



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

## **DIRECCIÓN DE POSGRADO**

### **MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD**

#### **MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN**

**Título:**

---

**COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN LA  
LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN A 34.5 KV, ENTRE NPF  
Y SPF, PARA MEJORAR LA GENERACIÓN  
ELÉCTRICA.**

---

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad  
Mención Sistemas Eléctricos de Potencia

**AUTOR**

Aguayo Mopocita Héctor Leonardo

**TUTOR**

Ing. Proaño Maldonado Xavier Alfonso MSc.

**LATACUNGA – ECUADOR**

**2022**

## AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación "COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN LA LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN A 34.5 KV, ENTRE NPF Y SPF, PARA MEJORAR LA GENERACIÓN ELÉCTRICA" presentado por Héctor Leonardo Aguayo Mopocita, para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia.

### CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, septiembre, 25 del 2022




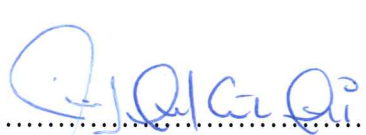
.....  
Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado MSc.  
CC.: 0502656424

## AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN LA LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN A 34.5 KV, ENTRE NPF Y SPF, PARA MEJORAR LA GENERACIÓN ELÉCTRICA”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, noviembre, 10, 2022

  
.....  
Msc. Jefferson Alberto Porras Reyes  
**Miembro de Tribunal 1**  
Presidente del tribunal  
C.C.: 0704400449

  
.....  
Msc. Luis Rolando Cruz Panchi  
**Miembro de Tribunal 2**  
C.C.: 0502595176

  
.....  
MSc. Franklin Vásquez Teneda  
**Miembro de Tribunal 3**  
C.C.: 1710434497

## **DEDICATORIA**

Este trabajo dedico a Dios por la bendición de haber culminado una etapa de mi vida.

A mis padres Walter y Magdalena, por el esfuerzo y apoyo recibido en todo momento.

A Alexandra por ser mi compañera y pilar de mi existencia, con su forma de ser y por el apoyo incondicional que siempre me brinda.

Y al regalo más importante que he recibido del creador, a Arlet, por llegar a iluminar nuestro hogar y ser la inspiración y motivo de ser mejor cada día.

*Héctor*

## **AGRADECIMIENTO**

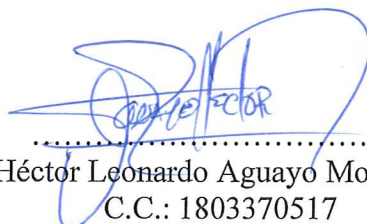
Agradezco a la Universidad Técnica de Cotopaxi, a todo su cuerpo docente por la dedicación desinteresada en compartir sus conocimientos y la guía brindada para la culminación de la presente investigación.

*Héctor*

## RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, noviembre, 10, 2022

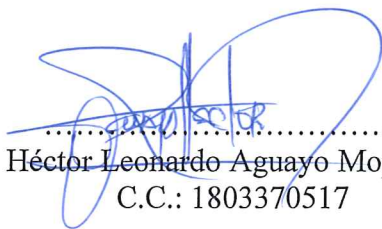
A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'HÉCTOR', is written over a horizontal dotted line. The signature is stylized and somewhat abstract.

Héctor Leonardo Aguayo Mopocita  
C.C.: 1803370517

## RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, noviembre, 10, 2022



.....  
Héctor Leonardo Aguayo Mopocita  
C.C.: 1803370517

## AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN LA LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN A 34.5 KV, ENTRE NPF Y SPF, PARA MEJORAR LA GENERACIÓN ELÉCTRICA”, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, noviembre, 10, 2022

  
.....  
Msc. Jefferson Alberto Porras Reyes  
Presidente del tribunal  
C.C.: 0704400449

**UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI  
DIRECCION DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD  
MENCION SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Title:** “Reactive power compensation in the 34.5 kV sub-transmission line between NPF and SPF to improve electricity generation.”

**Autor:** Aguayo Mopocita Héctor Leonardo

**Tutor:** Xavier Proaño Msc.

**ABSTRACT**

This research analyzes reactive power compensation in medium voltage sub-transmission lines to improve power generation.

The formulation of the problem aims to minimize generation costs by improving the power factor at the sub-transmission level and reducing losses in the system as a result of an adequate power factor, as well as minimize investment costs by implementing an analysis methodology that determines the most appropriate type of compensation for the system based on its inherent characteristics. The investigation aimed to determine bibliographically, based on the applicable standards, the limits of optimal compensation of the power factor; the collection of field data through the electrical SCADA, and measurements of energy quality in the generation bar, which is part of the analysis of the determination of the capacitive power required for the system and the type of compensation suitable for the SEP operation.

It was evaluated through simulations in the ETAP software to determine the applicability of the proposed solution and the optimal location of the compensation. Technically, the decrease in transmission demand was determined by 14%, and the reduction of losses associated with an inadequate power factor was 2.10%, which represents a saving of around 126 thousand dollars per year; in the economic part, its feasibility was evaluated through 5 financial indicators, so the results obtained were satisfactory.

**KEYWORD:** Reactive power compensation; Substream; Generation Improvement

Yo, Wilmer Patricio Collaguazo Vega con cédula de identidad número: 1722417571 Magister en: Pedagogía del Inglés como Lengua Extranjera, con número de registro de la SENESCYT: 1027-2021-2388034 ; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: “Compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión a 34.5 kV, entre NPF y SPF, para mejorar la generación eléctrica.”; de Aguayo Mopocita Héctor Leonardo, aspirante a Magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.



.....  
Wilmer Patricio Collaguazo Vega  
**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS UTC**  
**CC: 1722417571**

Latacunga, noviembre, 10, 2022



**CENTRO  
DE IDIOMAS**

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## DIRECCIÓN DE POSGRADO

### MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

#### MENCION SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

**Título:** Compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión a 34.5 kV, entre NPF y SPF, para mejorar la generación eléctrica.

**Autor:** Aguayo Mopocita Héctor Leonardo

**Tutor:** Xavier Proaño MSc.

### RESUMEN

La presente investigación abarca un análisis de compensación de potencia reactiva en las líneas de subtransmisión en medio voltaje, con la finalidad de mejorar la generación eléctrica.

La formulación del problema pretende minimizar los costos de generación, mejorando el factor de potencia a nivel de subtransmisión y disminuyendo las pérdidas en el sistema como resultado de un factor de potencia adecuado, así también busca minimizar los costos de inversión al implementar una metodología de análisis que determine el tipo de compensación más adecuada al sistema, en función de las características inherentes del mismo.

La investigación consistió en determinar bibliográficamente en función de los estándares aplicables, los límites de compensación óptima del factor de potencia, la recolección de los datos de campo a través del SCADA eléctrico y mediciones de calidad de energía en la barra de generación, siendo parte del análisis la determinación de la potencia capacitiva requerida para el sistema y el tipo de compensación adecuado a la operación del SEP.

Para determinar su aplicabilidad de la solución planteada y la ubicación óptima de la compensación, se evaluó a través de simulaciones en el software ETAP. De forma técnica se determinó la disminución de la demanda de transmisión en un 14%, la disminución de las pérdidas asociadas por un factor de potencia no adecuado fue del 2.10%, lo que representa un ahorro del alrededor de 126 mil dólares anuales, en la parte económica se evaluó su factibilidad a través de 5 indicadores financieros, por lo que los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

**PALABRAS CLAVE:** Compensación de potencia reactiva; Subtransmisión; Mejora de Generación.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI  
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD  
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Title:** “Reactive power compensation in the 34.5 kV sub-transmission line between NPF and SPF to improve electricity generation.”

**Autor:** Aguayo Mopocita Héctor Leonardo  
**Tutor:** Xavier Proaño MSc.

**ABSTRACT**

This research analyzes reactive power compensation in medium voltage sub-transmission lines to improve power generation.

The formulation of the problem aims to minimize generation costs by improving the power factor at the sub-transmission level and reducing losses in the system as a result of an adequate power factor, as well as minimize investment costs by implementing an analysis methodology that determines the most appropriate type of compensation for the system based on its inherent characteristics.

The investigation aimed to determine bibliographically, based on the applicable standards, the limits of optimal compensation of the power factor; the collection of field data through the electrical SCADA, and measurements of energy quality in the generation bar, which is part of the analysis of the determination of the capacitive power required for the system and the type of compensation suitable for the SEP operation.

It was evaluated through simulations in the ETAP software to determine the applicability of the proposed solution and the optimal location of the compensation. Technically, the decrease in transmission demand was determined by 14%, and the reduction of losses associated with an inadequate power factor was 2.10%, which represents a saving of around 126 thousand dollars per year; in the economic part, its feasibility was evaluated through 5 financial indicators, so the results obtained were satisfactory.

**KEYWORD:** Reactive power compensation; Substream; Generation improvement

Yo, Wilmer Patricio Collaguazo Vega con cédula de identidad número: 1722417571 Magister en: Pedagogía del Inglés como Lengua Extranjera, con número de registro de la SENESCYT: 1027-2021-2388034 ; CERTIFICO haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: “Compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión a 34.5 kV, entre NPF y SPF, para mejorar la generación eléctrica.”; de Aguayo Mopocita Héctor Leonardo, aspirante a Magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Latacunga, noviembre, 10, 2022

.....  
Wilmer Patricio Collaguazo Vega  
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS UTC  
CC: 1722417571

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA METODOLÓGICA .....	6
1.1. Antecedentes de la investigación.....	6
1.2. Fundamentación Teórica. ....	11
1.2.1. Sistema eléctrico de potencia (SEP).....	11
1.2.2. Potencia Activa. ....	12
1.2.3. Potencia Reactiva. ....	13
1.2.4. Armónico característico .....	13
1.2.5. Efectos de la potencia reactiva en los sistemas eléctricos.....	13
1.2.6. Compensación de potencia reactiva dentro de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP).....	14
1.2.7. Determinación de tipo de compensación reactiva. ....	18
1.2.8. Cálculo de la compensación reactiva. ....	23
1.2.9. Especificación de la compensación reactiva. ....	26
1.2.10. Control y operación de la compensación reactiva. ....	27
1.3. Fundamentación metodológica.....	32
1.3.1. Tipo de investigación. ....	32
1.4. Conclusiones Capítulo I .....	34
CAPITULO II PROPUESTA.....	35
2.1. Título del proyecto. ....	35
2.2. Objetivo del proyecto. ....	35
2.3. Descripción de la propuesta.....	35
2.4. Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados. ....	37
2.4.1. Ubicación de la investigación .....	37
2.4.2. Diagrama Unifilar .....	37

2.4.3.	Descripción de la generación existente en el Bloque 16.....	39
2.5.	Determinación del tipo de compensación.....	43
2.6.	Conclusiones Capítulo II.....	44
CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA .....		46
3.1.	Análisis de resultados.....	46
3.1.1.	Curvas de Generación del Bloque 16.....	46
3.1.2.	Histograma de frecuencias de la generación del Bloque 16.....	48
3.1.3.	Curva característica de la generación del Bloque 16 por hora. ....	49
3.1.4.	Histograma de frecuencias de la subtransmisión NPF y SPF. ....	50
3.1.5.	Costos de generación por hora sin compensación.....	52
3.1.6.	Costos de subtransmisión por hora sin compensación. ....	53
3.1.7.	Simulación condición actual del sistema, por medio de herramientas computacionales.....	53
3.1.8.	Despacho económico de energía en condición actual del sistema. .	55
3.1.9.	Determinación de la propuesta de compensación de potencia reactiva.	56
3.1.10.	Simulación del sistema con la compensación de potencia reactiva propuesta, por medio de herramientas computacionales. ....	57
3.2.	Resultados de la compensación de potencia reactiva. ....	58
3.3.	Especificación del banco de capacitores. ....	59
3.4.	Análisis técnico de los resultados.....	62
3.5.	Validación económica de los resultados.....	64
3.5.1.	Flujo Neto de Efectivo (FNE).....	65
3.5.2.	Pay Back o plazo de recuperación (PR). ....	66
3.5.3.	Tasa Interna de Rendimiento (TIR) .....	67
3.5.4.	El coste promedio ponderado del capital (WACC).....	67
3.5.5.	El Valor Actual Neto (VAN) .....	67

3.5.6. Relación Beneficio Costo (RBC) .....	67
3.5.7. Análisis de indicadores económicos .....	67
3.6. Conclusiones del capítulo III.....	68
CONCLUSIONES GENERALES .....	69
RECOMENDACIONES .....	71
BIBLIOGRAFÍA.....	72
ANEXOS.....	76

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Sistemas de tareas con relación a los objetivos específicos.....	4
Tabla 2: Armónicos voltaje y corriente del X-1014.....	10
Tabla 3: Armónicos voltaje y corriente del BAA901 .....	10
Tabla 4: Potencia reactiva capacitiva inherente a líneas de transmisión aéreas ....	16
Tabla 5: Problemas en los SEPs que pueden requerir compensación reactiva .....	21
Tabla 6: Velocidad relativa de respuesta requerida para el control de diversos fenómenos que se presentan en el SEP .....	22
Tabla 7: Guía de aplicación de equipo compensador de VARs.....	22
Tabla 8: Número mínimo recomendado de unidades en parralero por grupos en serie para limitar el voltaje remanente a 110% sin una unidad.....	26
Tabla 9: BIL y Clasificación típica de voltaje y potencia reactiva .....	26
Tabla 10: Capacidad instalada Bloque 16.....	41
Tabla 11: Consumo del gas asociado a la producción en la generación del Bloque 16.....	41
Tabla 12: Demanda por tipo de combustible y costo de energía .....	42
Tabla 13: Generación del bloque 16 por hora, para determinar la curva característica .....	48
Tabla 14: Frecuencias para histograma .....	48
Tabla 15: Energía transmitida por la línea de Subtransmisión NPF-SPF TAG 5NS-001 .....	50
Tabla 16: energía transferida NPF – SPF por la línea de Subtransmisión NPF-SPF TAG 5NS-001, en MW .....	50
Tabla 17: Frecuencias para histograma, demanda subtransmisión NPF-SPF en MW.....	51
Tabla 18: Costos de generación Bloque 16 .....	52
Tabla 19: Flujos de potencia y parámetros eléctricos de la simulación .....	54
Tabla 20: Despacho económico con una demanda promedio de 72,97 MW .....	56
Tabla 21: Flujos de potencia y parámetros eléctricos de la simulación con compensación de reactivos.....	57
Tabla 22: Comparación flujos de potencia estado actual VS compensado.....	59

Tabla 23: Comparación costos de generación estado actual VS compensado por día.....	59
Tabla 24: Comparación costos de generación estado actual VS compensado.....	59
Tabla 25: Especificación de banco de capacitores .....	61
Tabla 26: Flujo Neto de Efectivo (FNE) a 5 años.....	65
Tabla 27: Amortización de la inversión a 5 años .....	66
Tabla 28: Periodo de retorno (PR).....	66
Tabla 29: Resumen de indicadores económicos .....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Armónicos voltaje y corriente del X-1014.....	10
Fig. 2. Armónicos voltaje y corriente del BAA901 .....	11
Fig. 3. Principio de compensación reactiva por banco capacitores.....	19
Fig. 4. Diferencia entre $\cos \varphi$ y factor de potencia .....	20
Fig. 5. Criterio de selección de tipo de compensación.....	23
Fig. 6. Reducción de perdidas por efecto Joule Vs $\cos \varphi$ .....	25
Fig. 7. Configuración banco de capacitores .....	27
Fig. 8. Control automático banco capacitores .....	28
Fig. 9. Transitorio de sobre voltaje por el cierre simultaneo de las 3 fases del banco de capacitores con la fase A en pico de voltaje .....	29
Fig. 10. Transitorio de sobre corriente por el cierre simultaneo de las 3 fases del banco de capacitores con la fase A en pico de voltaje .....	30
Fig. 11. Tensión de reencendido del interruptor por des energización del banco de capacitores .....	31
Fig. 12. Flujograma de la metodología .....	36
Fig. 13. Ubicación del Bloque 16.....	37
Fig. 14. Diagrama Unifilar de la línea de subtransmisión entre NPF y SPF del Bloque 16 .....	38
Fig. 15. Sistema de Distribución eléctrica del Bloque 16 .....	39
Fig. 16. Sistema de distribución y generación del Bloque 16 .....	40
Fig. 17. Generación por tipo de combustible .....	42
Fig. 18. Demanda por tipo de sistemas .....	42
Fig. 19. SCADA de generación eléctrica del Bloque 16.....	43
Fig. 20. Curva de demanda del Bloque 16, histórico de los 8 meses del 2022 ....	47
Fig. 21. Histograma de frecuencias .....	49
Fig. 22. Curva característica.....	49
Fig. 23. Histograma de frecuencias subtransmisión NPF-SPF .....	51
Fig. 24. Curva característica demanda subtransmisión NPF-SPF.....	52
Fig. 25. Costos por hora de generación del Bloque 16, obtenida de la curva característica .....	53

Fig. 26. Simulación condición actual a Demanda promedio de curva característica .....	54
Fig. 27. Flujograma para el despacho económico .....	55
Fig. 28. Simulación condición actual a Demanda máxima .....	58
Fig. 29. Método de control Automático de compensación y control de voltaje ..	60

## ÍNDICE DE ECUACIONES

(1) Factor de potencia óptimo.....	28
(2) Cálculo de potencia necesaria del banco de capacitores.....	28
(3) Cálculo capacitancia del banco de capacitores.....	28
(4) Índice de pérdidas.....	29
(5) Tamaño paso máximo del banco de capacitores.....	62

## INTRODUCCIÓN

**Antecedentes:** El presente trabajo está enmarcado dentro de la línea de investigación en electricidad, mención en sistemas eléctricos de potencia y sub línea de conversión y uso racional de la energía eléctrica, el ámbito de análisis está basado en la compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión a 34.5 kV, entre North Production Facilities (NPF) y South Production Facilities (SPF) pertenecientes al Bloque 16.

El Plan Nacional de Eficiencia Energética (PLANEE) impulsado por el Ministerio de Energía y Minas, busca promover el uso eficiente, racional y sostenible de la energía en todas sus formas, a fin de incrementar la seguridad energética del país; al ser más eficiente, aumentar la productividad energética, fomentar la competitividad de la economía nacional [1], la compensación suministra energía reactiva a un sistema de subtransmisión, por lo que reduce significativamente las pérdidas de energía, incrementando la eficiencia del sistema, por lo cual se relaciona directamente al tema de investigación, resultando en la reducción del costo de levantamiento artificial de cada barril de petróleo producido en el Bloque 16.

En el año 2019, se realizó un estudio del sistema eléctrico de potencia del Bloque 16, donde se analizó la calidad de energía tanto en la carga, sistema de distribución, sistema de subtransmisión y sistema de generación, dentro de esta evaluación se concluyó que la red de subtransmisión tiene un factor de potencia bajo, por lo que el sistema presenta una oportunidad de reducir los costos de generación eléctrica, mejorando el factor de potencia con la compensación de potencia reactiva, cuyos resultados representarán la disminución de los costos de generación.

De acuerdo el ARCONEL004/15 en el artículo 313 determina que el Estado se reserva el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores estratégicos de conformidad con los principios de sostenibilidad ambiental, prevención y eficiencia. La investigación tiene como marco de referencia, normativa nacional como internacional, tal es el caso que su desarrollo se guio en la Ley Orgánica de Eficiencia Energética (LOEE) publicada en el Registro Oficial

No 449 del 19 de marzo del 2019, a la par del Reglamento General de la Ley Orgánica de Eficiencia Energética, según Decreto Ejecutivo No 229 del 20 de octubre del 2021, así como también la IEEE 1036 que es la guía para la aplicación de capacitores de potencia en Shunt, IEEE 18 Estándar para capacitores de potencia en Shunt, IEC 60871-1-4, que trata sobre Condensadores a instalar en paralelo en corriente alterna de tensión asignada superior a 1000 V y la IEC 61954 Pruebas para tiristores de Static VAr Compensator (SVC).

El **Planteamiento del problema** de esta investigación se fundamenta con teorías respecto a la compensación de potencia reactiva de energía eléctrica requerida para la operación del Bloque 16, la cual proviene en su totalidad de generación térmica, que utiliza tres tipos de combustibles: gas natural, crudo y diésel, para minimizar el costo de generación eléctrica, el sistema de generación prioriza el despacho de carga en función del tipo de combustible, se privilegia primero el uso de todo el gas natural disponible, luego se suma la generación a crudo y finalmente completando la demanda de energía con generación a diésel.

Para la subtransmisión de la energía eléctrica entre los campos NPF y SPF, se dispone de un cable de interconexión de 68 km a 34,5 kV, que va en su totalidad de forma soterrada, con cable tripolar armado, para el control del sistema eléctrico se dispone de un sistema SCADA, con el cual se monitorea todos los parámetros eléctricos y las diferentes plantas de generación eléctrica.

La mayor cantidad de cargas en el sector petrolero son no lineales, es común la utilización de variadores de frecuencia para las bombas electro sumergibles, arrancadores suaves para motores de gran potencia como son los motores que impulsan las bombas de reinyección de agua de formación las cuales son cargas de 1500 y 3000 HP, con alimentadores eléctricos de considerable longitud.

La condición de operación de la subtransmisión NPF y SPF es relativamente estable en el tiempo, con ciertas variaciones dependiendo de los requerimientos energéticos del proceso de producción de petróleo, actualmente esta línea de subtransmisión no dispone de una compensación de potencia reactiva, por lo que los reactivos son aportados por las plantas de generación eléctrica.

La reducción de pérdidas de energía eléctrica se convierte a su vez en una mayor disponibilidad de energía y menores gastos operativos, maximizando el beneficio económico de consumo de electricidad, situación que implica, a nivel del sector energético, una mayor utilización de energía primaria y una eventual disminución de inversiones en el área.

En la línea de subtransmisión eléctrica a 34.5 kV entre NPF y SPF, la potencia reactiva para mantener el nivel de voltaje en la red, al no disponer de compensación, la potencia reactiva necesaria, proviene de las fuentes de generación, teniendo pérdidas de potencia activa y reactiva en la subtransmisión, conductores sobre cargados, factor de potencia bajos y perfiles de voltaje no adecuados, para compensar los niveles de voltaje y el factor de potencia, actualmente se lo realiza con las fuentes de generación, esto significa un costo de consumo adicional de combustible.

**Formulación del problema** para mejorar el factor de potencia que permita disminuir los costos de generación y reducir las pérdidas en un SEP, se lo realiza con métodos de compensación de reactivos, por lo que se plantea la siguiente interrogante ¿Qué tipo de compensación y cual debería ser su potencia reactiva, a instalarse en la línea de subtransmisión eléctrica a 34.5 kV, entre NPF y SPF, del Bloque 16?

### **Objetivo general**

Determinar la compensación de potencia reactiva necesaria en la línea de subtransmisión a 34.5 kV, entre NPF Y SPF, para mejorar la generación eléctrica, mediante el análisis del factor de potencia, para la disminución de pérdidas y costos de generación.

### **Objetivos Específicos**

Se han establecido los siguientes objetivos específica:

- Revisar de forma crítica la bibliografía y normativa existente, referente a la compensación de la potencia reactiva en sistemas de subtransmisión, para sustentar el desarrollo de la investigación.

- Analizar el estado actual del sistema y determinar la propuesta de solución.
- Modelar los flujos de potencia con herramientas computacionales.
- Evaluar prefactibilidad de la compensación de potencia reactiva.

Tabla 1: Sistemas de tareas con relación a los objetivos específicos

Objetivos específicos	Actividad	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
1	Recopilación bibliográfica de la información referente a la investigación, tesis, libros, revistas, estudios previos.	Sustentar el desarrollo de la investigación.	Investigación de Documentos técnicos, informes trabajos previos, revisión de fuentes bibliográficas, linkografías
	Revisión de normativas nacionales e internacionales sobre el tema de investigación.	Establecer rangos de aceptabilidad determinados en los estándares.	Investigación de Normativa, nacional e internacional.
2	Analizar el sistema actual.	Determinación del comportamiento previo a compensación de reactivos.	Procesamiento de los datos recolectados.
	Determinación de la propuesta de solución.	Definir una propuesta de compensación de reactivos.	Aplicación de lineamientos normativos, para determinar propuesta de compensación.
3	Modelado de flujos de potencia.	Determinar del comportamiento del sistema con la propuesta de solución.	Utilización herramientas computacionales, Software ETAP
4	Análisis de la prefactibilidad económica para una futura implementación.	Análisis económico, TIR, VAN	Índices económicos

Elaborado por Héctor Aguayo (2022)

**Justificación** se debe a que con la implementación de una compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión a 34.5 KV, entre NPF y SPF del bloque 16, mejorará el factor de potencia, lo cual permitirá reducir las pérdidas y disminuir los costos de generación, por lo que es importante mantener el sistema eléctrico de potencia operando de forma adecuada, más aun considerando que la mayor parte del costo de producción de un barril de petróleo (lifting cost), corresponde a los gastos en generación eléctrica.

La operación del sistema eléctrico del Bloque 16 depende de la demanda energética de las diferentes plataformas de extracción de petróleo, con rutinarios

arranques y paradas de equipos tanto de superficie como de fondo, en especial cuando entran o salen de operación grandes cargas, como son los motores de 1500 y 3000 HP de las bombas utilizadas en el transporte y reinyección de agua de formación, siendo típico operar el sistema de generación de forma interconectada entre las plantas del NPF y SPF, a través de la línea de subtransmisión a 34,5 kV, con un conductor soterrado de longitud de 68 km, para asumir de forma más robusta las perturbaciones del ingreso de estas cargas. Por lo que esta interconexión demanda de potencia reactiva, para el transporte de la potencia activa entre NPF y SPF, que actualmente proviene del sistema de generación, con resultados no apropiados, como son: consumo adicional de combustible, pérdidas por generación y subtransmisión, bajo factor de potencia y perfiles de voltaje no adecuados.

Los sistemas de compensación de potencia reactiva, diseñados y ubicados adecuadamente, reaccionan rápidamente, suministrando los requerimientos de reactivos para el sistema y actualmente son de uso generalizado, afianzados en el desarrollo de la electrónica de potencia. Por los problemas que se identifican y que afectan directamente a las líneas de subtransmisión y los sistemas de generación sincrónicos, que son la fuente de este sistema, se justifica realizar la presente investigación, con la finalidad de plantear una alternativa técnica y económica viable, mediante la compensación de potencia reactiva, con beneficios en cuanto a la reducción de consumo de combustible, reducción de pérdidas de energía, liberación de capacidad del sistema de transporte, perfiles de voltaje adecuados del Bloque 16.

**Hipótesis:** con la compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión a 34.5kV, entre NPF y SPF, se pretende mejorar la generación eléctrica del Bloque 16, con la reducción de pérdidas en el sistema y reducción de costos de generación.

# CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA METODOLÓGICA

## 1.1. Antecedentes de la investigación

En la actualidad la compensación de potencia reactiva con técnicas innovadoras aplicadas para mejorar los sistemas de transmisión es sumamente explotado y tiene un desarrollo bastante extenso, aplicando métodos y técnicas que permiten realizar cálculos de optimización reactiva en la compensación de redes de suministro eléctrico, lo que permite evaluar diferentes opciones de conexión de los elementos correctores (secciones del banco de compensación y taps de trabajo en el transformador), donde la existencia de un elevado número de nodos, conduce a minimizar el tiempo de proceso requerido, para encontrar una solución sin afectar la calidad del suministro eléctrico [2].

La aplicación de los sistemas de compensación de potencia reactiva conlleva un uso más eficiente de la energía, sin embargo, un resultado adecuado, depende de su parametrización, ubicación, selección del tipo de compensador y su forma de operación, para lo cual, mediante la técnicas de algoritmo genético simple, y la ubicación de bancos de condensadores fijos (simétricos y asimétricos) aplicados en sistemas de distribución primaria, demuestran una compensación efectiva en las fases, lo que permiten compensar la potencia reactiva y corregir el factor de caída de potencia activa, esto a través de bancos de condensadores demostrando mayor reducción de pérdidas al desbalance en el circuito [3].

El flujo de potencia reactiva, constituye el análisis técnico del comportamiento de los distintos elementos de los que dispone el sistema de potencia eléctrica, esta depende de la localización de las mismas y la estructura del sistema de transmisión, los cuales son vitales para garantizar el voltaje del sistema, razón por la cual se hace indispensable la operación de las fuentes de potencias, a través de un nivel de eficiencia energética, identificando los niveles de tolerancias de voltajes para el transmisor y los valores de factores de potencia de la distribución que es recomendando  $\pm 7\%$  para alto voltaje y  $\pm 8\%$  para medio voltaje. [4].

El continuo incremento relacionado con la demanda de energía eléctrica produce sobrecargas en las líneas de transmisión y subestaciones, por lo tanto es imprescindible aplicar estudios relacionados con ajustes y compensaciones de la potencia reactiva para prevenir, mitigar, y mejorar la calidad del servicio, de modo que la potencia total que debe ser suministrada por el sistema en cada instante tiene que ser igual a la potencia total absorbida, por las cargas más las pérdidas del sistema, para lo cual se debe simular y analizar el flujo de potencia reactiva para evitar fallas en transformadores y líneas de transmisión sobrecargadas a bajos voltajes. [5]

El factor de potencia define cuanto porcentaje de energía se convierte en trabajo útil, razón por la cual se debe considerar el balance de las cargas en las líneas donde se vaya a realizar las pruebas, para asegurar que no exista fallas en la compensación reactiva, realizando la mayor cantidad de combinaciones posibles de los bancos de capacitores ya sea en serie paralelo, conexión estrella, y conexión delta, para obtener bancos con potencias menores, la cual permitirá obtener una potencia con un desempeño dinámico más fina, con el propósito de que la fuente de alimentación externa sea regulada en la red principal y evitar que esta se comporte de manera inestable. [6]

Con la compensación de reactivos, los consumos de energía pueden disminuir, lo que permite compensar la potencia reactiva inductiva y capacitiva sin cargar los elementos de red, en el punto de interconexión de la carga y la compensación, dentro de las redes de fábrica, con esta técnica también debe manifestarse positivamente la energía activa, ya que se minimizan pérdidas de transmisión sobrecargadas, se reduce la carga de transformadores en líneas, logrando evitar el sobredimensionado, esto significa un aumento de la seguridad en el servicio de la red de suministro eléctrico, un aumento de la vida útil de los medios de producción [7]. El déficit no compensado de potencia reactiva en las redes, suministrado de los generadores, disminuye la capacidad de transmisión de potencia activa por la red, aumentando las pérdidas y generando caídas de tensión, por lo cual se debe mejorar el sistema y las condiciones de cargabilidad energética en líneas y transformadores, principales para obtener un mejor desempeño frente a pérdidas de líneas intempestivas. [8]

La compensación de potencia reactiva con capacitores y armónicos en filtros pasivos puede generar una solución para la optimización de la energía eléctrica, para lo cual se debe analizar un conjunto de compensadores pasivos (capacitores o filtros sintonizados) para lograr un máximo ahorro anual de pérdidas y maximizar el incremento de la calidad de la energía en el circuito, obteniendo eficiencia y calidad en las redes de distribución, mitigando la distorsión producida por las cargas no lineales, logrando disminuir la posible resonancias entre los elementos inductivos del sistema y los bancos de capacitores existentes [9].

