 y 41, el Tap se ajustó en (+2) para elevar la tensión y en (-2) para que cayera esta.

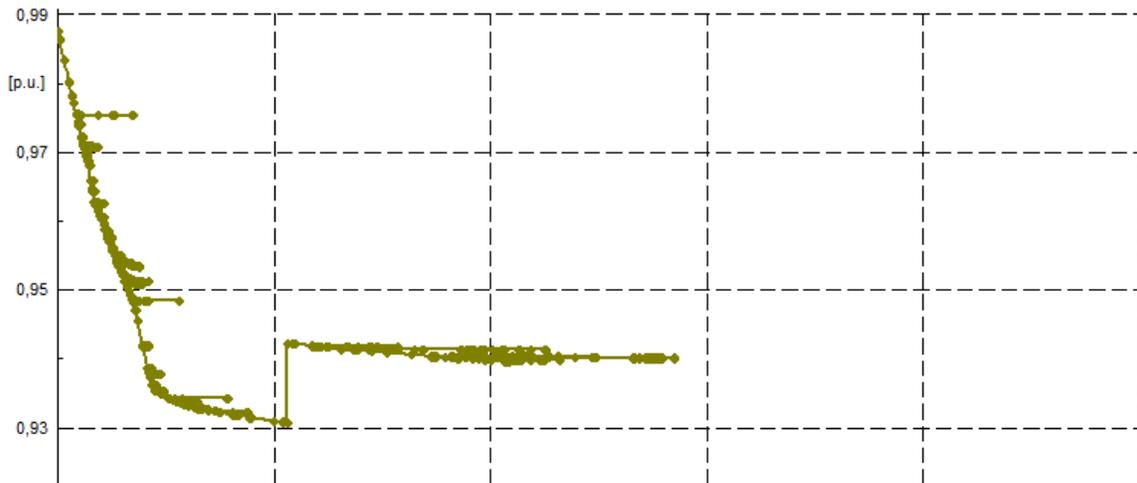


Figura 40 Regulador en Tap (+2).

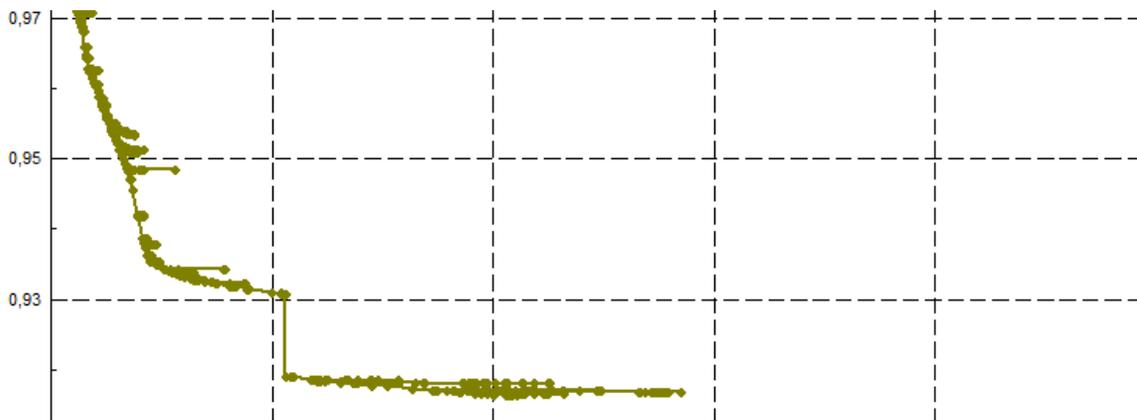


Figura 41 Regulador en Tap (-2).

Luego del recorrido y familiarización con las ventanas y pestañas del software que estaremos trabajando para la simulación y recolección de datos de los resultados obtenidos, pasaremos a hablar sobre la tecnología FACTS, más adecuada para nuestro trabajo y que cumpla con las necesidades identificadas y que pretendemos resolver con este trabajo.

## 2.5 Selección de la tecnología FACTS

Como lo mencionaba líneas arriba no se requiere la compensación capacitiva por lo que de entrada descartaríamos hacer una compensación para la potencia reactiva teniendo en cuenta que el factor de potencia está en 0.94 y que la potencia reactiva es baja 875kVAR eliminando la opción de realizar una compensación de potencia reactiva, en términos de viabilidad se debe insertar un delta de tensión sin realizar aportes de potencia reactiva, considerando que la mayor demanda de potencia se encuentra en la sección de correspondiente a la ciudad de Pamplona.

Otra medida para la mejora en la regulación la obtendríamos si mejoráramos el calibre del conductor de la red buscando bajar la impedancia y sus correspondientes pérdidas el cual se encuentra en aluminio ACSR 2, pero esta opción tendría un proceso largo al igual que una inversión grande de dinero, ya que en principio se requeriría del nuevo trazado de la red y la compra o pago por los derechos de servidumbre, porque al pensar trabajar sobre las mismas estructuras existentes el impacto sería aun mayor ya que se tendría que hacer un sin número de desconexiones para el cambio de la red afectando a los usuarios. Al igual que esta opción se encuentra la construcción de una subestación pero presentaría los mismos inconvenientes de permisos, tiempos de ejecución y costos, por lo tanto no las analizaremos a fondo. Mas pensando en que nuestro trabajo se basa o tiene como objetivo la implementación de la tecnología FACTS.

Teniendo todos los datos encontrados y el análisis hecho se concluye que la mejor solución FACST para mejorar el porcentaje de regulación y la transmisión de potencia es la instalación de un **banco de reguladores de tensión**.

Por lo que ahora nos encargaremos del estudio y selección del regulador de tensión adecuado para ser instalado en el circuito PAMC2.

### 2.5.1 Beneficios y perjuicios para la empresa Distribuidora del uso de reguladores de tensión

#### Beneficios:

- Al mejorar el perfil de tensión, la empresa distribuidora podrá cumplir con el porcentaje de regulación establecido por la norma, y por ende no será penalizada por el incumplimiento de la misma.
- Al mejorar el nivel de tensión, la corriente disminuirá logrando que las pérdidas por efecto Joule disminuyan en el alimentador.
- Mejora la confiabilidad del sistema.
- Reguladores de repuesto pueden ser justificados por costo y simplificar los mantenimientos.

### 2.5.2 Prejuicios:

Debido a que los reguladores son autotransformadores con cambiadores de tap, estos elementos al no poseer un aislamiento galvánico entre el devanado primario y secundario, existe el riesgo de que un aumento de potencial en un devanado respecto a un punto, repercuta directamente sobre el otro; por otro lado, las corrientes de falla en estos elementos, son mayores que en un transformador normal, debido a la reducción de su impedancia interna.

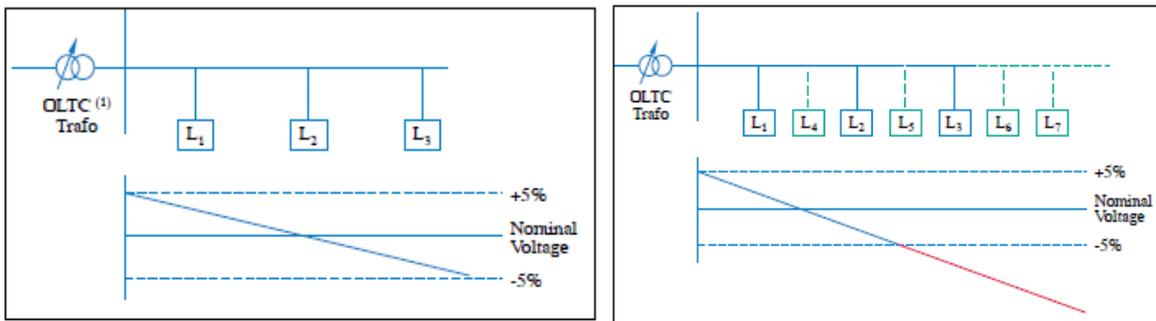


Figura 42 diagrama de cargas [24]

### 2.5.3 Corrección de la regulación de voltaje en los sistemas eléctricos.

- El diagrama de la izquierda muestra un alimentador construido de manera conservadora para que la densidad de carga se alimente dentro de los límites de voltaje permitidos.
- El diagrama de la derecha muestra el circuito con un crecimiento de la densidad de carga y de la longitud del mismo, lo que hace que la caída de voltaje supere los límites permitidos para las cargas L5, L3, L6 y L7.

### 2.5.4 Solución con Regulador de Tensión:

Para proveer una constante regulación del voltaje en los sistemas eléctricos, que además decrementará o incrementará la tensión según las necesidades de la carga, fue creado el regulador de tensión automático.

Un regulador de tensión después de L2 recibirá una baja o alta tensión, pero este la regulará para las cargas L5, L3, L6 y L7, manteniendo el perfil de tensión dentro de límites adecuados para la prestación de un buen servicio.

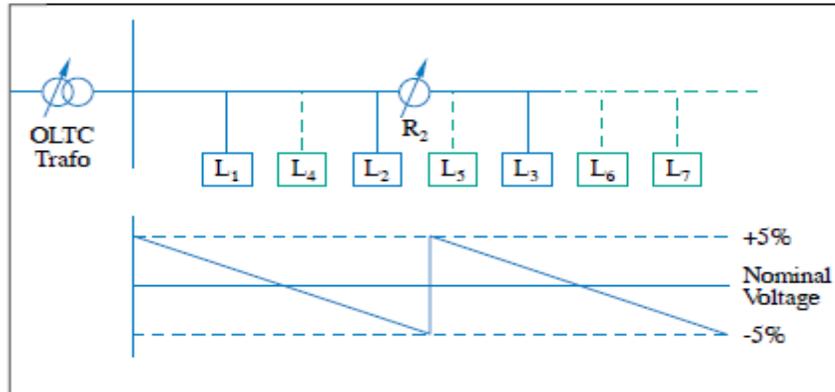


Figura 43 cargas con regulador incluido [24]

### 2.5.5 Beneficios de regulación con unidades monofásicas versus trifásicas:

- Debido al elevado costo y diseño voluminoso para pequeñas cargas a regular, los reguladores trifásicos son raramente usados en los sistemas eléctricos. Su uso solo es justificado si las cargas son completamente balanceadas, caso poco común.
- Los reguladores trifásicos solo se construyen en pequeñas potencias. Por el contrario los bancos compuestos por unidades monofásicas permiten un amplio rango de potencias acorde con las necesidades de los sistemas eléctricos de la actualidad.
- Los reguladores trifásicos miden la tensión y corriente sobre una sola fase de las tres, esta medida llega a un solo control y sobre ella se toma la decisión de regulación para las tres fases de la carga a regular, que en la mayoría de los casos corresponden a cargas desbalanceadas y por ende voltajes desbalanceados.
- El cambiador de TAP en un regulador trifásico es uno solo para las tres fases, esto representa una desventaja frente a las necesidades de un sistema eléctrico de distribución, dado que los requerimientos de regulación son diferentes en cada fase, por esta razón los reguladores monofásicos se convierten en una solución óptima.

### 2.5.6 Diagrama esquemático y descripción de funcionamiento

#### Funcionamiento del regulador de voltaje monofásico de 32 pasos

Un regulador de voltaje monofásico es representado por un autotransformador (fig.24), el devanado de bajo voltaje se denomina “devanado serie” y el de alto voltaje “devanado en derivación”. Cambiando la polaridad del devanado serie, el

voltaje de salida en un regulador, puede disminuir o aumentar con respecto al voltaje de entrada.

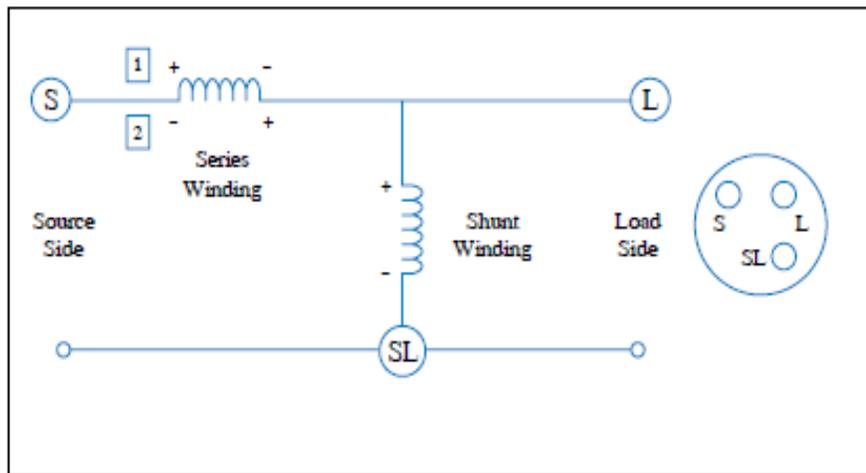


Figura 44 autotransformador

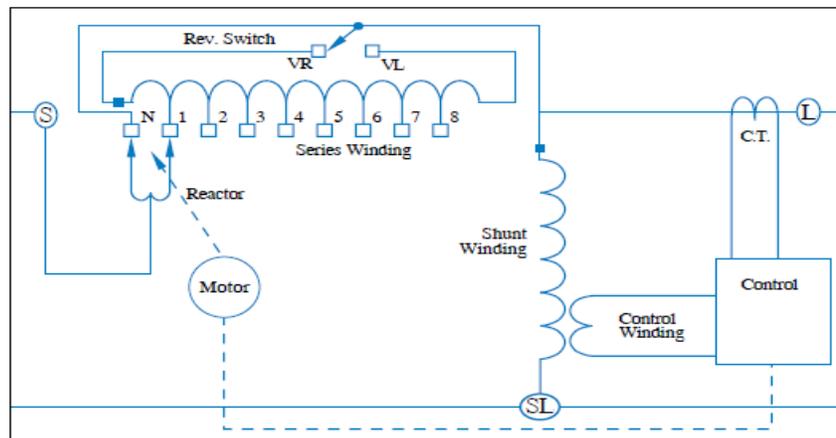


Figura 45 auto transformador monofásico tab's [24]

La combinación de un devanado serie con 8 derivaciones, un reactor de puente o y un suiche de inversión de polaridad, permite obtener 32 pasos (16 en incremento y 16 en de cremento), cada uno de ellos corresponde a 10/16% aproximadamente

## 2.5.7 Funcionamiento del regulador de voltaje monofásico de 32 pasos

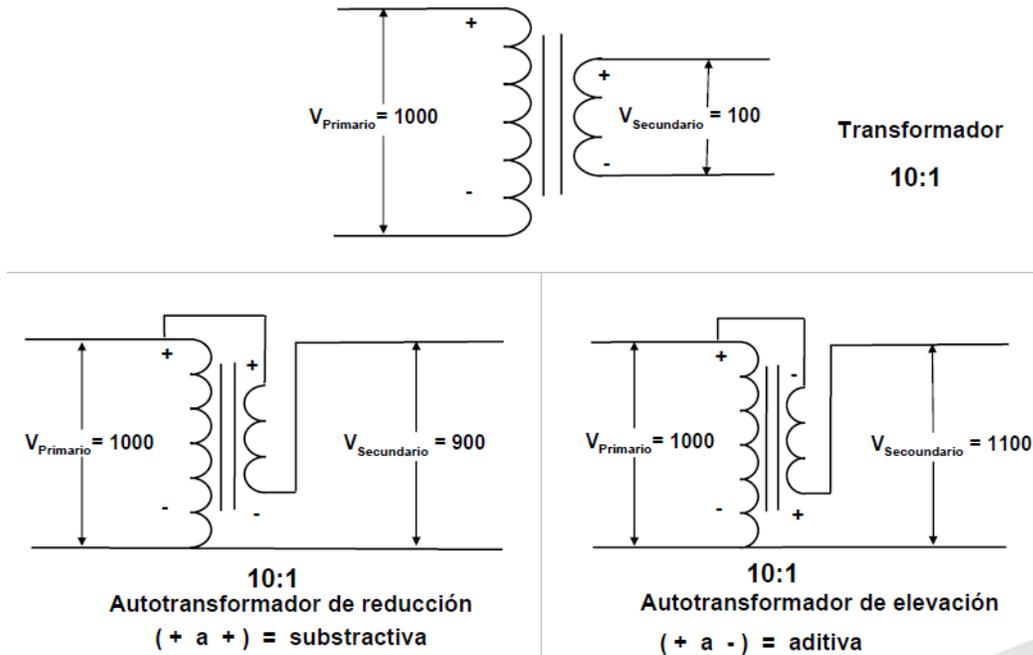


Figura 46 funcionamiento del regulador de voltaje

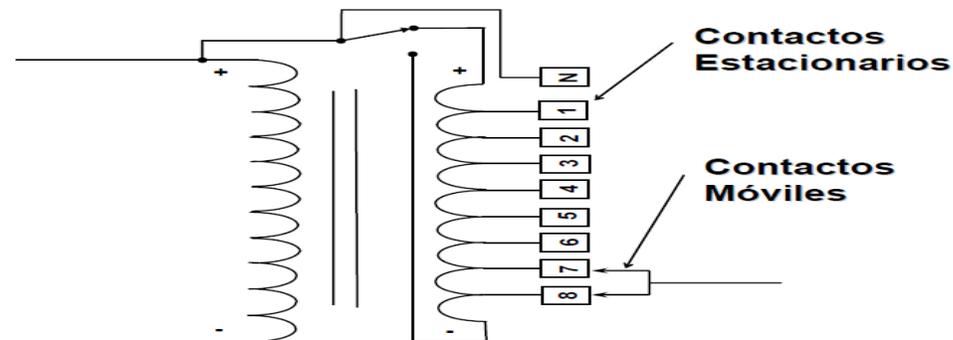


Figura 47 contactos moviles y fijos del regulador

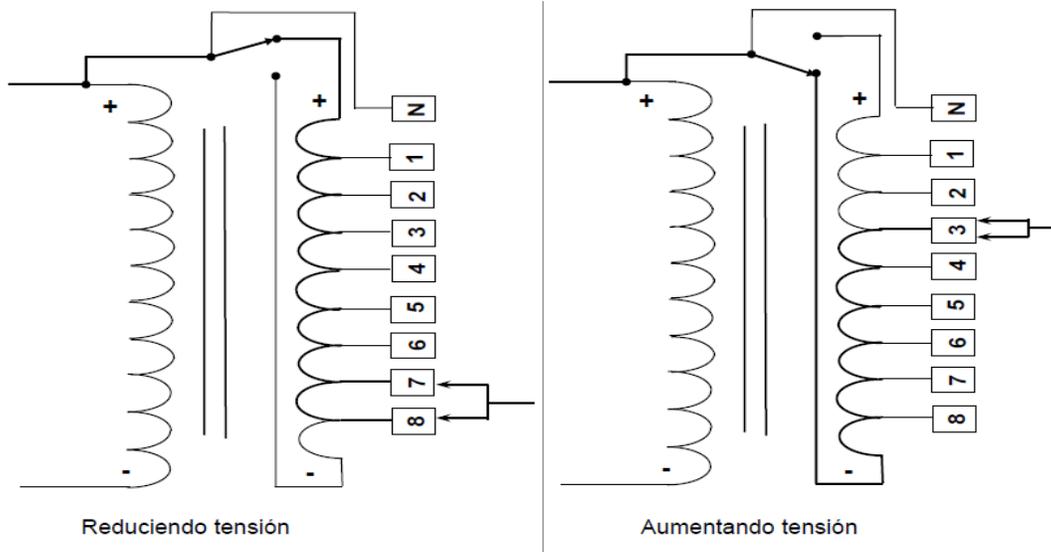
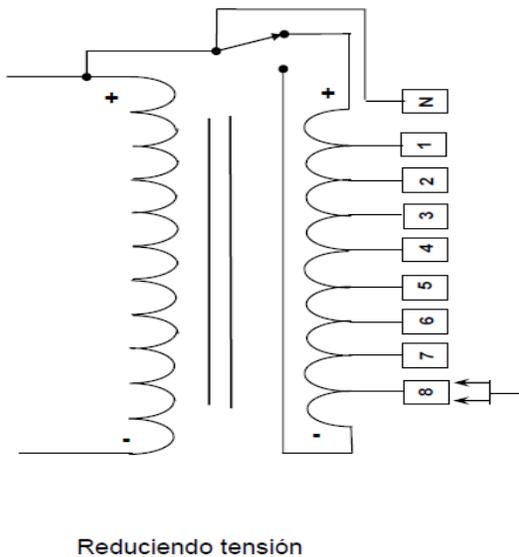


Figura 48 reducción y aumento de tensión en los reguladores



- ¿Por qué son 32 posiciones (16 arriba y 16 abajo) si sólo hay 8 contactos?
- Hay una posición en cada contacto estacionario y otra cuando los contactos móviles están puenteados entre contactos estacionarios.
  - Eso nos da 16 posiciones.
- El interruptor de polaridad nos permite tener otras 16 posiciones.

Reduciendo tensión

Figura 49 explicación del funcionamiento del los TAB's del regulador

Concluyendo lo estudiado y analizado en este apartado en cuanto a la tecnología FACTS seleccionada se concluye que se utilizarán reguladores de tensión monofásicos instalados uno por fase partiendo de los beneficios que ofrecen con respecto a los trifásicos, porque permiten trabajar con cada una de las fases dado que como se menciona es muy complicado, casi que imposible, encontrar un circuito en el que las tensiones y corrientes sean iguales en las tres líneas, con esto nos permitirá tener el control y trabajar cada una de las características eléctricas del circuito PAMC2.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS

### 3.1 Ubicación de los reguladores de tensión:

Para la ubicación y selección del punto más adecuado para la instalación del regulador de tensión partimos del análisis del perfil de tensión inicial y la gráfica de la línea seccionada por valores de la tensión en por unidad en el circuito, identificando los puntos donde la tensión empieza de la reducción de la tensión en los niveles adecuados para la prestación de un buen servicio.

Identificados estos puntos los cuales fueron cinco exactamente los ubicamos dentro del plano eléctrico y el software DlgSILENT e instalamos en estos puntos los reguladores para proceder a la simulación del funcionamiento del circuito teniendo como datos de referencia los perfiles de tensión que nos arrojará cada una de las simulaciones, más los datos de potencia activa, potencia reactiva, aparente y pérdidas.

Simulación	Tensión Max KV	Tensión Mínima KV	Pérdidas KW	Potencia Activa KW	Potencia Reactiva KVAR	Factor de potencia
0	13,6	12.3	39,81	2499,2	888,6	0.9422