Uno de los aspectos principales para la implementación de un proyecto es el factor económico o la rentabilidad de la inversión, y en este sentido las investigaciones de los últimos años respecto a nuevas metodologías que maximice el retorno económico en un tiempo prudencial aplicando herramientas tecnológicas; como simulaciones computacionales que permiten asimilar en tiempo real la colocación de diferentes estrategias para mejorar la potencia reactiva y determinar la prefactibilidad económica del sistema en un tiempo real, pues la principal ventaja de estas simulaciones permiten realizar, interpretar y analizar el procedimiento técnico y económico integrados en una función económica, modelada en el Valor Actual Neto (VAN) [3].

El estudio acerca de los sistemas de compensación de potencia reactiva y sus características de desbalance permitirá identificar los flujos contractuales del factor energético con el fin de establecer los niveles de voltaje tolerables y minimizar las pérdidas de potencia activa total. [10].

La compensación óptima de potencia reactiva se debe realizar mediante la ubicación de dispositivos Flexible AC Transmission Systems (FACTS) y Static VAR Compensator (SVC) en las barras de un sistema de transmisión para mejorar la componente reactiva, el perfil de voltaje en los nodos y el ángulo de tensión, buscando minimizarlas pérdidas de potencia en el sistema que a su vez reducirá los costos de suministro, mismos que es factible con una serie de cambios de topología, mismas que requieren una aplicación crecientes con compensación reactiva, esto se debe a que la compensación por fases permite una mayor reducción de pérdidas al compensar el desbalance. [11].

La teoría de la potencia alternativa para un sistema de compensación reactiva se aplicara previamente en una línea de transmisión, mediante el cual se identificara los flujos de potencia, el que representara una transferencia eficiente de energía desde la red de suministro hacia la carga, tratando de compensar la potencia reactiva, disminuyendo las corrientes ineficientes con potencias instantáneas bidireccionales o nulas, que circulan entre la red de suministro, ya que estas potencias instantáneas no representan un intercambio efectivo de energía, provocando pérdidas y efectos nocivos en los sistemas eléctricos [12].

Las redes eléctricas de distribución presentan un aumento progresivo de cargas no lineales que incrementan la inyección de corrientes y tensiones armónicas, originando problemas como: calentamiento en transformadores, vibraciones en motores, bajo factor de potencia activa, disparos indeseados en equipos de protección, excesiva corriente por el conductor neutro [13]. Para mitigar tal falencia se debe aplicar el algoritmo de compensación, para la reducción de armónicos de la corriente, porque al utilizar filtros pasa banda, atenúa el efecto que tienen los armónicos de tensión en el punto de conexión, sobre las corrientes de compensación, evitando generar distorsiones en la red de alimentación [14]

El dispositivo más utilizado en las redes de los sistemas eléctricos es el FACT de potencia SVC, esto es debido a su excelente desempeño para mejorar la estabilidad de la red [15], actuando como un compensador estático de potencia reactiva conectado en paralelo con una salida variable, la cual permite el intercambio de corriente tanto capacitiva como inductiva para así proporcionar una estabilidad de tensión en el sistema eléctrico de potencia [16]. Así mismo otro dispositivo recomendado es el Static Synchronous Compensator (STATCOM) es uno de los compensadores más fundamentales de los FACTS, ya que dichos dispositivos se utilizan cada vez con más frecuencia en líneas de transmisión largas en sistemas eléctricos de potencia actuales [17].

En el año 2019 se realizó un proyecto de Optimización Energética del Bloque 16, por parte de una empresa contratista, donde se realizó la evaluación de la calidad de energía, los valores de las variables de interés fueron obtenidos por medio de

mediciones de campo, y datos históricos tomados del SCADA eléctrico y SCADA de generación.

La contratista usó el equipo especializado para el levantamiento de datos de campo, como es el caso del equipo Sonel PQM-701, el cual es un analizador de calidad de energía eléctrica, que cumple con EN 61000-4-30 CLASS-A, las mediciones fueron realizadas en función de la IEEE 519-1992, tanto en el NPF y SPF.

Para determinar la calidad de energía en el sistema de generación realizaron mediciones en el lado de baja tensión de los transformadores X-1014 y BAA901 respectivamente, ya que son los que están conectados directamente a la barra de 13.8kV de generación, a continuación, se presenta un resumen de los datos obtenidos en cuanto a calidad de energía:

Tabla 2: Armónicos voltaje y corriente del X-1014

	U	I	Unidad	DC	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>THD [%]</b>	<b>0,803</b>	<b>2,230</b>	<b>U [V]</b>	0,064	270,100	0,055	0,162	0,058	1,035	0,063	0,764	0,068	0,062
<b>K</b>	---	---	<b>I [kA]</b>	0,000	1,404	0,004	0,002	0,001	0,003	0,001	0,005	0,001	0,000

Elaborado por Proyecto Optimización Energética Bloque 16.

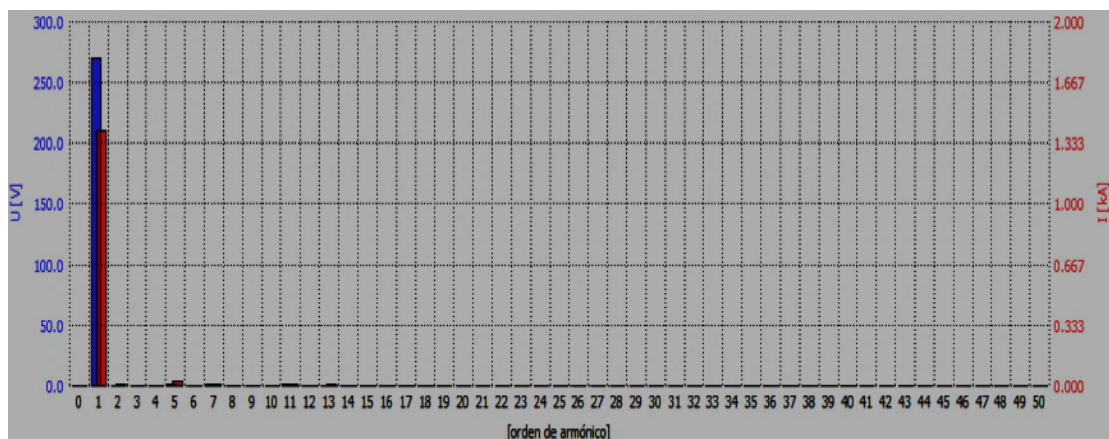


Fig. 1. Armónicos voltaje y corriente del X-1014

Elaborado por Proyecto Optimización Energética Bloque 16.

Tabla 3: Armónicos voltaje y corriente del BAA901

	U	I	Unidad	DC	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>THD [%]</b>	0,259	2,392	<b>U [V]</b>	0,035	478,500	0,123	0,460	0,134	0,562	0,335	0,485	0,119
<b>K</b>	---	---	<b>I [A]</b>	0,298	576,800	0,764	2,255	0,433	12,680	0,698	4,637	0,135

Elaborado por Proyecto Optimización Energética Bloque 16.

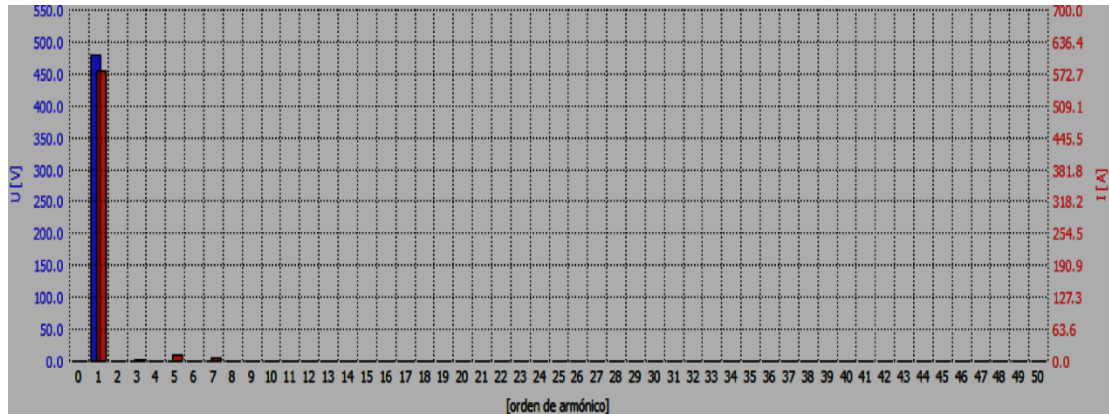


Fig. 2. Armónicos voltaje y corriente del BAA901

Fuente: Proyecto Optimización Energética Bloque 16.

## 1.2. Fundamentación Teórica.

En esta sección se realiza una revisión de los conceptos de compensación de reactivos necesarios para el contexto general de la investigación. Además, se revisan las normativas referentes al estudio que enmarcan legalmente la compensación de reactivos en este tipo de sistema eléctricos de potencia.

También se realiza una revisión bibliográfica y levantamiento de diversas prácticas internacionales con respecto al tratamiento de reactivos. Buscando sintetizar las mejores prácticas a modo de benchmarking para posteriormente contrastarlas con la experiencia nacional y definir lineamientos al respecto.

### 1.2.1. Sistema eléctrico de potencia (SEP)

Es un conjunto de instalaciones que permiten generar, transportar y distribuir la energía eléctrica en condiciones adecuadas de tensión, frecuencia y disponibilidad, distribuyendo, la energía eléctrica a los puntos donde se encuentran los consumos, por lo que da origen a líneas de transmisión eléctricas que en su conjunto se denomina sistema de transmisión [18]. La potencia reactiva no es una potencia realmente consumida en la instalación eléctrica, sin embargo, es la potencia que necesita el sistema para el transporte de la potencia activa y para el funcionamiento de algunos equipos para generar campos magnéticos o eléctricos para su trabajo [19].

Las cantidades de energía y potencia que el sistema entrega o recibe, determina las restricciones bajo las cuales funcionará y su propósito. En este contexto los tipos de sistemas con más relevancia son:

- **Sistemas de distribución:** son los que entregan la potencia y energía eléctrica según las necesidades de las redes que alimentan consumos de usuarios finales, los que estrictamente conforman el primer escalón de los sistemas eléctricos.
- **Sistemas de subtransmisión:** son las redes que suministran la potencia a los sistemas de distribución y alimentan a usuarios industriales de determinado consumo, generalmente son radiales, aunque es posible encontrar estructuras en bucle o anillo. el sistema es a su vez alimentado desde las redes de transporte mediante subestaciones transformadores o bien mediante centrales pequeñas. Las potencias transmitidas son de algunas decenas de MW por lo que las tensiones usadas son del rango de 40 kV a 154 kV.
- **Sistemas de transporte:** son los que proporcionan energía a territorios grandes como provincias, regiones geográficas o países, para esto requieren transferir potencias importantes del orden de cientos o miles de MW, por grandes distancias. Las tensiones de este sistema se encuentran en el rango de 220 kV a 750 kV

### **1.2.2. Potencia Activa.**

Es la potencia que representa la capacidad de un circuito para realizar la transformación de energía eléctrica en trabajo. Además, corresponde al valor medio de la potencia instantánea que es definida considerando los tipos de cargas presentes en un sistema eléctrico de corriente alterna. Las cargas resistivas se alimentan de corrientes que están en fase con la tensión aplicada en las mismas, lo que se traduce en una transformación completa de energía eléctrica en trabajo mecánico, calor o en cualquier forma de energía que no retorna en forma directa a la red eléctrica, de manera que la Potencia útil que disipan los equipos en calor o

trabajo es igual a la potencia en P(kVA) menos Q(kVAr) para la formación de los campos eléctrico y magnético de sus componentes,  $kW = kVA - kVAr$  [21].

### **1.2.3. Potencia Reactiva.**

Es una potencia sinusoidal y fluctuante que cuando no contiene armónicos su valor medio es cero, esta potencia es utilizada para la formación de campos eléctricos y magnéticos de las reactancias del circuito eléctrico, por lo que, la energía eléctrica no se transforma en trabajo necesario, desde el punto de vista de las cargas, las cargas reactivas ideales toman corrientes que se encuentran desfasadas  $90^\circ$  con respecto a la tensión aplicada, por lo que la energía eléctrica no se consume si no que se almacena en forma de campo magnético o eléctrico, por lo tanto se dice que es una potencia desvatada (que no produce vatios) y aparece en una instalación eléctrica en la que existen bobinas o condensadores, y es necesaria para crear campos magnéticos [22], [23].

### **1.2.4. Armónico característico**

Son los producidos en operación normal, por convertidores en base a semiconductores, en un equipo convertidor de 6 pulsos, los armónicos característicos son los armónicos impares diferentes a los múltiplos de 3, es decir: 5th, 7th, 11th, 13th, etc.

$$h = kq \pm 1$$

k = algún entero

q = número de pulsos del convertidor.

### **1.2.5. Efectos de la potencia reactiva en los sistemas eléctricos**

Como es conocido, la potencia reactiva en los sistemas de suministro eléctrico trae aparejado un conjunto de efectos indeseables que se pueden resumir en [26].

1. Aumento de las pérdidas de potencia y energía eléctrica activa en los elementos del sistema: esto se debe a la circulación de una componente de corriente (reactiva) cuyo valor eficaz ocasiona pérdidas en los elementos del sistema por efecto Joule.

2. Incremento del calentamiento de todos los elementos de la red eléctrica: como resultado de esta corriente, se producen calentamientos innecesarios en el sistema.
3. Aumento de las caídas de tensión: las corrientes reactivas que circulan por los elementos del sistema (principalmente líneas y transformadores) incrementan las caídas de tensión y, por ende, disminuyen la tensión en los receptores eléctricos.
4. Limitación de la capacidad de los elementos del sistema eléctrico hasta llegar a los receptores: la capacidad del sistema se ve limitada por la presencia de corrientes reactivas, sin que ello contribuya directamente a la transferencia de energía útil.
5. Sobredimensionamiento de los elementos del sistema eléctrico hasta llegar a los receptores: desde el punto de vista del diseño, los elementos del sistema deben sobredimensionarse para que soporten las potencias y corrientes reactivas.
6. Incremento de la posibilidad de averías y encarecimiento de los costos de inversión y explotación del sistema.
7. Aumento de los costos externos de la generación eléctrica: debido a que la generación en muchos países es mayoritariamente a través de plantas termoeléctricas, cuyos residuos son altamente contaminantes del medio ambiente.
8. Aumento de los costos de la energía eléctrica en las instalaciones

#### **1.2.6. Compensación de potencia reactiva dentro de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP)**

La potencia reactiva en un SEP se compensa por medio de aplicación de diferentes elementos tales como, compensadores dinámicos los que destacan generadores y motores sincrónicos, y los de compensación estáticos como condensadores, SVC, FACTS, reactores, transformadores, líneas de transmisión transformadores desfasadores, etc.

Los dispositivos empleados para la compensación de potencia reactiva pueden ser clasificados como sigue:

- Dinámicos: Generación sincrónica, motores sincrónicos
- Estáticos: Banco condensadores, FACTS, reactores, etc.

- Pasiva: Líneas de transmisión, reactores shunt, reactores serie, capacitor shunt - serie.
- Activa: FACTS
- Fuentes o consumidores de potencia reactiva dentro de estos están:
  - Compensadores de reactancia de red, o conocidos como capacitor serie.
  - Trafos reguladores, entre ellos trafos con cambiadores de tomas automáticos y booters.

La compensación sincronizada, los SVC y todos los FACTS constituyen una compensación activa, son totalmente automáticos.

**Los reactores shunt** son usados para compensar los efectos de la capacitancia de la línea, particularmente para limitar el aumento de voltaje en circuito abierto o altas cargas [24]. Físicamente pueden ser bobinas en aire o núcleo ferromagnético y tienen aplicaciones diversas tanto en sistemas de medio, alto, y extra alto voltaje, así como también en redes de bajo voltaje [24]. Económicamente los reactores son mucho más convenientes que cualquier compensador activo debido a la relativa sencillez de su construcción y principio de funcionamiento, sin embargo, a diferencia de los compensadores activos es un elemento que solo puede consumir reactivos [28].

**Los capacitores shunt** suplen potencia reactiva y aumenta el voltaje local. Ellos son usados a través del sistema y son aplicados en un variado rango de tamaños. La principal ventaja de los capacitores shunt son su bajo costo y su flexibilidad de instalación y operación. Ellos son fácilmente aplicables en varios puntos en el sistema, así contribuye con la eficiencia de la transmisión y distribución de potencia. La principal desventaja de los capacitares shunt es que su valor de potencia es proporcional al cuadrado del voltaje. Consecuentemente, la potencia reactiva de salida es reducida a voltajes bajos cuando es deseable que se entreguen más [25].

**Los capacitores serie** son normalmente instalados para control de voltaje, debido a que ellos contribuyen a mejorar el control de voltaje y el balance de potencia. La potencia reactiva producida por un capacitor serie se incrementa cuando la

potencia transferida se incrementa ya que un capacitor serie es autoregulante en este aspecto, los capacitores almacenan la misma cantidad de carga eléctrica independientemente de la capacitancia, esto se debe a que la carga almacenada por una placa de cualquier capacitor debe provenir de la placa de su capacitor adyacente, el valor de la capacitancia equivalente será menor que el valor del capacitor más pequeño en la configuración [26].

**Los Static VAR Control** Comúnmente conocidos como SVCs, Static VAR Control, es una compensación shunt que cambia su potencia reactiva de salida por medio del control de impedancias reactivas, con la aplicación de controles de electrónica de potencia. En el mercado existen los siguientes equipos [28]:

- Reactores controladores por tiristores (TCR) con condensadores fijos. (FC)
- Condensadores conmutados por tiristores (TSC)
- Reactores controladores por medio de tiristores en combinación mecánica o mediante tiristores de condensadores.

Un SVC es un dispositivo FACTS (Flexible AC Transmission System) [17] su aplicación sirve para controlar de forma continua los reactivos sobre la red, permitiendo una compensación capacitiva o inductiva [29].

**Las líneas de transmisión de alto y medio voltaje** contribuyen de gran manera a la potencia reactiva en el sistema eléctrico, este efecto se da por el paralelismo de las líneas y las longitudes considerables que por lo general representa el transmitir la energía desde los centros de generación hasta las áreas de consumo, la siguiente tabla muestra valores típicos de potencia reactiva desarrolladas por el efecto capacitivo entre las líneas de transmisión [20].

Tabla 4: Potencia reactiva capacitiva inherente a líneas de transmisión aéreas

Nivel de Voltaje [kV]	MVARs por cada 100 km
230	17
345	50
500	106
165	280

Elaborado [20]

Dentro del diseño o la operación del sistema de transmisión, deben considerarse que cuando la línea de transmisión se encuentra operando en vacío la potencia reactiva capacitiva, tendrá que ser compensada totalmente por el sistema, a medida que sube la potencia a transmitir por la línea, se desarrolla un efecto inductivo, el cual contrarresta el efecto capacitivo.

Los conductores soterrados utilizados en líneas de transmisión de potencia eléctrica, desarrollan altos defectos de capacitancia, que varían desde 20 a 40 veces más que una línea de transmisión aérea equivalente por entregan grandes cantidades de potencia relativa al sistema, este efecto capacitivo es beneficioso cuando se transfiere una cantidad elevada de potencia activa, sin embargo, cuando por el cable se transfiere baja potencia activa en periodos de baja demanda, el efecto capacitivo puede provocar problemas de alto voltaje.

**Generación sincrónica** estos pueden actuar sobre la excitación del alternador para variar el valor de la tensión generada y con ello regular las aportaciones de potencia reactiva en la red, con el objeto de mejorar los perfiles de tensión del sistema y reducir las pérdidas causadas por el efecto de Joule en las líneas, así mismo se podría aplicar **motores sincrónicos** que funcionan en vacío, puestos en sincronismo en la red, cuya función es absorber la potencia reactiva excedente o bien proporcionar la potencia faltante [25].

**Compensación por capacitores** la compensación de potencia reactiva mediante la instalación de condensadores en sistemas de distribución es una técnica utilizada por las empresas eléctricas desde casi el inicio de la industria. Existen numerosas y diferentes metodologías para el diseño de un esquema de compensación de potencia reactiva, pero en todos ellos la finalidad es la selección y ubicación en la red de los condensadores, con la selección y ubicación de condensadores se pretende la compensación reactiva en la carga, lo que permite la corrección del factor de potencia y mejorar la regulación de tensión, reducción de las pérdidas de energía y aumento de la capacidad del sistema, de esta manera muy general, se busca un factor de potencia cercano a 0.96 ya que el valor del factor de potencia igual a 1 no supone una mejora sustancial en el rendimiento [27].

### **1.2.7. Determinación de tipo de compensación reactiva.**

Para una operación eficiente y confiable de los sistemas de potencia, el control del voltaje y la potencia reactiva deben satisfacer los siguientes objetivos:

- Los voltajes en los terminales de todos los equipos en el sistema están dentro de límites aceptables.
- Los equipos son diseñados para operar a un cierto voltaje nominal.
- La operación prolongada de los equipos a voltajes fuera de rango puede causar efectos adversos en su desempeño y posiblemente causar daños.

El flujo de potencia reactiva es minimizado para reducir las pérdidas a un mínimo impacto esto asegura que el sistema de transmisión opere eficientemente, principalmente para la transferencia de la potencia reactiva

Las funciones principales de los elementos de compensación reactiva tanto para condiciones de estado estable como para condiciones dinámicas son:

- Controlar los niveles de voltaje
- Controlar el flujo de potencia reactiva
- Mejorar la estabilidad del sistema

Estas funciones hacen que la selección del tipo y tamaño del equipo de compensación dependa de los requerimientos de seguridad y calidad establecidos para el sistema.

Otro problema común de soporte de reactivos que ocurre generalmente en sistemas de subtransmisión de alto voltaje y más acentuado el efecto en redes subterráneos, son los altos voltajes que se presentan durante periodos de baja demanda, en particular cuando el exceso de reactivos asociados a dichos sistemas no puede ser compensada por las cargas y generación sincrónica, en estas circunstancias la adición de compensación reactiva por medio de reactores en derivación suele ser una práctica común.

Para controlar este efecto, el sistema de transmisión del Bloque 16, dispone en su sistema de reactores, tanto en el SPF y NPF, particularidad que debe ser considerada dentro del análisis del sistema.

La aplicación de una compensación en un sistema eléctrico de potencia con el empleo de banco de capacitores tiene la bondad de ser relativamente sencilla, el principio consiste en remplazar parte de la energía reactiva producida por el generador, con una fuente externa de menor inversión y costo operativo.

En la siguiente figura se aprecia claramente este principio, la compensación de reactivos, con la instalación de fuentes de capacitivos en la red, pretende reducir la carga de reactivos al sistema de generación, aprovechando más potencia activa y reduciendo las pérdidas provocadas por la potencia reactiva.

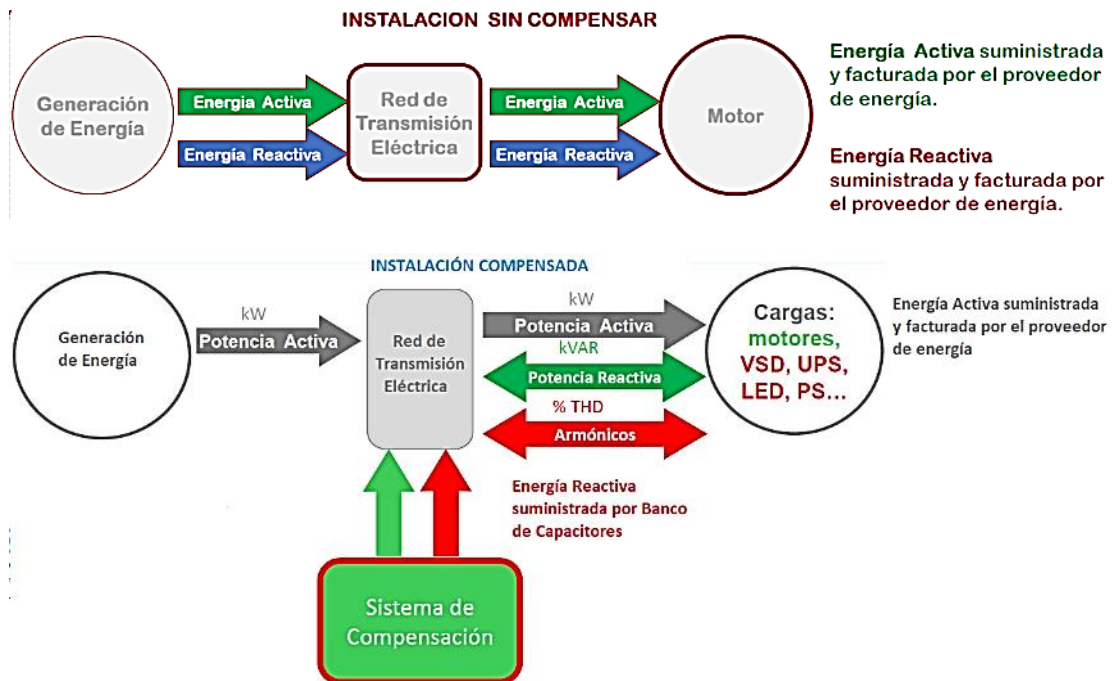


Fig. 3. Principio de compensación reactiva por banco capacitores

En este punto es conveniente determinar las diferencias entre  $\cos \phi$  y factor de potencia, para una mejor comprensión del análisis a desarrollar.

El  $\cos \phi$ , es el desplazamiento angular que existe entre la función corriente de una carga y su función tensión, también se la puede definir de forma fasorial como el ángulo formado entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S) de una

carga, sin embargo, en este concepto no se involucra a uno de los componentes del sistema que son los armónicos.

Por concepto el factor (FP) de potencia lo define de igual forma la relación entre P/S, sin embargo, cuando se aplica la noción de FP, es necesario incluir la potencia de distorsión (D), que es resultado de las componentes armónicas presentes en el sistema.

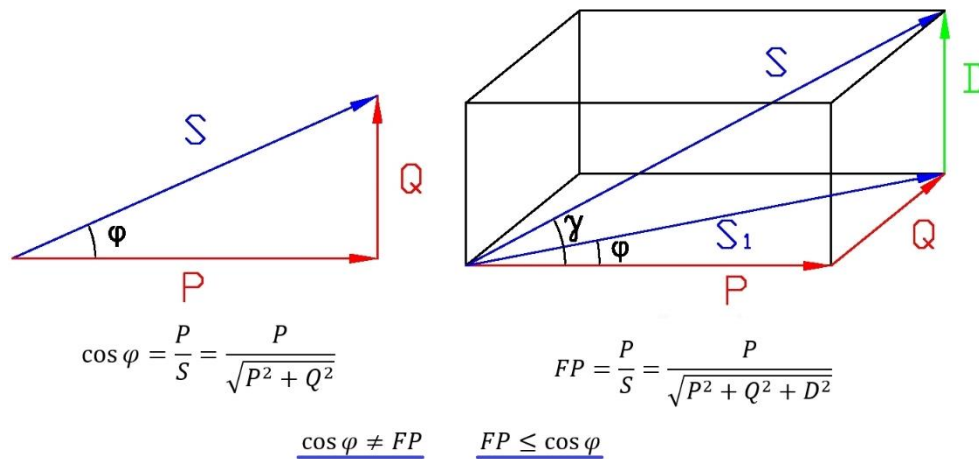


Fig. 4. Diferencia entre  $\cos \varphi$  y factor de potencia

Los principales elementos de compensación de reactiva son los condensadores, que en los últimos años han desbancado a los compensadores síncronos, actualmente, existen diferentes configuraciones para los elementos de compensación de reactiva en redes eléctricas, entre ellos: bancos de condensadores, SVC y STATic synchronous COMPensator (STATCOM).

Todos estos elementos se denominan estáticos porque no contienen ninguna parte móvil, como en el caso de los compensadores síncronos.

Para la mayoría de los escenarios de demanda de reactivos en los SEPs, un análisis de flujo de potencia es suficiente para determinar la magnitud y la localización de fuentes de compensación de reactivos para un conjunto limitado de condiciones de operación. Sin embargo, en realidad, en los SEP existen situaciones en que las variaciones de voltaje se presentan rápidamente por motivo de algún tipo de disturbio específico. En estas circunstancias el control de voltaje que se requiere debe tener una respuesta rápida y precisa tal y como la presenta los sistemas de compensación FACTS.

Para estos casos además de un análisis de flujo de carga se requiere estudios más detallados que incluyan efectos dinámicos que justifiquen la instalación de los FACTS cuya desventaja es el costo, por este motivo la instalación de este tipo de compensador en el sistema debe tener una razón bien fundamentada que permita explorar todos sus atributos [32].

La tabla siguiente muestra un listado de algunos problemas en los SEPs que pueden resolverse mediante elementos de compensación reactiva, para condiciones de estado estable o dinámico, esta clasificación es útil para la evaluación del método a utilizar, para el análisis del problema, así como para la selección del equipo de compensación necesaria [32].

Tabla 5: Problemas en los SEPs que pueden requerir compensación reactiva

Estado estable	Estado dinámico
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo voltaje</li> <li>• Alto voltaje</li> <li>• Variabilidad de voltaje (diario/estacional)</li> <li>• Exceso de flujos de potencia reactiva y/o pérdidas</li> <li>• Estabilidad de estado estable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluctuaciones de carga</li> <li>• Inestabilidad de voltaje</li> <li>• Margen de estabilidad transitoria o dinámica</li> <li>• Inestabilidad debido a resonancias subsíncrona</li> <li>• Oscilaciones de potencia</li> </ul>

Elaborado IEEE Std 1036-2020

Para resolver adecuadamente los problemas listados en la tabla 5, se requiere un conocimiento completo de causa a efecto, además de los atributos de los equipos de compensación disponibles. Uno de estos atributos que resulta clave es la velocidad de respuesta, la cual suele ser determinante en la forma de compensación que el sistema requiere punto en especial como los problemas dinámicos requieren un control refinado que opere en cortos periodos de tiempo con el fin de aliviar lo antes posible tales problemas la tabla 6 lista una serie de fenómenos que se presentan en el SEP y la velocidad relativa de respuesta que se requiere para su control.