Tabla 7 resultados sin compensación simulación 0

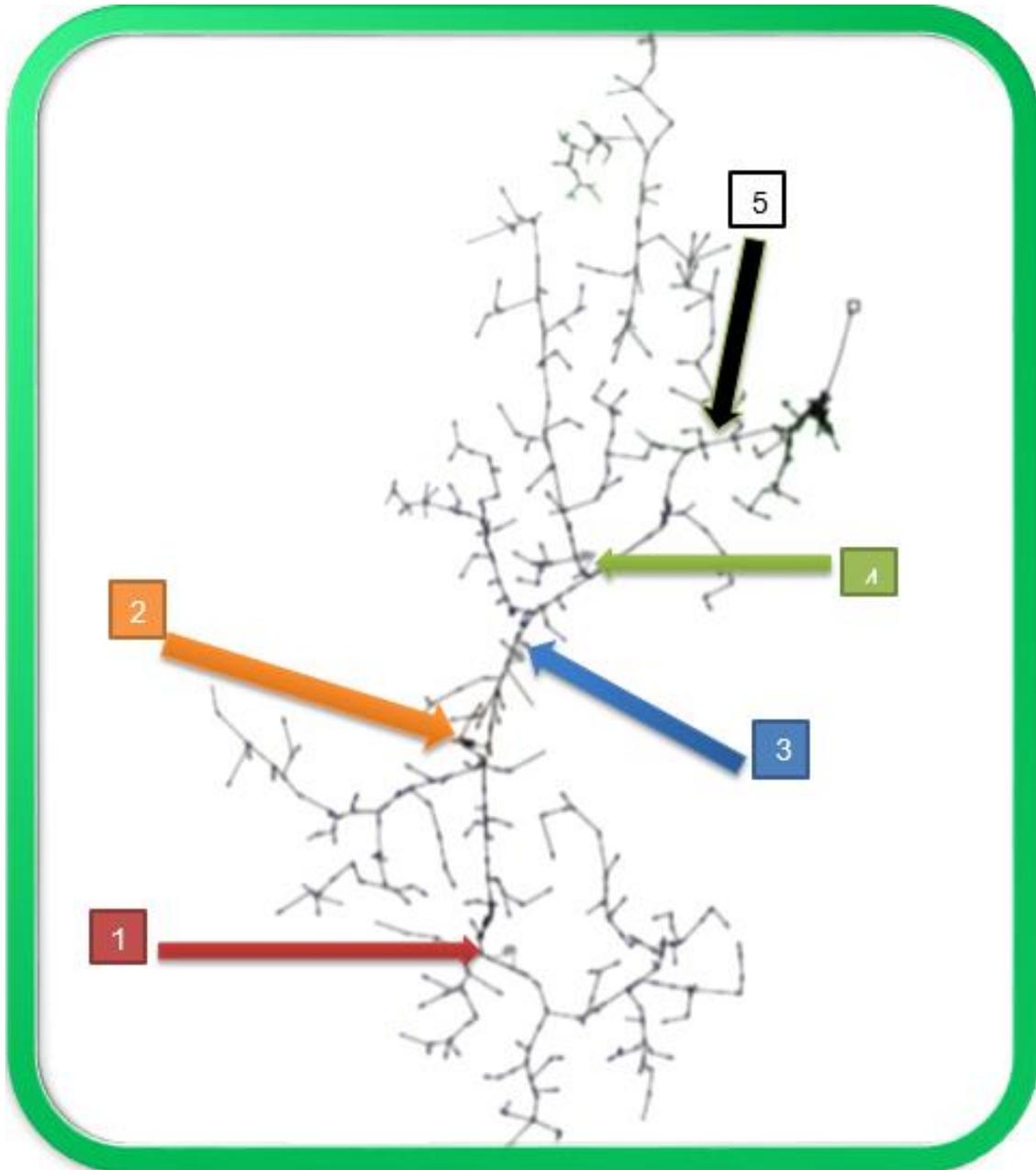


Figura 50 Ubicación reguladores simulados PAMC2

Luego de definidos y ubicados los puntos para la instalación de los reguladores procedimos a realizar la simulación con cada uno de los bancos de reguladores, consolidando la información de dichas simulaciones en las gráficas de perfiles de tensión, data de resultados y tabla de resultados de la simulación los cuales veremos a continuación en el capítulo resultad

### 3.1.1 Evaluación de simulación en el primero de los puntos seleccionados

Para iniciar la simulación tomamos el punto en el cual empieza la caída de tensión más baja < 0.92 Pu, de todo el circuito, el cual se puede identificar con facilidad en la figura 21 el cual nos arrojó la siguiente información:

#### Perfil de tensión

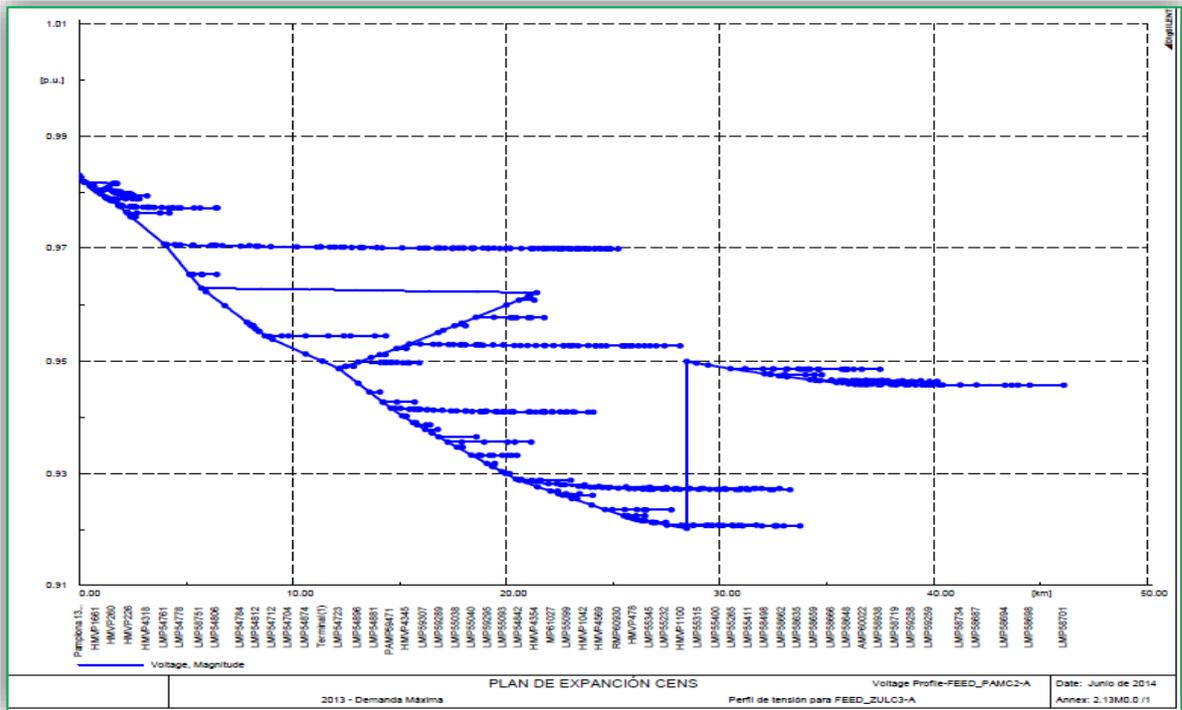


Figura 51 Perfil de tensión simulación 1

Name	In Folder	Grid	Maximum Voltage (kV)	Maximum Voltage (p.u.)	Minimum Voltage (kV)	Minimum Voltage (p.u.)	Max Loading %	Losses MW	Total Load, Active (MW)	Total Load, React (Mvar)	Distance km	maxim-Distance km	Active Power MW	Infeed, Active Po (MW)	Input (MW)
FEED_PAMC2	Feeders												2.414		
FEED_PAMC2.A	Feeders		13.55988	0.9826002	12.69877	0.9202007	30.24377	0.03981	2.459278	0.8886001	0.	0.	2.53910	2.539101	
FEED_PAMC3	Feeders												3.125		
FEED_PAMC3.A	Feeders		13.56533	0.9829947	13.49897	0.9781865	38.86255	0.00934	3.277599	1.344784	0.	0.	3.28694	3.286947	
FEED_PAMC4	Feeders												0.772		

Figura 52 Data de resultados 1

Simulación	Tensión Max KV	Tensión Mínima KV	Perdidas KW	Potencia Activa KW	Potencia Reactiva KVAR	Facto de potencia
1	13,6	12.6	39,81	2499,2	888,6	0.9422

Tabla 8 Resultados de la simulación 1

Comparados los resultados de la simulación sin compensación con la simulación de la compensación en el punto más alejado se puede apreciar una mejora en la tensión mínima del punto más lejano, sin embargo los demás parámetros siguen comportándose de la misma forma.

### 3.1.2 simulación en el segundo punto

El punto dos está ubicado en la intersección donde se encuentra el segundo nivel de caída de tensión <0.94 Pu.

#### Perfil de tensión

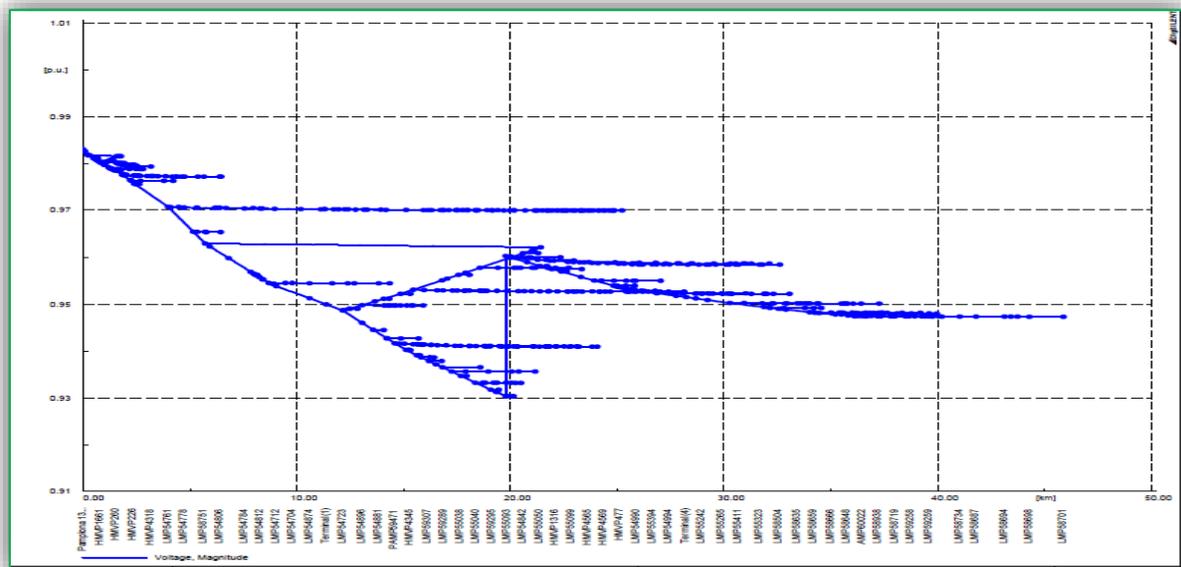


Figura 53 Perfil de tensión simulación 2

Name	In Folder	Grid	Maximum Voltage (kV)	Maximum Voltage (p.u.)	Minimum Voltage (kV)	Minimum Voltage (p.u.)	Max. Loading (%)	Losses (MW)	Total Load, Active (MW)	Total Load, React... (Mvar)	Distance (km)	maxin-Distance (km)	Active Power (MW)	Infeed, Active Po... (MW)	Input (MW)
FEED_PAMC2	Feeders												2.414		
FEED_PAMC2-A	Feeders		13.55988	0.9826002	12.83389	0.930354	30.24377	0.03919	2.499897	0.8888184	0.	0.	2.53910	2.539101	
FEED_PAMC3	Feeders												3.125		
FEED_PAMC3-A	Feeders		13.56533	0.9823947	13.49897	0.9781863	38.86255	0.00934	3.277599	1.344784	0.	0.	3.28694	3.286947	
FEED_PAMC4	Feeders												0.772		
FEED_PAMC4-A	Feeders		13.56572	0.9830232	13.34396	0.9669533	20.64467	0.00588	0.8061175	0.3540876	0.	0.	0.81200	0.8120074	

Figura 54 Data de resultados 2

Simulación	Tensión Max KV	Tensión Mínima KV	Perdidas KW	Potencia Activa KW	Potencia Reactiva KVAR	Facto de potencia
2	13,6	12.83	39,19	2499,8	888,8	0.9422

Tabla 9 resultados de la simulación 2

En esta simulación al igual que en la primera se presenta un aumento considerable en la tensión mínima del punto más alejado, las pérdidas se reducen un poco y las potencias se mantienen constantes en los valores iniciales.

### 3.1.3 simulación en el tercer punto

La ubicación del banco de reguladores en el punto tres se realiza, en esta oportunidad no teniendo en cuenta las caídas de tensión sino ubicando el punto medio de la distancia total de la red de Media Tensión del circuito PAMC2.

### Perfil de tensión

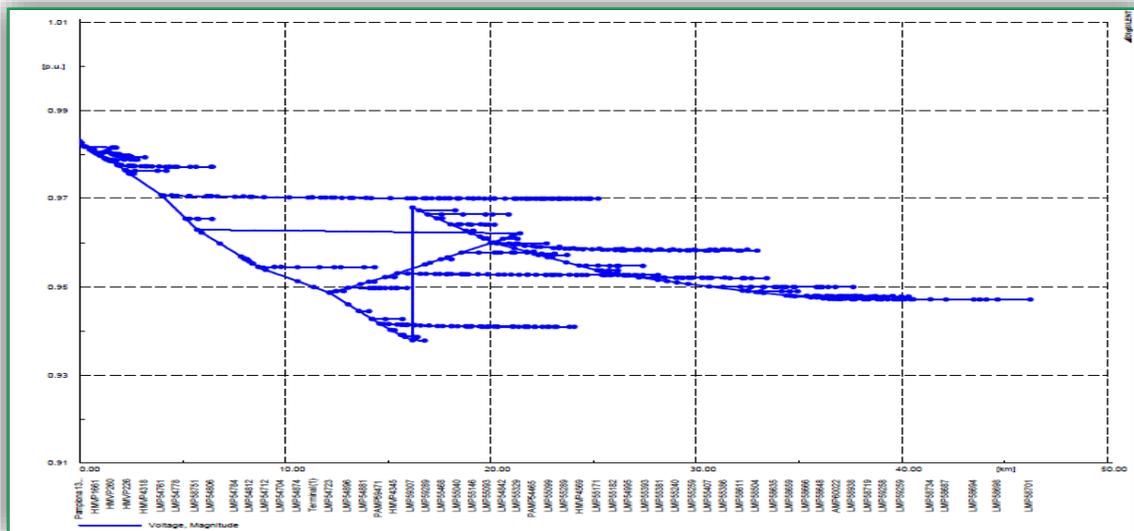


Figura 55 Perfil de tensión simulación 3

Name	In Folder	Grid	Maximum Voltage (kV)	Maximum Voltage (p.u.)	Minimum Voltage (kV)	Minimum Voltage (p.u.)	Max. Loading %	Losses MW	Total Load, Active (MW)	Total Load, React... (Mvar)	Distance km	maxin-Distance km	Active Power MW	Infeed, Active Po... (MW)	Input (MW)
FEED_PALRANGOVALI	Feeders		12.35673	0.8954155	11.54887	0.8368747	19.79456	0.02960	0.6635409	0.3109232	0.	0.	0.69315	0.6931514	
FEED_PAMC2	Feeders												2.414		
FEED_PAMC2-A	Feeders		13.55988	0.9826002	12.94205	0.9378297	30.24377	0.03925	2.499837	0.8887786	0.	0.	2.53910	2.539101	
FEED_PAMC3	Feeders												3.125		
FEED_PAMC3-A	Feeders		13.56533	0.9829947	13.49897	0.9781863	38.86255	0.00934	3.277599	1.344784	0.	0.	3.28694	3.286947	
FEED_PAMC4	Feeders												0.772		
FEED_PAMC4-A	Feeders		13.56572	0.9830232	13.34396	0.9689533	20.64467	0.00588	0.8061175	0.3540876	0.	0.	0.81200	0.8120074	
FEED_PATIOS	Feeders												4.6861		
FEED_PATIOS-A	Feeders		13.64783	0.9889728	12.95927	0.9390775	58.75538	0.05454	4.874397	2.583789	0.	0.	4.92894	4.928948	

Figura 56 Data de resultados 3

Simulación	Tensión Max KV	Tensión Mínima KV	Perdidas KW	Potencia Activa KW	Potencia Reactiva KVAR	Facto de potencia
3	13,6	12.94	39,25	2499,8	888,7	0.9422

### 2.5.4 Resultados simulación en el tercer punto

En esta simulación se presenta un aumento considerable en la tensión mínima del punto más alejado, una reducción en las perdidas y mantenimiento en los valores de las potencias activa y reactiva con respecto al comportamiento del circuito sin compensación.

### 3.1.4 simulación en el cuarto punto

Para la ubicación de este punto mantenemos nuestra constante de instalar los reguladores en el punto donde la tensión cae por debajo de  $<0.96$  Pu.

### Perfil de tensión

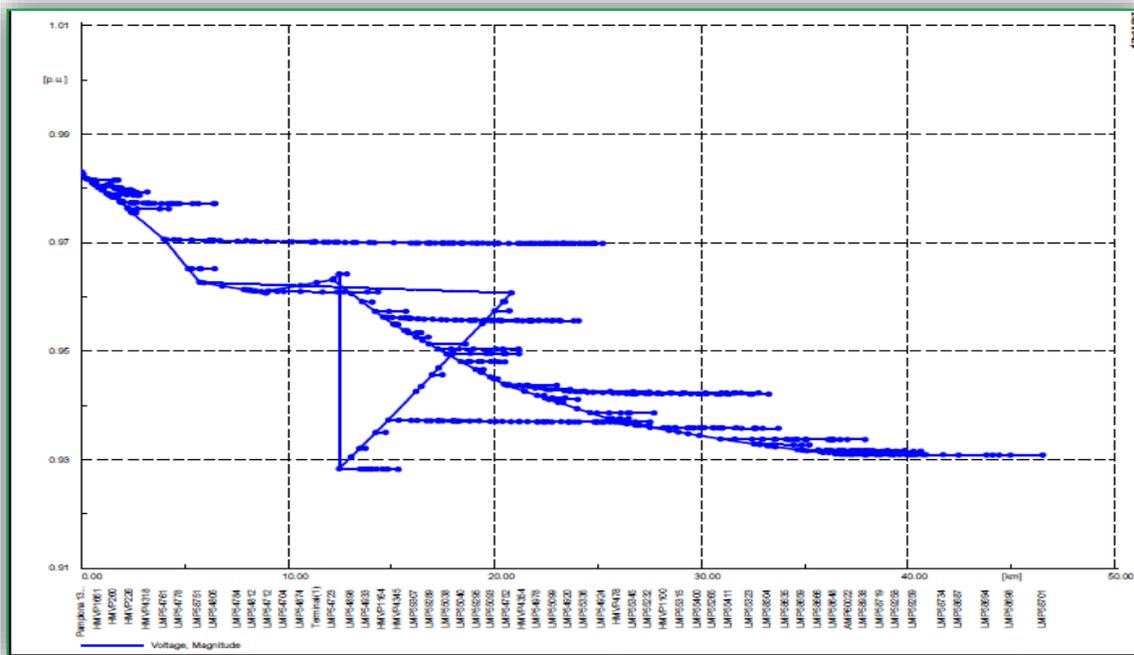


Figura 57 Perfil de tensión simulación 4

Name	In Folder	Grid	Maximum Voltage (kV)	Minimum Voltage (kV)	Maximum Voltage (p.u.)	Minimum Voltage (p.u.)	Max. Loading (%)	Losses (MW)	Total Load, Active (MW)	Total Load, Reacti (Mvar)	Distance (km)	maxim-Distance (km)	Active Power (MW)	Infeed, Active Po (MW)	Input (MW)
FEED_PAMC2	Feeders												2.414		
FEED_PAMC2-A	Feeders		13.55888	12.80976	0.9826002	0.9282434	30.24377	0.05381	2.485278	0.8793745	0.	0.	2.53810	2.538101	
FEED_PAMC3	Feeders												3.125		

Figura 58 Data resultados 4

Simulación	Tensión Max KV	Tensión Mínima KV	Perdidas KW	Potencia Activa KW	Potencia Reactiva KVAR	Facto de potencia
4	13,6	12.8	53,81	2485,2	879,3	0.9427

Tabla 10 Resultados simulación en el cuarto punto

En este caso contrario a los resultados que veníamos obteniendo con un aumento progresivo en la tensión una reducción de pérdidas y la estabilidad en los valores de las potencias, se nos incrementan considerablemente las pérdidas y se presenta una caída leve de tensión en comparación con los resultados obtenidos de la simulación anterior.

### 3.1.5 simulación en el quinto punto

En esta última simulación instalaremos los reguladores dentro del circuito en un punto de la red donde la tensión se encuentra en su mejor nivel dentro del circuito 0,98 Pu, pero teniendo en cuenta que este punto este fuera de la ciudad de Pamplona dado que esta presenta las mayores cargas instaladas en el circuito y no sufre problemas de regulación por su cercanía con la subestación.

## Perfil de tensión

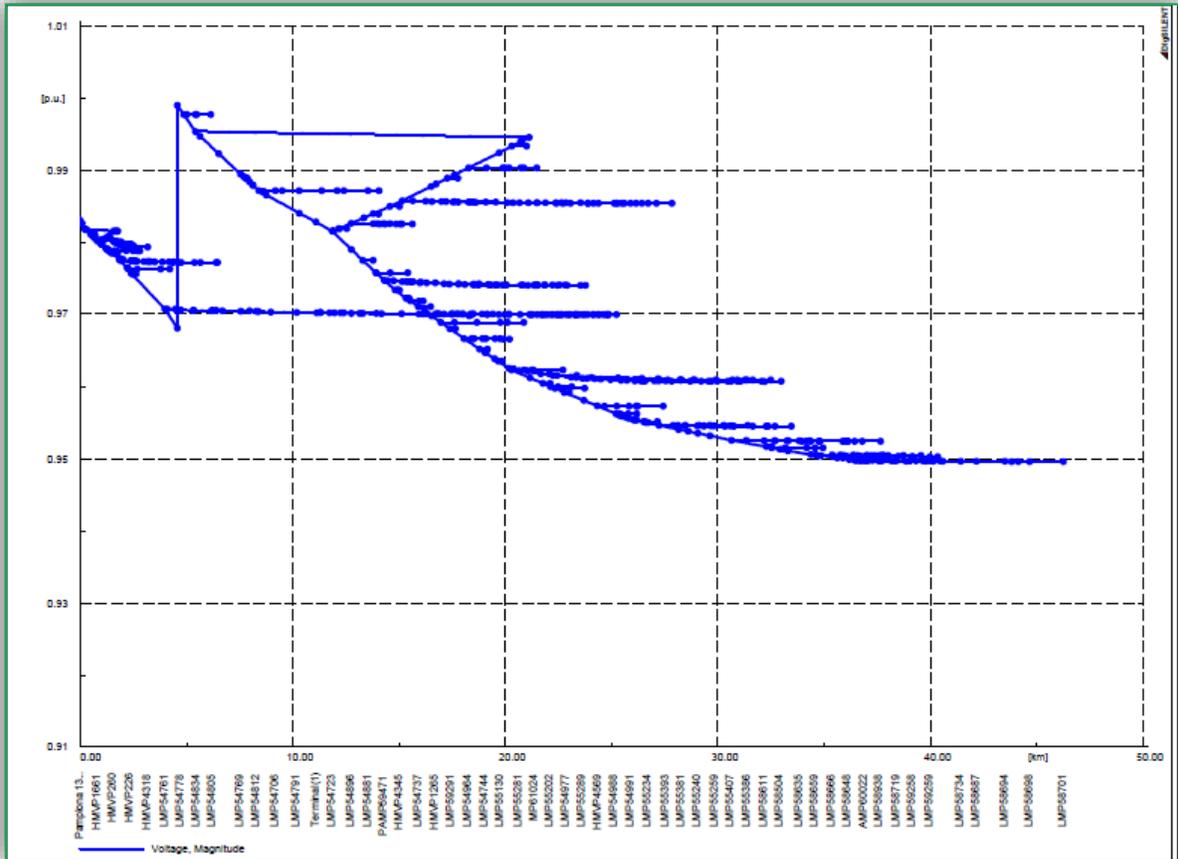


Figura 59 Perfil de tensión simulación 5

Name	In Folder	Grid	Maximum Voltage (kV)	Maximum Voltage (p.u.)	Minimum Voltage (kV)	Minimum Voltage (p.u.)	Max. Loading (%)	Losses (MW)	Total Load, Active (MW)	Total Load, React (Mvar)	Distance (km)	maxin-Distance (km)	Active Power (MW)
FEED_PAMC2	Feeders												2.414
FEED_PAMC2-A	Feeders		13.78594	0.9989813	13.10451	0.9496025	30.24377	0.03720	2.501891	0.8893392	0.	0.	2.5391
FEED_PAMC3	Feeders												3.125
FEED_PAMC3-A	Feeders		13.56533	0.9829947	13.49897	0.9781865	38.86255	0.00934	3.277599	1.344784	0.	0.	3.2869
FEED_PAMC4	Feeders												0.772

Figura 60 Data resultados 5

Simulación	Tensión Max KV	Tensión Mínima KV	Perdidas KW	Potencia Activa KW	Potencia Reactiva KVAR	Factor de potencia
5	13,78	13.1	37,2	2501,8	889,3	0.9422

Tabla 11 Resultados simulación en el quinto punto

Los resultados dados en esta última simulación ubicando los reguladores más cerca de la subestación y dentro del circuito donde se tienen los valores más altos de

tensión se consigue la tensión más elevada en el punto más lejano inclusive aumenta la tensión en la barra de la subestación sobre este circuito, al igual que una gran reducción en las pérdidas, mientras que los valores de las potencias como en la mayoría de las simulaciones realizadas se mantiene constantes.

### 3.2 conclusión de la simulación

Simulación	Tensión Max KV	Tensión Mínima KV	Pérdidas KW	Potencia Activa KW	Potencia Reactiva KVAR	Potencia Aparente KW	Factor de potencia
0	13,6	12.3	39,81	2499,2	888,6	2539,1	0.9422
1	13,6	12.6	39,81	2499,2	888,6	2539,1	0.9422
2	13,6	12.83	39,19	2499,8	888,8	2539,1	0.9422
3	13,6	12.94	39,25	2499,8	888,7	2539,1	0.9422
4	13,6	12.8	53,81	2485,2	879,3	2539,1	0.9427
5	13,78	13.1	37,2	2501,8	889,3	2539,1	0.9422

Tabla 12 resultados de las simulaciones realizadas

Se realizaron 6 simulaciones en total, de las cuales cinco se realizaron con la instalación del banco de reguladores de tensión mientras que la primera se realizó con los parámetros actuales del circuito, en estas se pudieron observar las diversas variables eléctricas presentadas.