Tabla 6: Velocidad relativa de respuesta requerida para el control de diversos fenómenos que se presentan en el SEP

Fenómeno	Velocidad de respuesta requerida para su control
Regulación diaria de voltaje	más lenta
Respuesta de primo motor	
Control de voltaje estabilidad en estado estable	
Estabilidad transitoria y dinámica	
Resonancia subsíncrona	
	más rápido

Elaborado IEEE Std 1036-2020

La siguiente tabla fue tomada de la referencia [32] la cual presenta una guía de aplicación elaborada sobre la base del conocimiento del problema, como las características de los equipos de compensación y su costo relativo. Esta tabla intenta resumir las reglas y soluciones típicas de compensación reactiva a problemas característicos en los SEPs. Es de manera notarse que no existen soluciones únicas para ninguno de los problemas, es por eso por lo que son requeridos rigurosos estudios técnicos y económicos que determinan la solución más conveniente para cualquiera de los tales problemas [32].

Tabla 7: Guía de aplicación de equipo compensador de VARs

Problema en el sistema		Compensación de VARs típica
Estado estable	Bajo voltaje	Capacitores en derivación
	Alto voltaje	Reactores en derivación
	Variabilidad de voltaje diaria/estacional	Capacitores en derivación, reactores, FACTS
	Exceso de flujo de potencia reactiva inductiva	Capacitores en derivación
	Estabilidad de estado estable	Capacitores en derivación, capacitores serie
Estado dinámico	Fluctuaciones de carga	FACTS
	Inestabilidad de voltaje	Capacitores en derivación con FACTS
	Inestabilidad transitoria o dinámica	Capacitores serie, FACTS
	Inestabilidad debido a resonancias subsíncrona	FACTS
	Oscilaciones de potencia	FACTS

Elaborado [32]

Los estudios de compensación reactiva definen el dimensionamiento y la localización de los equipos de compensación reactiva necesaria para compensar los requerimientos de seguridad del sistema, asegurándose que el sistema eléctrico exista la suficiente reserva de potencia reactiva incluso en contingencias que considere una la pérdida razonable de parte de la compensación por algún tipo de falla de los elementos de compensación.

Los equipos de compensación reactiva deben cumplir las dos principales funciones en el sistema, que son, mantener los niveles de voltaje adecuados en todo el sistema y mantener suficiente reserva de potencia reactiva para manejar las demandas de energía activa, en especial en condiciones de contingencias o cambios rápidos en las demandas de reactivos.

Los estudios de compensación se analizan en régimen de tipo permanente y dinámico. Los análisis de comportamiento en régimen dinámico se basan en estudios de fallas, de pérdida súbita de carga, o de generación, de sobre tensión y en condiciones de resonancia.

En la siguiente figura se presenta de forma resumida la selección adecuada del tipo de compensación en función de las variables de calidad de energía específicamente referente al contenido armónico (% THDi y % THDv), también interviene el % de cargas no lineales (%NLL) presentes en el sistema y factores ambientales.



Fig. 5. Criterio de selección de tipo de compensación

Para el régimen permanente los análisis se realizan en función de flujos de potencia, considerando dos escenarios que son casos base y para casos de contingencia, para las diversas condiciones de operación, para el presente estudio es de interés la compensación de reactivos y mejora del sistema de generación para un régimen permanente.

### 1.2.8. Cálculo de la compensación reactiva.

Para determinar la compensación de potencia reactiva por banco de capacitores, se aplicó el estándar IEEE 1036-1992, Guía IEEE para la aplicación de

condensadores de potencia en paralelo, este estándar denota varios pasos debidamente estructurados para el dimensionamiento de un sistema de compensación por banco de capacitores, por lo que en este estudio el dimensionamiento del banco de capacitores se basará en este estándar.

Para determinar un óptimo factor de potencia se lo calculará con la siguiente formula.

$$FP = \sqrt{1 - \left(\frac{C}{S}\right)^2} \quad (1)$$

Donde:

C es el costo por kVAr del banco de capacitores

S es el costo por kVA para incrementar la capacidad del sistema

Para determinar los kVAr capacitivos necesario el nuevo factor de potencia objetivo será el factor de potencia optimo calculado, para esto se emplea el estándar IEEE 1036-2010, donde se debe restar los kVAr inductivo del nuevo factor de potencia (optimo) del factor de potencia actual.

El resultado, son los kVAr que se deben añadir al sistema para llegar al factor de potencia objetivo.

$$Q_C = P_S [kW] [\tan(\cos^{-1}FP_1) - \tan(\cos^{-1}FP_2)] \quad (2)$$

Donde:

Ps es la carga del sistema en kW

Qc es el valor del banco de capacitores necesario para llegar al factor de potencia objetivo.

Para conocer el valor del banco de condensadores se calculó aplicando la siguiente formula.

$$C = \frac{\text{kVAr} * 1000}{(kV)^2 * 2 * \pi * f} \quad (3)$$

De acuerdo con el estándar IEEE 18 2002, la tolerancia para la selección de los capacitores será del -0% a +10% a una temperatura de 25 °C.

El índice de pérdidas del sistema asociadas en función de la carga o demanda en la línea de subtransmisión y el factor de potencia con y sin capacitores instalados, se puede estimar con la siguiente ecuación, donde se asume que la demanda en asume kilovatios y el voltaje se mantienen constantes y se asume que no existe armónicos en la línea [33]:

$$\text{Índice de pérdidas} = \left( \frac{FP_1}{FP_2} \right)^2 \quad (4)$$

Esta reducción de pérdidas reducirá el requerimiento de combustible de generación para suplir estas pérdidas, así como el costo del equipo del sistema para suplir las pérdidas en carga máxima.

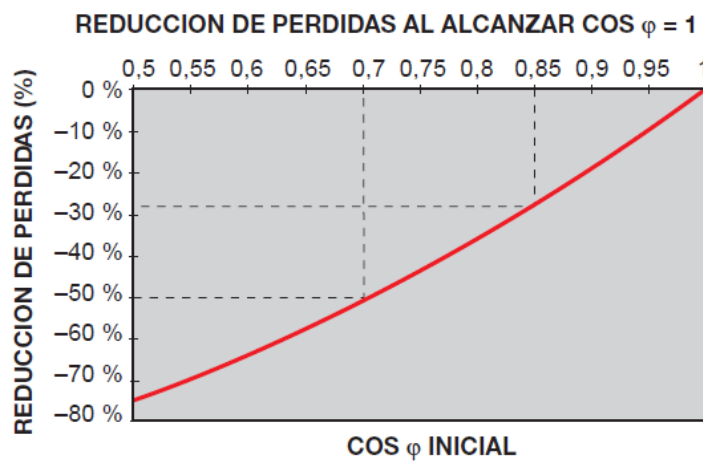


Fig. 6. Reducción de pérdidas por efecto Joule Vs  $\cos \varphi$

Fuente: Merlin Gerin Schneider Electric.

La energía se pierde como calor en los conductores y las pérdidas por efecto Joule son directamente proporcional al cuadrado de la corriente que circula en el circuito, las pérdidas típicas, de los componentes principales dentro de un sistema de subtransmisión se detalla a continuación:

- 1-2% Conexiones entre transformador, generador y la línea de transmisión.
- 2-4% Pérdidas en la línea de subtransmisión.
- 1-2% Pérdidas en el transformador reductor desde la línea de transmisión a la red de distribución.
- 4-6% Transformadores y cables de redes de distribución.

### 1.2.9. Especificación de la compensación reactiva.

El diseño del banco de capacitores es en función del estándar IEEE 18-2002, para configurar los bancos de capacitores para limitar el voltaje remanente de las unidades a 110% en caso de salida de una unidad por falla.

Tabla 8: Número mínimo recomendado de unidades en parralero por grupos en serie para limitar el voltaje remanente a 110% sin una unidad

Number of series groups	Grounded Y or $\Delta$	Ungrounded Y	Split ungrounded Y (equal sections)
1	---	4	2
2	6	8	7
3	8	9	8
4	9	10	9
5	9	10	10
6	10	10	10

Elaborado IEEE Std 18-2002

De la misma manera el estándar IEEE 18-2002, establece la clase de aislamiento (basic impulse insulation levels BIL) y el nivel de voltaje para los bancos de capacitores, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 9: BIL y Clasificación típica de voltaje y potencia reactiva

Volts, rms (terminal-to-terminal)	kvar	Number of phases	BIL kV <sup>a</sup>
2400	50, 100, 150, 200, 300 and 400	1 and 3	75, 95, 125, 150 and 200
2770	50, 100, 150, 200, 300, 400 and 500	1 and 3	75, 95, 125, 150 and 200
4160, 4800	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 and 800	1 and 3	75, 95, 125, 150 and 200
6640, 7200, 7620, 7960, 8320, 9540, 9960, 11 400, 12 470, 13 280, 13 800, 14 400	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 and 800	1	95, 125, 150 and 200
15 125	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 and 800	1	125, 150 and 200
19 920	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 and 800	1	125, 150 and 200
20 800, 21 600, 22 800, 23 800, 24940	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 and 800	1	150 and 200

Elaborado por IEEE Std 18-2002

Mientras más bajo sea el voltaje de operación de los condensadores individuales, su costo es menor, por lo que es conveniente adaptar configuraciones de grupos en serie para formar un banco de condensadores ya sea en Y o en  $\Delta$ , para la aplicación que estamos estudiando, el voltaje en Y es de 19,92 kV, lo que significa que el voltaje para un grupo formado por 2 condensadores en serie, en cada ramal del Y es de 9,95kV, (conocido como doble estrella) por lo tanto el condensador adecuado para esta configuración será de 11,4kV como nominal, como se muestra en la siguiente figura.

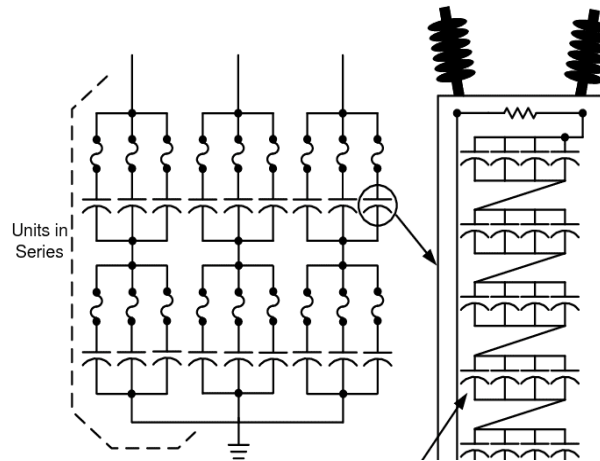


Fig. 7. Configuración banco de capacitores

Fuente: SEMANTIC SCHOLAR.

### 1.2.10. Control y operación de la compensación reactiva.

Para la selección del control de la compensación de reactivos se tiene dos opciones: de tipo fija o automática, para determinar la adecuada se debe considerar los siguientes datos:

Si  $Q_c/S_n < 12\%$  Compensación FIJA.

Si  $Q_c/S_n > 12\%$  Compensación AUTOMÁTICA.

$Q_c$  (kVAr): potencia reactiva requerida

$S_n$  (kVA): potencia aparente del transformador de alimentación.

Para la implementación del banco de capacitores se requiere un sistema de control flexible de acuerdo a la aplicación y consideraciones del sistema de potencia, en este caso la mejor opción es utilizar un sistema de control **automático** ( $Q_c/S_n > 12\%$ ), con compensación de capacitores asimétricos por fase, el cual tiene la bondad de conectar o desconectar, paulatinamente cierta cantidad de capacitivos conforme varía la demanda de potencia reactiva en el sistema y al ser de control por fase, activa y desactiva indistintamente por cada fase, pasos del banco de capacitores en caso de sistemas desbalanceados, en la siguiente figura se muestra la operación del banco de capacitores con la conexión y desconexión de los pasos de compensación, conforme el requerimiento de reactivos de las cargas.

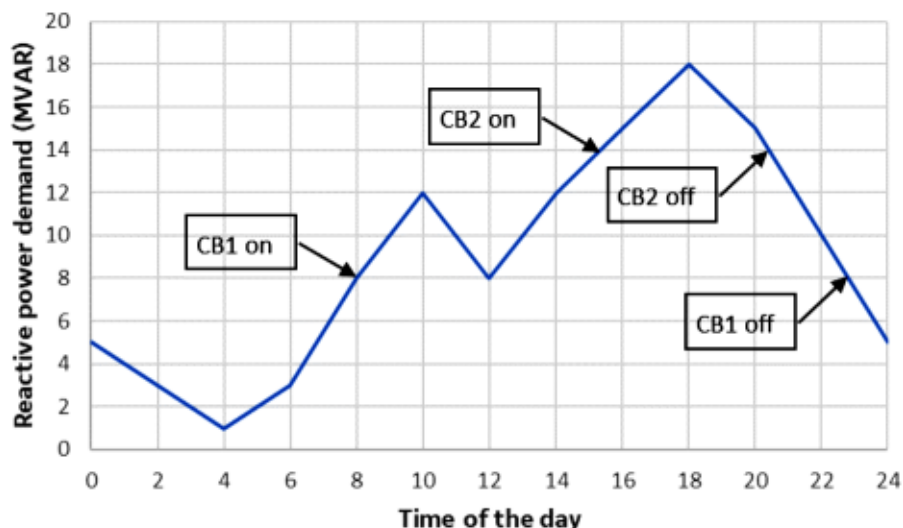


Fig. 8. Control automático banco capacitores

Fuente: Métodos de control de voltaje / VARs.

Los bancos de capacitores deben ser diseñados para operar a temperatura ambiente dentro de los límites, la altitud no debe superar los 1800 m sobre el nivel del mar, para instalaciones en exteriores y en alturas superiores a los 1800 metros sobre el nivel de mar es posible que los capacitores requieran niveles de aislamiento superiores para evitar descargas disruptivas en los o corrientes de fuga [33].

Los capacitores están diseñados para operar a su tensión nominal o por debajo de ella y también deben ser capaces de operar continuamente bajo escenarios de contingencia siempre que ninguno de los siguientes escenarios de operación sea excedidos [33].

- a. 110% de la tensión rms nominal.
- b. 120% de la tensión máxima nominal, es decir tensión máxima que no excede 1,2 por el voltaje pico, incluidos los armónicos, pero excluyendo los transitorios.
- c. 135% de la corriente rms nominal basada en kVAr nominales y voltaje nominal.
- d. 135% del kVAr nominal

Aun cuando en los sistemas de suministro eléctrico la compensación de potencia reactiva se realiza usualmente mediante bancos de capacitores trifásicos

balanceados fijos o variables (controlados), el uso de capacitores asimétricos por fase puede resultar en una mejora adicional de la eficiencia, al compensar parcialmente la potencia de asimetría, por lo que en este estudio lo recomienda el empleo de este tipo de banco de condensadores [6].

De igual forma la configuración de conmutación asimétrica tiene otro punto a favor, que es la conmutación tanto de encendido y apagado, cuando la curva de voltaje pasa por cero, esto permite disminuir la intensidad de corte o cierre y alargar la vida útil de estos dispositivos, así como disminuir los transitorios de sobre voltaje y frecuencia de la operación del banco de capacitores hacia la red.

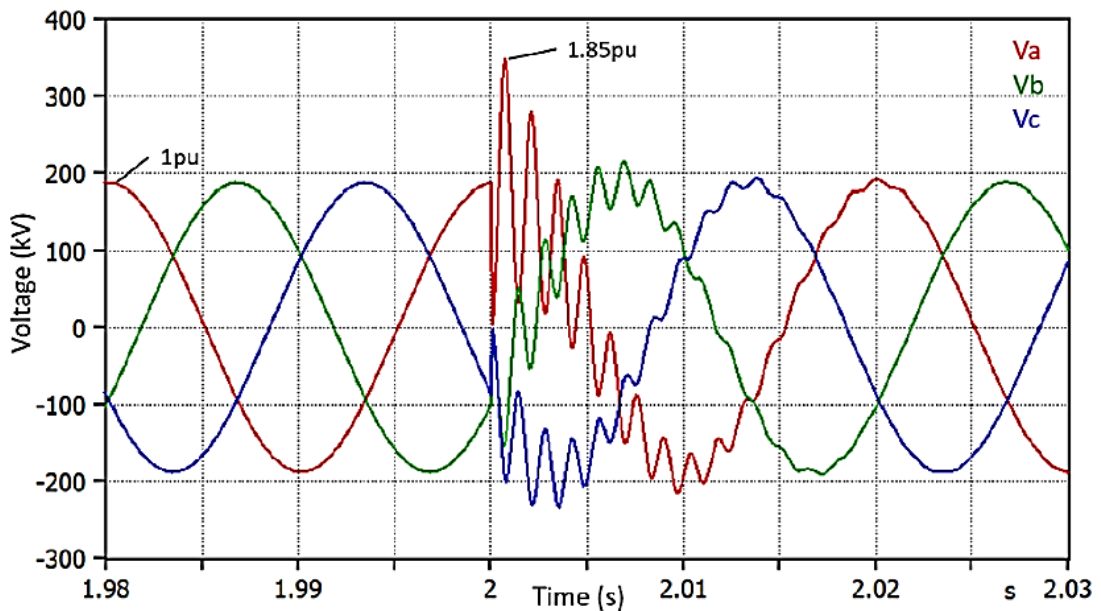


Fig. 9. Transitorio de sobre voltaje por el cierre simultaneo de las 3 fases del banco de capacitores con la fase A en pico de voltaje

Fuente: Métodos de control de voltaje / VARs.

De la misma manera para evitar transitorios de frecuencia causados por la energización del banco de condensadores y reducir sobre voltajes y sobre corriente, es deseable la utilización de sistemas de control de capacitores asimétricos que conmuten cada fase por separado, cuando el voltaje cruce por cero.

Como se puede observar en la siguiente figura, con condiciones desfavorables, la sobre corriente puede superar 13 veces la nominal en una energización de un banco de capacitores.

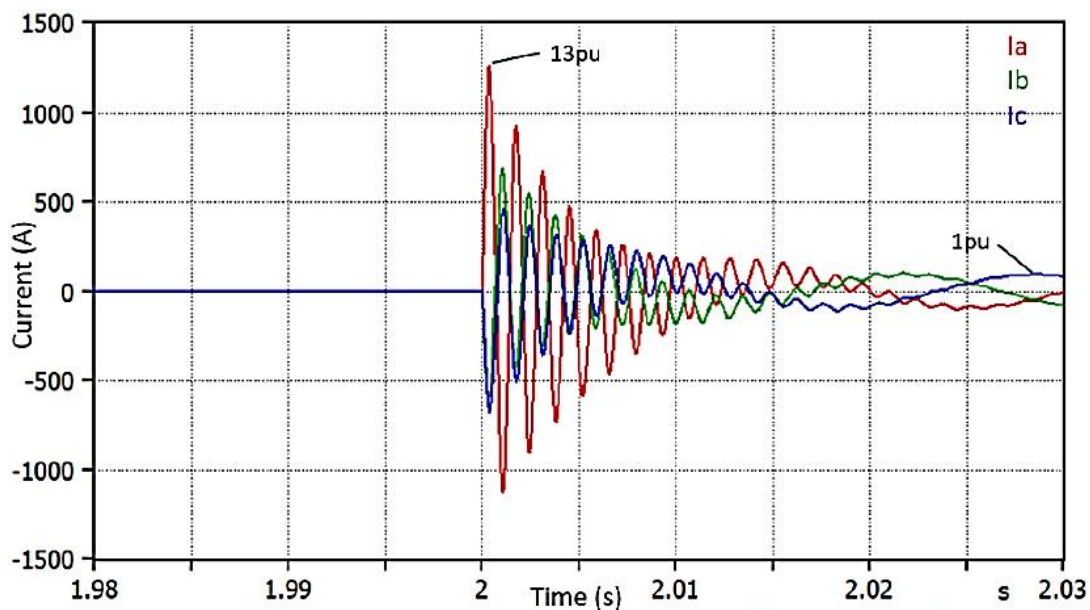


Fig. 10. Transitorio de sobre corriente por el cierre simultaneo de las 3 fases del banco de capacitores con la fase A en pico de voltaje

Fuente: Métodos de control de voltaje / VARs.

También se debe considerar en la selección de los disyuntores y en la calibración de las protecciones eléctricas, el fenómeno de reencendido de los elementos de corte, que puede aparecer al desenergizar el banco de capacitores.

En el peor de los casos, la tensión de interrupción puede llegar a 2 veces la tensión pico de línea a tierra del sistema, es decir aparece 2pu a través del contacto del interruptor. Por lo que es muy importante el uso de capacitores asimétricos que desenergice cada fase a la vez y en cruce de voltaje por cero.

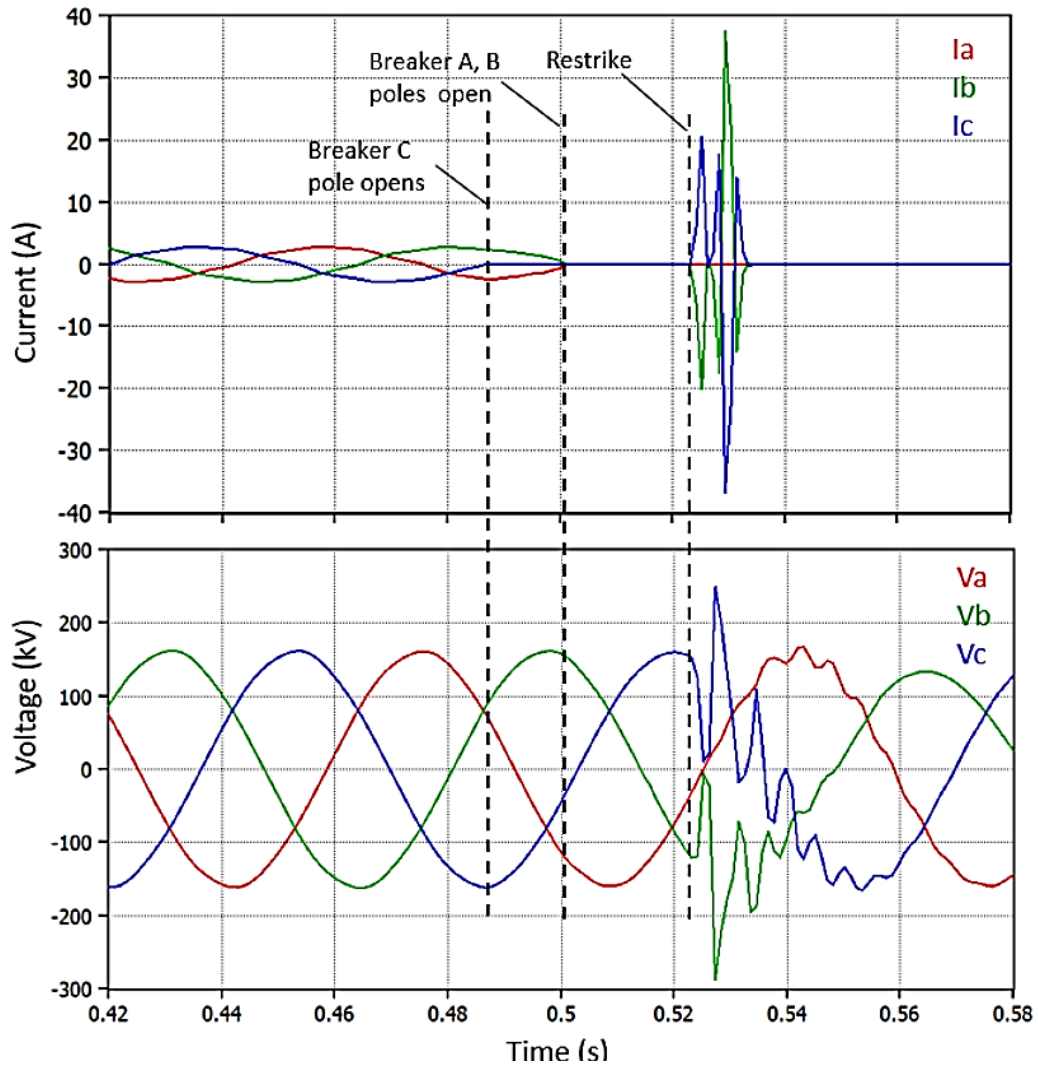


Fig. 11. Tensión de reencendido del interruptor por desenergización del banco de capacitores

Fuente: Métodos de control de voltaje / VARs.

La solución óptima de interruptor para evitar este fenómeno que se encuentra en el mercado es utilizar accionamientos con SF6, mostrando un control perfecto de los fenómenos eléctricos que se producen cuando los condensadores se conectan o desconectan a redes de potencia.

### **1.3. Fundamentación metodológica.**

#### **1.3.1. Tipo de investigación.**

##### **Cuantitativa.**

Permite obtener de la investigación resultados válidos que respondan a los objetivos inicialmente planteados mediante recopilación de la información de campo, el análisis de los datos obtenidos y la medición de las variables energéticas del sistema que tiene como resultados parámetros cuantitativos. Estos datos serán extraídos a partir de los registros históricos de la línea de subtransmisión 34.5 kV registradas en el bloque 16 para establecer el modelo de la simulación determinando la cantidad de unidades capacitivas de compensación.

##### **Explicativa.**

Permite establecer las causas y efectos del objeto de estudio de forma deductiva, es una parte de la investigación exploratoria que recaba información de normativas y ayudara a consensuar procedimientos para la compensación de un sistema de potencia reactiva, llevando un procedimiento centralizado en la simulación energética y considerando su efecto de liberar capacidad eléctrica y mejorar el perfil de tensión en el circuito de la línea de sub trasmisión, simulando con la aplicación de un modelo matemático que permitirá brindar una posible solución al problema de la compensación de potencia reactiva.

##### **Métodos de Investigación.**

Son herramientas que permiten al investigador desarrollar, experimentar y establecer resultados:

- **Histórica.**

El seguimiento del factor de eficiencia energética aplicado en el bloque 16 es indicador de desempeño energético (IDEn) que forma parte de los indicadores del Sistema de gestión de la energía bajo certificación ISO 50001: 2011, Por lo cual la demanda de energía, está basada en generación eléctrica a base de crudo, gas y

diésel que generan 94,06 MW de energía que es suministrada por 2 turbinas a diésel (18 MW), 5 generadores a gas (1MW) en NPF, 1 turbina a diésel (18 MW), 16 generadores a gas (16 MW) y 7 generadores a crudo (7MW) en SPF.

- **Sintética.**

Mediante este método se analizará todos los datos tomados en campo referentes al sistema de la línea de subtransmisión eléctrica a 34.5 kV entre NPF y SPF donde se hará uso de la herramienta tecnológica computacional (ETAP), identificando la prefactibilidad más apta del sistema, con el fin de evaluar económicamente el costo de compensación de potencia reactiva planteado en el Bloque 16.

- **Estadístico**

Permitirá conocer el proceso por el cual se obtendrá, representara, analizara, interpretara y proyectara las características, variables o valores numéricos del estudio para una mejor comprensión de la realidad del funcionamiento del sistema activo energético, estableciendo que para la compensación de potencia reactiva son implementados procedimientos de generación basados en la evolución de códigos, es decir, de alguno de los algoritmos propios del método de simulación e integración de variables.

- **Técnicas de investigación**

Es imprescindible recabar información, que permite apreciar el objeto de estudio en sus múltiples manifestaciones y en toda su complejidad por lo tanto se debe hacer uso de las técnicas como:

- **Documental**

Se obtuvo para adquirir información e ideas de investigaciones científicas a través de fuentes bibliográficas como: libros, artículos, tesis doctorales y páginas web, que permitirán interpretar conceptos, teorías, y condiciones de trabajo relacionadas con la ingeniería eléctrica y el proceso de compensación de potencia reactiva en líneas de subtransmisión con la implementación de bancos de capacitores.

○ **Exploratoria.**

Permitirá obtener datos reales cuantificados mediante el proceso de simulación, que facilitara formular con mayor precisión los resultados de la investigación, permitiendo definir las características de la línea de sub transmisión, alcanzando una aproximación más real de la investigación al reducir pérdidas de energía reactiva durante su transporte, contemplado que la energía reactiva es una deficiencia de los sistemas eléctricos, puesto que no se transforma en otro tipo de energía que se pueda aprovechar, y por lo tanto, no puede ser utilizada por los equipos que están conectados al sistema.

**1.4. Conclusiones Capítulo I**

- El trabajo investigativo está basado en la recopilación bibliográfica de libros, tesis, revistas, normativas nacionales e internacionales sobre la compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión, mejorando el sistema de generación de energía del Bloque 16, con el objetivo de reducir los costos de generación e incrementando la eficiencia energética de la operación, a través de la compensación reactiva, estableciendo rangos de aceptabilidad determinados en los estándares IEEE, IEC, NTE-INEN, LOEE, PLANEE.
- La determinación del comportamiento del sistema eléctrico de potencia, el manejo de la producción de petróleo, y una adecuada compensación de energía reactiva en la línea de subtransmisión entre North Production Facilities (NPF) y South Production Facilities (SPF), son determinantes para mejorar el sistema de generación eléctrica del bloque 16.
- La aplicación de los sistemas de compensación de potencia reactiva se encuentra relacionados con diversos métodos y técnicas de optimización que han venido mejorando constantemente a lo largo de varias décadas, por lo que se cuenta el momento de diferentes tipos que pueden ser aplicados a los diferentes tipos de industria, generando un uso más eficiente de la energía, sin embargo, un resultado positivo, depende de su parametrización, ubicación, selección del tipo de compensador y características de la red.

## **CAPITULO II PROPUESTA**

### **2.1. Título del proyecto.**

En función de la bibliografía analizada dentro del estado del arte desarrollada en el marco teórico de la presente investigación se desarrollará una solución para la “Compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión a 34.5 kV, entre NPF y SPF, para mejorar la generación eléctrica” del Bloque 16.

### **2.2. Objetivo del proyecto.**

En función de la investigación y en base a los estándares nacionales como internacionales, se ha determinado una metodología de análisis para determinar una compensación adecuada de potencia reactiva en la línea de subtransmisión entre NPF y SPF, mediante el análisis del factor de potencia que tendrá como resultado la mejora del sistema de generación eléctrica del bloque 16, con la disminución de pérdidas y costos de generación.

### **2.3. Descripción de la propuesta.**

La presente propuesta busca mejorar el factor de potencia para disminuir las pérdidas y reducir los costos de generación, mediante la compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión a 34.5 kV, entre NPF y SPF perteneciente al Bloque 16.

Con el análisis de la información bibliográfica y la normativa vigente, se plantea una metodología a emplear que nos arroje el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

En esta metodología, se incluye el levantamiento de información en campo, tanto de las variables del sistema, así como de la infra estructura del sistema eléctrico de potencia; también se involucra los costos de generación, las perdidas, la simulación con herramientas computacionales, la especificación del banco de capacitores y la evaluación económica del proyecto.