De lo cual podemos concluir que con la instalación del banco de reguladores de tensión no se ve afectado en ningún momento el factor de potencia del circuito dado que al ser los reguladores autotransformadores y comportarse como tal, como transformadores no aportan reactivos al circuito aunque tampoco los compensa, partiendo de la estabilidad del factor de potencia, podemos ver que las potencias reactivas y activa mantienen igualmente una regularidad en sus valores.

Revisando la tabla 12 que es la comparación de los resultados en cada una de las simulaciones y apoyándonos en lo concluido anteriormente con respecto a factor de potencia y potencia reactiva y activa, pasamos a revisar los siguientes parámetros, que tuvimos en cuenta en las simulaciones, como lo son la tensión mínima dentro de la totalidad del circuito y que además fue el principal problema encontrado en el análisis previo y el punto de partida de este trabajo. En cuanto a este parámetro fácilmente observamos que el mejor comportamiento de la tensión se dio en la quinta simulación arrojándonos una tensión de 13.1KV. Acompañado de esto en la misma simulación se presenta la mayor reducción de las pérdidas comparadas con el análisis y simulación previa al reducirse en 2.61KW.

Por todo lo expuesto anteriormente se llega a la conclusión de que el mejor comportamiento del circuito PAMC2 de pamploña se da con los resultados de la quinta simulación. Todos estos datos nos aportaran para tener los como base en la toma de la mejor decisión en cuanto al punto más adecuado para la instalación del banco de reguladores.

### **3.3 punto ideal para la instalación y características del regulador comercial adecuado para la instalación y mejora de la tensión del circuito.**

Concluido que nuestro circuito se comporta de la mejor manera en la última simulación, tomamos como punto ideal para la instalación del banco de reguladores, el nodo LMP54778 en el cual instalamos en el software DIgSILENT, los reguladores de tensión y que nos arrojó excelentes resultados.

Ya identificado el punto ideal para la instalación dentro del circuito nodo LMP54778, y seleccionada la tecnología FACTS a utilizar como lo es los reguladores de tensión. Pasamos a buscar comercialmente las características adecuadas del regulador que satisfagan las necesidades de nuestro circuito.

Para esto verificamos o incluimos una variable más que es la potencia presente en el punto seleccionado la cual es 488.85 KVA y la dividimos en 3 que son las fases del circuito dándonos 162.95 KVA por fase esto partiendo de que instalaremos un autotransformador por fase como se exponía líneas arriba aprovechando los beneficios que ofrece en cuanto a que nos permite controlar los parámetros de cada una de ellas, frente a un regulador trifásico.

<b>UBICACIÓN</b>	<b>CARGA GENERAL ACTIVA (kW)</b>	<b>CARGA GENERAL REACTIVA (kVAR)</b>	<b>CARGA GENERAL APARENTE (KVA)</b>
PUNTO 1	460,693	163,53	488,8559104
PUNTO 2	457,297	162,589	485,3408381
PUNTO 3	455.958	162,105	455958,0288
PUNTO 4	454,354	161,542	482,2171452
PUNTO 5	164,588	58,518	174,6813272

Tabla 13 potencias en los diferentes puntos de simulación

Comercialmente encontramos el siguiente regulador de tensión monofásico VR-32 con las características que veremos a continuación comercializado por Cooper power system representaciones « EATON», Distribuidor autorizado de Cooper Power Systems by EATON para el sector eléctrico colombiano.

### 3.3.1 componentes del regulador VR-32



Figura 61 Regulador de tensión [24]

1. Pararrayo Bypass: Protege el devanado serie

2. Buje de porcelana: Los tres son iguales

3. Terminal conector: Bimetálico de alta capacidad de conducción.

4. Alivio de presión: Válvula que opera automáticamente a 28kPa (4psig) para evitar acumulación de presión interna. Posee una pantalla contra insectos y es operable con pértiga.

5. Indicador de Posición: Muestra la posición de derivación, permite ser reseteado desde el control y adicionalmente posee la función ADDAMP que permite reducir el rango de regulación permitiendo el manejo de mayor carga (corriente)

6. Placa de datos: Dos placas de datos una en el control y otra en el tanque del regulador.

7. Herraje de montaje en poste: Varía con el tamaño del regulador.

8. Válvula de drenaje: Válvula de drenaje con equipo de muestreo.

9. Mirilla de inspección: Permite identificar rápidamente el nivel (con una bola roja) y color del aislamiento interno.

10. Tanque sellado: Previene la oxidación del aislamiento interno. NOTA: el rango de mayor temperatura 65C permite regular un 12% adicional sin reducir la vida útil del mismo.

11. Ganchos de Elevación: Permite izar solamente la parte activa e interna.

12. Conexión rápida de filtro superior: Permite adicionar líquido aislante.

13. Puntos para colocación de pararrayo con herraje: Se encuentra adyacente a los tres bujes.

14. Ganchos de izaje: Estos ganchos son para izaje completo de la unidad.

15. Conector de tierra: El tanque del regulador posee dos puntos.

16. Provisiones de montaje: Permiten fijar el regulador a una estiba para el transporte, a una plataforma en H o estructura de elevación.

17. Gabinete de control: Permite instalarlo en la pared del tanque, poste o donde convenga más para la operación.

18. Caja de conexiones: Contiene todas las conexiones de control y el cable flexible de indicación de posición que conecta el cambiador de TAPS con el indicador.

19. Cable de control: Hermético de especificación militar, permite la desconexión del control sin desenergizar el regulador

### 3.3.2 Funcionamiento del regulador de voltaje monofásico de 32 paso

Tensión(KV)		Paso															N	
		16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2		1
13.8	R+	15.18	15.09	15.01	14.92	14.84	14.75	14.66	14.58	14.49	14.4	14.32	14.23	14.15	14.06	13.97	13.89	13.8
	L-	12.42	12.51	12.59	12.68	12.77	12.85	12.94	13.02	13.11	13.20	13.28	13.37	13.48	13.54	13.63	13.71	
23	R+	25.3	25.16	25.01	24.87	24.73	24.58	24.44	24.29	24.15	24.01	23.86	23.72	23.58	23.43	23.29	23.14	23
	L-	20.7	20.84	20.99	21.13	21.28	21.42	21.56	21.71	21.85	21.99	22.14	22.28	22.43	22.57	22.71	22.86	
34.5	R+	37.95	37.73	37.52	37.3	37.09	36.87	36.66	36.44	36.23	36.01	35.79	35.58	35.36	35.15	34.93	34.72	34.5
	L-	31.05	31.27	31.48	31.70	31.91	32.13	32.34	32.56	32.78	32.99	33.21	33.42	33.64	33.85	34.07	34.28	
% Regulación		10%	9.4%	8.8%	8.1%	7.5%	6.9%	6.3%	5.6%	5%	4.4%	3.8%	3.1%	2.5%	1.9%	1.3%	0.6%	

Figura 62. Funcionamiento del regulador de voltaje monofásico de 32 pasos

- ✓ Cada paso del cambiador de derivaciones (taps) es de 5/8 %,
- ✓ Excelente y fina regulación
- ✓ Permite ajustes aproximados de voltaje
  - 86V en sistemas 13.8KV
  - 143V en sistemas de 23KV
  - 215 en sistemas de 34.5KV

### 3.3.3 conexión del regulador

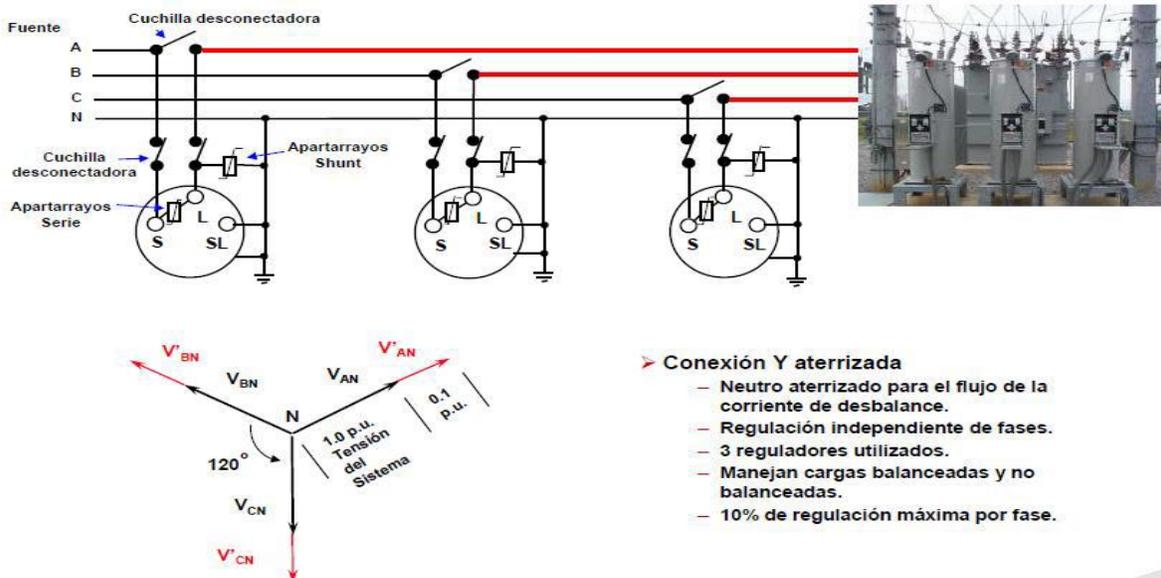


Figura 63 Conexión Estrella aterrizada

### 3.3.4 Sistema de puesta a tierra

Con el fin de cumplir con los requerimientos del RETIE en términos de las tensiones de paso y de contacto, según numeral 15.2 diseños de sistema de puesta a tierra, se validan las tensiones de paso y de contacto según el diseño a realizar e implementar.

De acuerdo al concepto anterior, el RETIE en el numeral 15.4 recomienda algunos valores de resistencia de puesta a tierra, los cuales pudieran garantizar las tensiones de paso y contacto.

Para tal fin y teniendo en cuenta las medidas de resistividad para cumplir con lo recomendado en la tabla 15.4 del RETIE y que para este trabajo será la tabla 13.

APLICACIÓN	VALORES MÁXIMOS DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
Estructuras y torrecillas metálicas de líneas o redes con cable de guarda	20 $\Omega$
Subestaciones de alta y extra alta tensión.	1 $\Omega$
Subestaciones de media tensión.	10 $\Omega$
Protección contra rayos.	10 $\Omega$
Punto neutro de acometida en baja tensión.	25 $\Omega$
Redes para equipos electrónicos o sensibles	10 $\Omega$

Tabla 14 valores de referencia para sistemas de puesta a tierra

Se realiza el cálculo del sistema de puesta a tierra requerido para el buen funcionamiento de los reguladores de tensión y que igualmente limite las tensiones de paso y contacto teniendo como base lo soportado por el cuerpo humano.

#### Diseño de sistema de puesta a tierra.

Con el fin de cumplir con lo requerido se proyectan las tensiones de paso y de contacto tolerables teniendo en cuenta los parámetros según la IEEE80 del 2000. Tensiones de paso y de contacto.

Según la IEEE80 del 2000 y lo recomendado en el RETIE, las ecuaciones son:

Tensiones de paso con los dos criterios. Para una persona que pesa 50 kg y una persona que pesa 70 kg.