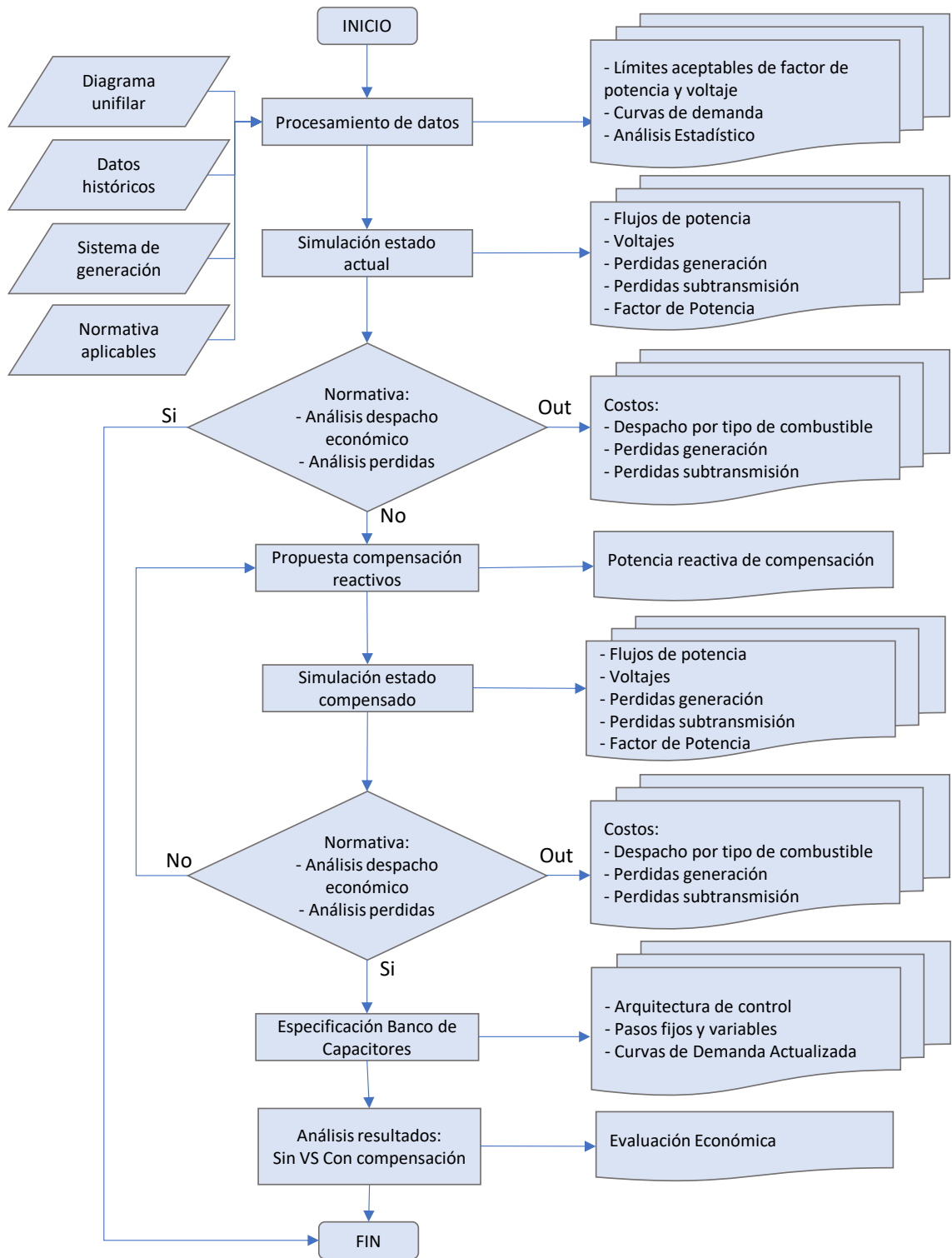


Fig. 12. Flujograma de la metodología

## 2.4. Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados.

La metodología que se propone para determinar la compensación de reactivos para mejorar la generación del bloque 16, es de forma cuantitativa que permite obtener de la investigación resultados válidos que respondan a los objetivos inicialmente planteados mediante recopilación de los datos de campo, medición de las variables energéticas del sistema, simulaciones con herramientas computacionales y el análisis de los datos obtenidos.

### 2.4.1. Ubicación de la investigación

El bloque 16 está ubicado en la provincia de Orellana en la cuenca amazónica del Ecuador, colindante con el parque nacional Yasuní y el territorio Waorani.

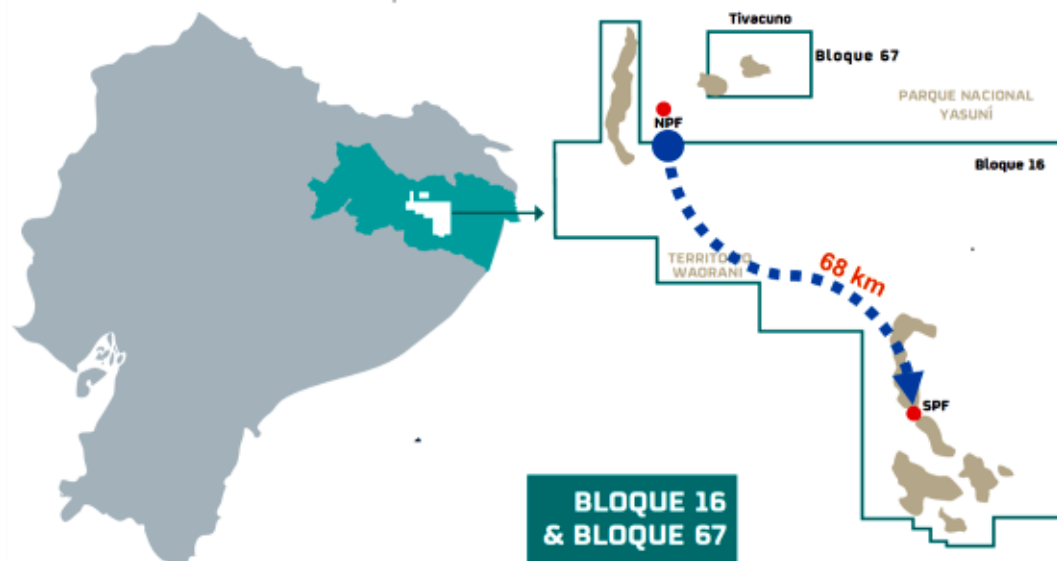


Fig. 13. Ubicación del Bloque 16

### 2.4.2. Diagrama Unifilar

La generación eléctrica está centralizada en el NPF y SPF, y se encuentra interconectado eléctricamente (sistema radial) entre las facilidades de NPF- AMO – SPF., con una línea de subtransmisión de 68 km a 34.5 kV.

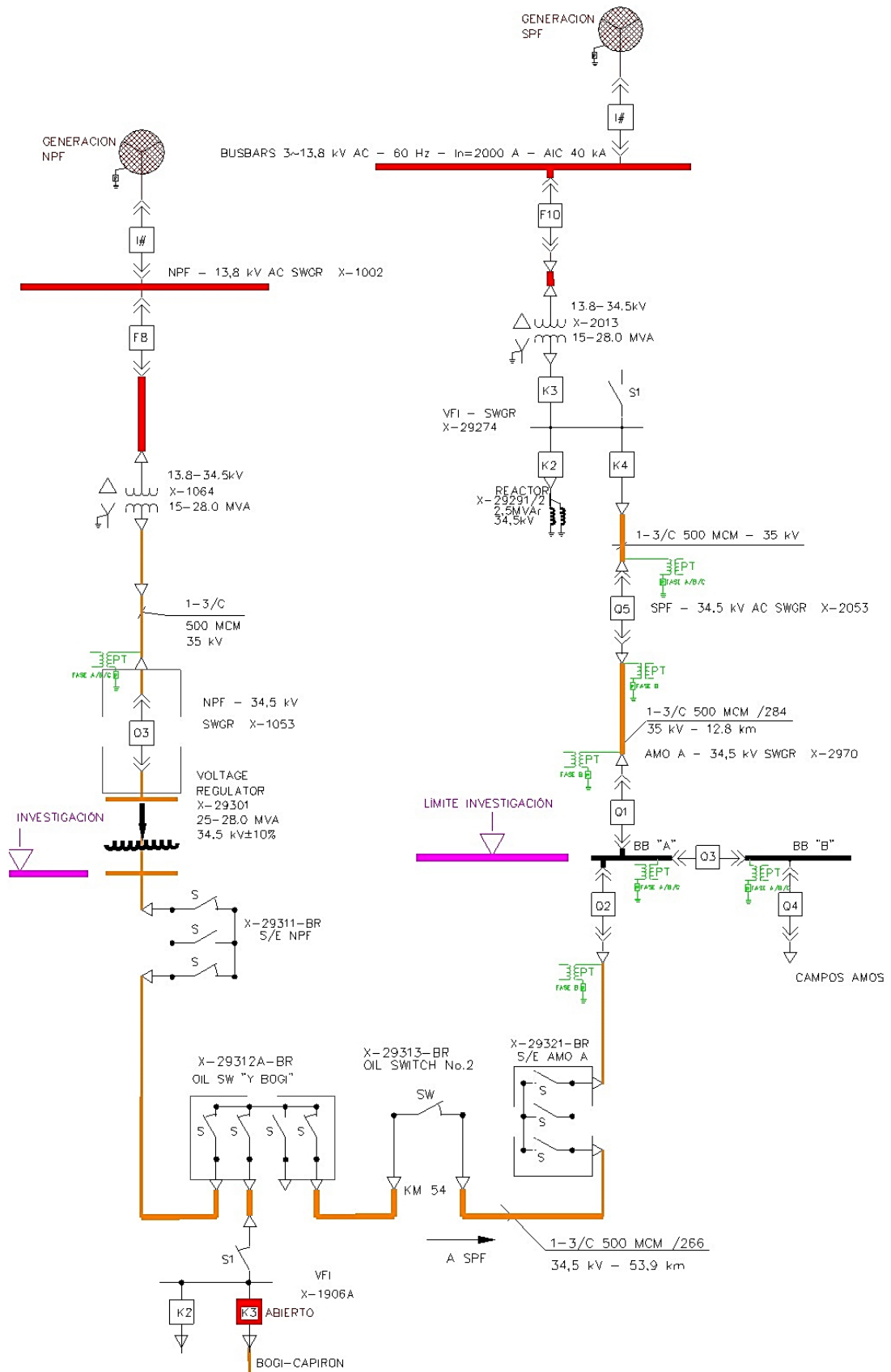


Fig. 14. Diagrama Unifilar de la línea de subtransmisión entre NPF y SPF del Bloque 16

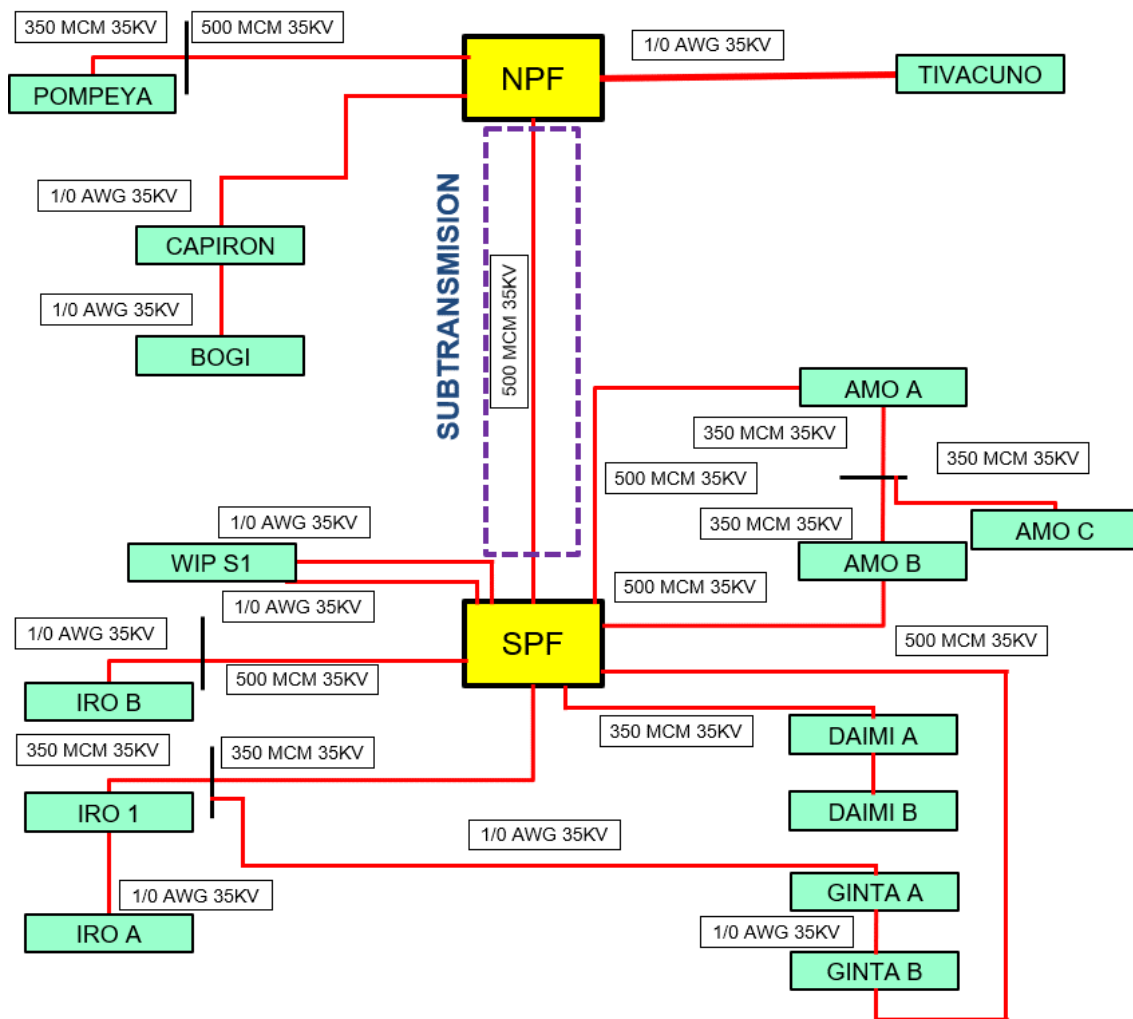


Fig. 15. Sistema de Distribución eléctrica del Bloque 16

### 2.4.3. Descripción de la generación existente en el Bloque 16

La energía para la operación es 100% de fuentes térmicas, este bloque es catalogado como auto generadora, dentro de su parque térmico de generación se utiliza como combustible el gas asociado a la producción, crudo y diésel.

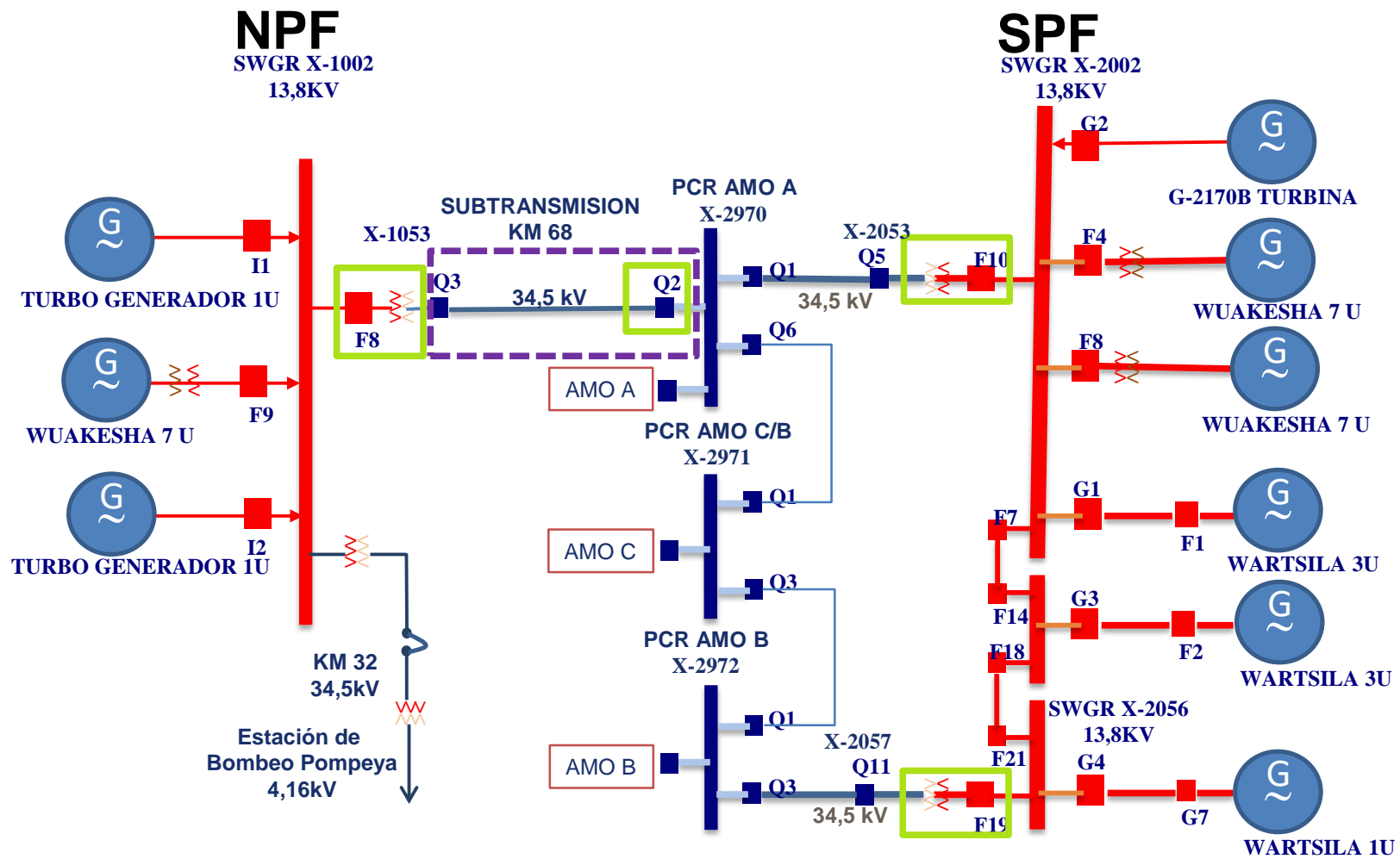


Fig. 16. Sistema de distribución y generación del Bloque 16

Los equipos de generación están distribuidos en el NPF y SPF, a continuación, el listado de generadores del NPF:

- 1 Generador Detroit G-1171
- 6 Generadores Waukesha G-1172A/F
- 2 Turbogeneradores GE LM2500 G-1170A/B

La Generación en la estación SPF está conformada por los siguientes equipos:

- 1 Generador Mustang G-2942
- 1 Generador Caterpillar G-3516
- 15 Generadores Waukesha G-3001/3003-3005/3016
- 1 Turbogeneradores GE LM2500 G-2170B
- 7 Generadores Wartsila G-3170A/G

En la siguiente tabla se muestra la capacidad instalada de generación en el Bloque 16, en las diferentes locaciones, diferenciado por el tipo de combustible que utiliza para su operación.

Tabla 10: Capacidad instalada Bloque 16

LOCACIÓN	MOTOR GENERADOR	UNIDADES	COMBUSTIBLE	POTENCIA NOMINAL TOTAL [MW]
NPF	LM2500	2	DIESEL	40,00
NPF	WUAKESHA	6	GAS	6,00
SPF	LM2502	1	GAS - DIESEL	20,00
SPF	WUAKESHA	15	GAS	15,00
SPF	WARTSILA	7	CRUDO	44,10
SSFD	CENTAURO H-50	2	DIESEL	6,00
<b>TOTAL</b>				<b>131,10</b>

El combustible de más bajo costo es el gas asociado a la producción, por lo tanto, uno de los objetivos del sistema es no quemar este gas en las teas, sino utilizarlo en su totalidad en generación, a continuación, se muestra los promedios de consumo del gas versus el gas quemado, de un día típico de operación:

Tabla 11: Consumo del gas asociado a la producción en la generación del Bloque 16

	UN.	SPF	NPF	TOTAL	%
Consumo gas en motores Waukesha	MSCFD	670	1021,87	1691,87	---
Consumo gas en turbogenerador	MSCFD	3278	---	3278,00	---
Total, gas consumido en generación	MSCFD	---	---	<b>4969,87</b>	<b>98,41%</b>
Gas quemado	MSCFD	80	0,2	<b>80,2</b>	<b>1,59%</b>

La generación promedio, así como el costo por tipo de combustible se muestra a continuación:

Tabla 12: Demanda por tipo de combustible y costo de energía

TIPO DE GENERACIÓN	DEMANDA 2022 [%]	COSTO 2022 [\$/MW-H]
GAS	19%	100,8
CRUDO	54%	302,4
DIESEL	27%	365,9

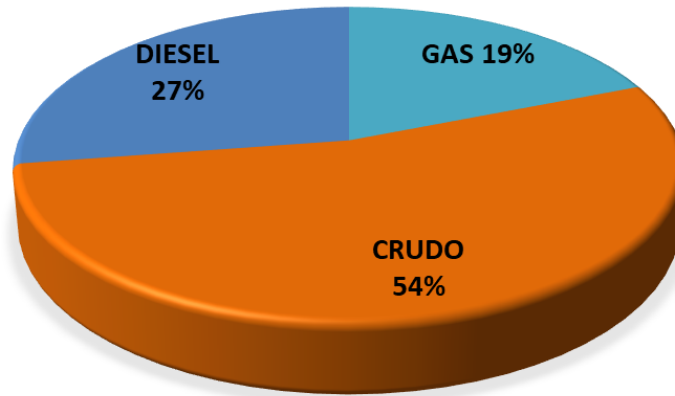


Fig. 17. Generación por tipo de combustible

Para establecer la demanda de las cargas no lineales se determinó en función de los datos registrados del mes de enero del 2022, el cual se muestra en forma porcentual en la siguiente gráfica, donde se establece un 40 % de cargas no lineales.

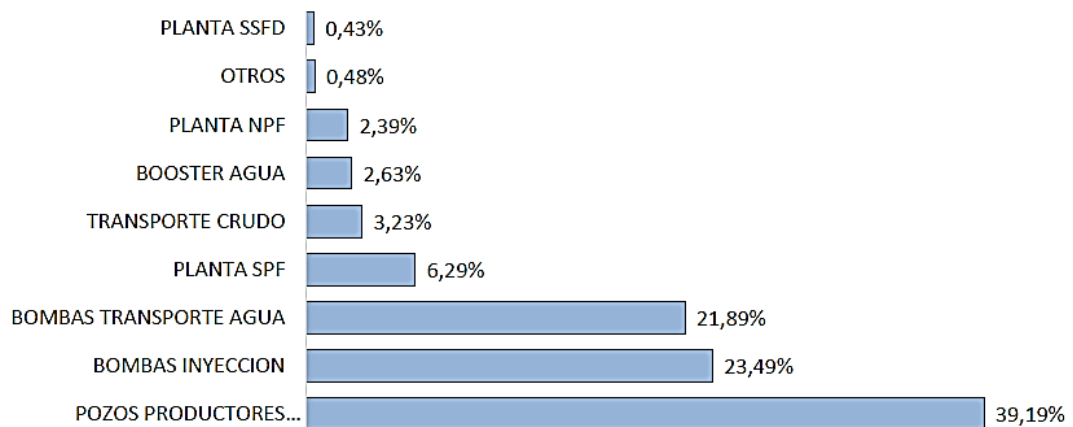


Fig. 18. Demanda por tipo de sistemas

A continuación, se puede apreciar el SCADA de generación con todos los moto-generadores y turbo generadores que comprende el sistema de generación.

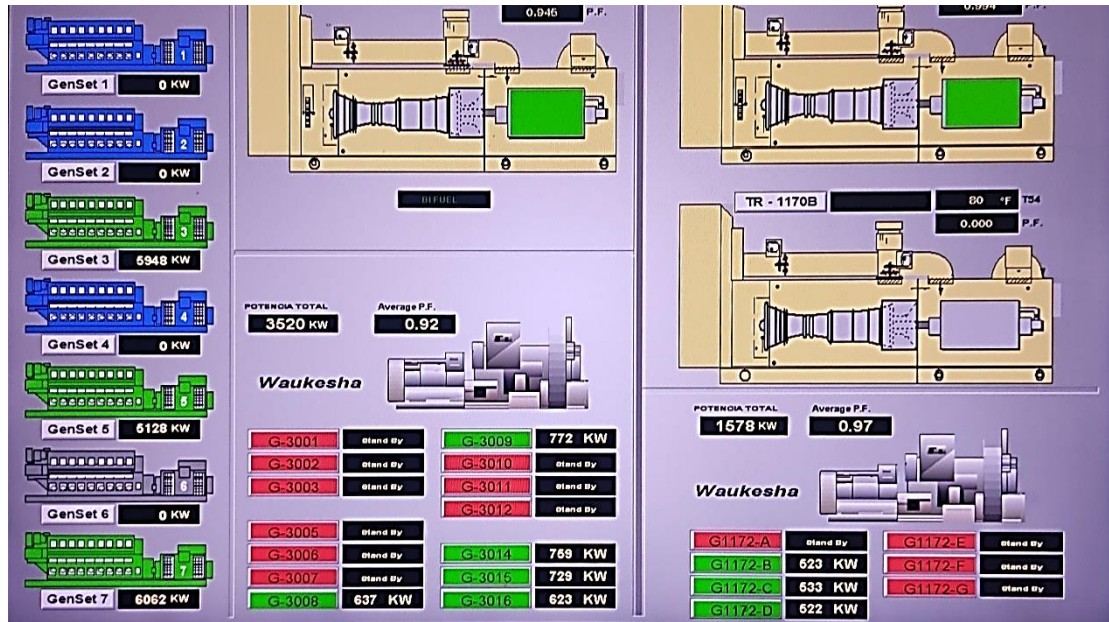


Fig. 19. SCADA de generación eléctrica del Bloque 16

Para la condición de operación a baja carga de la línea de subtransmisión, NPF-SPF, esta genera un exceso de capacitivos, por lo que el SEP dispone de compensación inductiva que ayuden a equilibrar el exceso de reactivos de forma temporal en el sistema, ya que luego de retornar a condiciones normales de operación, estos no son requeridos.

## 2.5. Determinación del tipo de compensación.

Al contar con un objetivo anual de producción de petróleo, el comportamiento de la demanda es prácticamente constante durante las 24H y los 365 días del año, lo que difiere a un sistema de transmisión industrial, donde la demanda tiene picos.

Como se citó a lo largo del capítulo I, existen diferentes tipos de compensación, sin embargo, el sistema adecuado debe cubrir las necesidades técnicas del sistema, así como también justificar el factor económico.

A continuación, se detallan algunas de las variables y problemáticas a resolver, priorizando el tipo de compensación más básico que cubrirá cada necesidad en función de la bibliografía investigada:

- El fenómeno que se desea arribar es el control de estabilidad en voltaje en estado estable, para esto la repuesta del sistema de compensación necesario es de velocidad lenta, ver tabla 6.

- Los problemas de bajo voltaje, exceso de potencia reactiva inductiva, y disminución de las pérdidas por efecto Joule, se pueden controlar básicamente con una compensación por banco de capacitores, ver tabla 7.
- El sistema de generación y subtransmisión tiene una distorsión armónica inferior al 5% tanto en voltaje como en corriente, cuya operación será en un ambiente inferior a 55°C, por lo que la solución adecuada es la utilización de banco de capacitores, ver figura 5.
- La carga no lineal en el sistema bordea el 40% por lo que en este caso es aplicable una compensación activa o en su defecto un banco de capacitores con filtros activos, ver figura 5.
- El control de la operación de la compensación es el coeficiente entre la potencia reactiva requerida y la potencia aparente del sistema, siendo en este caso mayor al 12%, por lo que se requiere de un control automático del sistema de control de la compensación, ver apartado 1.2.9.
- La subtransmisión es a través de un cable soterrado de 35kV, este cable al energizarse en vacío genera reactivos capacitivos, por lo que cuenta con una reactancia en serie para minimizar los sobre voltajes que aparecen en el sistema al momento del arranque, lo que es contrarrestado cuando por este cable transmite potencia. El utilizar una línea de subtransmisión para compensación de reactivos es económicamente improbable.
- El SEP del bloque 16, al ser autogenerado y al disponer de una arquitectura radial para la subtransmisión con una longitud de 68 km, no es factible una redistribución de cargas ni tampoco el ingreso de fuentes de potencia externas para compensar al sistema.

Como resultado de la investigación el sistema adecuado para la compensación de potencia reactiva al sistema de subtransmisión que cumpliría las necesidades del SEP es una compensación por banco de capacitores.

## **2.6. Conclusiones Capítulo II.**

- Para el desarrollo del presente estudio partimos de la descripción y entendimiento de proceso de extracción de petróleo en el bloque 16, esto con el objetivo de contar con un punto de partida de las características del

sistema, seguido a esto, se analizó el sistema eléctrico de potencia del Bloque 16, con la finalidad de comprender de forma global el SEP y determinar los puntos a recopilar información para la evaluación, acompañada de una exhaustiva revisión bibliográfica al respecto y análisis de las diferentes normativas existentes sobre el tema.

- En la actualidad el empleo de condensadores en todas sus configuraciones, en redes de distribución y transporte está ampliamente estudiado y difundido. La aplicación de este método de compensación es principalmente para minimizar pérdidas y mantener un perfil de tensión en los diferentes puntos del sistema de transporte, compensar el factor de potencia de las cargas, y estabilizar el sistema, dando como resultado, que los generadores trabajen en el entorno del factor de potencia cercano a la unidad, y controlar fácilmente el perfil de tensiones en las diferentes secciones del SEP.
- Por otro lado, en la industria su aplicación de la compensación de reactivos se da por diversos objetivos, donde las motivaciones para compensar van desde las netamente económicas en función de una señal regulatoria, hasta motivaciones técnicas y de flexibilidad del sistema de potencia. No obstante, el mejoramiento del factor de potencia en la industria se realiza debido a una penalización por el distribuidor hacia el consumidor por un factor de potencia inadecuado, que se refleja en su planilla de consumo.
- Dentro del Bloque 16 se realiza por otros aspectos como: mejorar el sistema de generación, reduciendo costos al disminuir el consumo de combustible por este rubro, aumentar la capacidad disponible de las subestaciones y líneas de subtransmisión, retrasar la construcción de nuevos proyectos y reducir las pérdidas del sistema.

## **CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA**

### **3.1. Análisis de resultados**

Finalizado la metodología descrita en el Capítulo II, se realizará un análisis de los datos y resultados obtenidos durante esta investigación, que permitan validar la solución propuesta a la problemática inicial, la cual es la compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión a 34.5 kV, entre NPF y SPF, para mejorar la generación eléctrica; para lo cual se considera apropiado ir examinando los datos tanto del sistema, así como los que arroja el software utilizado en la simulación.