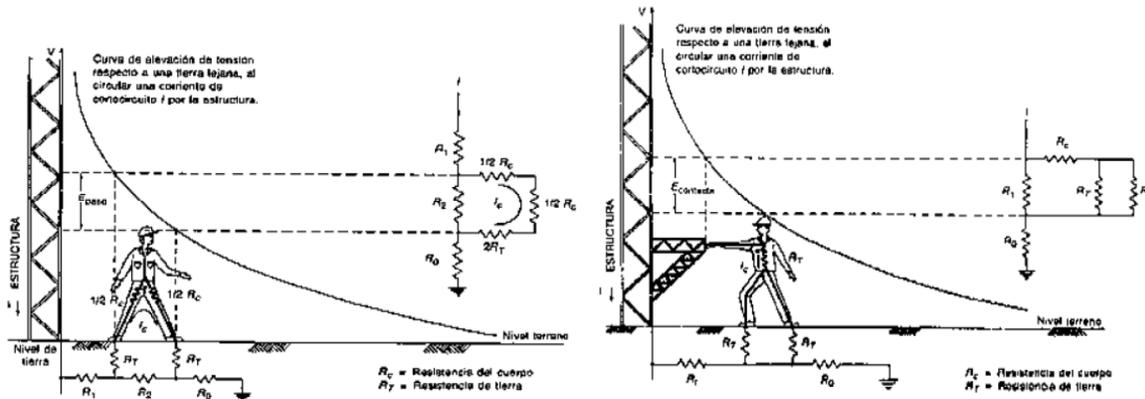
Las tensiones de contacto con los mismo criterios.

$$Ep_{50} = (1000 + 6C_s\rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$Et_{50} = (1000 + 1.5 C_s\rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$Ep_{70} = (1000 + 6C_s\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$Et_{70} = (1000 + 1.5 C_s\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$



De acuerdo a estas ecuaciones se calculan las tensiones de paso y de contacto, en condiciones de resistividad dadas en un nodo cualquiera dl sistema, obteniendo los parámetros:

Tensiones criterio de 50 kg:

SELECCIÓN DEL CRITERIO	50KG
tensión de contacto	1770,63 V
tensión de paso	6184 V

Tensiones criterio de 70 kg:

SELECCIÓN DEL CRITERIO	70KG
tensión de contacto	2396,45 V
tensión de paso	8369,7 V

Las tensiones de paso y de contacto corresponde a una corriente de 500 A, la cual corresponde a una corriente de falla típica de un nodo a unas distancia de 8 km de la subestación.

### Diseño de puesta a tierra.

Con el fin de cumplir con las tensiones de contacto y de paso se realiza el diseño según la IEEE80 del 2000, con algunos criterios como:

Se reduce la capa superficial h, del material con resistividad superior, con el fin de eliminar el riesgo de una sobre tensión, ya que no se puede validar que efectivamente se estén implementando los 20 cm que se proyectaron.

No se tiene en cuenta el uso de materiales o compuestos que puedan mejorar el sistema, lo cual dura en un periodo de tiempo en tanto el material mantenga sus propiedades, las cuales se degradan y no aseguran el valor requerido.

Para el diseño se ha mantenido los materiales en fleje de acero galvanizado.

Las varillas son de 2.4 m, varilla cobrizada de 5/8 de pulgada. Los conectores deberán ser adecuados para el empalme eléctrico.

En las siguientes imágenes se pueden ver las configuraciones que se han establecido, mediante estudio realizado con anterioridad y que se han realizado un alcance nuevo con el presente estudio.

#### Diseño una varilla:

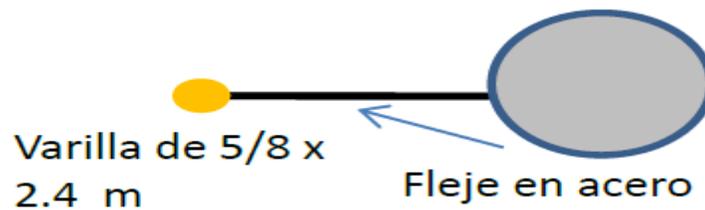


Figura 64 Diseño una varilla

#### Diseño dos varillas:

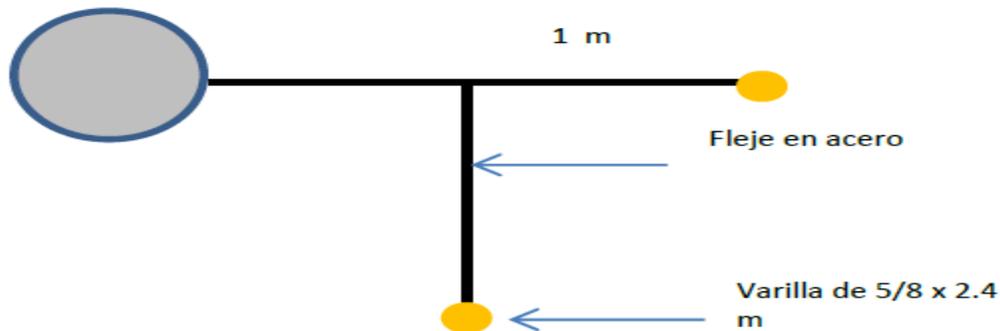


Figura 65 Diseño dos varillas

#### Diseño 3 varillas:

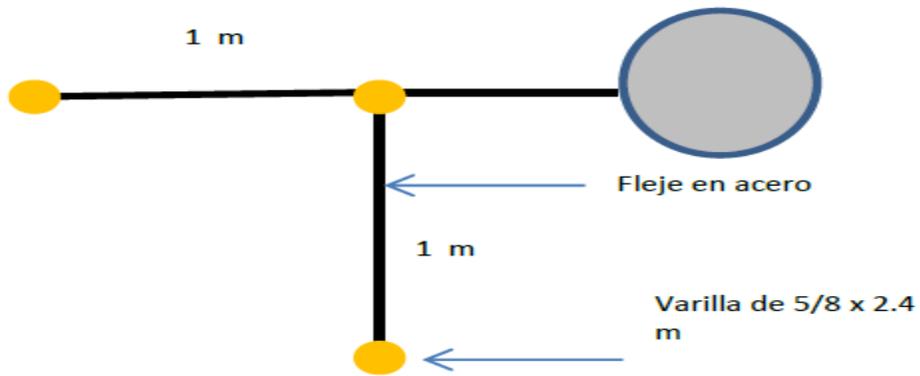


Figura 66 Diseño 3 varillas

Diseño malla tipo uno:

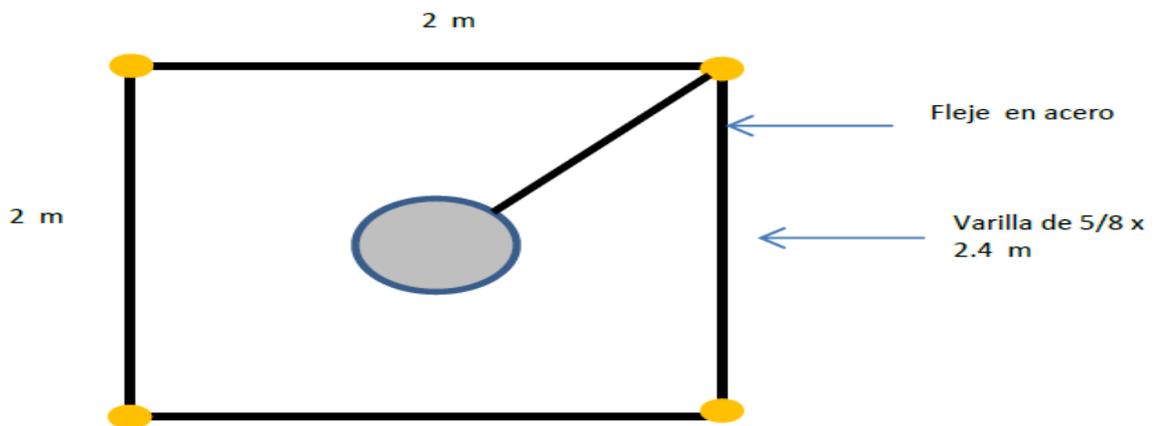


Figura 67 Diseño malla tipo uno

Diseño malla tipo dos:

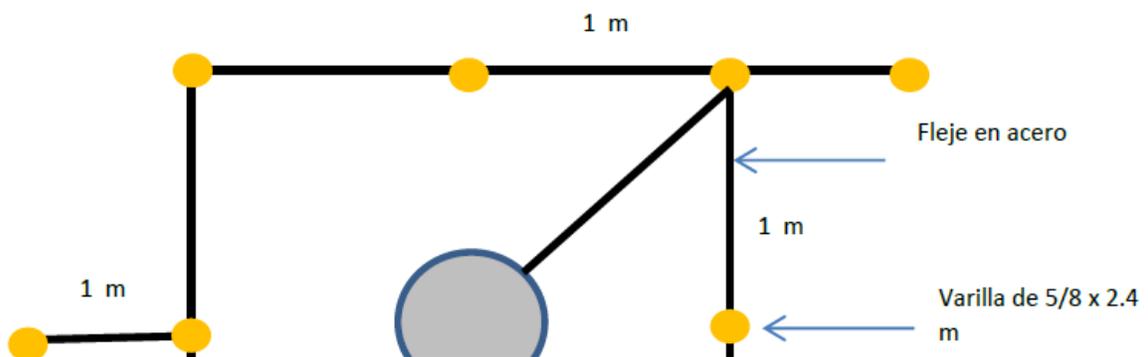


Figura 68 Diseño malla tipo dos

Diseño de malla tipo tres:

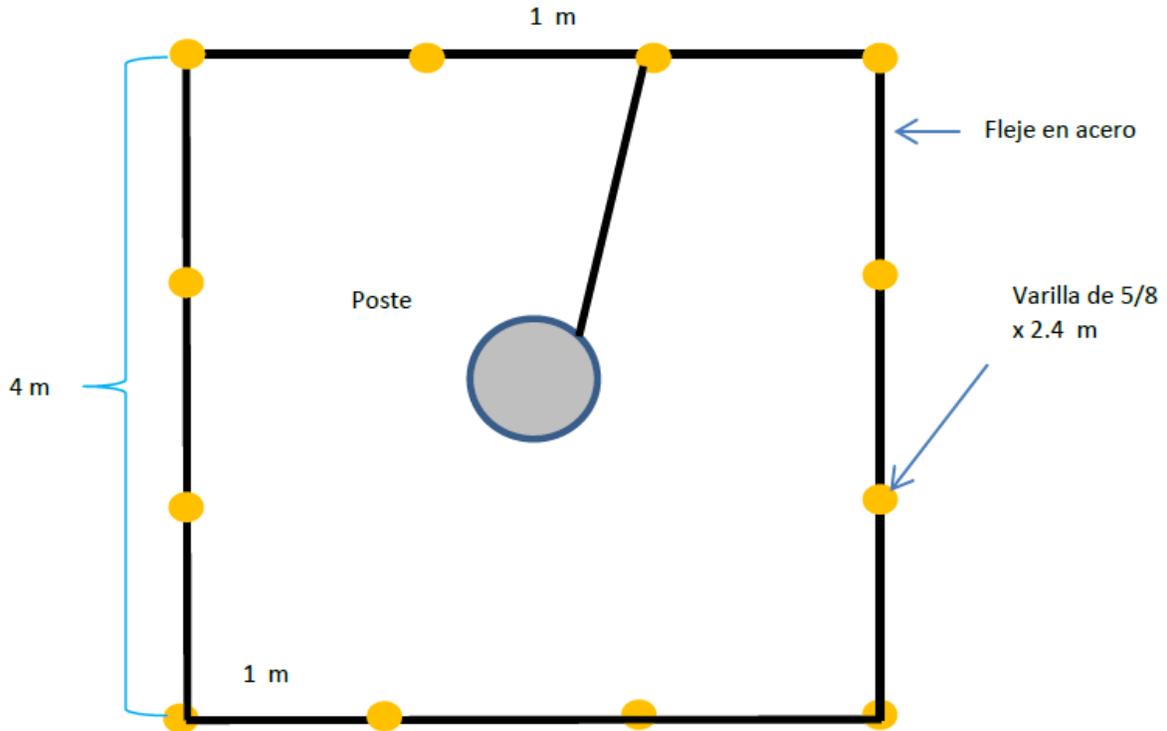
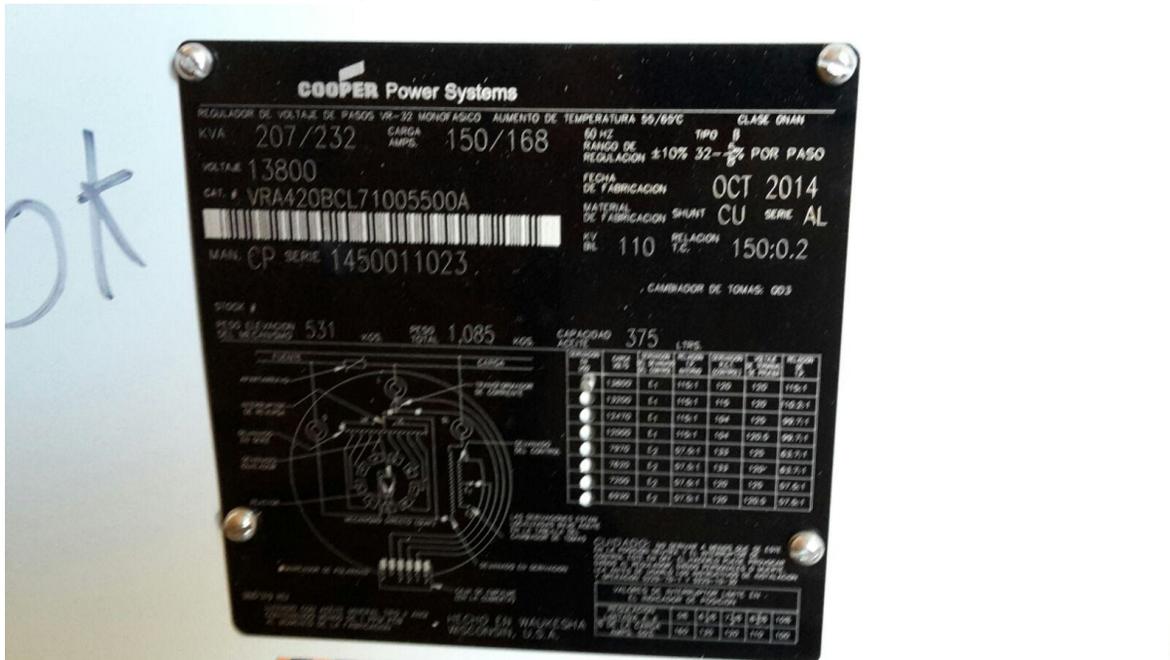


Figura 69 Diseño de malla tipo tres

Para el diseño del sistema de puesta a tierra utilizado para los reguladores de tensión se hace, de la misma manera que para un transformador de distribución, que es lo que en últimas son autotransformadores. Como hemos visto el principio fundamental del diseño de los sistemas de puesta a tierra es el de minimizar los valores de las tensiones tanto de paso como de contacto a niveles soportables para el cuerpo humano que para efectos de cálculo se han normalizado en  $100\Omega$  la resistencia y una corriente máxima de  $80\mu A$ .

### 3.3.5 Características específicas del regulador de tensión monofásico VR-32:



A)



B)

Figura 70. Características específicas reguladores A y B

Después de haber conocido los componentes, funcionamiento de los reguladores de tensión y la manera de instalación complementaremos con algunas

características específicas de estos y que podemos observar en la figura 64 (A y B). Estos reguladores trabajan a una tensión de 13.8KV, potencia entre 207 a 232 KVA una carga en amperios entre 150 y 168 A, y un rango de regulación del 10%.

Por ultimo veremos la imagen de cómo quedaría la instalación del banco de reguladores en la figura 72

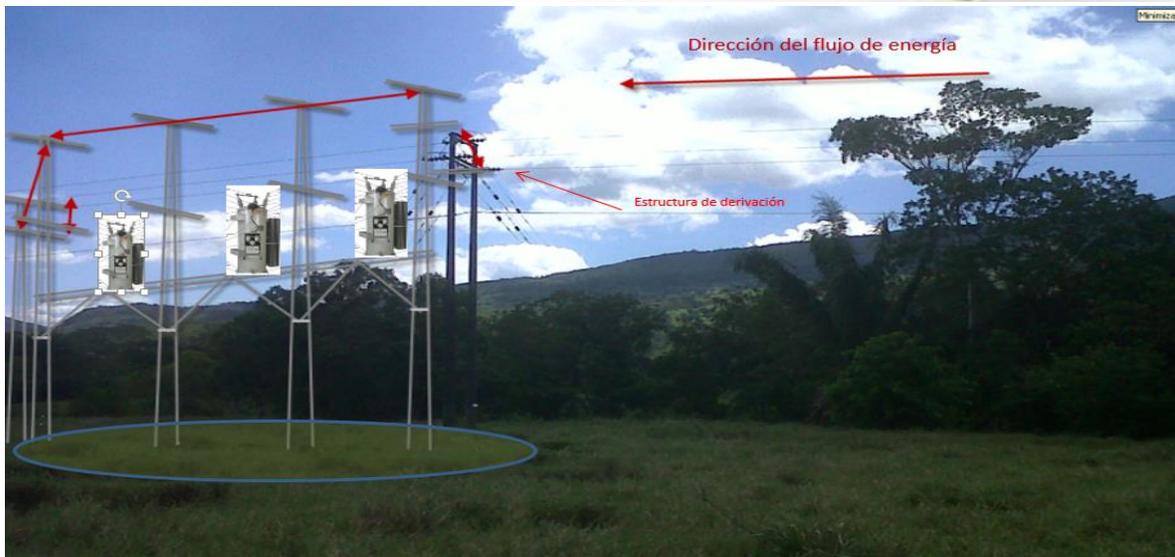
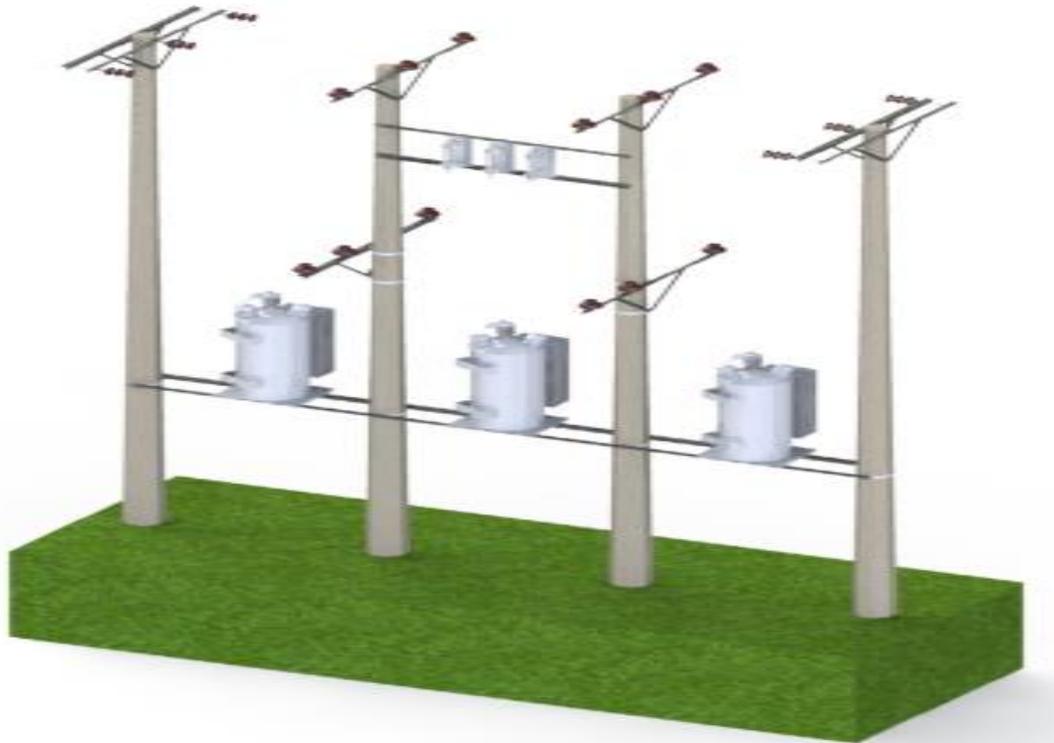


Figura 701. Montaje de reguladores de tensión

### 3.4 Proyección de la potencia.

En el cuadro 15 veremos la proyección de la potencia a 2024 del circuito PAMC2. Seguidamente en la figura 72 se mostrara el perfil de tensión proyectado igualmente a 10 años, lo anterior para verificar el buen funcionamiento y la capacidad de funcionamiento en el tiempo del regulador seleccionado.

UBICACIÓN	CARGA GENERAL ACTIVA (kW)	CARGA GENERAL REACTIVA (kVAR)	CARGA GENERAL APARENTE (KVA)
PUNTO 1	569,257	201,246	603,7826468

Tabla 15 Proyección de la potencia año 2024

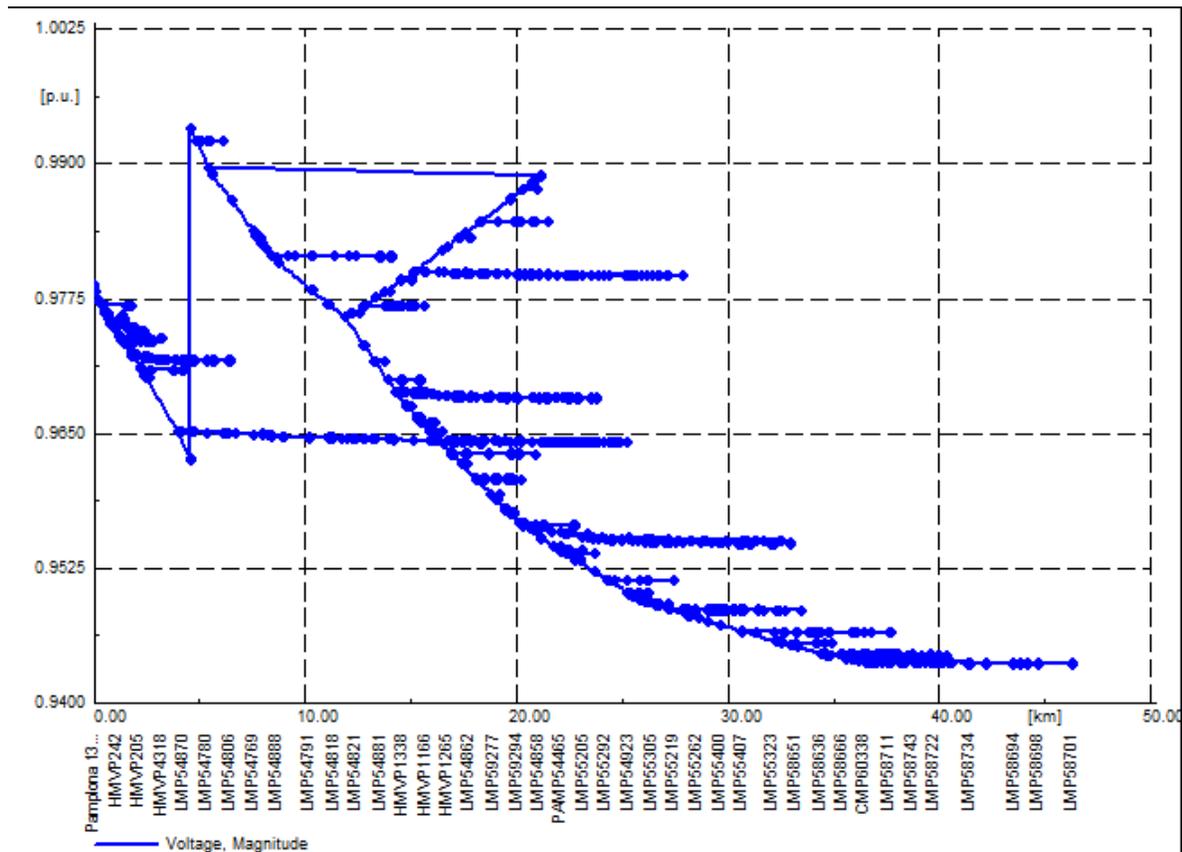


Figura 71 Perfil de tensión año 2024

Con lo anterior podemos comprobar un funcionamiento adecuado del banco de reguladores instalado dado que la tensión estará por encima del 0.94 en Pu 12.972 kv según el perfil de la figura 71, estando en un buen nivel de tensión y dentro del rango del 10% de la base de tensión que s de 13.8kv.

### 3.4.1 Proyección de la demanda

Ahora para aclarar cómo se hace la proyección de esta demanda nos basaremos en los documentos de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) 3.2.4 de 2013 [26].

#### Resultados de la proyección de demanda de energía eléctrica en el largo plazo

La Gráfica 72 presenta los tres escenarios de proyección de demanda de energía eléctrica para Colombia para las siguientes dos décadas. En el escenario medio se estima para el periodo comprendido entre los años 2012-20 un crecimiento promedio anual de la demanda de 3.9%, mientras para los escenarios alto y bajo tasas de 4.5% y 3.4%, respectivamente. Para la década 2020-2030, en el escenario medio se estima un crecimiento anual promedio de 3.0% y para los escenarios alto y bajo de 3.6% y 2.4%.