#### **3.1.1. Curvas de Generación del Bloque 16.**

Para obtener la curva de generación, se recolectaron datos de los históricos, medidos a través del sistema SCADA, para el periodo que comprende desde enero a agosto del 2022.

En esta curva se observar, dos valles muy acentuados, los mismos corresponden a fallas de diferente índole, como son:

- El 11 de enero del 2022, se presentó una falla en la planta de generación a crudo, lo que representó una disminución de 42 MW.
- El 14 de febrero del 2022, el turbo generador TR-2170 no generó energía eléctrica a causa de la falla en el compresor de gas C-3121 A.
- El 6 de junio del 2022, se paró el sistema de reinyección de agua de formación, por lo que solo se generó a gas, la demanda cayó drásticamente.

Por lo que se decidió no incluir en el análisis estos datos de generación, ya que son condiciones particulares y excepcionales del sistema, por lo tanto, todo el análisis no los considera.

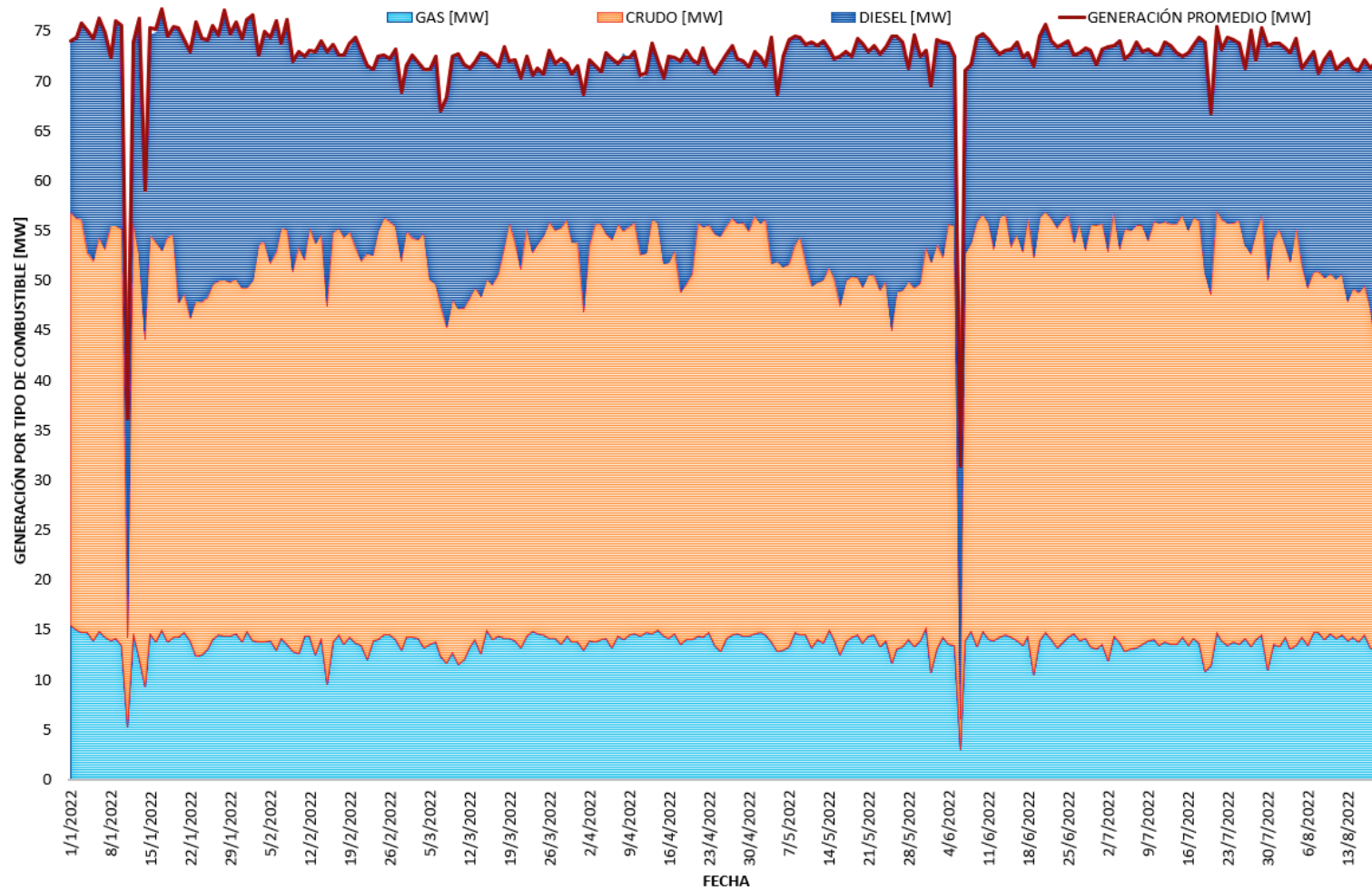


Fig. 20. Curva de demanda del Bloque 16, histórico de los 8 meses del 2022

### 3.1.2. Histograma de frecuencias de la generación del Bloque 16.

Para determinar la curva característica de la generación, se ordenó los datos por hora, esto nos permite integrar todos los datos para el análisis, de tal forma que el análisis estadístico de histogramas de frecuencia a emplear se lo haga del universo de datos, con esta curva característica de la generación se evaluará el sistema.

Tabla 13: Generación del bloque 16 por hora, para determinar la curva característica

HORAS	Media	PROM	L_MAX	L_MIN	Max	Min	Moda	Mediana	Desv est [%]
1	72,43	72,97	74,73	71,21	76,35	65,63	75,56	72,36	1,64
2	72,43	72,97	74,73	71,21	76,35	65,93	70,96	72,39	1,67
3	72,41	72,97	74,73	71,21	76,68	66,12	73,4	72,35	1,64
4	72,40	72,97	74,73	71,21	76,58	65,87	73,03	72,39	1,62
5	72,40	72,97	74,73	71,21	76,62	65,97	72,69	72,42	1,67
6	73,15	72,97	74,73	71,21	77,36	67,08	73,19	73,20	1,73
7	73,13	72,97	74,73	71,21	77,49	67,01	73,42	73,24	1,74
8	73,21	72,97	74,73	71,21	78,23	66,62	75,36	73,18	1,79
9	73,25	72,97	74,73	71,21	78,13	66,83	75,05	73,29	1,76
10	73,20	72,97	74,73	71,21	78,01	66,83	72,97	73,19	1,74
11	73,16	72,97	74,73	71,21	78,00	67,14	73,62	73,20	1,70
12	73,15	72,97	74,73	71,21	78,15	67,60	73,21	73,14	1,75
13	73,23	72,97	74,73	71,21	77,96	66,28	73,06	73,23	1,77
14	73,13	72,97	74,73	71,21	78,16	65,91	72,95	73,14	1,81
15	73,13	72,97	74,73	71,21	78,34	66,75	75,14	73,00	1,82
16	73,18	72,97	74,73	71,21	78,01	67,57	72,97	73,20	1,69
17	73,23	72,97	74,73	71,21	77,87	67,55	71,46	73,23	1,84
18	73,10	72,97	74,73	71,21	78,00	66,20	75,52	73,11	1,75
19	73,14	72,97	74,73	71,21	77,52	66,85	72,58	73,11	1,73
20	73,10	72,97	74,73	71,21	77,75	66,23	72,62	73,09	1,82
21	72,96	72,97	74,73	71,21	77,32	66,05	71,79	72,80	1,82
22	72,93	72,97	74,73	71,21	77,37	66,45	73,33	72,86	1,66
23	72,92	72,97	74,73	71,21	77,06	66,26	72,71	72,98	1,76
24	72,93	72,97	74,73	71,21	77,67	67,43	73,38	72,90	1,66

Para determinar la curva característica se realizó por medio de un histograma de frecuencias, donde se identificó a las clases que contengan los mínimos, los promedios, la moda, la mediana y los máximos, en este caso hay una coincidencia relativa entre moda, promedio y mediana y están dentro del rango de la clase # 5, lo que nos permite determinar la curva característica de forma simple.

Tabla 14: Frecuencias para histograma

	Clase	Li	Ls	Marca	fa	Fa	fr	FR%	% fr
MIN	65,63	1	65,63	67,22	66,42	32	32	0,0058	0,58%
		2	67,22	68,81	68,01	77	109	0,0141	1,41%
		3	68,81	70,40	69,60	200	309	0,0365	3,65%
MODA	72,62	4	70,40	71,99	71,19	1191	1500	0,2177	21,77%
PROM	72,97	5	71,99	73,57	72,78	2056	3556	0,3757	37,57%
MEDIANA	72,97	6	73,57	75,16	74,37	1355	4911	0,2476	24,76%
		7	75,16	76,75	75,96	466	5377	0,0852	8,52%
MAX	78,34	8	76,75	79,34	78,05	95	5472	0,0174	1,74%

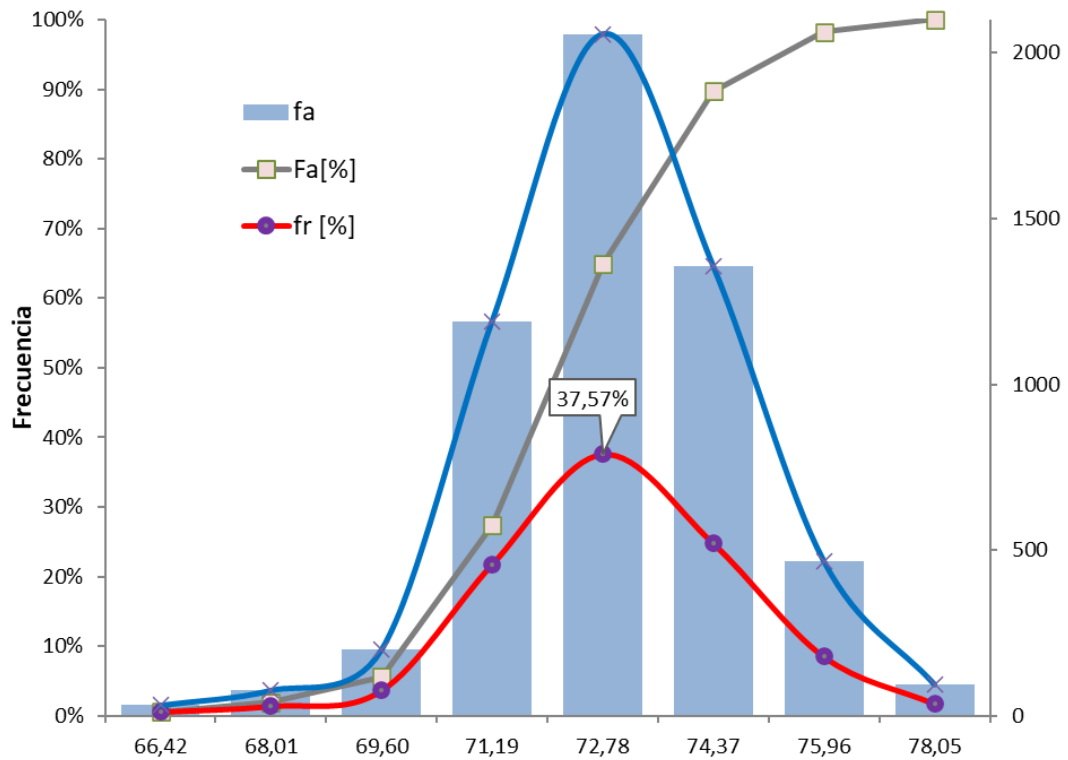


Fig. 21. Histograma de frecuencias

### 3.1.3. Curva característica de la generación del Bloque 16 por hora.

la curva característica de generación se elaboró en función del histograma de frecuencias y del universo de datos recolectados.

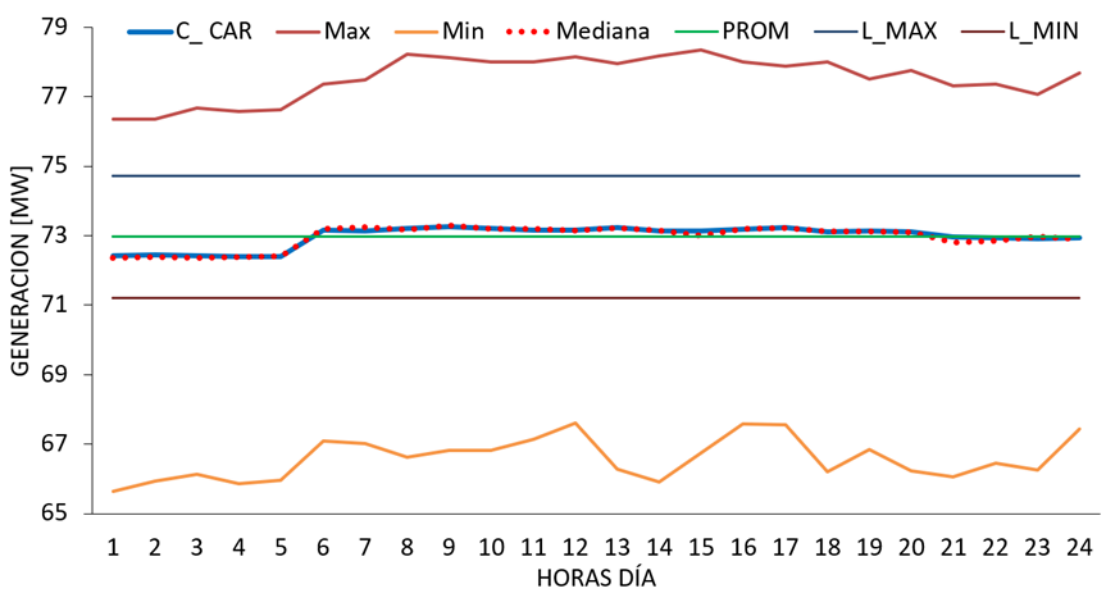


Fig. 22. Curva característica

### 3.1.4. Histograma de frecuencias de la subtransmisión NPF y SPF.

Para la línea de subtransmisión, no se cuenta con un histórico por hora de la energía transmitida entre NPF y SPF, por lo que fue necesario recolectar los datos de una semana de operación de forma manual, los datos se muestran a continuación:

Tabla 15: Energía transmitida por la línea de Subtransmisión NPF-SPF TAG 5NS-001

HORAS	Media	PROM	L_MAX	L_MIN	Max	Min	Moda	Mediana	Desv est [%]
1	7,32	8,12	8,89	7,35	8,18	6,77	7,36	7,36	0,48
2	7,52	8,12	8,89	7,35	8,22	7,26	7,32	7,38	0,35
3	7,63	8,12	8,89	7,35	8,26	6,67	7,94	7,74	0,52
4	7,65	8,12	8,89	7,35	7,96	7,34	7,34	7,68	0,25
5	7,47	8,12	8,89	7,35	8,20	6,78	7,3	7,30	0,55
6	8,54	8,12	8,89	7,35	9,37	7,22	8,74	8,74	0,73
7	8,25	8,12	8,89	7,35	9,45	6,85	7,94	8,24	0,81
8	7,80	8,12	8,89	7,35	8,51	7,26	7,26	7,88	0,49
9	8,13	8,12	8,89	7,35	9,16	7,29	7,72	7,72	0,81
10	8,65	8,12	8,89	7,35	9,38	7,57	9,11	8,83	0,65
11	8,60	8,12	8,89	7,35	9,40	6,97	9,13	8,94	0,85
12	8,04	8,12	8,89	7,35	8,83	6,98	8,31	8,31	0,74
13	8,42	8,12	8,89	7,35	10,07	7,20	7,53	8,74	1,04
14	8,66	8,12	8,89	7,35	9,70	6,82	8,2	8,94	1,00
15	8,22	8,12	8,89	7,35	9,36	7,59	7,59	8,01	0,63
16	8,19	8,12	8,89	7,35	8,94	7,09	8,7	8,37	0,67
17	8,45	8,12	8,89	7,35	9,12	7,14	8,82	8,82	0,70
18	8,51	8,12	8,89	7,35	9,74	6,90	8,59	8,59	1,06
19	8,27	8,12	8,89	7,35	9,42	7,60	8,45	8,12	0,59
20	8,46	8,12	8,89	7,35	9,76	7,36	8,33	8,33	0,77
21	7,92	8,12	8,89	7,35	8,71	6,83	8,19	7,89	0,57
22	8,08	8,12	8,89	7,35	9,10	7,14	9,1	7,86	0,78
23	8,16	8,12	8,89	7,35	9,14	7,06	8,74	8,04	0,75
24	7,85	8,12	8,89	7,35	8,99	6,66	7,39	7,97	0,76

En el siguiente cuadro se resume la energía transferida por la línea de transmisión entre NPF y SPF de los 7 días de la semana en análisis.

Tabla 16: energía transferida NPF – SPF por la línea de Subtransmisión NPF-SPF TAG 5NS-001, en MW

DÍA	Qc Flow [MVar]	P Flow [MW]	S Flow [MVA]	Corriente [A]	cos $\phi$	ENERGÍA [MW*H]
1	5,104	8,17	9,64	161,26	0,85	196,16
2	5,127	8,11	9,59	160,57	0,85	194,64
3	5,055	8,68	10,04	168,04	0,86	208,22
4	5,209	8,32	9,81	164,23	0,85	199,61
5	5,158	8,12	9,62	160,98	0,84	194,87
6	5,136	7,60	9,17	153,47	0,83	182,35
7	5,212	7,82	9,40	157,32	0,83	187,77
<b>PROMEDIO</b>						<b>194,80</b>

El promedio y la mediana de la energía transferida por cada hora entran en el rango de la clase # 3.

Tabla 17: Frecuencias para histograma, demanda subtransmisión NPF-SPF en MW

	Clase	Li	Ls	Marca	fa	fr	Fa	Fr	%	
MIN	6,66	1	6,66	7,15	6,904	17	0,1012	17	0,1012	10,12%
		2	7,15	7,63	7,391	37	0,2202	54	0,3214	22,02%
MEDIANA	8,05	3	7,63	8,12	7,878	33	0,1964	87	0,5179	19,64%
PROMEDIO	8,12	4	8,12	8,61	8,365	32	0,1905	119	0,7083	19,05%
		5	8,61	9,10	8,852	25	0,1488	144	0,8571	14,88%
MAX	10,07	6	9,10	9,58	9,339	20	0,1190	164	0,9762	11,90%
		7	9,58	11,07	10,326	4	0,0238	168	1,0000	2,38%

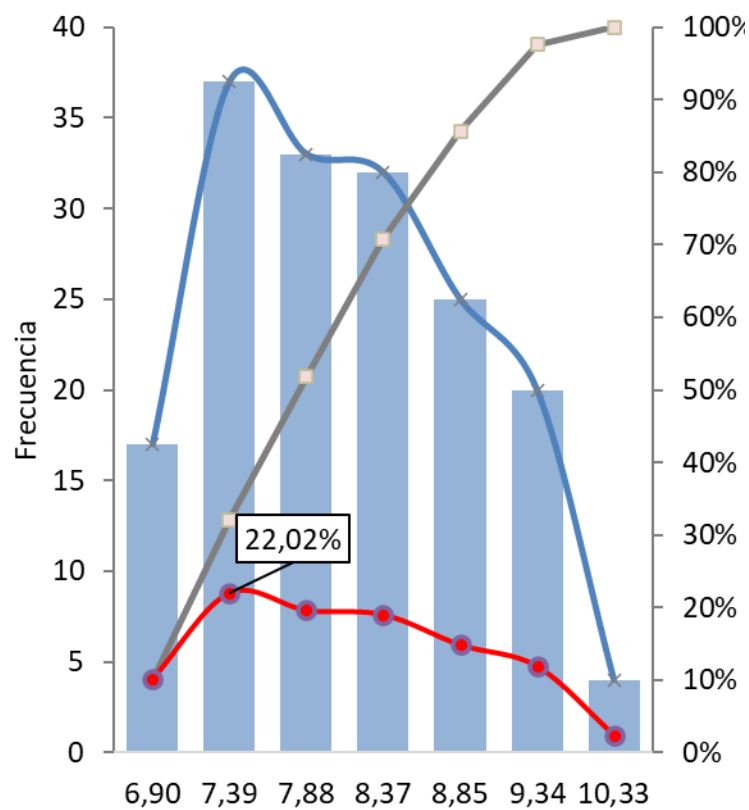


Fig. 23. Histograma de frecuencias subtransmisión NPF-SPF

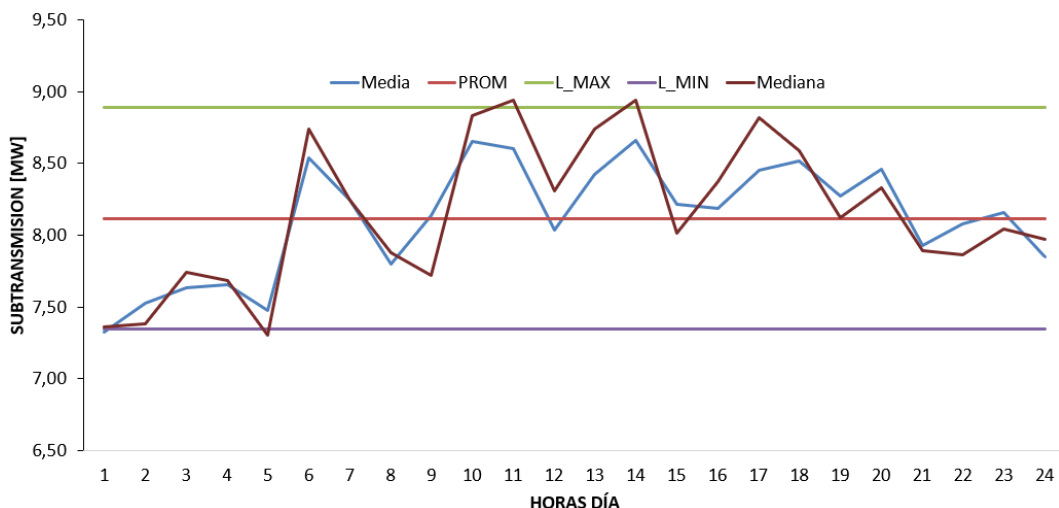


Fig. 24. Curva característica demanda subtransmisión NPF-SPF

### 3.1.5. Costos de generación por hora sin compensación.

Tabla 18: Costos de generación Bloque 16

HORA	GAS			CRUDO		DIESEL		TOTAL [USD]
	POT GEN	ENERGÍA [MW*H]	COSTO [\$/MW*H]	ENERGÍA [MW*H]	COSTO [\$/MW*H]	ENERGÍA [MW*H]	COSTO [\$/MW*H]	
1	72,43	13,29	100,80	38,58	302,40	20,56	365,90	20.529,57
2	72,43	13,30	100,80	38,58	302,40	20,55	365,90	20.527,92
3	72,41	13,28	100,80	38,55	302,40	20,58	365,90	20.527,31
4	72,40	13,30	100,80	38,58	302,40	20,52	365,90	20.515,97
5	72,40	13,35	100,80	38,58	302,40	20,47	365,90	20.502,70
6	73,15	14,08	100,80	39,29	302,40	19,77	365,90	20.536,84
7	73,13	14,10	100,80	39,29	302,40	19,74	365,90	20.524,57
8	73,21	14,02	100,80	39,38	302,40	19,81	365,90	20.571,35
9	73,25	14,00	100,80	39,30	302,40	19,95	365,90	20.595,51
10	73,20	14,04	100,80	39,30	302,40	19,86	365,90	20.565,79
11	73,16	14,07	100,80	39,36	302,40	19,74	365,90	20.540,59
12	73,15	14,07	100,80	39,37	302,40	19,71	365,90	20.535,71
13	73,23	14,11	100,80	39,40	302,40	19,72	365,90	20.552,57
14	73,13	13,99	100,80	39,38	302,40	19,76	365,90	20.548,98
15	73,13	14,10	100,80	39,34	302,40	19,69	365,90	20.522,44
16	73,18	14,06	100,80	39,34	302,40	19,78	365,90	20.549,69
17	73,23	14,16	100,80	39,28	302,40	19,79	365,90	20.547,26
18	73,10	14,05	100,80	39,32	302,40	19,74	365,90	20.528,19
19	73,14	14,11	100,80	39,33	302,40	19,71	365,90	20.526,06
20	73,10	14,10	100,80	39,32	302,40	19,68	365,90	20.512,47
21	72,96	13,81	100,80	39,15	302,40	19,99	365,90	20.546,59
22	72,93	13,81	100,80	39,08	302,40	20,04	365,90	20.543,07
23	72,92	13,79	100,80	39,02	302,40	20,11	365,90	20.549,00
24	72,93	13,79	100,80	39,08	302,40	20,06	365,90	20.547,55
<b>TOTAL</b>								<b>492.947,69</b>

Los costos de generación tienen un valor mínimo de USD 20.502, un máximo de USD 20.595, es decir un rango de USD 92, respecto al valor promedio se tiene un valor de USD 20.539, es decir al analizar con el universo de datos obtenidos, prácticamente no hay una variación marcada en el costo de generación por hora.

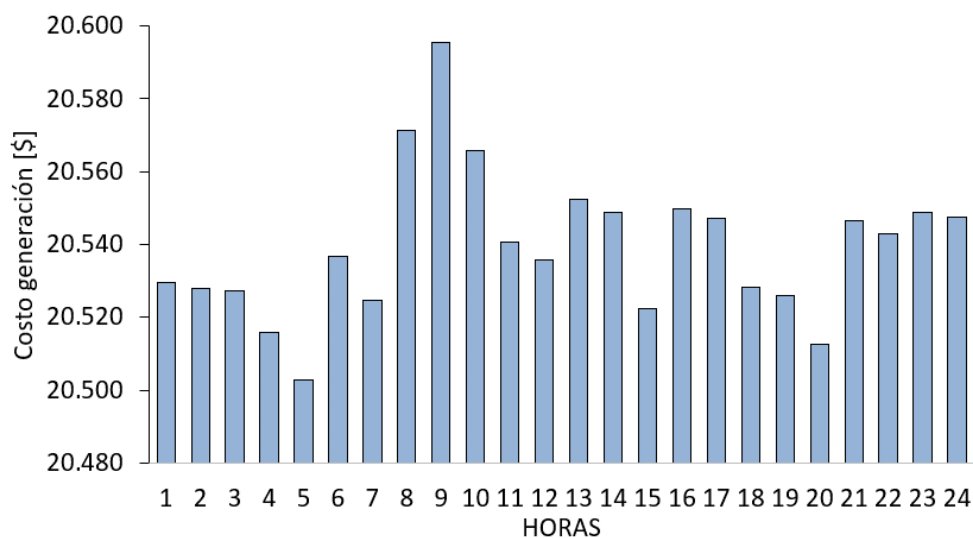


Fig. 25. Costos por hora de generación del Bloque 16, obtenida de la curva característica

### 3.1.6. Costos de subtransmisión por hora sin compensación.

HORA	GAS			CRUDO		DIESEL		TOTAL [USD]
	ENERGÍA TRAN. [MW*H]	ENERGÍA [MW*H]	COSTO [\$ /MW*H]	ENERGÍA [MW*H]	COSTO [\$ /MW*H]	ENERGÍA [MW*H]	COSTO [\$ /MW*H]	
1	7,32	1,39	100,80	3,95	302,40	1,98	365,90	2.059,09
2	7,52	1,43	101,80	4,06	303,40	2,03	366,90	2.123,26
3	7,63	1,45	102,80	4,12	304,40	2,06	367,90	2.161,94
4	7,65	1,45	103,80	4,13	305,40	2,07	368,90	2.175,26
5	7,47	1,42	104,80	4,04	306,40	2,02	369,90	2.131,97
6	8,54	1,62	105,80	4,61	307,40	2,31	370,90	2.444,50
7	8,25	1,57	106,80	4,45	308,40	2,23	371,90	2.368,51
8	7,80	1,48	107,80	4,21	309,40	2,11	372,90	2.247,46
9	8,13	1,55	108,80	4,39	310,40	2,20	373,90	2.352,77
10	8,65	1,64	109,80	4,67	311,40	2,34	374,90	2.511,00
11	8,60	1,63	110,80	4,64	312,40	2,32	375,90	2.505,09
12	8,04	1,53	111,80	4,34	313,40	2,17	376,90	2.348,37
13	8,42	1,60	112,80	4,55	314,40	2,27	377,90	2.470,35
14	8,66	1,65	113,80	4,68	315,40	2,34	378,90	2.547,71
15	8,22	1,56	114,80	4,44	316,40	2,22	379,90	2.426,04
16	8,19	1,56	115,80	4,42	317,40	2,21	380,90	2.425,37
17	8,45	1,61	116,80	4,56	318,40	2,28	381,90	2.512,54
18	8,51	1,62	117,80	4,60	319,40	2,30	382,90	2.539,31
19	8,27	1,57	118,80	4,47	320,40	2,23	383,90	2.475,58
20	8,46	1,61	119,80	4,57	321,40	2,28	384,90	2.540,04
21	7,92	1,51	120,80	4,28	322,40	2,14	385,90	2.387,12
22	8,08	1,54	121,80	4,36	323,40	2,18	386,90	2.442,11
23	8,16	1,55	122,80	4,40	324,40	2,20	387,90	2.473,15
24	7,85	1,49	123,80	4,24	325,40	2,12	388,90	2.386,99
							<b>TOTAL USD</b>	<b>57.055,48</b>

### 3.1.7. Simulación condición actual del sistema, por medio de herramientas computacionales.

La simulación se realizó con el software ETAP 19.0.1, El sistema está compuesto por 163 barras, 544 ramales, 546 líneas principales / cables troncales, 506 cargas.

La simulación se realizó con un valor de generación determinado en función del histograma de frecuencias, con el valor de mayor frecuencia, es decir con el promedio de la demanda de generación de la curva característica, este mismo criterio se aplicó para la demanda de la subtransmisión.

Los datos de la corrida de flujo se detallan a continuación:

Tabla 19: Flujos de potencia y parámetros eléctricos de la simulación

PARÁMETROS	UN.	DEMANDA
EN LA LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN		
Potencia aparente	[MVA]	10,5
Potencia real	[MW]	8,924
potencia reactiva	[MVAr]	5,505
cos j	[%]	85,11
Corriente	[A]	174,7
Voltaje	[kV]	34,65
% de Voltaje	[%]	100,40%
EN EL SISTEMA		
Load	[MW]	72,97
Load	[MVAr]	32,24
Generation	[MW]	74,88
Generation	[MVAr]	23,17
Loss	[MW]	1,91
Loss	[MVAr]	-9,08

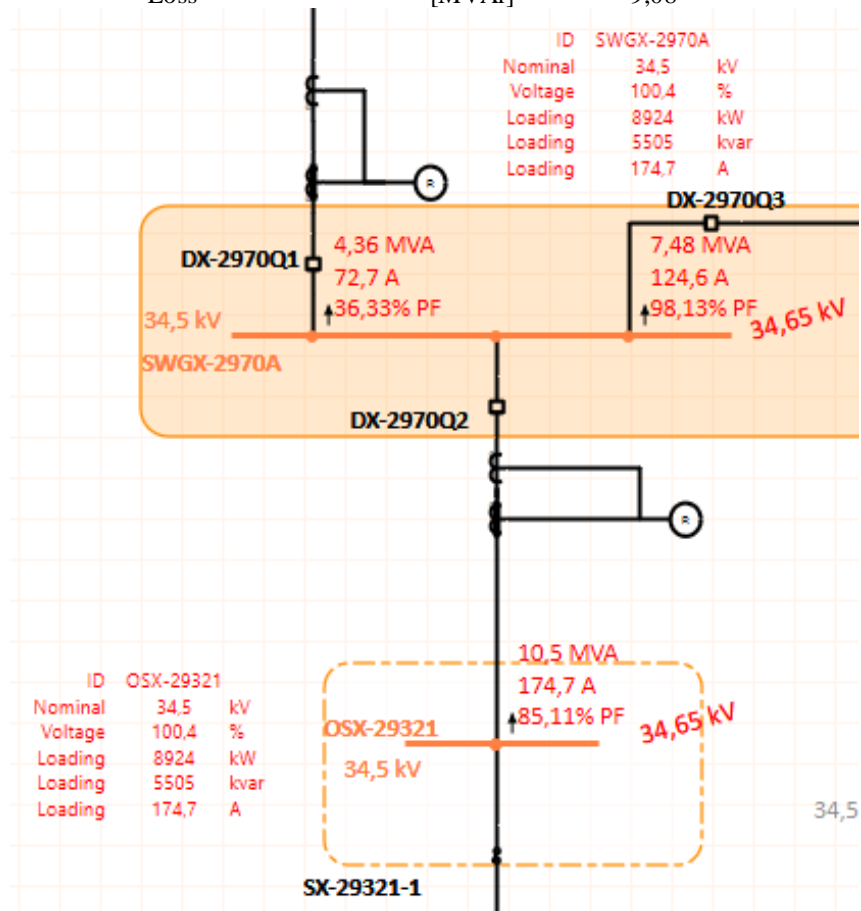


Fig. 26. Simulación condición actual a Demanda promedio de curva característica

### 3.1.8. Despacho económico de energía en condición actual del sistema.

El despacho de generación se realiza en función del costo del combustible, siendo prioridad el ingreso de la generación a gas, luego la generación a crudo, y finalmente como generación de regulación o ajuste de la demanda del sistema se realiza con la generación a diésel.

El esquema del proceso se muestra en el siguiente diagrama de flujo del despacho económico.

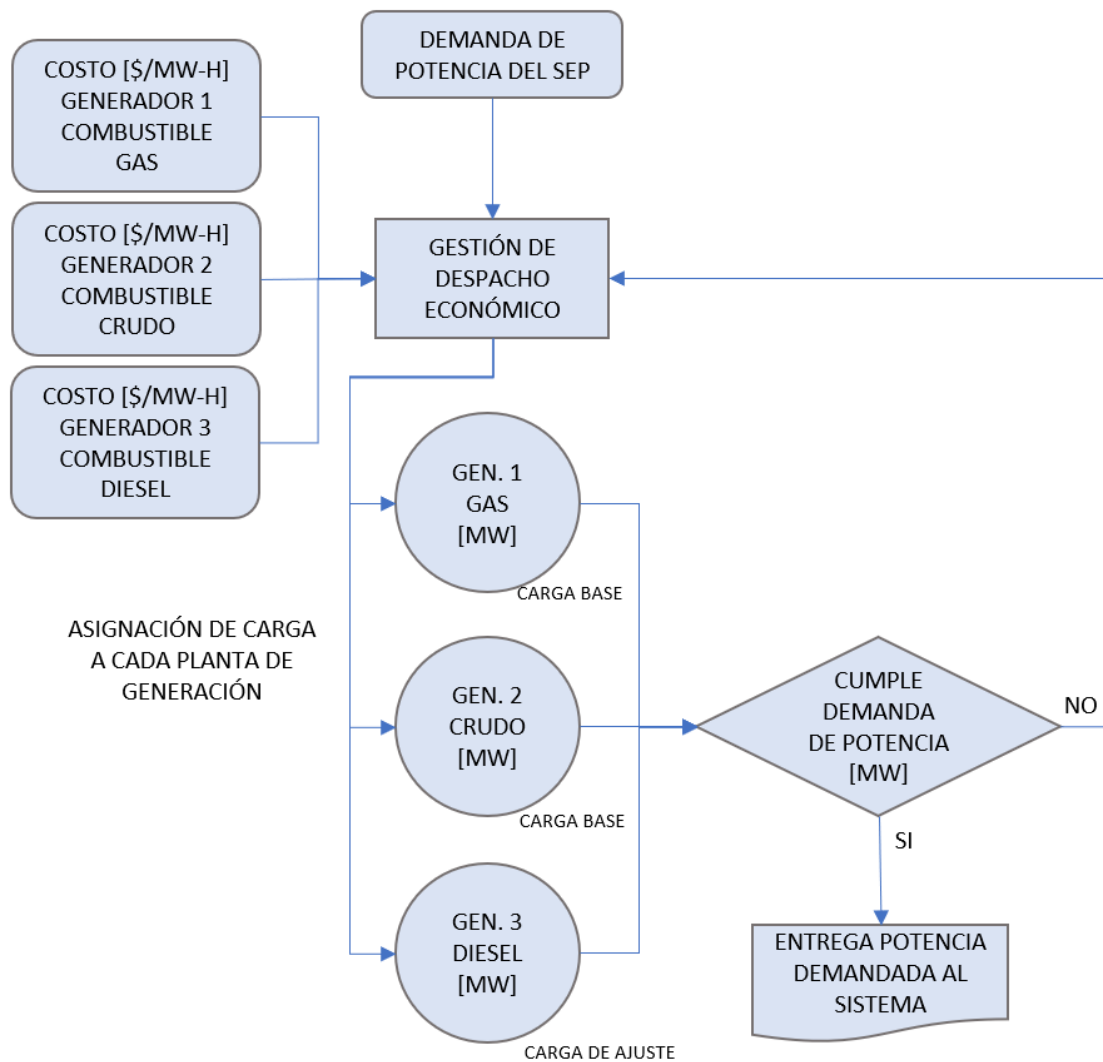


Fig. 27. Flujograma para el despacho económico

Para el despacho de energía, se prioriza la generación de menor a mayor costo, es decir, primero entra la generación a gas, luego la generación a crudo y para alcanzar la demanda del SEP se la realiza con la generación a diésel.

Cabe aclarar que la condición normal de operación del SEP es al 100% de la demanda del bloque, por lo que la determinación de la compensación de reactivos se realizó con la demanda al 100%.

Tabla 20: Despacho económico con una demanda promedio de 72,97 MW

GENERACIÓN	GAS [MW*H]	CRUDO [MW*H]	DIESEL [MW*H]	ENERGÍA GENERADA POR DÍA [MW*H]
MÁXIMO	377,31	1.023,30	704,93	1.853,18
PROMEDIO	332,76	939,20	479,34	1.751,30
MÍNIMO	228,38	713,66	352,31	1.602,99
EN %	19%	54%	27%	100%

### 3.1.9. Determinación de la propuesta de compensación de potencia reactiva.

Uno de los parámetros más importante para la selección del tipo de compensación es determinar la presencia o no de armónicos en el sistema, la selección adecuada también significará un impacto económico en el presupuesto al momento ya de ejecución en campo de la solución que se seleccione.

En el apartado introductorio se mencionó el estudio previo realizado en el 2019 sobre calidad de energía del sistema de potencia del Bloque 16, y las mediciones realizadas en campo por medio del transformador que está conectado directamente a la barra de generación, en este estudio se cuantificó las siguientes distorsiones armónicas:

- THD<sub>v</sub> en el NPF 0,8030%
- THD<sub>v</sub> en el SPF 0,2586%
- TDH<sub>i</sub> NPF 2,230%
- TDH<sub>i</sub> SPF 2,392%

Estas mediciones en parte permiten determinar la contaminación armónica presente en el sistema de generación tanto del NPF y SPF, de este análisis la evaluación de THD<sub>v</sub> no supera el 0,85% y en el caso corriente THD<sub>i</sub> de igual forma son inferior al 2,5, comparando contra los requerimientos de la IEEE 519-2014, estas variables cumplen los requerimientos establecidos en dicha norma.

De acuerdo con el literal 1.2.10.1., donde se describe una guía sencilla de determinar el tipo de compensación de potencia reactiva de acuerdo con el

contenido armónico del sistema y porcentaje de cargas no lineales, es totalmente factible la compensación por banco de capacitores.

El FP óptimo y la compensación de potencia reactiva, se calcula en función de IEEE 1036-2010 Guide for Application of Shunt Power Capacitors.

El factor de potencia actual de la línea de subtransmisión es de 84% y el factor de potencia óptimo calculado con la ecuación 1, es de 96%, siendo este el FP objetivo para esta investigación.

La potencia real promedio, que se transmite es de 8070 kW, con la ecuación 2, se determina la potencia necesaria del banco de capacitores [33]:

$$Q_c = 2858,96 \text{ kvar}$$

La capacitancia del banco de capacitores se determina con la ecuación 3, y es de:

$$C = 6,37 \text{ uf}$$

### 3.1.10. Simulación del sistema con la compensación de potencia reactiva propuesta, por medio de herramientas computacionales.

En el párrafo anterior se procedió a calcular la compensación de potencia reactiva que requiere la línea de subtransmisión en estudio, con este valor calculado de compensación se simuló el SEP con el software ETAP, dándonos los siguientes resultados de la corrida de flujo:

Tabla 21: Flujos de potencia y parámetros eléctricos de la simulación con compensación de reactivos

PARÁMETROS	UN.	DEMANDA
<b>EN LA LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN</b>		
Potencia aparente	[MVA]	9,01
Potencia real	[MW]	8,919
potencia reactiva	[MVAr]	1,304
cos j	[%]	98,95
Corriente	[A]	151
Voltaje	[kV]	34,45
% de Voltaje	[%]	99,85%
<b>EN EL SISTEMA</b>		
Load	[MW]	72,97
Load	[MVAr]	29,36
Generation	[MW]	74,84
Generation	[MVAr]	20,36
Loss	[MW]	1,87
Loss	[MVAr]	-9,00

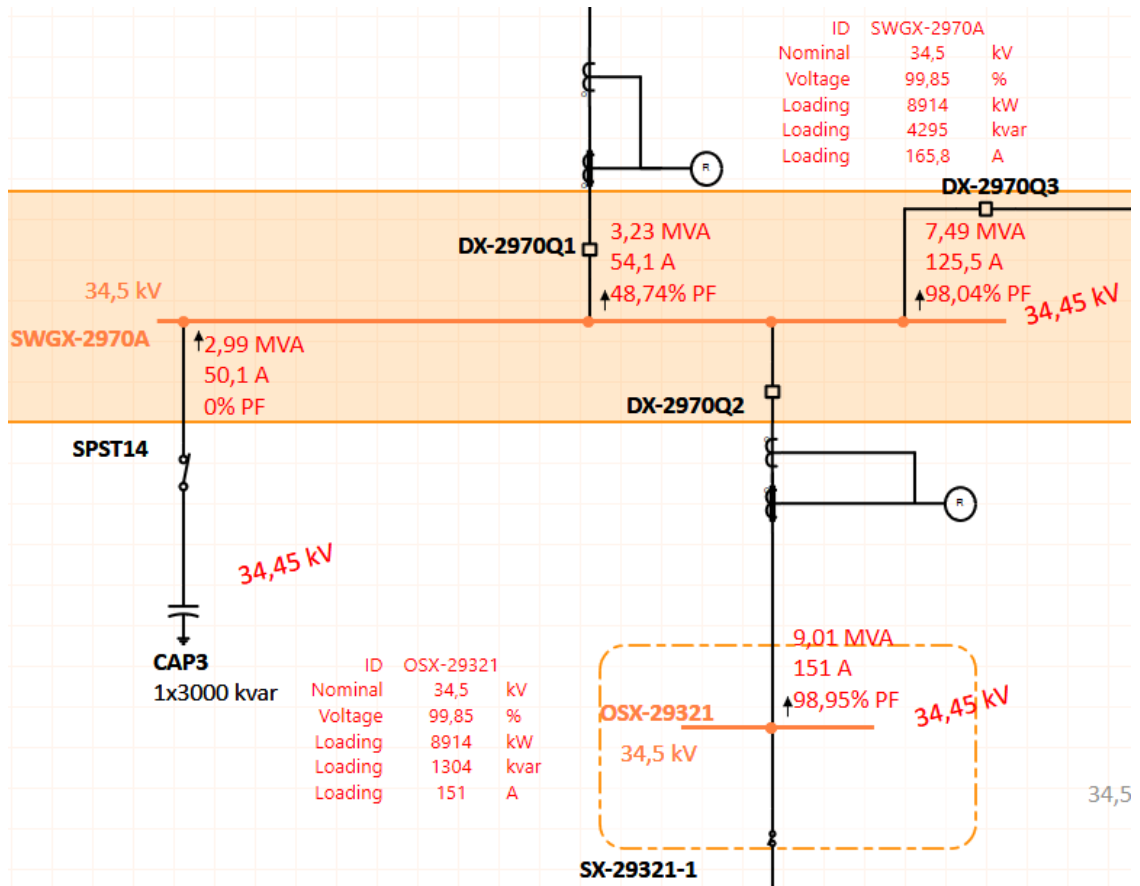


Fig. 28. Simulación condición actual a Demanda máxima

### 3.2. Resultados de la compensación de potencia reactiva.

En este acápite se compara los flujos de potencia, los parámetros eléctricos, los costos de despacho, los costos de generación de reactivos y pérdidas, de los datos obtenidos con los escenarios sin compensación y con compensación de potencia reactiva.

Para determinar el costo del MVar\*H, se lo realizó en función de la Regulación No. CONELEC - 004/02 “Transacciones de Potencia Reactiva en el Mercado Eléctrico Mayorista”.

Tabla 22: Comparación flujos de potencia estado actual VS compensado

PARÁMETROS	UN.	FLUJOS DE POTENCIA		DIFERENCIA
		SIN	CON	S-C
<b>EN LA LÍNEA DE SUBTRANSMISIÓN</b>				
Potencia aparente	[MVA]	10,50	9,01	1,49
Potencia real	[MW]	8,92	8,92	0,00
Potencia reactiva	[MVA <sub>r</sub> ]	5,51	1,30	4,20
cos j	[%]	85,11	98,95	---
Corriente	[A]	174,70	151,00	23,70
Voltaje	[kV]	34,65	34,45	0,20
% de Voltaje	[%]	100,40%	99,85%	---
<b>EN EL SISTEMA</b>				
Load	[MW]	72,97	72,97	0,00
Load	[MVA <sub>r</sub> ]	32,24	29,36	2,89
Generation	[MW]	74,88	74,84	0,04
Generation	[MVA <sub>r</sub> ]	23,17	20,36	2,81
Loss	[MW]	1,91	1,87	0,04
Loss	[MVA <sub>r</sub> ]	-9,08	-9,00	-0,08

Tabla 23: Comparación costos de generación estado actual VS compensado por día

COMBUS.	ENERGÍA GENERADA			COSTOS GENERACIÓN		
	SIN [MW*H]	CON [MW*H]	COSTO [\$/MW-H]	SIN [\$]	CON [\$]	SIN - CON [\$]
GAS	332,76	332,76	100,80	33542,22	33542,22	0,00
CRUDO	939,20	939,20	302,40	284014,65	284014,65	0,00
DIESEL	479,34	478,38	365,90	175390,82	175039,55	<b>351,26</b>

Tabla 24: Comparación costos de generación estado actual VS compensado

	ENERGÍA GENERADA		COSTOS GENERACIÓN			VENEFICIO (SIN-CON)	
	SIN	CON	[\$/MVA <sub>r</sub> -H] [\$/MW-H]	SIN [\$]	CON [\$]	POR DÍA [USD]	POR AÑO [USD]
REACTIVA GENERADA [MVA <sub>r</sub> *H]	555,98	488,54	22,17	12.326,17	10.831,02	1.495,14	538.252,13
PERDIDAS [MW*H]	45,74	44,78	365,90	16.737,73	16.386,47	351,26	126.455,04
<b>TOTAL POR AÑO [USD]</b>						<b>664.707,17</b>	

### 3.3. Especificación del banco de capacitores.

En el sistema de control a emplear deben considerarse el uso de banco de capacitores automáticos, con sistemas de conmutación en cruce por cero, para disminuir los transitorios de voltaje y corriente causados por la energización de bancos con cierre simultaneo.

De acuerdo con el literal 1.2.10.4., de esta investigación se puede seleccionar el tipo de control en función del cociente entre  $Q_c$  y  $S_n$ , en este caso el resultado es de 31%, por lo que corresponde a una compensación Automática.

Si  $Q_c/S_n < 12\%$  Compensación FIJA.

Si  $Q_c/S_n > 12\%$  Compensación AUTOMÁTICA.

$Q_c$  (kVAr): potencia reactiva requerida

$S_n$  (kVA): potencia aparente del transformador de alimentación.

Respecto al control en la siguiente figura se muestra la arquitectura simplificada del método de control automático para el banco de capacitores utilizado para la mejora del sistema de generación del Bloque 16, donde se integra el control del factor de potencia a través del banco de capacitores de forma automática y el control de voltaje de forma manual a través de los taps del transformador de la subtransmisión.

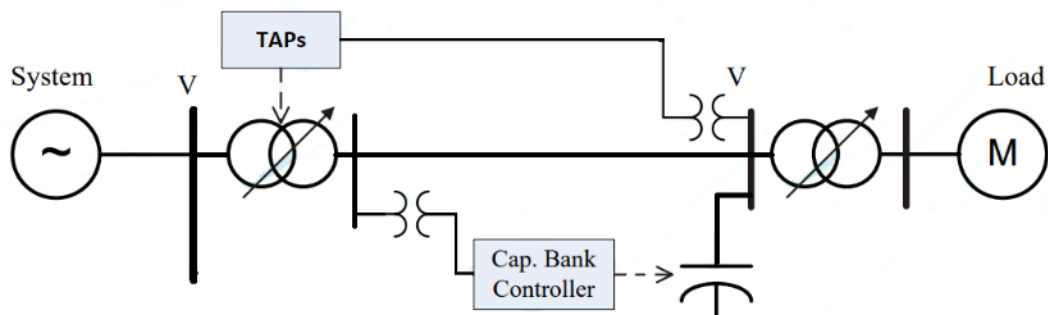


Fig. 29. Método de control Automático de compensación y control de voltaje

Para determinar el nivel de voltaje, la capacidad estándar por capacitor, número de terminales por capacitor y clase de aislamiento y BIL básico del banco de capacitores, fue seleccionado aplicando el estándar IEEE Std 18-2002. Key aspects of the ratings and service conditions are given here for easy reference.

Para determinar la sobre tensión y sobre corriente se debe aplicar el estándar IEEE 1036-2010 Guide for Application of Shunt Power Capacitors.

Para determinar el tamaño paso máximo del banco de capacitores se emplea la fórmula del acápite 5.1.1 del estándar IEEE1036, que se muestra en la fórmula 5.

$$\Delta V = \left( \frac{MVA_r}{MVA_{sc}} \right) * 100\% \quad (5)$$

Donde:

MVA<sub>r</sub> es el tamaño en MVA<sub>r</sub> del paso del banco de capacitores.

MVA<sub>sc</sub> Son los MVA de corto circuito trifásico disponible en el lugar del banco de capacitores.

En la siguiente tabla se resumen la especificación del banco de capacitores aplicando IEEE1036-2010 y IEEE Std 18-2002.

Tabla 25: Especificación de banco de capacitores

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	REQUERIDO	UN.
1	Tensión estrella	19,92	kV
2	Numero de fases sistema	3	
3	Numero de fases del capacitor	1	
4	Potencia Reactiva calculada	2859	kVAr
5	Frecuencia	60	Hz
6	Conexión	Doble estrella flotante*	
7	Configuración	Automático multipaso	
8	Instalación	Servicio exterior	
9	Grado de protección	NEMA 4X e IP 66	
10	Normas	IEEE 1036-2010	
11		IEEE Std 18-2012	
12	Altitud	<1000	msnm
13	Temperatura ambiente	hasta 45°	°C
14	Nivel de aislamiento	N 23 kV – 125 kV BIL	KV
15	Medio de conexión	Desconectores en SF6	
16	Proteccion sobrecorriente	Fusible	
17	Voltaje de Impulso	125	kV
18	Número de Bushing por banco:	2	
19	Tipo de Bushing	C4 o mejor	
20	Descarga:	75V/10min	
21	Potencia Reactiva Normalizada	3600	kVAr
22	Pasos	6	
23	Potencia por pasos	2x300	kVAr
		2x600	kVAr
		2x900	kVAr
24	Fluido dieléctrico no contaminante.	MDBT (sin PCB)	
25	Incluye: Portafusibles, Pararrayos y herrajes instalación	Incluye	
26	Sobre carga	135	

\* El transformador es D-Y aterrizado, de acuerdo con IEEE Std 1036-2010, es recomendable banco en doble estrella sin aterrizar

### 3.4. Análisis técnico de los resultados

Finalizado la metodología descrita en el Capítulo II, se realizó un análisis de los datos y resultados obtenidos durante esta investigación, que permitan validar la solución propuesta a la problemática inicial, la cual es la compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión a 34.5 kV, entre NPF y SPF, para mejorar la generación eléctrica; para lo cual se consideró apropiado ir examinando los datos tanto del sistema, así como los que arroja el software utilizado en la simulación.

Dentro del objetivo de la revisión bibliográfica y de normativa, se determinó

Para determinar el comportamiento del sistema se analizó la generación y el sistema de subtransmisión, de forma cuantitativa, en función de los datos de las diferentes variables, que se ha recopilados en esta investigación.

**Generación:** Los generadores juegan un papel muy importante en el aporte de potencia reactiva al sistema, siendo, por tanto, los responsables en gran parte de mantener valores aceptables de tensión a lo largo de todo el sistema de potencia.[31]

**Red de subtransmisión eléctrica:** Para integrar la generación del NPF y SPF se dispone de una red a nivel de 34.5 kV, que interconecta las dos facilidades de generación eléctrica, esto permite aprovechar la generación con gas asociado producida en el NPF y enviar el excedente de generación del NPF hasta el SPF, también esta interconexión eléctrica tiene la bondad de darle más inercia y robustes al sistema.

La red de subtransmisión en estudio está compuesta por un conductor soterrado, tipo tripolar de calibre 500 MCM, 35 kV, aislamiento EPR al 133%, con encapsulado continuo corrugado de aluminio y PVC, apto para ser enterrado directamente y operar en áreas clasificadas, de acuerdo con ANSI/ICEA S-93-639, como se puede observar en el unifilar del sistema ubicado en la sección de anexos, la carga actual de este conductor es inferior al 70% de su nominal.

Físicamente la red se encuentra en buen estado, incluido sus componentes, correctamente mantenida y operativa, sin embargo, en el monitoreo realizado se identifica que el  $\cos \phi$ , fluctúa entre 0.83 a 0.86, con un promedio de 0,84.

Para el control de voltaje, en este sistema es práctica común el ajustar con la modificación de los TAPs de los transformadores de la línea de subtransmisión.

De igual manera para el control de reactivos capacitivos de esta línea soterrada en condición de baja demanda, el sistema dispone de reactores en paralelo, los cuales son de operación manual.

Es en la corrección del factor de potencia de la línea de subtransmisión en lo que se puede obtener un beneficio significativo, considerando que el promedio de transmisión de potencia activa es de 8.07 MW con 5.15 MVAR y un  $\cos \phi$  de 0.84.

**Cargas:** El 40% de las cargas del sistema son no lineales y corresponde al sistema de bombeo electro sumergible utilizado para el levantamiento artificial de la producción petrolera, los cuales utilizan variadores de frecuencia para optimizar la producción del pozo y son las principales fuentes de distorsión armónicas dentro de un sistema petrolero.

De los datos recolectados y analizados, el sistema de generación y subtransmisión eléctrica tiene un desempeño conforme lo requiere el criterio normativo de la IEEE 519-1992, es decir un contenido bajo de distorsión armónica, tanto en voltaje y corriente.

Respecto al sistema de distribución y subtransmisión, para contrarrestar gran parte de los armónicos que viajan hacia la fuente, se utiliza transformadores en configuración DYn, el bobinado Y de este tipo de transformadores anula los terceros y quintos armónico, evitando que se refleje en el lado delta

**Despacho económico de generación:** Los costos de generación desde la más económica a la más cara dentro del Bloque 16, está dado en el siguiente orden: Gas asociado, crudo y diésel.

Por lo que hay que priorizar el uso del gas en la generación, esta política es completamente aplicable y se practica de forma adecuada por la operación del

sistema de generación, por lo que en promedio de los 5 MMSCFD que se producen, tan solo el 1,6% se quema en las teas de proceso.

Adicional en los turbo generadores y en la planta de generación a crudo, se tienen implementado sistemas de ciclo combinado, mejorando el rendimiento de las fuentes de generación.

Por lo tanto, en este sentido no se identifica un plan a corto plazo y económicamente viable para disminuir los costos de generación, por lo que la compensación de reactivos de acuerdo con los datos refleja una oportunidad para mejorar la generación y disminuir los costos de producción del barril de petróleo.

Con la compensación de reactivos, se calcula se reduzca un 2% las pérdidas y la disminución de la demanda de potencia aparente se esperada sea del 14%.

### **3.5. Validación económica de los resultados.**

Como se ha planteado, para la compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión a 34.5 kV, entre NPF y SPF, para mejorar la generación eléctrica por medio de banco de capacitores, tiene un efecto global monetario, por lo que su factibilidad puede representarse a través de una expresión de análisis económico.

Para una evaluación con banco de capacitores, se debe tener en cuenta los siguientes puntos:

- Costos de inversión de los bancos de capacitores.
- Gastos de amortización de los bancos.
- Gastos de pérdidas de energía activa de los bancos.
- Beneficios por la mejora del factor de potencia, incluida la reducción de pérdidas de energía activa en el sistema.
- Beneficios por la liberación de la capacidad de carga para condiciones en donde los sistemas estén al borde superior de la capacidad de sus facilidades, este aspecto pueda representar un atractivo económico.

Para el análisis económico, se evaluarán los siguientes indicadores:

- Flujo Neto de Efectivo (FNE)
- Pay Back o plazo de recuperación (PR).

- La Tasa Interna de Rendimiento (TIR)
- El coste promedio ponderado del capital (WACC, por sus siglas en inglés)
- El Valor Actual Neto (VAN)
- Relación Beneficio Costo (RBC).

Así también como dato de entrada, el costo de generación a diésel en el Bloque 16, es de aproximadamente 0,25 USD/kW-h; la REGULACIÓN No. CONELEC – 004/02 hace referencia a los costos que representa la generación de reactivos, los cuales se pueden obtener de la base de datos del CONELEC, el valor promedio es de 0,025 USD/kVAr-h. Si bien es cierto la mayoría de los fabricantes de condensadores asegura una vida útil de 10 años, en nuestro caso por regulación interna se establece una amortización para 5 años.

### 3.5.1. Flujo Neto de Efectivo (FNE)

Para determinar el flujo neto de efectivo se incluye todos los costos fijos y variables, tanto de la inversión como de la operación del sistema de compensación:

Tabla 26: Flujo Neto de Efectivo (FNE) a 5 años

<b>Rubro</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Ingresos		\$664.707,17	\$686.864,07	\$709.759,54	\$733.418,19	\$757.865,47	\$783.127,65
Costos Fijos		\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Costos variables		\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
<b>Utilidad Operativa</b>		<b>\$664.707,17</b>	<b>\$686.864,07</b>	<b>\$709.759,54</b>	<b>\$733.418,19</b>	<b>\$757.865,47</b>	<b>\$783.127,65</b>
Depreciación		\$180.114,00	\$180.114,00	\$180.114,00	\$180.114,00	\$180.114,00	
Ingreso NO operativo		\$126.455,04	\$130.670,21	\$135.025,88	\$139.526,74	\$144.177,64	\$148.983,56
<b>UAI</b>		<b>\$611.048,21</b>	<b>\$637.420,28</b>	<b>\$664.671,42</b>	<b>\$692.830,94</b>	<b>\$721.929,10</b>	<b>\$932.111,21</b>
Gastos financieros		\$108.356,40	\$95.004,10	\$80.049,53	\$63.300,41	\$44.541,40	\$23.531,31
<b>UAI (Base Imponible)</b>		<b>\$502.691,81</b>	<b>\$542.416,18</b>	<b>\$584.621,89</b>	<b>\$629.530,52</b>	<b>\$677.387,70</b>	<b>\$908.579,90</b>
Impuestos Renta		\$140.753,71	\$151.876,53	\$163.694,13	\$176.268,55	\$189.668,56	\$254.402,37
Aporte Trab.		\$75.403,77	\$81.362,43	\$87.693,28	\$94.429,58	\$101.608,16	\$136.286,99
<b>UDI</b>		<b>\$286.534,33</b>	<b>\$309.177,22</b>	<b>\$333.234,48</b>	<b>\$358.832,40</b>	<b>\$386.110,99</b>	<b>\$517.890,54</b>
Capital Financiero		\$111.269,13	\$124.621,42	\$139.575,99	\$156.325,11	\$175.084,13	\$196.094,22
Depreciación		\$180.114,00	\$180.114,00	\$180.114,00	\$180.114,00	\$180.114,00	\$180.114,00
Valor de Rescate							\$60.038,00
<b>FNE</b>	<b>\$ (902.970,00)</b>	<b>\$355.379,20</b>	<b>\$364.669,80</b>	<b>\$373.772,48</b>	<b>\$382.621,29</b>	<b>\$451.178,86</b>	<b>\$561.948,32</b>

### 3.5.2. Pay Back o plazo de recuperación (PR).

En la siguiente tabla se determina la amortización de la inversión, en este caso está considerado todos los componentes necesarios para el proyecto, así como los costos asociados, como costos del valor del dinero, interés de impuestos y cargos por mantenimiento:

Tabla 27: Amortización de la inversión a 5 años

Periodo [Años]	Capital	Interés	Pago	Saldo
0				\$ 902.970,00
1	\$ 111.269,13	\$ 108.356,40	\$ 219.625,53	\$ 791.700,87
2	\$ 124.621,42	\$ 95.004,10	\$ 219.625,53	\$ 667.079,45
3	\$ 139.575,99	\$ 80.049,53	\$ 219.625,53	\$ 527.503,46
4	\$ 156.325,11	\$ 63.300,41	\$ 219.625,53	\$ 371.178,35
5	\$ 175.084,13	\$ 44.541,40	\$ 219.625,53	\$ 196.094,22
6	\$ 196.094,22	\$ 23.531,31	\$ 219.625,53	\$ 0,00

Para el cálculo del PR, se lo efectúa en función del Flujo Neto de Efectivo, el Flujo Neto de Efectivo acumulado e inversión inicial y determina el tiempo en el que se recupere la inversión:

Tabla 28: Periodo de retorno (PR)

Año	Flujo	Flujo Acumulado
Año 1	\$ 355.379,20	\$355.379,20
Año 2	\$ 364.669,80	\$720.049,00
Año 3	\$ 373.772,48	\$1.093.821,49
Año 4	\$ 382.621,29	\$1.476.442,77
Año 5	\$ 451.178,86	\$1.927.621,64
Año 6	\$ 561.948,32	\$2.489.569,96
PR	<b>2,49</b>	
Años	<b>2</b>	
Meses	<b>5</b>	
Días	<b>26</b>	

Elaborado por Autoría

El PR o Pay Back será de 2 años, 5 meses y 26 días.

### **3.5.3. Tasa Interna de Rendimiento (TIR)**

La tasa interna de retorno (TIR) es la rentabilidad que ofrece una inversión. Es decir, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto, cuyo valor calculado es:

$$\text{TIR} = 36,09\%$$

### **3.5.4. El coste promedio ponderado del capital (WACC)**

El WACC, como costo de oportunidad, permite medir y comparar diferentes tasas que ofrecen las oportunidades de negocios, para decidir si el negocio será rentable, cuando se trata de analizar un proyecto de inversión, para este análisis se tomó un impuesto a la renta causado de 28%, un impuesto financiero del 18%, siendo:

$$\text{WACC} = 6,84\%$$

### **3.5.5. El Valor Actual Neto (VAN)**

El valor actual neto (VAN) es un criterio de inversión que consiste en actualizar los cobros y pagos de un proyecto o inversión para conocer cuánto se va a ganar o perder con esa inversión.

$$\text{VAN} = \$ 1.051.191,20$$

### **3.5.6. Relación Beneficio Costo (RBC).**

Es la relación existente entre Valor Actual (VA) e Inversión del proyecto y representa el beneficio esperado por cada unidad económica invertida, siendo:

$$\text{RBC} = \$ 2,16$$

### **3.5.7. Análisis de indicadores económicos**

En la siguiente tabla se resumen los indicadores seleccionados para la evaluación económica del proyecto.

Tabla 29: Resumen de indicadores económicos

INDICADOR	DESCRIPCIÓN	VALOR
<b>PR</b>	Pay Back o plazo de recuperación	2 años; 5 meses; 26 días
<b>TIR</b>	Tasa Interna de Rendimiento	36,09%
<b>WACC</b>	El coste promedio ponderado del capital	6,84%
<b>VAN</b>	El Valor Actual Neto	\$ 1.051.191,20
<b>RBC</b>	Relación Beneficio Costo	\$ 2,16

Elaborado por Autoría

La evaluación económica es totalmente viable.

### 3.6. Conclusiones del capítulo III

- En la recolección de datos para el estudio se obtuvieron 16416 mediciones.
- La operación del bloque 16, depende de un objetivo de producción anual de petróleo, por lo que la demanda de energía es prácticamente constante durante las 24H del día y los 365 días de año.
- Al analizar los 16416 datos, se obtuvo una moda, media y mediana prácticamente única, de alrededor de 72MW, esto afianza al párrafo anterior que se tiene una demanda de generación prácticamente constante.
- El aplicar un proceso estadístico de histograma de frecuencias, permitió obtener la curva característica de la generación eléctrica por horas, esto fue necesario por la gran cantidad de datos procesados.
- Al aplicar la metodología desarrollada en el capítulo II, permitió de forma esquematizada determinar la condición actual del sistema y llegar a la solución propuesta.

## CONCLUSIONES GENERALES

Dentro del análisis bibliográfica y normativa se concluyó como punto importante que el factor de potencia óptimo para el SEP del Bloque 16 es del 96%, por lo que el análisis de la compensación se realizó con el objetivo de subirlo del 85% del valor actual.

La metodología desarrollada permitió aplicar una secuencia controlada de la investigación, donde se cubrió el llegar a cumplir los objetivos de la investigación. Esta metodología puede ser aplicados para futuras investigaciones al respecto.

Dentro de la investigación se plantearon las soluciones posibles de compensación de potencia reactiva, en este análisis se determinó que la compensación de potencia reactiva adecuada para el SEP del Bloque 16, es la incorporación de banco de capacitores en función del tipo de demanda que es prácticamente constante, la presencia de contaminación armónica de THDv de 0.8% y THDi de 2,4%, cuyos valores están dentro de lo permitido en el estándar IEEE 519-2014, así como también que la velocidad de respuesta de un sistema de compensación dio como resultado baja y algo fundamental que es el factor económico.

La aplicación de la metodología permitió determinar que el sistema requiere una compensación de 2.8 MVAR, cuya simulación de los flujos de potencia, del modelo computacional desarrollado en la aplicación ETAP, arrojó valores similares a los calculados para obtener un FP del 96%.

Respecto a la factibilidad económica se concluyó que los indicadores son positivos por lo que la implementación de la investigación es prácticamente aplicable, ya que el proyecto tendrá un Pay Back de 2 años con 5 meses, el cual es inferior para el tiempo de amortización. El TIR del 36,09% versus el WACC que es del 6,84%, basado en esta relación el  $TIR > WACC$  cumpliendo este indicador. El VAN al sexto año es de \$ 1.051.191,20 lo que representa más del 50% de retorno de la inversión, respecto a la inversión total, es decir la ganancia al sexto año, considerando que la vida útil del banco de capacitores esperada es superior a 10 años. Y por último el RBC, representa que por cada dólar invertido se tendrá un retorno adicional de \$1,16.

También hay que mencionar, para realizar el análisis financiero, se tomó como tiempo de amortización del activo de 5 años, sin embargo, los fabricantes de este tipo de sistemas garantizan una vida útil de 10 años, lo que económicamente resultará más rentable para la empresa.

Con la compensación de potencia reactiva en la línea de subtransmisión a 34.5 kV, entre NPF Y SPF, dará como resultado la recuperación del 10 al 13 % de la potencia transmitida por esta línea, concluyéndose que con la compensación de potencia reactiva en esta línea de subtransmisión mejorará la generación eléctrica en el Bloque 16, dado que esta compensación de reactivos representará directamente en la reducción de costos de generación.

Por lo tanto, se comprueba como cierta la hipótesis a partir de los resultados presentados, que la compensación de potencia reactiva mejora el sistema de generación eléctrica del Bloque 16.

Dentro de un proyecto es de suma importancia el evaluar de forma temprana la solución planteada, siendo la simulación el camino tanto técnico y económico viable, con este fin se empleó el software ETAP para la validación de la propuesta de compensación de simulación.

Dentro de la evaluación de la factibilidad económica se analizaron 5 indicadores económicos que permitieron evaluar la solución propuesta, dando como resultado que la propuesta es económicamente viable.

## **RECOMENDACIONES**

En próximos trabajos de continuidad se puede evaluar la solución planteada en estado dinámico del sistema, así como también en condición de emergencia, donde realicen estudio de transientes tanto de voltaje, corriente y frecuencia, por efectos de la conexión y desconexión de los bancos de capacitores, previo a la materialización de la solución, esto permitirá incorporar mejoras a la compensación calculada.

De la misma forma un aspecto importante para la operación adecuada del sistema de compensación es su diseño, por lo que el mismo debe ser parte de una ingeniería de detalle, donde se incluya la filosofía de operación, así como de la configuración estructural del sistema, entre ellos: número de pasos del banco: tipo de interruptores; tipo de controlador, protecciones eléctricas, etc.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Registro Oficial No. 449, “Ley Orgánica de Eficiencia Energética”, Editora National, 2019.
- [2] I. González, A. Legrá, S. Marrero, J. “Arzola, “Optimización de la compensación de potencia reactiva en redes industriales de suministro eléctrico con el empleo de un algoritmo de criterios múltiples” Parte I, Energética Vol. XXVII, No. 2, 2006.
- [3] D. Vasconcellos, I. Pérez, V. León, “Compensación de potencia reactiva en sistemas de distribución primaria de energía aplicando algoritmos genéticos”, Revista, ISSN 0718-3291, Vol. 20, N°. 3, 2012, págs. 284-292.
- [4] CONELEC, “Regulación No CONELEC – 004/01”, Directorio CONELEC, 2001. C. Bonilla, “Transacción y Remuneración de Potencia Reactiva En El MEM”, trabajo de fin de grado, Esc. Pol. Nacional 2001.
- [5] A. Tamayo Mendoza, W. Gil Borja, J. Layana Chancay. “Compensación de Potencia Reactiva en Sistemas de Transmisión que sirve a la Provincia de Manabí” Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) Ecuador. 2012
- [6] D. Obregón Holguín, J. Zeas Mora. “Simulación y automatización del control de potencia reactiva para mejorar el rendimiento del factor de potencia”, trabajo de fin de grado, Univ. Pul. Salesiana. 2018.
- [7] Reinhausen. “Soluciones para sistemas de red” doi: 1845-4666, Accedido: 24-01-2020.
- [8] P. F. Guerra Valdés, “Estudio del comportamiento de la potencia reactiva en sistemas zonales y propuesta de criterios para la compensación en subestaciones AT/M” trabajo de fin de grado, Univ. Pul. Chile. 2018.
- [9] M. S. Santos Azevedo, I. Pérez Abril. C, León Benítez, J. Cabral Leite, U. Holanda Bezerra, “Optimización multiobjetivo de la compensación de potencia reactiva en sistemas eléctricos de distribución” Revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, ISSN 0012-7353, Vol. 81, N°. 187, 2014, págs. 175-183.
- [10] J. A. Rojas Gómez, “Estudio Investigación Óptima Compensación de la Potencia Reactiva en Redes de Distribución Eléctrica Basado en Simulated Annealing. Trabajo de fin de grado”, Univ. Pol. Salesiana. 2019

- [11] P. A. Achig Santamaria, “Compensación Óptima De Potencia Reactiva En Sistemas Eléctricos De Transmisión Mediante Búsqueda Armónica” Trabajo de fin de grado, Univ. Pol. Salesiana. 2019
- [12] N. Muñoz, F. Villada, D. Cadavid, “Análisis de los Flujos de Potencia de Sistemas Eléctricos y su Interpretación Física” Universidad de Antioquía, Información Tecnológica Vol. 23, 2012.
- [13] N. Muñoz, F. Villa & D. Cadavi “Analysis and Physical Interpretation of Electric System Power Flow” Techno., vol.23 no. 5, pp 0718-0764, 2016 doi.10.4067/S0718-07642012000500007.
- [14] J. Marulanda Durango, A. Escobar Mejía, A. Alzate Gómez, “Estudio comparativo de cinco estrategias de compensación de armónicos en filtros activos de potencia”. Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento, ISSN-e 0123-921X, Vol. 21, N° 52 (abril - junio), 2017.
- [15] G. Quintana de Basterra, J. González Cueto, Z. García Sánchez, Implementación de modelos de control de los SVC en el programa PSX Ingeniería Energética, ISSN-e 1815-5901, Vol. 36, N° 1, 2015.
- [16] M.L. Gyugyi Shauder, Static Synchronous Series Compensator A solid state Approach to the series compensation of transmission line, IEEE Transactions on Power Delivery, 12(1997), No. 3, 406- 417.
- [17] D. Thukaram Lomi, Selection of static VAR compensator location and size for system voltage stability improvement, Electr Power Syst Res, 54(2000):139–150.
- [18] [7] W. Brokering, R. Palma y L. Vargas, "Los Sistemas Eléctricos De Potencia", Santiago: Prentice Hall-Pearson Education, 2008.
- [19] S. Chapman, “Maquinas eléctricas”, McGraw-hill, 2012
- [20] F. GONZALES, “Control de Q-V Potencia Reactiva – Voltaje”, Longatt, 2004
- [21] M. Ezquerra, “Análisis De La Factibilidad De Incorporación De Bancos De Condensadores En 110 kV En Un Plan De Compensación De Reactivos De Una Empresa Distribuidora”, Santiago: Memoria Universidad de Santiago, 2005.

- [22] C. Chacón, “Estudio Técnico Y Económico De Un Plan De Instalación de Bancos De Condensadores Para El Sistema De Subtransmisión de la Región Metropolitana”, Santiago: Memoria Universidad de Santiago, 2009.
- [23] R. Carrasco, "Definición Óptima Técnico-Económica De Planes De Compensación De Potencia Reactiva En Un Sistema De Subtransmisión", Santiago: Memoria Universidad de Santiago, 2011.
- [24] C. A. Mora Miñaca, “Metodología para el Dimensionamiento Eléctrico de Reactores de Potencia Incorporados en Líneas De 500 Kv del Sistema Nacional de Transmisión” Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2017.
- [25] W. Brokering, R. Palma y L. Vargas, "Los Sistemas Eléctricos De Potencia", Santiago: Prentice Hall-Pearson Education, 2008.
- [26] V. León Martínez, J. Montañana Romeu, J. Giner García and A. Cazorla Navarro. "Ineficiencias de los sistemas eléctricos. Efectos, cuantificación y dispositivos de mejora de la eficiencia". Ed. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2001.
- [27] G. Vargas Argota, “Mejoramiento del factor de potencia de una subestación industrial de distribución de la Empresa Ernesto Che Guevara”, Ins, Sup Minerometalurgico, Dr, Antoni Nuñez Jiménez Cuba, 2010.
- [28] E. S. d. MIT, “Circuitos Magnéticos y Transformadores”, Reverté, 1943.
- [29] V. León Martínez, J. Montañana Romeu, J. Roger Folch and A. Cazorla Navarro. "Why Reactive Compensators do not Improve the Efficiency Correctly in Unbalanced Circuits". XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology. Lisbon, Portugal. September 6, 2009
- [30] Jose Manuel Aller. “Maquinas Eléctricas Rotativas”, UNIVERSIDADE SIMON BOLÍVAR, 2008.
- [31] T. VAN CUSTEM and C. VOURNAS. “Voltage stability of electric power Systems”, Kluwer, 1998.
- [32] EPR Report, “Optimization of Reactive Voltage-Ampere (VAR) Sources in Systems Planning” EPRI EL-3729, Volume 1, Project 2109-1, Final Report Prepared by Scientific System Inc, Cambrids Massachusetts, November 1984.

- [33] IEEE Std 1036-2020, “IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors”, Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society, March 2020.
- [34] P. Sánchez “Análisis de factibilidad técnica y económica de corrección de factor de potencia con bancos de capacitores distribuidos en Valeo sistemas electrónicos S. de R.L. de C.V.”, París Francia, 2018

## **ANEXOS**

**ANEXO 1**  
**LISTA DE ACRÓNIMOS**

SPF	South Production Facilities
NPF	North Production Facilities
IEC,	Comisión Electrotécnica Internacional
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
MV	Medio Voltaje.
SCADA	Supervisión, Control y Adquisición de Datos
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
LOEE	Ley Orgánica de Eficiencia Energética
PLANEE	Plan Nacional de Eficiencia Energética
FP	Factor de potencia
P	Potencia activa
S	Potencia aparente
D	Potencia de distorsión armónica
SVC	Static VAr Compensator
STATCOM	STATic synchronous COMpensator
FACTS	Flexible AC Transmission System
Rms	Raíz de la Media de los Cuadrados o valor eficaz
pu	Por unidad
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia.
SF6	Hexafluoruro de Azufre.
ETAP®	Electrical Transient and Analysis Program es un software propietario utilizado para sistemas de energía
TIR	tasa Interna de Rendimiento
VAN	Valor Actual Neto
RBC	Relación Beneficio Costo
WACC	Coste promedio ponderado del capital
PR	Pay Back o plazo de recuperación
FNE	Flujo Neto de Efectivo
VAr	Voltios Amperios Reactivos
W	Watts

## ANEXO 2

### SEGUIMIENTO DE PRODUCCION

DIA	GAS [MW]	CRUDO [MW]	DIESEL [MW]	BLOQUE 16 DEMANDA [MW]
1/1/2022	15,72	41,40	16,89	74,01
2/1/2022	14,99	41,45	17,91	74,36
3/1/2022	14,85	41,80	19,15	75,80
4/1/2022	15,00	38,02	22,05	75,07
5/1/2022	14,12	38,19	21,94	74,24
6/1/2022	14,99	39,36	21,92	76,27
7/1/2022	14,28	38,70	21,85	74,82
8/1/2022	14,09	41,57	16,65	72,31
9/1/2022	14,10	41,46	20,50	76,05
10/1/2022	13,67	41,88	20,05	75,60
12/1/2022	14,69	41,36	17,87	73,92
13/1/2022	12,15	40,53	23,63	76,31
15/1/2022	14,53	40,15	20,61	75,29
16/1/2022	14,09	40,05	21,01	75,14
17/1/2022	14,89	38,07	24,26	77,22
18/1/2022	13,87	40,54	20,13	74,54
19/1/2022	14,27	40,52	20,69	75,48
20/1/2022	14,28	33,34	27,68	75,30
21/1/2022	14,88	34,18	25,07	74,13
22/1/2022	13,71	32,38	26,86	72,95
23/1/2022	12,38	35,46	28,11	75,95
24/1/2022	12,49	35,56	26,21	74,26
25/1/2022	13,08	35,46	25,62	74,16
26/1/2022	14,17	35,63	25,77	75,57
27/1/2022	14,57	35,82	24,26	74,65
28/1/2022	14,42	35,86	26,76	77,04
29/1/2022	14,42	35,56	24,79	74,77
30/1/2022	14,72	35,55	25,64	75,91
31/1/2022	13,65	35,37	25,27	74,29
1/2/2022	14,81	34,33	27,06	76,20
2/2/2022	13,94	36,17	26,49	76,60
3/2/2022	13,80	39,85	18,98	72,64
4/2/2022	13,92	40,15	20,94	75,01
5/2/2022	13,60	37,94	22,81	74,34
6/2/2022	12,99	40,16	22,82	75,97
7/2/2022	14,15	40,91	18,75	73,81
8/2/2022	13,68	41,64	20,82	76,14
9/2/2022	12,73	38,07	21,24	72,03
10/2/2022	12,64	41,12	19,18	72,94
11/2/2022	14,32	37,40	20,76	72,48
12/2/2022	14,34	41,10	17,57	73,01
13/2/2022	12,49	41,12	19,27	72,88
14/2/2022	14,02	40,71	19,28	74,02
15/2/2022	9,52	37,93	25,45	72,90
16/2/2022	14,10	40,91	18,61	73,62
17/2/2022	14,63	40,82	17,09	72,54
18/2/2022	13,78	40,89	17,90	72,57
19/2/2022	14,05	40,82	18,88	73,76
20/2/2022	13,76	39,67	20,95	74,38
21/2/2022	13,61	38,51	20,77	72,89
22/2/2022	12,11	40,86	18,57	71,54
23/2/2022	13,90	38,60	18,71	71,21
24/2/2022	14,11	40,81	17,56	72,48
25/2/2022	14,37	41,85	16,33	72,56
26/2/2022	14,58	41,44	16,21	72,24
27/2/2022	14,15	41,33	17,72	73,20

	<b>GAS</b>	<b>CRUDO</b>	<b>DIESEL</b>	<b>BLOQUE 16</b>
<b>DIA</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>DEMANDA [MW]</b>
28/2/2022	12,98	39,17	16,80	68,95
1/3/2022	14,38	40,81	16,32	71,51
2/3/2022	14,21	39,92	18,42	72,55
3/3/2022	14,17	39,88	17,88	71,92
4/3/2022	13,43	41,60	16,17	71,20
5/3/2022	13,77	36,62	20,75	71,15
6/3/2022	14,07	35,91	22,42	72,41
7/3/2022	12,59	35,39	19,00	66,98
8/3/2022	11,79	33,83	22,75	68,37
9/3/2022	12,77	35,45	24,23	72,44
10/3/2022	11,75	35,77	25,24	72,75
11/3/2022	11,94	35,50	24,14	71,58
12/3/2022	13,24	35,12	22,97	71,34
13/3/2022	14,05	35,28	22,58	71,90
14/3/2022	12,85	35,90	24,06	72,81
15/3/2022	15,09	35,31	22,23	72,62
16/3/2022	14,01	35,63	22,31	71,95
17/3/2022	14,33	36,46	20,60	71,39
18/3/2022	14,16	39,11	20,20	73,47
19/3/2022	14,30	41,53	16,13	71,96
20/3/2022	14,15	39,96	17,97	72,08
21/3/2022	13,18	38,04	19,11	70,33
22/3/2022	14,50	40,96	17,01	72,47
23/3/2022	15,13	38,02	17,47	70,62
24/3/2022	14,78	38,78	17,72	71,28
25/3/2022	14,29	39,82	16,56	70,67
26/3/2022	14,32	42,00	16,73	73,05
27/3/2022	14,09	40,92	16,69	71,70
28/3/2022	13,26	41,79	17,14	72,20
29/3/2022	14,43	41,80	15,49	71,73
30/3/2022	13,84	40,17	16,68	70,69
31/3/2022	13,76	39,83	17,87	71,46
1/4/2022	12,97	33,95	21,72	68,63
2/4/2022	13,96	39,70	18,44	72,10
3/4/2022	13,66	41,99	15,82	71,47
4/4/2022	14,26	41,97	14,68	70,91
5/4/2022	13,93	40,51	18,32	72,77
6/4/2022	13,33	41,05	17,89	72,27
7/4/2022	14,39	41,54	15,88	71,81
8/4/2022	14,01	40,97	17,38	72,37
9/4/2022	14,56	41,04	16,74	72,34
10/4/2022	14,81	41,23	16,84	72,88
11/4/2022	14,42	38,27	17,87	70,56
12/4/2022	15,04	38,02	17,79	70,84
13/4/2022	14,78	41,51	17,47	73,77
14/4/2022	14,98	41,15	15,80	71,94
15/4/2022	14,41	37,24	18,70	70,35
16/4/2022	14,11	37,79	20,59	72,49
17/4/2022	15,02	38,48	18,79	72,29
18/4/2022	13,74	35,52	22,74	72,00
19/4/2022	14,06	35,64	23,38	73,07
20/4/2022	14,14	36,49	21,43	72,06
21/4/2022	14,27	41,57	15,96	71,79
22/4/2022	14,57	41,25	17,42	73,25
23/4/2022	14,70	40,85	15,99	71,54
24/4/2022	13,56	41,41	15,84	70,81
25/4/2022	12,84	41,48	17,40	71,73
26/4/2022	14,47	41,48	16,72	72,67
27/4/2022	14,52	41,71	17,35	73,58

	<b>GAS</b>	<b>CRUDO</b>	<b>DIESEL</b>	<b>BLOQUE 16</b>
<b>DIA</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>DEMANDA [MW]</b>
28/4/2022	14,75	41,10	16,41	72,26
29/4/2022	14,30	41,83	15,89	72,02
30/4/2022	14,40	40,73	16,31	71,44
1/5/2022	14,62	42,17	16,11	72,89
2/5/2022	14,55	41,07	16,74	72,36
3/5/2022	14,60	41,91	15,01	71,52
4/5/2022	13,75	38,20	22,41	74,36
5/5/2022	12,81	39,09	16,79	68,69
6/5/2022	13,18	38,49	20,85	72,52
7/5/2022	13,28	38,35	22,43	74,07
8/5/2022	14,80	38,60	21,11	74,52
9/5/2022	14,55	39,99	19,80	74,35
10/5/2022	14,65	37,53	21,44	73,62
11/5/2022	13,09	36,42	24,42	73,93
12/5/2022	14,15	35,72	23,66	73,54
13/5/2022	13,69	36,48	23,83	74,00
14/5/2022	14,94	36,49	21,76	73,18
15/5/2022	13,91	35,93	22,40	72,25
16/5/2022	12,55	34,83	25,14	72,53
17/5/2022	13,94	36,16	22,79	72,89
18/5/2022	14,18	36,46	21,86	72,50
19/5/2022	14,45	36,02	23,76	74,23
20/5/2022	13,67	35,36	24,74	73,77
21/5/2022	14,52	36,29	22,11	72,92
22/5/2022	14,42	36,20	22,95	73,57
23/5/2022	13,39	35,61	23,71	72,72
24/5/2022	14,23	36,16	22,98	73,38
25/5/2022	11,77	33,48	29,23	74,49
26/5/2022	13,23	35,88	25,40	74,52
27/5/2022	13,45	35,77	24,72	73,94
28/5/2022	14,09	36,20	20,94	71,23
29/5/2022	13,22	36,03	25,40	74,66
30/5/2022	14,01	35,98	22,42	72,41
31/5/2022	15,27	38,15	19,61	73,03
1/6/2022	10,75	41,34	17,42	69,51
2/6/2022	13,16	40,46	20,49	74,12
3/6/2022	14,37	37,97	21,57	73,91
4/6/2022	13,77	42,14	17,87	73,79
5/6/2022	13,63	42,12	16,77	72,52
7/6/2022	14,20	38,86	17,97	71,04
8/6/2022	15,10	39,07	17,48	71,65
9/6/2022	13,43	42,49	18,46	74,38
10/6/2022	15,07	41,97	17,64	74,68
11/6/2022	14,23	41,71	18,23	74,17
12/6/2022	14,05	39,26	20,05	73,36
13/6/2022	14,27	42,31	16,07	72,65
14/6/2022	14,27	42,32	16,52	73,12
15/6/2022	14,56	39,29	19,34	73,19
16/6/2022	14,02	40,92	18,92	73,86
17/6/2022	13,36	39,49	19,53	72,38
18/6/2022	14,22	42,09	16,57	72,88
19/6/2022	10,35	42,05	19,12	71,51
20/6/2022	14,04	42,38	18,04	74,45
21/6/2022	14,70	42,18	18,79	75,67
22/6/2022	14,25	42,27	17,50	74,02
23/6/2022	13,35	42,14	17,93	73,42
24/6/2022	13,88	42,40	17,40	73,68
25/6/2022	14,42	42,63	17,01	74,07
26/6/2022	14,79	39,37	18,47	72,62

	<b>GAS</b>	<b>CRUDO</b>	<b>DIESEL</b>	<b>BLOQUE 16</b>
<b>DIA</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>DEMANDA [MW]</b>
27/6/2022	14,00	42,04	16,84	72,87
28/6/2022	14,07	39,07	20,13	73,26
29/6/2022	13,59	42,40	17,12	73,10
30/6/2022	13,22	42,55	15,85	71,62
1/7/2022	13,67	42,35	17,14	73,15
2/7/2022	11,97	41,31	20,16	73,43
3/7/2022	14,44	42,60	16,53	73,56
4/7/2022	13,53	39,54	21,00	74,07
5/7/2022	12,94	42,54	16,80	72,29
6/7/2022	13,07	41,95	17,63	72,66
7/7/2022	13,16	42,49	18,29	73,93
8/7/2022	14,03	42,29	16,59	72,91
9/7/2022	13,78	39,85	19,56	73,19
10/7/2022	13,99	41,93	16,83	72,75
11/7/2022	13,56	42,24	16,74	72,54
12/7/2022	13,79	42,33	17,83	73,94
13/7/2022	13,75	42,35	17,39	73,49
14/7/2022	13,80	41,99	17,06	72,85
15/7/2022	14,23	42,53	15,76	72,52
16/7/2022	13,42	41,54	17,86	72,82
17/7/2022	14,11	42,24	17,24	73,59
18/7/2022	13,72	42,64	18,02	74,38
19/7/2022	11,22	39,93	22,76	73,92
20/7/2022	11,33	37,34	18,12	66,79
21/7/2022	14,63	42,49	18,27	75,39
22/7/2022	13,99	42,14	17,06	73,19
23/7/2022	13,47	42,15	18,71	74,33
24/7/2022	13,85	41,95	18,33	74,12
25/7/2022	13,66	42,48	17,69	73,83
26/7/2022	14,24	39,51	17,58	71,33
27/7/2022	13,37	39,44	22,30	75,11
28/7/2022	14,19	40,92	17,02	72,13
29/7/2022	14,61	42,06	18,67	75,33
30/7/2022	11,22	39,37	22,89	73,49
31/7/2022	13,55	40,49	19,69	73,72
1/8/2022	13,38	41,87	18,57	73,81
2/8/2022	14,55	39,20	19,55	73,31
3/8/2022	13,17	38,72	20,89	72,77
4/8/2022	13,45	41,98	18,83	74,26
5/8/2022	14,26	37,38	19,65	71,29
6/8/2022	13,36	35,89	22,91	72,16
7/8/2022	15,09	36,38	21,45	72,92
8/8/2022	14,96	36,15	19,64	70,75
9/8/2022	14,16	36,24	21,77	72,16
10/8/2022	14,59	36,15	22,16	72,90
11/8/2022	14,07	36,01	21,06	71,13
12/8/2022	14,63	36,09	21,06	71,77
13/8/2022	13,85	33,98	24,43	72,26
14/8/2022	14,31	35,08	21,86	71,26
15/8/2022	13,84	35,10	22,06	71,00
16/8/2022	14,54	35,22	22,39	72,15
17/8/2022	13,33	33,96	23,93	71,22
18/8/2022	12,93	29,74	29,37	72,04
19/8/2022	12,67	31,91	27,90	72,48
<b>MAXIMO</b>	15,72	42,64	29,37	<b>77,22</b>
<b>PROMEDIO</b>	13,87	39,13	19,97	<b>72,97</b>
<b>MINIMO</b>	9,52	29,74	14,68	<b>66,79</b>
PROMEDIO %	19%	54%	27%	100%

# ANEXO 3

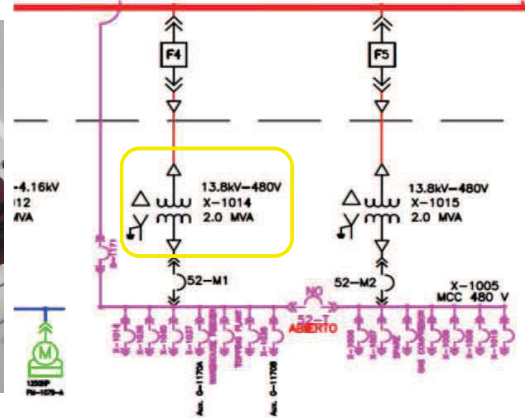
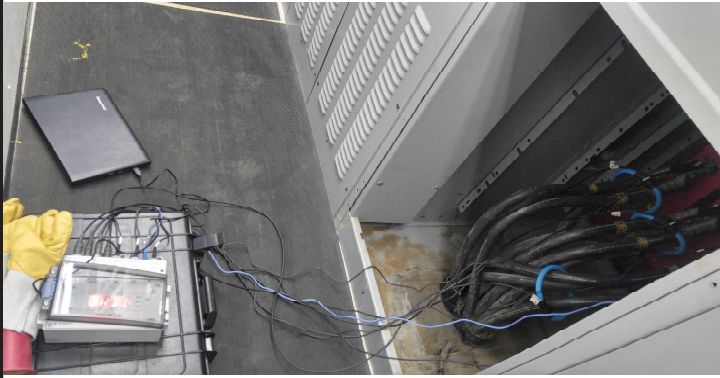
<b>OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA</b>	
<b>TRABAJO PRELIMINAR DE CAMPO BLOQUE 16 REPSOL</b>	
<b>REGISTRO: SLI&amp;B16-NPF-GEN-001-0</b>	

Locación:	NPF	Reporte #	01	REV 00	Hoja	1 de 3
-----------	-----	-----------	----	--------	------	--------

**Descripción:** Medición de parámetros eléctricos a la salida del transformador X-1014 en NPF

V	480	Conexión	Δ -Y aterrizado
---	-----	----------	-----------------

### REPORTE FOTOGRAFICO

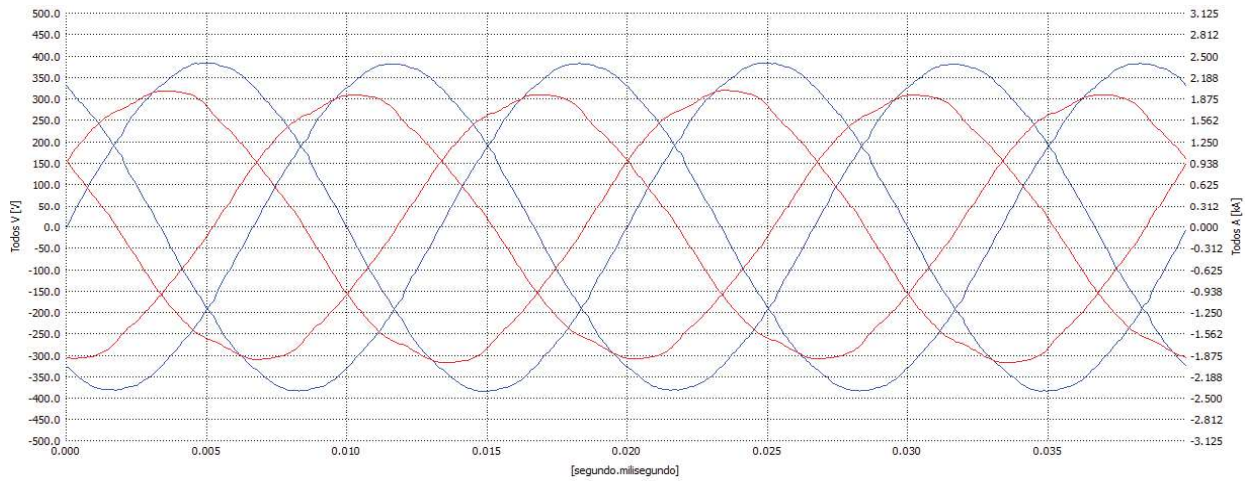


### MEDICIÓN DE PARÁMETROS

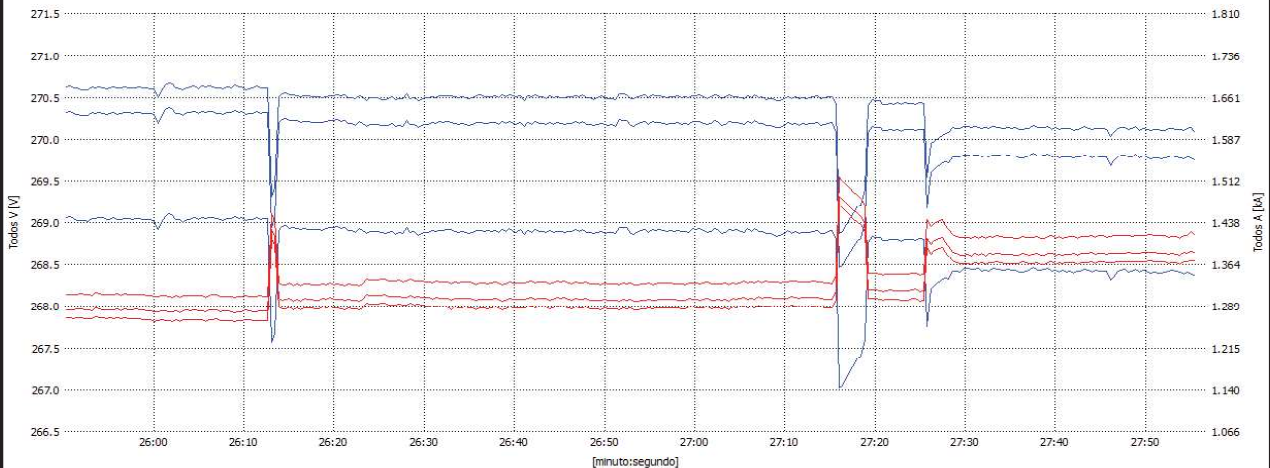
**NORMA APLICADA**  
IEEE 519-1992

### REPORTE DEL ANALIZADOR DE ENERGÍA

#### FORMAS DE ONDA



#### GRÁFICOS DE TIEMPO



		<b>OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA</b>				
		<b>TRABAJO PRELIMINAR DE CAMPO BLOQUE 16 REPSOL</b>				
		<b>REGISTRO: SLI&amp;B16-NPF-GEN-001-0</b>				

<b>Locación:</b>	<b>NPF</b>	<b>Reporte #</b>	<b>01</b>	<b>REV 00</b>	<b>Hoja</b>	<b>2 de 3</b>
------------------	------------	------------------	-----------	---------------	-------------	---------------

**Descripción:** Medición de parámetros eléctricos a la salida del transformador X-1014 en NPF

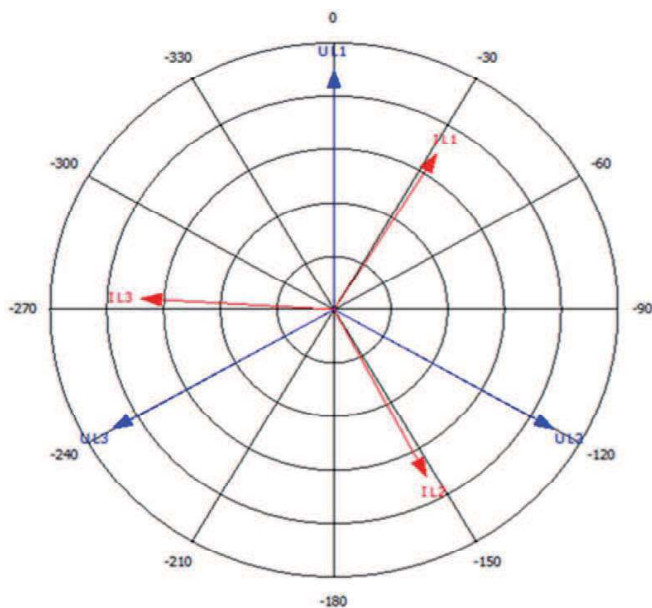
<b>V</b>	480	<b>Conexión</b>	Δ-Y aterrizado			
----------	-----	-----------------	----------------	--	--	--

**REPORTE DEL ANALIZADOR DE ENERGÍA**

**MEDICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS**

	Unidad	L1	L2	L3	II-PE	L1-2	L2-3	L3-1	Total
U	[V]	270.6	268.9	270.2	---	467.5	466.9	468.0	---
U <sub>bc</sub>	[mV]	63.80	75.23	7.170	---	---	---	---	---
f	[Hz]	59.99	59.99	59.99	---	---	---	---	59.99
I	[kA]	1.293	1.332	1.280	0.007	---	---	---	---
I <sub>bc</sub>	[mA]	-56.74	41.10	-25.87	4.725	---	---	---	---
P	[kW]	297.5	302.9	289.3	---	---	---	---	889.6
Q <sub>g</sub>	[kvar]	183.7	190.8	189.4	---	---	---	---	564.0
S	[MVA]	0.350	0.358	0.346	---	---	---	---	1.054
D	[kvar]	8.720	8.645	8.602	---	---	---	---	25.97
PF	---	0.851	0.846	0.836	---	---	---	---	0.844
cosφ	---	0.851	0.846	0.837	---	---	---	---	0.845
tg φ	---	0.618	0.630	0.655	---	---	---	---	0.634
THD U	[%]	0.817	0.832	0.799	---	---	---	---	---
THD I	[%]	2.577	2.489	2.593	2.982	---	---	---	---
CF U	---	1.420	1.422	1.420	---	---	---	---	---
CF I	---	1.433	1.433	1.437	1.453	---	---	---	---

**FASORES**



	Unidad	L1	L2	L3
U	[V]	270.2	268.5	269.8
φ <sub>u</sub>	[°]	0.000	-120.1	119.9
I	[kA]	1.368	1.409	1.356
φ	[°]	-31.87	-152.4	86.56
φ <sub>u,i</sub>	[°]	31.87	32.27	33.30
Tipo	---			
	Unidad	Desequilibrio		
U <sub>2</sub> /U <sub>1</sub>	[%]	0.1422		
I <sub>2</sub> /I <sub>1</sub>	[%]	1.9187		

		OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA													
		TRABAJO PRELIMINAR DE CAMPO BLOQUE 16 REPSOL													
		REGISTRO: SLI&B16-NPF-GEN-001-0													
Locación:	NPF	Reporte #	01	REV 00	Hoja	3 de 3									
<b>Descripción:</b>	Medición de parámetros eléctricos a la salida del transformador X-1014 en NPF														
<b>V</b>	480	<b>Conexión</b>	Δ -Y aterrizado												
REPORTE DEL ANALIZADOR DE ENERGÍA															
ARMÓNICOS															
		<b>U</b>	<b>I</b>		<b>Unidad</b>	<b>DC</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>THD</b>	[%]	0.8030	2.230	<b>u</b>	[V]	0.064	270.1	0.055	0.162	0.058	1.035	0.063	0.764	0.068	0.062
<b>K</b>	---	---	1.023	<b>I</b>	[kA]	-0.000	1.404	0.004	0.002	0.001	0.028	0.001	0.005	0.001	0.000
MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA															
<b>MEDICIÓN</b>	<b>R [Ω]</b>	<b>RC [Ω]</b>	<b>L [μH]</b>	<b>C [nF]</b>	<b>NORMA APLICADA</b>										
1	6,72	1,81	37	1090	API 540-5.6.1										
COMENTARIOS															
1. El sistema de generación se ha comprobado que funciona dentro de los parámetros normativos.															
2. Las mediciones de armónicos en las barras del switchgear principal de generación, medidas a través de un transformador reductor de 13,8 kV a 480 V, son las que se observan en este registro, las distorsiones armónicas totales son:															
THDv = 0,803 %															
THDI = 2,230 %															
3. Se comprobó los valores de la puesta a tierra de generación, encontrándose estos valores:															
R [Ω] = 6,72 ; RC [Ω] = 1,81 ; L [μH] = 37 ; C [nF] = 1090															
CONCLUSIONES															
1. El contenido de armónicos en voltaje es inferior al 3%, es decir, su contenido armónico en voltaje es completamente normativo.															
2. El contenido de armónicos de corriente es inferior al 5%, es decir, su contenido armónico en corriente es completamente normativo.															
3. La resistencia DC de la malla de tierra y su impedancia compensada cumplen los estándares eléctricos para este tipo de instalaciones.															

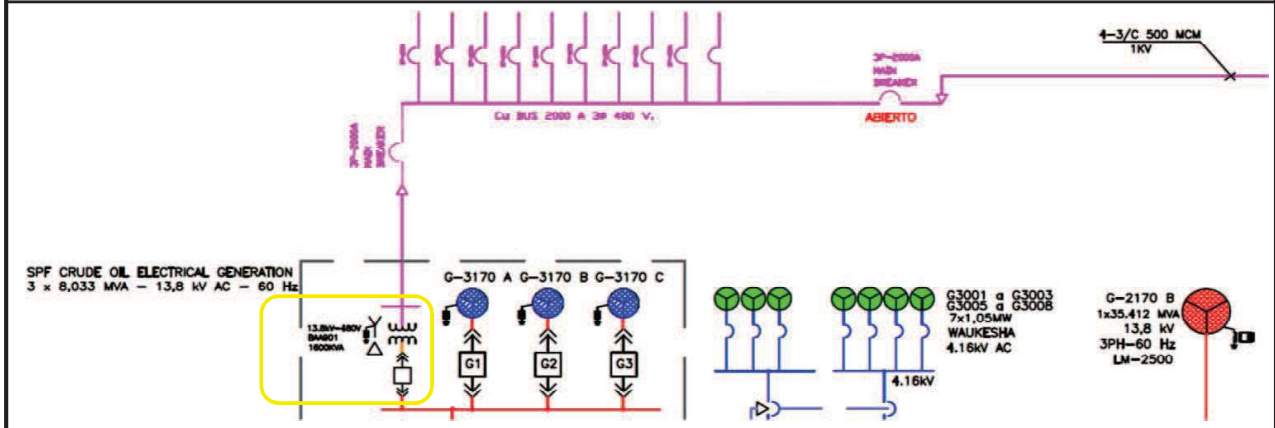
		<b>OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA</b>			
		TRABAJO PRELIMINAR DE CAMPO BLOQUE 16 REPSOL			
		REGISTRO:	SLI&B16-SPF-GEN-001-0		

Locación:	SPF	Reporte #	01	REV 00	Hoja	1 de 3
-----------	-----	-----------	----	--------	------	--------

**Descripción:** Medición de parámetros eléctricos a la salida del transformador BAA901 en SPF

V	480	Conexión	Δ -Y aterrizado
---	-----	----------	-----------------

**UBICACIÓN**

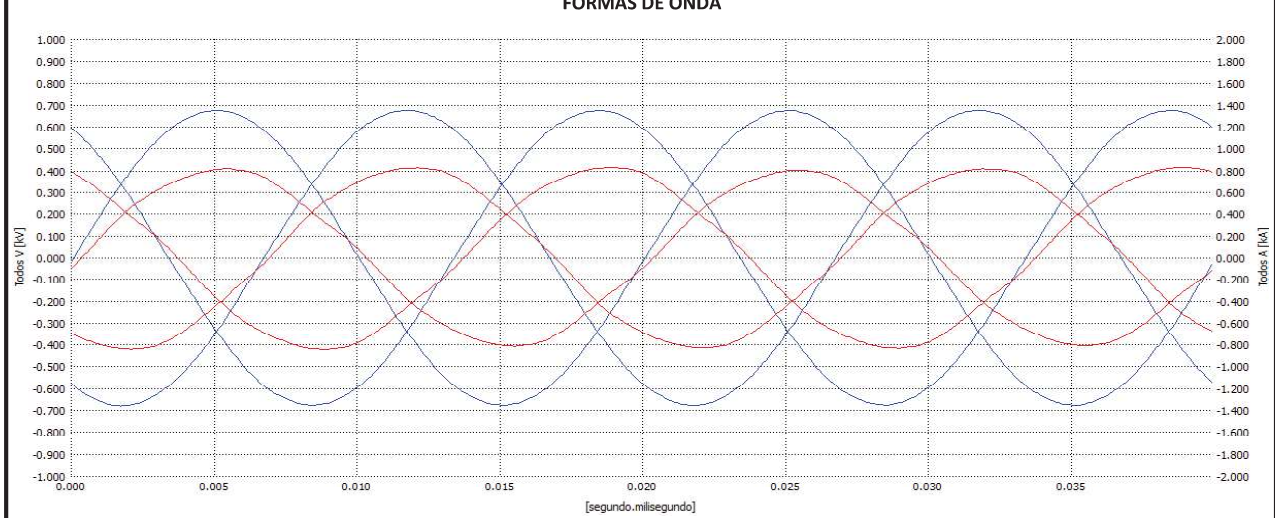


**MEDICIÓN DE PARÁMETROS**

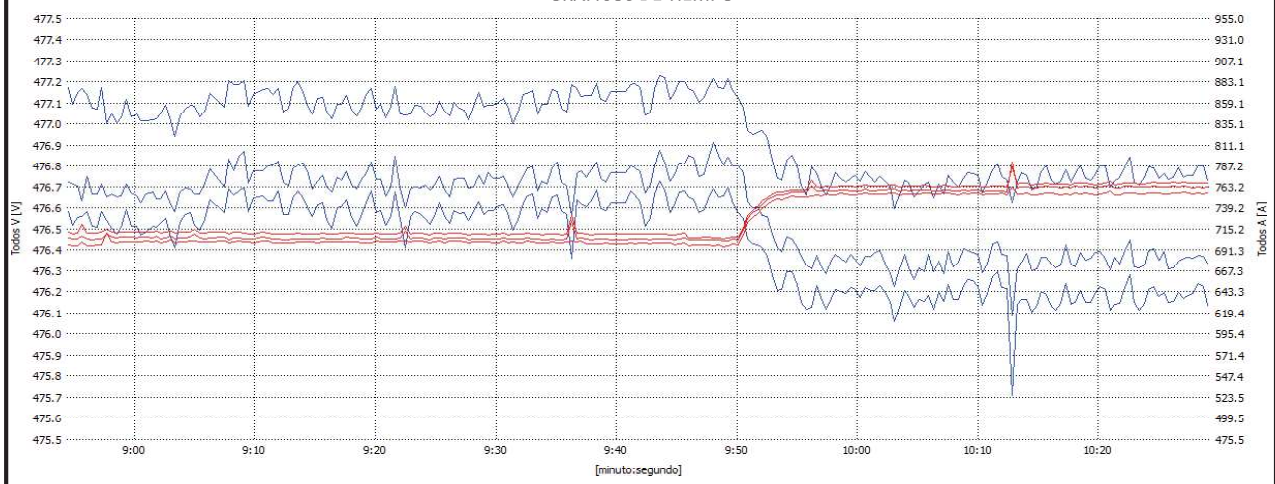
**NORMA APLICADA**  
IEEE 519-1992

**REPORTE DEL ANALIZADOR DE ENERGÍA**

**FORMAS DE ONDA**



**GRÁFICOS DE TIEMPO**



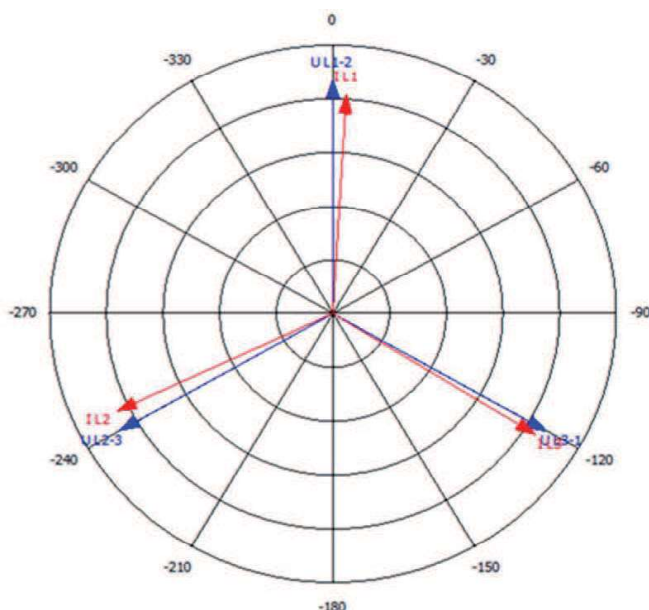
		<b>OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA</b>				
		TRABAJO PRELIMINAR DE CAMPO BLOQUE 16 REPSOL				
		REGISTRO:	SLI&B16-SPF-GEN-001-0			
Locación:	NPF	Reporte #	01	REV 00	Hoja	2 de 3
Descripción:	Medición de parámetros eléctricos a la salida del transformador X-1014 en NPF					
V	480	Capacidad:	N/A			

**REPORTE DEL ANALIZADOR DE ENERGÍA**

**MEDICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS**

	Unidad	L1	L2	L3	N-PE	L1-2	L2-3	L3-1	Total
U	[V]	---	---	---	---	478.3	478.1	478.7	---
U <sub>0c</sub>	[mV]	---	---	---	---	30.68	22.42	-53.08	---
f	[Hz]	---	---	---	---	59.99	59.99	59.99	59.99
I	[A]	584.1	601.6	601.5	---	---	---	---	---
I <sub>0c</sub>	[A]	0.249	-0.158	-0.098	---	---	---	---	---
P	[kW]	---	---	---	---	---	---	---	411.1
Q <sub>a</sub>	[kvar]	---	---	---	---	---	---	---	273.3
S	[kVA]	---	---	---	---	---	---	---	493.7
D	[var]	---	---	---	---	---	---	---	0.000
PF	---	---	---	---	---	---	---	---	0.833
cosφ	---	---	---	---	---	---	---	---	---
tg φ	---	---	---	---	---	---	---	---	0.665
THD U	[%]	---	---	---	---	0.255	0.278	0.253	---
THD I	[%]	2.313	2.024	1.929	---	---	---	---	---
CF U	---	---	---	---	---	1.416	1.416	1.419	---
CF I	---	1.442	1.433	1.422	---	---	---	---	---

**FASORES**



	Unidad	L1-2	L2-3	L3-1
U	[V]	478.6	478.3	479.0
φ <sub>u</sub>	[°]	0.000	119.9	-120.1
	Unidad	L1	L2	L3
I	[A]	571.4	590.5	590.1
φ <sub>i</sub>	[°]	-3.400	115.3	-122.1
	Unidad	Desequilibrio		
U <sub>2</sub> /U <sub>1</sub>	[%]	125017.7031		
I <sub>2</sub> /I <sub>1</sub>	[%]	4192.5977		

		<b>OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA</b>			
		<b>TRABAJO PRELIMINAR DE CAMPO BLOQUE 16 REPSOL</b>			
		<b>REGISTRO: SLI&amp;B16-SPF-GEN-001-0</b>			

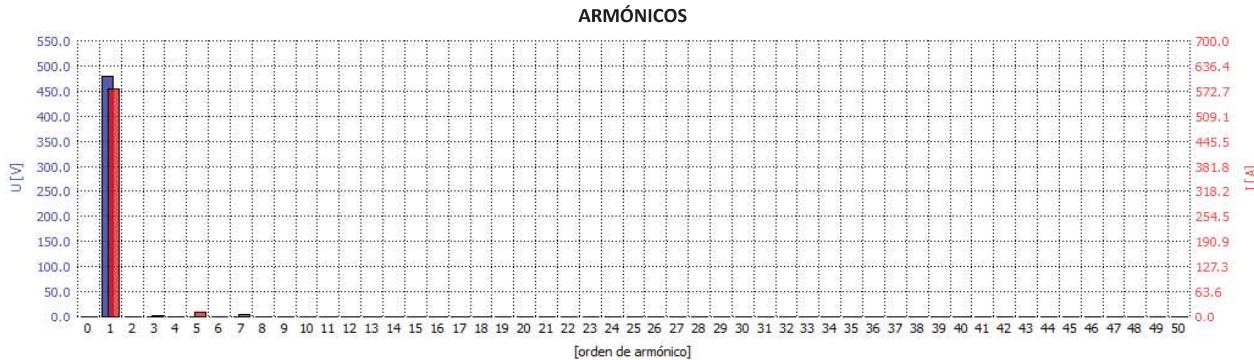
<b>Locación:</b>	<b>SPF</b>	<b>Reporte #</b>	<b>01</b>	<b>REV 00</b>	<b>Hoja</b>	<b>3 de 3</b>
------------------	------------	------------------	-----------	---------------	-------------	---------------

**Descripción:** Medición de parámetros eléctricos a la salida del transformador BAA901 en SPF

<b>V</b>	480	<b>Capacidad:</b>	Δ -Y aterrizado
----------	-----	-------------------	-----------------

**REPORTE DEL ANALIZADOR DE ENERGÍA**

**ARMÓNICOS**



		<b>U</b>	<b>I</b>		<b>Unidad</b>	<b>DC</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>THD</b>	[%]	0.2586	2.392	<b>u</b>	[V]	0.035	478.5	0.123	0.460	0.134	0.562	0.335	0.485	0.119
<b>K</b>	---	---	1.017	<b>I</b>	[A]	0.298	576.8	0.764	2.255	0.433	12.68	0.698	4.637	0.135

**MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA**

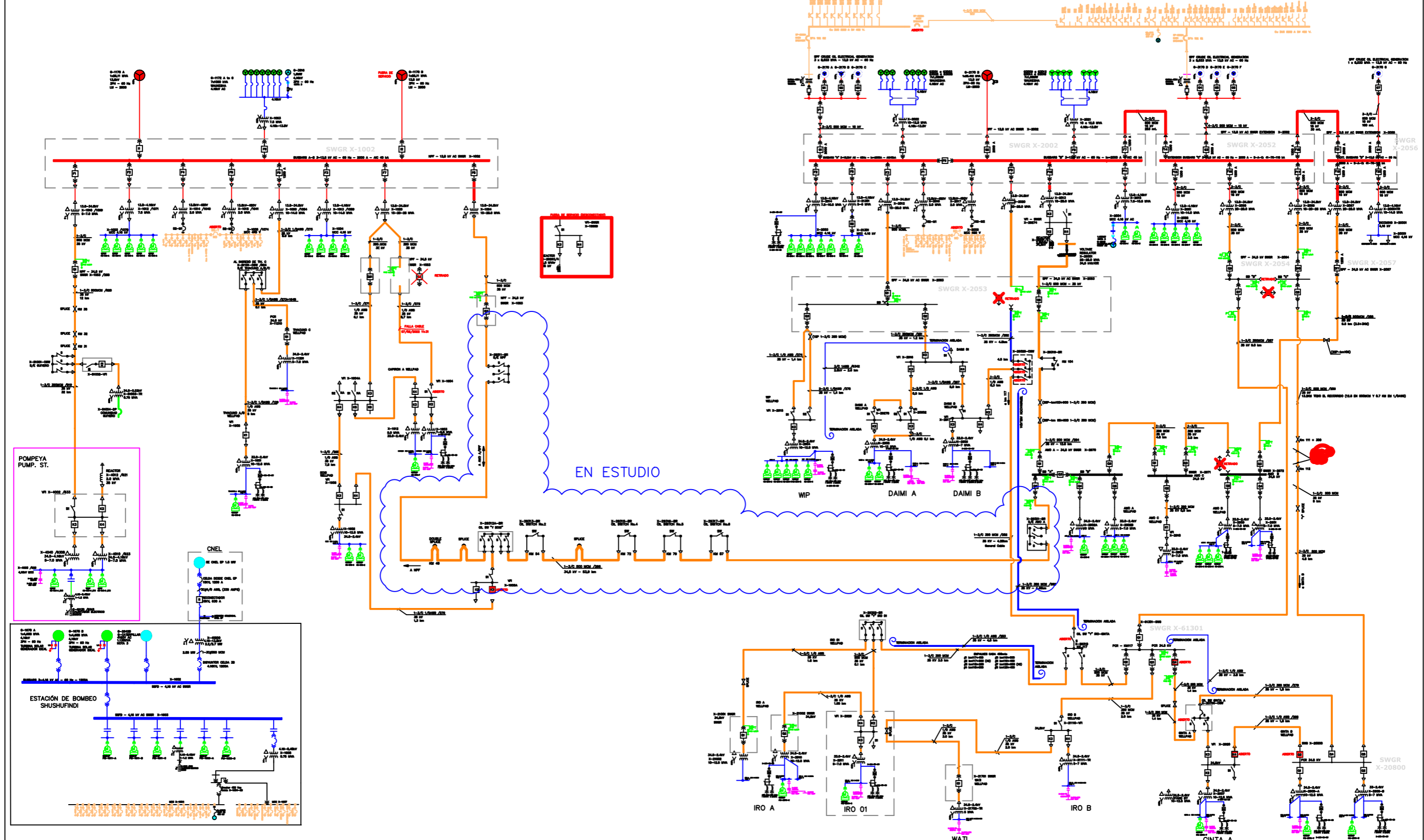
<b>MEDICIÓN</b>	<b>R [Ω]</b>	<b>RC [Ω]</b>	<b>L [μH]</b>	<b>C [nF]</b>	<b>NORMA APLICADA</b>
1	3,68	0,59	24	1660	API 540-5.6.1

**COMENTARIOS**

- El sistema de generación se ha comprobado que funciona dentro de los parámetros normativos.
- Las mediciones de armónicos en las barras del switchgear principal de generación, medidas a través de un transformador reductor de 13,8 kV a 480 V, son las que se observan en este registro, las distorsiones armónicas totales son:  
 THDv = 0,2586 %  
 THDI = 2,392 %
- Se comprobó los valores de la puesta a tierra de generación, encontrándose estos valores:  
 R [Ω] = 3,68 ; RC [Ω] = 0,59 ; L [μH] = 24 ; C [nF] = 1660

**CONCLUSIONES**

- El contenido de armónicos en voltaje es inferior al 3 %, es decir, su contenido armónico en voltaje es completamente normativo.
- El contenido de armónicos de corriente es inferior al 5 %, es decir, su contenido armónico en corriente es completamente normativo.
- La resistencia DC de la malla de tierra y su impedancia compensada cumplen los estándares eléctricos para este tipo de instalaciones.



PANEL 0001 3-000 13.8KV 0001											
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12

PANEL 0002 3-000 13.8KV 0002											
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12

PANEL 0003 3-000 13.8KV 0003											
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12

PANEL 0004 3-000 13.8KV 0004											
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12

**SYMBOLGY:**

- NOMINAL VOLTAGE 34.5 KV
- FASE EN CONSTRUCCION - FUTURO
- NOMINAL VOLTAGE 13.8 KV
- NOMINAL VOLTAGE 4.16 KV
- NOMINAL VOLTAGE 2.4 KV
- NOMINAL VOLTAGE 480 V
- INTERLOCK ENTRE CELDAS DE MEDIA TENSION
- SPLICE

SI ESTE PLANO ESTA IMPRESO ES UNA COPIA NO CONTROLADA

DRAWN BY DATE  
ISUP 21/03/22

MODIFIED BY DATE  
H AGUAYO 21/03/22

REVIEWED BY DATE  
B. SANCHEZ 21/03/22

SCALE NONE

ENERGIA

PROY. N°  
BLQ-16

COST./SHED-AREA

**BLOCK 16 DEVELOPMENT**

PPY, NPF, SPF AND WELLPADS

DISTRIBUTION SYSTEM

GENERAL ONE LINE DIAGRAM

APPROVED BY DATE  
FIELD MANAGER M. PALACIOS 21/03/2022

APPROVED BY DATE  
CHIEF ENERGY J. CHILUIZA 21/03/2022

APPROVED BY DATE

DRAWING NO. 802-A42PL-001

Version: 40  
Rev. 21