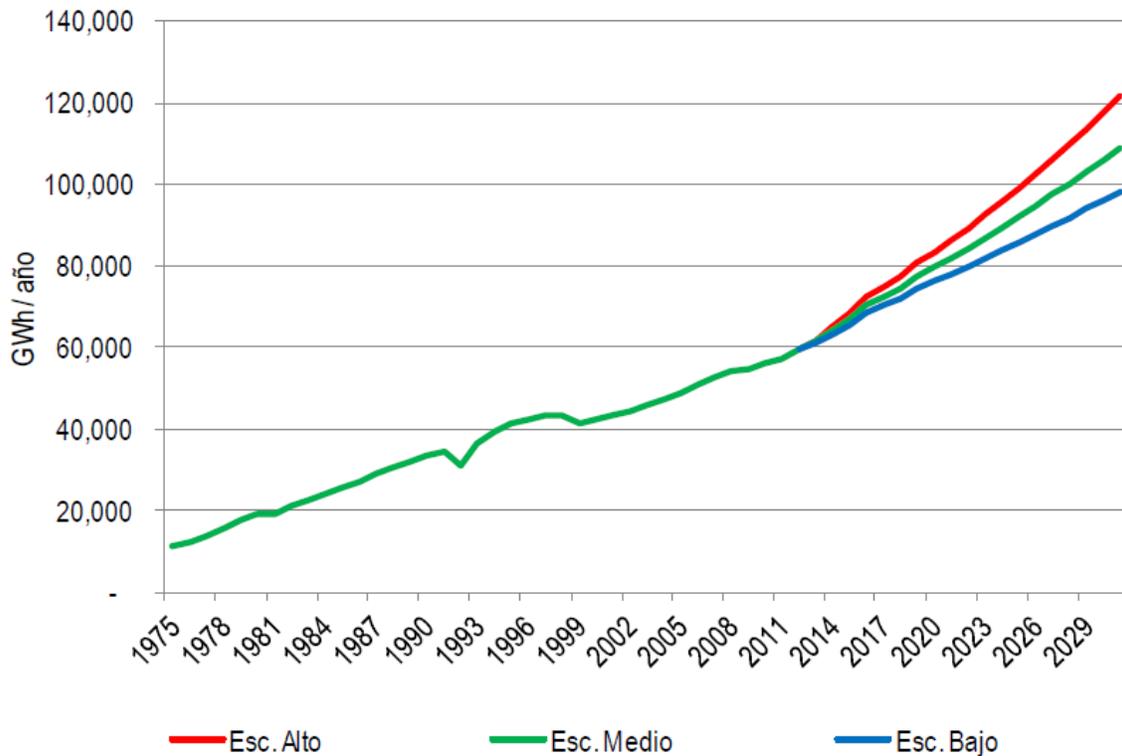


Figura 72 Escenarios de proyección de demanda nacional de energía eléctrica.[26]

### 3.5 Análisis económico

En este apartado revisaremos económicamente la viabilidad de la inversión en este tipo de tecnología FACTS aunque de partida para una empresa prestadora de

servicio la prioridad es la satisfacción de sus usuarios con la prestación de un buen servicio.

Para este ejercicio tomaremos el valor comercial de los reguladores, la compensación de la CREG a las electrificadoras por unidades constructivas y como pudimos ver las recuperaciones en pérdidas.

El valor comercial del banco (3 unidades) de reguladores monofásicos de tensión esta en \$ 66.000 dólares unos \$198.000.000 pesos, información suministrada por el Cooper power system representaciones « EATON», Distribuidor autorizado de Cooper Power Systems by EATON para el sector eléctrico colombiano[24].

La comisión de regulación de energía y gas CREG mediante la resolución 097 establece unos valores a compensar económicamente a las electrificadoras que realicen inversión en sus unidades constructivas buscando la prestación de un buen servicio con calidad y que además estas inversiones ayuden a garantizar la continuidad del mismo

CODIGO UC	DESCRIPCIÓN	VALOR INDIVIDUAL	VIDA ÚTIL	VALOR DEL BANCO
N2EQ21	REGULADOR DE VOLTAJE MONOFÁSICO HASTA 276 KVA	\$ 52,684,000	30	\$ 1,580,520,000

Tabla 16 Valores compensación CREG 097

En cuanto a la recuperación de pérdidas se reducen en un 6.55% con respecto al valor en el estado inicial que son de 39.81kw y el estado con compensación que serían de 37.2kw para un valor de 2.61kw/h recuperados.

El cálculo del valor monetario recuperado es el siguiente:

KW RECUPERADO	KW DIA	KW MES	KW AÑO	VALOR DEL KW	VALOR ANUAL
2.61	62.64	1879.2	22550.4	\$ 447.00	\$ 10,080,028.80

Tabla 17 Valor de las perdidas recuperadas

VALOR DEL REGULADOR	COSTO PÉRDIDAS RECUPERADAS	COMPENSACIÓN CREG	VALOR ANUAL RECIBIDO	TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN
\$198.000.000	\$10.080.028,00	\$52.684.000,00	\$62.764.028,00	<b>3 Años</b>

Tabla 18 Tiempo de retorno de la inversión

## CONCLUSIONES

- La tensión ideal en el punto más lejano debe ser igual a la tensión en la barra con un porcentaje de regulación del 0%, pero en la realidad es impráctica la regulación del 0%, ya que requiere un número elevado de FACTS con un control sincronizado para obtener una regulación 0.
- En el caso específico de la celda 2 el sistema de autotransformadores monofásicos cuenta con un rango de variación del 10% y adaptabilidad al sistema desbalanceado proporcionado por el control independiente, y funcional en el tiempo de vida estimado.
- El aporte de tensión mejora considerablemente el porcentaje de regulación en el 5% en el punto más lejano y reduce las pérdidas de potencia activa del circuito.
- La reducción de pérdidas debido al aumento de tensión y por ende reducción de la corriente es de 2.1kw/h
- Las magnitudes de potencia activa y reactiva no cambian ya que son propias de las cargas instaladas, el regulador solo realiza una transformación de voltaje y corriente en la línea.
- La solución D-FACTS seleccionada es viable económicamente analizando la reducción de las pérdidas y los aportes económicos de la CREG anual para la empresa CENS.
- El retorno de la inversión según lo extraído del análisis económico será a los 3 años de puesto en funcionamiento el banco de reguladores.
- Con la proyección de la demanda y la potencia a 2024 se comprueba el buen funcionamiento y la capacidad de compensación a la fecha proyectada
- Partiendo de las simulaciones realizadas, la ubicación del compensador afecta drásticamente el comportamiento de las tensiones del sistema.

- Ante el gran número de posibilidades de tecnología D-FACTS la metodología sugiere tener claros el tipo y la necesidad para determinar la tecnología específica que solucione el problema de transmisión.

## **RECOMENDACIONES**

- Elevar la tensión en la barra de la subestación para permitir la mayor estabilidad en la misma a lo largo del circuito.
- Instalar un compensador adicional para mejorar y reducir aún más la regulación de tensión.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] La Comisión de Regulación de Energía y Gas. Resolución N°024. «Por la cual se modifican las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables a los servicios de Distribución de Energía Eléctrica»,2005.

[2] H. K. Tyll y F. Schettle, «Historical overview on dynamic reactive power compensation solutions from the begin of ac power transmission towards present applications», Proc.IEEE Power Syst,2009, pp. 1 – 7.

[3] M.H. Rashid, «Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones», México. 3ª Edición. Prentice Hall, 2004, pp. 570 – 600.

[4] La Comisión de Regulación de Energía y Gas. Resolución N°70. «Por la cual se establece el Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional», 1998.

[5] IEEE STANDARD. «519-1992 - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems»,1992.

[6] F. De la Bodega, M.D Gutiérrez, Z. Aginako y J. Sagastabeitia, «FACTS Formas de usar más eficientemente las líneas eléctricas existentes», Departamento de

ingeniería eléctrica E.U.I.T.I. de Bilbao, publicación de la 11<sup>a</sup> . Conferencia HispanoLusa de Ingeniería Eléctrica (11CHLIE), Zaragoza, España, pp. 1–4.

[7] I. Valdiviezo, A. Rosales, «Estudio y Aplicación de FACTS en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano», Revista de las XXIV Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 202-209. ISBN:978-9978- 383-22-3, 2012, pp. 1 – 8.

[8] Hector Gerardo Sarmiento, «Algunas consideraciones para identificar la aplicación de controladores FACTS en los sistemas de transmisión», Artículo recomendado y aprobado por el Comité Nacional de CIGRÉ-México para presentarse en el Segundo Congreso Bienal, del 13 al 15 de junio del 2001, en Irapuato, Gto.

[9] M. H. Rashid , Electrónica de potencia circuitos, dispositivos y aplicaciones Tercera edición, Tercera edición ed., Mexico: Pearson Educación, 2004, pp. 570-600.

[10] E. H. Watanabe, M. Aredes, P. G. Barbosa, F. K. De Araújo Lima, R. F. Da Silva Dias y G. Santos Jr., «Flexible AC Transmission Systems,» de In Power Electronics Handbook, Tercera ed., M. . H. Rashid, Ed., Boston, Butterworth-Heinemann, 2011, pp. 851-877.

[11] N. G. Hingoranl y L. Gyugyi, Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, M. E. El-Hawary, Ed., New York: IEEE Prees, 2000.

[12] J. R. C. Orillaza y A. R. Wood, «Harmonic State-Space Model of a Controlled TCR,» IEEE Transactions on power delivery, vol. 28, n<sup>o</sup> 1, pp. 197- 205, 2013.

[13] W. Li-guo, X. Yu, R. Xiang, X. Dian-guo y X. Zhuang, «Passive Control on the Negative Effect of Thyristor Switched Capacitor (I),» de IEEE Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific, 2011.

[14] H. . K. Tyll y F. Schettler, «Historical overview on dynamic reactive power compensation solutions from the begin of AC power transmission towards present applications,» de IEEE Power Systems Conference and Exposition, Seattle, WA , 2009.

[15] Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, Plan de Expansión de Referencia Generación – Transmisión 2012-2025, Bogota: Ministerio de Minas y Energía, 2012.

[16] B. Gultekin y M. Ermis, «Cascaded Multilevel Converter-Based Transmission STATCOM: System Design Methodology and Development of a 12 kV  $\pm$ 12 MVar Power Stage,» IEEE Transactions on power electronics, vol. 28, n<sup>o</sup> 11, pp. 4930-4950, 2013.

- [17] . J. Nicklas, Ä. Lennart y N. Hans-Peter, «An Adaptive Controller for Power System Stability Improvement and Power Flow Control by Means of a Thyristor Switched Series Capacitor (TSSC),» IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, vol. 25, nº 1, pp. 381- 391, 2010.
- [18] H. García, J. Segundo y M. Madrigal, «Harmonic analysis of power systems including thyristor-controlled series capacitor (TCSC) and its interaction with the transmission line,» Electric Power Systems Research, vol. 106, pp. 151-159, 2014.
- [19] J. Rivera, «Modelamiento y Simulación de Dispositivos FACTS para Estudios Eléctricos de Estado Estable», Tesis de Maestría. Universidad de Antioquia, 2008.
- [20] S. Gasperic, R. Mihalic, «The impact of serial controllable FACTS devices on voltage stability», University of Ljubljana, 2014,
- [21] Deepak Divan and Harjeet Johal “Distributed FACTS—A New Concept for Realizing Grid Power Flow Control”; IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 22, NO. 6, NOVEMBER 2007
- [22] Katherine M. Rogers, Student Member, IEEE, Thomas J. Overbye, Fellow, IEEE < Power Flow Control with Distributed Flexible AC Transmission System (D-FACTS) Devices >
- [23] centrales electricas del norte de santander « CENS-NORMA TÉCNICA - CNS-NT-02 », capitulo 2 parametros de diseño numeral 2.4.2 febrero 2015
- [24] Cooper power system representaciones « EATON », Distribuidor autorizado de Cooper Power Systems by EATON para el sector eléctrico colombiano.
- [25] DlgSILENT PowerFactory « PowerFactory User’s Manual », Version 14.0; DlgSILENT GmbH Gomaringen, Germany 2008.
- [26] upme - Unidad de Planeación Minero Energética « Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia »