



Universidad  
Continental

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

**Prospectiva energética del transformador T4  
de 20 MVA, mediante el análisis del flujo de  
potencia por incremento de carga en la Planta  
de Cemento UNACEM Condorcocha**

**Jesús Ramiro Vila Safora**

Huancayo, 2017

Tesis para optar el Título Profesional de  
Ingeniero Electricista



Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por brindarme la sabiduría y la voluntad de encaminar mi vida profesional, por concederme esta oportunidad para mi superación en esta prestigiosa Universidad y sentir orgullo de la gloriosa Facultad de Eléctrica.

Mis sinceros agradecimientos a los ingenieros, quienes me estuvieron encaminando en todo momento, brindándome el aliento necesario para culminar con éxito esta tesis de investigación.

Finalmente, un agradecimiento único e infinito a mis padres, hermanos y amigos que permanecieron conmigo en las buenas y en las malas durante toda esta etapa de vida como hijo, padre y estudiante.

## **DEDICATORIA**

A mi madre, esposa e hijos por el apoyo incondicional en los momentos difíciles.

**Jesús**

# ÍNDICE

DEDICATORIA .....	iii
ÍNDICE .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	ix
RESÚMEN.....	x
ABSTRACT .....	xi
INTRODUCCIÓN.....	xii
CAPÍTULO I.....	1
1. PLANTEAMIENTO DE ESTUDIO.....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.1.1.1. Problema general .....	1
1.2. Objetivos .....	1
1.2.1. Objetivo general.....	1
1.2.2. Objetivos específicos .....	1
1.3. Justificación e importancia .....	2
1.3.1. Justificación .....	2
1.3.2. Importancia.....	3
1.4. Hipótesis y descripción de variables .....	3
1.4.1. Hipótesis .....	3
1.4.1.1. Hipótesis general.....	3
1.4.1.2. Hipótesis específicas .....	3
1.4.2. Descripción de variables .....	3
1.4.2.1. Variables .....	3
CAPÍTULO II .....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes del problema .....	6
2.2. Bases teóricas.....	11
2.2.1. Prospectiva energética .....	11
2.2.2. Flujo de potencia .....	11
2.2.3. Compensador de VAR estático.....	23
2.2.4. Inversores para generación dispersa .....	25
2.2.5. Inversores monofásicos.....	26

2.2.6.	Inversores trifásicos .....	27
2.2.7.	Control de fase electrónico .....	27
2.2.8.	Variador de modulación con ancho de pulso (PWM). .....	28
2.2.9.	Efectos de los armónicos .....	29
2.2.10.	Métodos de reducir la interferencia .....	43
2.2.11.	Multifaseado del equipo de conversión.....	44
2.2.12.	Corrientes de retorno residuales o por el neutro .....	44
2.2.13.	Efectos de conmutación .....	45
2.2.14.	Filtrado .....	45
2.2.15.	Convertidores de potencia estática .....	45
2.2.16.	Compensación de potencia reactiva .....	46
2.2.17.	Tipos de compensación.....	48
2.3.	Definición de términos básicos.....	54
CAPÍTULO III .....		59
3. METODOLOGÍA.....		59
CAPÍTULO IV .....		62
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		62
4.1.	Resultados del tratamiento y análisis de la información .....	62
4.1.1.	Pre observación.....	62
	Fuente: elaboración propia .....	71
4.1.2.	Post observación .....	71
4.3.	Discusión de resultados .....	101
CONCLUSIONES.....		103
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		104
ANEXOS .....		105

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido armónico de corriente en un horno de arco en dos fases de un ciclo de fundición. ....	23
Tabla 2. Amplitudes Máximas de Corrientes Armónicas en TCR .....	26
Tabla 3. Espectro del modo de cambio típico en la fuente de poder .....	28
Tabla 4. Convertidor Armónico de Seis Pulsos .....	31
Tabla 5. Valores TIF de frecuencia simple para 1960 .....	43
Tabla 6. Temperaturas admisibles .....	53
Tabla 7. THD .....	63
Tabla 8. Niveles de THD y TDD .....	64
Tabla 9. Fuentes armónicas.....	65
Tabla 10. Fuentes armónicas detectadas en el sistema eléctrico principal .....	71
Tabla 11. Consumo de los transformadores de potencia .....	72
Tabla 12. Banco de condensadores en media tensión de UNACEM.....	73
Tabla 13. Fuentes armónicas en media tensión de UNACEM.....	74
Tabla 14. Consumos en el transformador T4 sin compensación.....	75
Tabla 15. Consumos en el transformador T4 con compensación.....	77
Tabla 16. Detalle de la tabla N° 16 – Std IEEE 399.....	81
Tabla 17. Detalle del dimensionamiento del banco de compensación – 6.6 kV .....	83
Tabla 18. Reporte Sumario de Potencias.....	85
Tabla 19. Resumen de Resultados de Tensión en Barras .....	85
Tabla 20. Resumen de Resultados de % de Carga en Transformadores.....	86
Tabla 21. Reporte Sumario de Potencias.....	87
Tabla 22. Resumen de Tensión en Barras.....	87
Tabla 23. Resumen de Resultados de % de Carga en Transformadores.....	88
Tabla 24. Niveles de THD en barras – Sistema Proyectado.....	88
Tabla 25. Tabla de THD en barras – Sistema en Contingencia.....	90
Tabla 26. Salida del Banco de 3.5 MVar.....	92
Tabla 27. Distorsión armónica (pre y post observación).....	95
Tabla 28. Contrastación de hipótesis de la distorsión armónica.....	99
Tabla 29. Cos $\phi$ - (Pre observación – Post observación) .....	99
Tabla 30. Contrastación de hipótesis de Cos $\phi$ .....	100

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Circuito rectificador de puente trifásico.....	13
Gráfico 2. Onda de salida del rectificador ideal.....	14
Gráfico 3. Onda de corriente AC ideal .....	15
Gráfico 4. Solapamiento de conmutación $\alpha=0^\circ$ , $\mu=25^\circ$ .....	16
Gráfico 5. Solapamiento de conmutación $\alpha=30^\circ$ , $\mu=12^\circ$ .....	16
Gráfico 6. Escalonamiento de voltaje rectificado con $\alpha=0^\circ$ .....	17
Gráfico 7. Escalonamiento de voltaje rectificado con $\alpha=30^\circ$ .....	17
Gráfico 8. Rectificador de seis pulsos con fluctuaciones DC.....	18
Gráfico 9. Rectificador de seis pulsos con onda DC séptimo armónico como una función de onda DC.....	19
Gráfico 10. Rectificador de seis pulsos con onda DC 11vo armónico como una función de onda DC.....	19
Gráfico 11. Rectificador de seis pulsos con onda DC.....	20
Gráfico 12. Compensador de VAR estático usando un reactor controlado por thyristor ...	24
Gráfico 13. Onda de Corriente de una fuente de poder de seis pulsos.....	29
Gráfico 14. Reducción del conductor vs. Armónicos con distribución de corriente armónica de seis pulsos. ....	36
Gráfico 15. Valores de peso TIF en 1960.....	44
Gráfico 16. Potencia reactiva.....	47
Gráfico 17. Forma de onda sinusoidal de 60 Hz y algunos armónicos .....	52
Gráfico 18. Forma de onda sinusoidal distorsionada por.....	52
Gráfico 19. Operación de un CER.....	54
Gráfico 20. Diagrama de potencia activa (kW) y de potencia reactiva (kVAr).....	66
Gráfico 21. Diagrama de factor de potencia (p.u.).....	66
Gráfico 22. Sensibilidad entre $Q_{\text{banco}}$ y $f_{dp}$ . ....	76
Gráfico 23. Diagrama de carga – Transformador T4.....	79
Gráfico 24. Diagrama de carga – Transformador T4.....	80
Gráfico 25. Niveles de tensión barras T4 – Sin compensación .....	82
Gráfico 26. Niveles de tensión barras 0.69 kV - Rectificador del motor de ventilador separador Sepol .....	82



Gráfico 27. Niveles de THD en barra de 6.6 kV del T4 por variación de la capacidad del banco de 3.5 MVar.....	93
Gráfico 28. Contrastación de hipótesis .....	96
Gráfico 29. contrastación de hipótesis II.....	97
Gráfico 30. contrastación de hipótesis III.....	98
Gráfico 31. Contrastación de hipótesis de $\text{Cos } \phi$ .....	100

## ÍNDICE DE ANEXOS

anexo 1. Matriz de consistencia.....	106
anexo 2. Diagrama unifilar del sistema eléctrico proyectado.....	107
anexo 3. Sistema eléctrico actual.....	109
anexo 4. Resultados del flujo de potencia i.....	110
anexo 5. Resultados del flujo de potencia ii.....	111
anexo 6. Sistema eléctrico proyectado.....	112
anexo 7. Resultados del flujo de potencia iii.....	113
anexo 8. Resultados del flujo de potencia iv.....	114
anexo 9. Resultados del flujo de potencia v.....	115
anexo 10. Resultados del flujo de potencia vi.....	116
anexo 11. Subestación principal Unacem s.a.a. planta Condorcocha.....	117
anexo 12. Fotografías de trabajos realizados.....	118

## RESÚMEN

La investigación tuvo como objetivo general: determinar en qué nivel el análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín, y los objetivos específicos: identificar el nivel de la distorsión armónica en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA, determinar y analizar el nivel de eficiencia del  $\cos \varphi$  (Coseno de phi) en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA y estimar el nivel del resultado esperado por el análisis del flujo de potencia por incremento de carga en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín.

La metodología empleada fue: tipo de investigación explicativa; diseño de la investigación experimental y el método fue inductivo.

La población de la investigación fue un transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem - Condorcocha.

Se tomó como instrumento la observación para la población muestral. Así mismo, los datos fueron procesados con el *T-Student* por ser de tipo de variable cuantitativa.

Finalmente, se concluye que el análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en un nivel medio en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín, en función a la distorsión armónica y factor de potencia en 1.81 y 0.92 %, respectivamente.

Palabras claves: flujo de potencia y prospectiva energética.

## ABSTRACT

The general objective of the research was to determine the level of power flow analysis by load increase in the energy prospect of the 20 MVA T4 transformer at the UNACEM cement plant in Condorcocha, Province of Tarma – Junín, And specific objectives: To identify the level of the harmonic distortion in relation to the analysis of the power flow in the transformer T4 of 20 MVA, To determine and analyze the efficiency level of  $\cos \phi$  (Cosine of phi) in relation to the analysis of the power flow in the transformer T4 of 20 MVA and Estimate the level of the expected result by the analysis of the power flow by increase of load in the transformer T4 of 20 MVA in the cement plant UNACEM, Condorcocha, Province of Tarma - Junín.

The methodology used was: type of explanatory research; Design - experimental research and the method is inductive.

The research population was a T4 transformer of 20 MVA in the cement plant UNACEM - Condorcocha.

Observation was taken as an instrument for the sample population. Also, the data were processed with the T STUDENT, being of type of quantitative variable.

Finally, it is concluded that the power flow analysis by load increase influences an average level in the energy prospect of the T4 transformer of 20 MVA in the cement plant UNACEM, Condorcocha, Province of Tarma - Junín, in function of the harmonic distortion And power factor at 1.81 and 0.92%, respectively.

Key words: power flow and energy prospective.

## INTRODUCCIÓN

En el transformador T4 la distorsión armónica (THD) se encuentra en el orden de 3.22% en concordancia con la NTCSE (Norma Técnica de Concesiones Eléctricas) [1] y la norma IEEE STD 519 – 1992, pese a ello la onda senoidal presenta problemas en su funcionamiento como: sobrecarga de los conductores neutros, disparos intempestivos de los interruptores automáticos de lado secundario de los transformadores de distribución, sobrecalentamiento del transformador de potencia, sobrecarga de los condensadores de corrección del factor de potencia, distorsión de la tensión, ruido de paso por cero y desconexión de los variadores de frecuencia; sin embargo, el incremento de carga respecto al convertidor de 6 pulsos de 2x0,4 MW para la prensa KHD, convertidor de 6 pulsos de 0,5 MW para el motor Sepol, convertidor de 12 pulsos de 0,78 MW para el motor del ventilador separador Sepol, CCM molino 8 2.0 MW, CCM envase 5 2.0 MW, motor de 6000 HP; influirá de manera negativa en el comportamiento de la onda senoidal maximizando los problemas ya mencionados; para ello, se instalará un banco de condensadores para mejorar el factor de potencia en función al análisis del flujo de potencia; para ello se formuló el problema general: ¿en qué nivel el análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma - Junín?, y problemas específicos: ¿cuál es el nivel de la distorsión armónica en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma - Junín?, ¿cuál es el nivel de eficiencia del  $\cos \varphi$  (coseno de phi) en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma - Junín? y ¿cuál es el nivel del resultado esperado por el análisis del flujo de potencia por incremento de carga en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma - Junín?; así mismo, se estableció el objetivo general: determinar en qué nivel el análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín; identificar el nivel de la distorsión armónica en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín; determinar y analizar el nivel de eficiencia del  $\cos \varphi$  (coseno de phi) en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín; y estimar el nivel del resultado esperado por el

análisis del flujo de potencia por incremento de carga en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín; respecto a los precedentes descritos se asevera las hipótesis formuladas con la finalidad de responder a los problemas establecidos:

Hipótesis general:

- “El análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en un nivel medio en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”.

Y las hipótesis específicas:

- “La distorsión armónica en relación al análisis del flujo de potencia se encuentra en un nivel medio del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”.
- “El  $\cos \varnothing$  (coseno de phi) en relación al análisis del flujo de potencia se encuentra en un nivel alto del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”.
- “El nivel del resultado esperado por el análisis del flujo de potencia por incremento de carga en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín, es medio”.

La importancia de la investigación radica en que se garantiza la implementación del molino 8 y embolsado 5, reduciendo la distorsión armónica y mejorando el factor de potencia, en contribución a la operatividad y productividad de la empresa.

La investigación está compuesta de la siguiente manera:

Agradecimiento, dedicatoria, índice, resumen e introducción.

CAPÍTULO I. Menciona el planteamiento del estudio: planteamiento y formulación del problema, objetivos, justificación e importancia, hipótesis y descripción de variables.

CAPÍTULO II. Se cita el marco teórico: antecedentes del problema, bases teóricas y definición de términos básicos.

CAPÍTULO III. Se explica la metodología: método y alcance de la investigación, diseño de la investigación, población, muestra y técnicas e instrumentos de recolección de datos.

CAPÍTULO IV. Acontecen los resultados y discusión: resultados del tratamiento y análisis de la información, prueba de hipótesis y discusión de resultados.

Conclusiones, referencias bibliográficas y anexos.

Finalmente, se concluye que el análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en un nivel medio en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín, en función a la distorsión armónica y factor de potencia en 1.81y 92 %, respectivamente.

# CAPÍTULO I

## 1. PLANTEAMIENTO DE ESTUDIO

### 1.1. Planteamiento del problema

En el transformador T4 la distorsión armónica (THD) se encuentra en el orden de 3.22% en concordancia con la NTCSE (Norma Técnica de Concesiones Eléctricas)[1] y la norma IEEE STD 519 – 1992, pese a ello la onda senoidal presenta problemas en su funcionamiento como: sobrecarga de los conductores neutros, disparos intempestivos de los interruptores automáticos de lado secundario de los transformadores de distribución, sobrecalentamiento del transformador de potencia, sobrecarga de los condensadores de corrección del factor de potencia, distorsión de la tensión, ruido de paso por cero y desconexión de los variadores de frecuencia; sin embargo, el incremento de carga respecto al convertidor de 6 pulsos de 2x0,4 MW para la prensa KHD, convertidor de 6 pulsos de 0,5 MW para el motor Sepol, convertidor de 12 pulsos de 0,78 MW para el motor del ventilador separador Sepol, CCM molino 8 2.0 MW, CCM envase 5 2.0 MW, motor de 6000 HP; influirá de manera negativa en el comportamiento de la onda senoidal maximizando los problemas ya mencionados; para ello, se instalará un banco de condensadores para mejorar el factor de potencia en función al análisis del flujo de potencia.

#### 1.1.1. Formulación del problema

##### 1.1.1.1. Problema general

¿En qué nivel el análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en la prospectiva energética del transformador T4



de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma - Junín?

#### **1.1.1.2. Problemas específicos**

- ¿Cuál es el nivel de la distorsión armónica en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma - Junín?
- ¿Cuál es el nivel de eficiencia del  $\cos \varnothing$  (coseno de phi) en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma - Junín?
- ¿Cuál es el nivel del resultado esperado por el análisis del flujo de potencia por incremento de carga en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma - Junín?

### **1.2. Objetivos**

#### **1.2.1. Objetivo general**

Determinar en qué nivel el análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín.

#### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Identificar el nivel de la distorsión armónica en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín.
- Determinar y analizar el nivel de eficiencia del  $\cos \varnothing$  (coseno de phi) en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín.
- Estimar el nivel del resultado esperado por el análisis del flujo de potencia por incremento de carga en el transformador T4 de 20

MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín.

### 1.3. Justificación e importancia

#### 1.3.1. Justificación

- a. **Legal.** El resultado de la investigación se encuentra dentro de los parámetros de la norma IEEE std 519 – 1992 (*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*); así mismo, guarda relación con la NTCSE (Norma Técnica de Concesiones Eléctricas), el cual exige a la empresa Unacem S.A.A., el pago de penalidades por generación de armónicos, y factor de potencia.
- b. **Teórica.** El resultado de la investigación aportará bases teóricas para la implementación del molino 8 y embolsado 5 tomando en cuenta el análisis de flujo de potencia en base a la instalación del banco de condensadores.
- c. **Tecnológica.** El resultado de la investigación contribuye en mejorar el sistema eléctrico para garantizar la eficiencia de los equipos eléctricos, así como la vida útil.
- d. **Económica.** El resultado de la investigación reducirá el costo por consumo de energía reactiva y estar exentos de penalidades por generación de distorsión armónica.
- e. **Social.** El incremento de carga en el transformador T4 de 20 MVA no influirá en la red eléctrica de las ciudades contiguas, garantizando a la población una buena calidad de energía eléctrica.
- f. **Práctica.** La implementación de las celdas de media y banco de condensadores para la alimentación del molino 8 y embolsado 5 a través del análisis del flujo de potencia es de carácter asequible y de tiempo de instalación moderado.

### **1.3.2. Importancia**

La prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA, mediante el análisis del flujo de potencia por incremento de carga en la planta de cemento Unacem planta Condorcocha, es importante porque garantiza la implementación del molino 8 y embolsado 5, reduciendo la distorsión armónica y mejorando el factor de potencia, en contribución a la operatividad y productividad de la empresa.

## **1.4. Hipótesis y descripción de variables**

### **1.4.1. Hipótesis**

#### **1.4.1.1. Hipótesis general**

“El análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en un nivel medio en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”.

#### **1.4.1.2. Hipótesis específicas**

- “La distorsión armónica en relación al análisis del flujo de potencia se encuentra en un nivel medio del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”.
- “El  $\cos \phi$  (coseno de phi) en relación al análisis del flujo de potencia se encuentra en un nivel alto del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”.
- “El nivel del resultado esperado por el análisis del flujo de potencia por incremento de carga en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín, es medio”.

### **1.4.2. Descripción de variables**

#### **1.4.2.1. Variables**

- Variable independiente(X): análisis de flujo de potencia.

- Variable dependiente (y): prospectiva energética.

Operacionalización de variables

VARIABLE	TEORÍA	DIMENSIONES	INDICADORES	TIPO DE VARIABLE	TÉCNICA E INSTRUMENTO
x= Flujo de potencia	El flujo de potencia también llamado flujo de carga, que se mide a través del voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva.	Distorsión armónica	THD	Cuantitativo	Observación / guía de observación
		Coseno $\phi$	P.U.		
y= Prospectiva energética	Es lo que se espera a futuro respecto a la distorsión armónica y factor de potencia.	Flujo de potencia	kW kVAR	Cuantitativo	Simulación

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes del problema

##### **Internacional**

En la tesis: “Análisis de demanda del sistema eléctrico en la empresa Aromas del Tungurahua, ubicada en Ambato, utilizando el software de simulación Neplan, para determinar el nivel de cargabilidad del sistema y realizar propuestas de mejora”, llega a las siguientes conclusiones:

- La información bibliográfica nos permitió conocer técnicas de análisis de sistemas eléctricos, las mismas que se aplicaron al objeto de estudio; además, de brindar conocimientos relevantes orientados a simulación de circuitos para el desarrollo de la propuesta.
- Una vez analizados los datos se establece que el factor de utilización actual es de 22,09%; mientras que, el factor de utilización obtenido de la simulación arroja que está en el 22,18%, estos valores concuerdan y se afirma que el trafo se encuentra subcargado y es capaz de asimilar una mayor demanda en el sistema.
- Los niveles de cargabilidad de la acometida principal están en el 16,46% por fase, cabe resaltar que el nivel de voltaje promedio que se registró en el tablero principal de distribución es 216 voltios, y el transformador está

trabajando con el TAP en posición 4 debido a que existe una considerable caída de voltaje en la línea de medio voltaje que alimenta el transformador 9483 de 125 kVA

- No existen problemas de balance de cargas en las fases, la mayoría de las cargas son trifásicas, se afirma que la carga se encuentra uniformemente distribuida en cada una de las fases, motivo por el cual no es necesario hacer modificaciones en la distribución de carga entre fases.
- Los registros del analizador de cargas y de los reportes de telemedición de la EEASA muestran variaciones del factor de potencia, pero se mantienen dentro del rango mínimo permitido 0,92. Al incrementar la nueva carga del Hammer Millse, disminuye el factor de potencia a 0,88 por lo que se debe implementar 15kVAR al banco de capacitores y así evitar penalizaciones.
- Cuando se pone en funcionamiento el molino Hammer Millse aumentan las pérdidas del sistema, ya que la acometida soporta mayor cantidad de corriente. Al momento de ingresar los 15 kVAR al banco de capacitores se reducen las pérdidas de 311W a 278W.
- Con la implementación del banco de capacitores se tiene un ahorro anual de \$471,96 por penalización de bajo factor de potencia, inversión recuperable a 4 años.
- La máxima demanda se registró el día martes con un valor de 25,68 kW, con una duración de 1 hora y la demanda promedio en el día es de 21 kW, datos registrados por telemedición y por el analizador de carga. (1)

En la tesis: “Análisis del flujo de potencia reactiva en el sistema eléctrico de Pereira”, llega a las siguientes conclusiones:

- Luego de realizar el movimiento de taps de los transformadores de potencia de las subestaciones Dosquebradas, Cuba y La Rosa que son de gran importancia debido a que estas manejan tensiones de 115 kV, se afectaron la mayoría de las tensiones y flujos de potencia reactiva por las líneas del sistema.

- Por otro lado, se tienen subestaciones que manejan tensiones de 33 kV y 13,2 kV; al realizar el movimiento de taps de los transformadores 33/13,2 kV solo se obtuvo un cambio de tensión en el nodo de baja de la subestación y el flujo de reactivos por las líneas del sistema fue casi constante.
- Se observó que la variación del taps de los transformadores de -5 a +5 equivale a cerrar una llave, ya que a medida que el tap subía de nivel el transformador limitaba el flujo de reactivos hacia las cargas o líneas de transmisión y hace que presente redirección de reactivos hacia otros lugares del sistema eléctrico.
- La inyección de reactivos a través de bancos de condensadores es una solución para las bajas tensiones en los nodos; además, evita que tengan que comprarse reactivos para mejorar estas tensiones.
- Los usuarios de energía eléctrica de la ciudad tienen derecho a consumir potencia reactiva siempre y cuando esta no exceda el 50% de la potencia activa.
- La potencia reactiva no es una energía realmente consumida a comparación de la potencia activa, sino que es una potencia que se utiliza para establecer un campo magnético en un determinado tiempo y luego esta potencia es devuelta al sistema.
- La CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas) es la entidad que regula y expide todas las resoluciones que rigen al sistema eléctrico de Colombia y donde se pueden encontrar las resoluciones que regulan el manejo de potencia reactiva, tensiones y la operación del sistema. (2)



## Nacionales

En la tesis: "Metodología de estudio del diagrama de carga para el mejoramiento del factor de potencia de la planta frigorífica de la corporación Hayduk S.A.", llegan a las siguientes conclusiones:

- Se realizó un análisis de los diagramas de carga de la Planta Frigorífica de la Empresa Hayduk S.A, identificándose las características de operación de las 2 unidades conformantes, tal como son la Cámara Frigorífica y el Túnel de Congelamiento, analizándose para cada uno de ellas los diagramas de carga en función a la estación de verano e invierno, así como del requerimiento de demanda máxima y mínima.
- Se obtuvo un factor de potencia en la Cámara Frigorífica de 0.8831 y para el túnel de congelamiento de 0.8591, aplicando la metodología del diagrama de carga con un valor promedio de toda la instalación de 0.8712.
- Se dimensionó 2 sistemas de compensación de energía reactiva por grupos, según las siguientes características: para la Cámara Frigorífica se tiene la siguiente configuración: 1:2:3:4:4:4:4 con un total de 7 escalonamientos: 1 de 10 KVAR, 1 de 20 KVAR, 1 de 30 KVAR y 4 de 40 KVAR, sumando 220 KVAR. Para el túnel de congelamiento se tiene una configuración: 1:2:3:3:4:4:4 con 7 escalonamientos: 1 de 10 KVAR, 1 de 20 KVAR, 2 de 30 KVAR y 3 de 40 KVAR, sumando 210 KVAR.
- Se dimensionó un total de 14 condensadores individuales con los siguientes detalles: 6 Motores de 134 KW (180 HP) cada uno con un condensador individual de 25 KVAR, 2 Motores de 111 KW (150 HP) cada uno con un condensador individual de 13 KVAR y 6 Motores de 93 KW (125 HP) cada uno con un condensador individual de S KVAR
- Se obtiene un factor de potencia global de 0.9598 desde un valor inicial de 0.8712, mejorando en un 0.33 % el valor meta fijado de 0.9567, valor en el cual se suprime la penalidad por consumo de energía reactiva.
- Se obtiene un ahorro económico anual de S/ 3711SO o U\$ 111831.00 a instalar el sistema de compensación reactiva compuesto por 2 Bancos de

condensadores automáticos grupales y 14 condensadores individuales para motores de gran potencia.

- Se tiene los siguientes indicadores de rentabilidad: Valor Actual Neto de U\$ 541873, Tasa Interna de Retorno de 48% y un *pay back* de 1 año 9 meses,<sup>1</sup> con el cual con una inversión de U\$ 22,000.00 el proyecto de instalación de un sistema de compensación reactiva es rentable para la empresa. (3)

En la tesis: “Utilización de la energía proveniente de la distorsión armónica en un sistema eléctrico”, llega a las siguientes conclusiones:

- Mediante el uso del nuevo filtro para armónicos es posible captar la onda a la cual se ha sintonizado; también, parte de las otras ondas presentes en la red entre ellas la onda fundamental, el transformador que es parte integral del nuevo filtro permite transmitir esta energía para poder darle una utilidad.
- El nuevo filtro para armónicos sigue el mismo principio de resonancia que utiliza un filtro pasivo paralelo, por ello fue necesario entender el funcionamiento de este último para realizar los cálculos de resonancia.
- Se elaboró una tabla con diferentes combinaciones para filtros de armónicos del tercer orden, en esta tabla se calculó la potencia que disipan los filtros pasivos paralelo en función de la capacidad del condensador. Se pudo observar que la potencia disipada por un filtro convencional, así como su selectividad depende no solo de los valores de capacitancia e inductancia, sino de la resistencia interna de los elementos del filtro. El nuevo filtro permitió recuperar aproximadamente el 60% de la energía que disiparía.
- Mediante el uso de este nuevo filtro es posible recuperar parte de la potencia que un filtro común disiparía, esta energía puede destinarse a otros usos originando de esta manera un ahorro económico. Es imposible recuperar toda la potencia disipada por un filtro pasivo, ya que siempre

existen pérdidas, aun así la instalación de este nuevo tipo de filtro resulta viable técnica y económicamente. (4)

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Prospectiva energética**

A fin de identificar los principales problemas existentes y factores que puedan afectar el desempeño del sector eléctrico, de analizar las opciones de política que permitan enfrentar las diferentes contingencias.

Se basa en la identificación de los factores que puedan afectar el sector eléctrico, incluyendo su importancia relativa y si estos pueden ser o no influenciados por las políticas públicas mediante la revisión de estudios y la consulta a expertos a través de la realización de un experimento Delphi para luego proceder a la posterior construcción de escenarios y ver cómo se puede llegar a las más deseables.

Esta metodología de los estudios de prospectiva fue complementada con el análisis de sensibilidad de un modelo de optimización de las inversiones para los próximos años.

Por lo tanto, los resultados que se esperaría del presente estudio incorporarían lo siguiente:

- Identificación de los principales factores o variables claves que puedan afectar el desempeño del sector eléctrico.
- Construcción de escenarios prospectivos en ejes en base a resultados de la encuesta Delphi a expertos nacionales e internacionales.
- Repercusión de los escenarios prospectivos sobre el modelo estadístico tendencial determinado.
- Identificar medidas o acciones que puedan tomarse para prevenir riesgos en cada uno de estos escenarios. (5)

### **2.2.2. Flujo de potencia**

La experiencia con el método Gauss-Seidel ha demostrado que es una técnica simple de ser aplicada y cumple con los requerimientos

exigidos para la solución de las ecuaciones de flujo; sin embargo, se requiere de un número elevado de iteraciones antes que la solución converja con un índice aceptable de precisión. El tiempo para alcanzar la convergencia aumenta casi directamente con el número de barras.

Las simulaciones de Flujo de Carga se efectuarán mediante la ayuda del software *DigSilent Power Factory*, donde se tiene modelado todo el sistema interconectado nacional.

Para evaluar los resultados de los flujos de potencia se tomarán los siguientes criterios bajo una condición de operación normal:

**Límites de tensión admisibles en barras:**

Barras con carga:  $\pm 5\%$  Vn.

Independientemente de la potencia transmitida los niveles de tensión deben estar comprendidos en el rango indicado.

**Capacidad de transporte de líneas y capacidad de carga de transformadores:**

- Líneas de transmisión: 100% de su potencia nominal.
- Transformadores de potencia: 100% de su potencia nominal.

Para evaluar los resultados de los flujos de potencia se tomarán los siguientes criterios bajo una condición de operación en contingencia.

**Límites de tensión admisibles en barras:**

Barras con carga:  $\pm 10\%$  Vn.

Independientemente de la potencia transmitida los niveles de tensión deben estar comprendidos en el rango indicado.

**Capacidad de transporte de líneas y capacidad de carga de transformadores:**

- Líneas de transmisión: 120% de su potencia nominal.
- Transformadores de potencia: 120% de su potencia nominal.
- El tiempo de duración de la sobrecarga no debe ser mayor de cuatro horas.

La solución del problema de flujo de potencia permite obtener principalmente los siguientes resultados:

- Flujo de potencia activa y reactiva en las líneas de transmisión y tensiones en las barras.
- La influencia de la incorporación de nuevas cargas y unidades de generación.
- La influencia de pérdidas o salidas temporales de líneas, cargas y unidades de generación. (6)

### Generadores armónicos

**Convertidores.** En este texto “ideal” significa simplemente ignorar los efectos de la inductancia en el circuito AC.

- a. **Onda de voltaje ideal:** en el gráfico N° 1 muestra un sistema de alimentación trifásica alimentando a un puente rectificador. Asumiendo sin carga, el más alto voltaje línea a línea se conectará al circuito de carga DC dando la forma de onda de voltaje como la mostrada en el gráfico N° 1. (6)

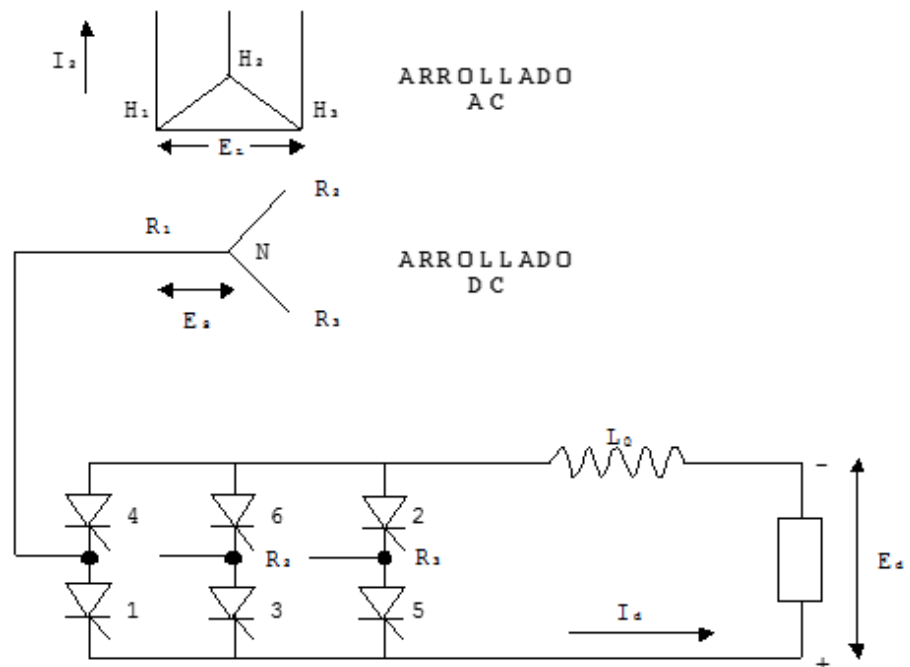


Gráfico 1. Circuito rectificador de puente trifásico

Fuente: IEEE std 519 – 1992

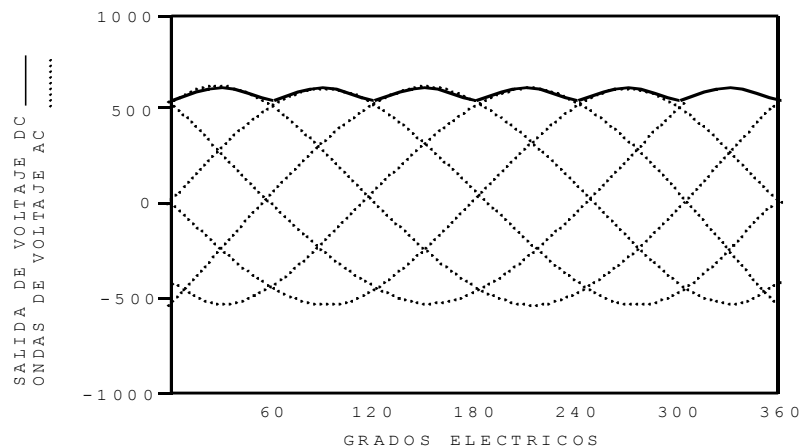


Gráfico 2. Onda de salida del rectificador ideal

Fuente: IEEE std 519 – 1992

- b. **Onda de corriente ideal.** El gráfico N° 3 muestra la onda de corriente AC ideal en un puente rectificador. Esta forma se basa en la asunción de que la corriente DC no tiene fluctuaciones (carga inductiva) y que la corriente DC es transferida de una fase a otra al momento en que el voltaje en la fase entrante excede el voltaje en la fase saliente. La fórmula para los componentes de corriente armónica de la onda de corriente AC es:

$$h = kq \pm 1 \dots \dots \dots \text{Eq. 2.1}$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \dots \dots \dots \text{Eq. 2.2}$$

Donde:

h: es el orden del armónico

k: es algún entero positivo

q: es el número de pulso del circuito rectificador

$I_h$ : es la amplitud de la corriente armónica de orden h

$I_1$ : es la amplitud de la corriente fundamental. (6)

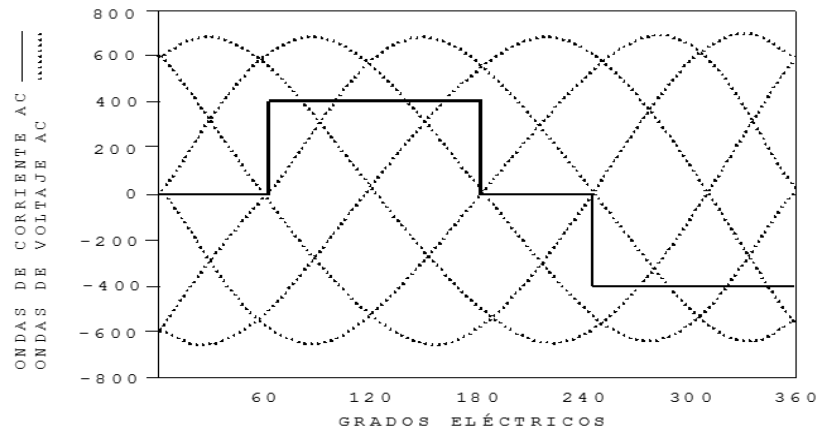


Gráfico 3. Onda de corriente AC ideal

Fuente: IEEE std 519 – 1992

- c. **Fenómeno de conmutación.** Una onda de corriente rectangular significa inductancia cero o fuente infinita en el circuito AC que alimenta al rectificador, en cuyo caso el escalonamiento de tensión no ocurre. Cuando la inductancia está presente, la corriente no se transfiere de una fase a otra al instante; en cambio, hay un solapamiento (o conmutación) período durante el cual los dos dispositivos están conduciendo. Durante el solapamiento, hay un corto circuito transitorio AC a través de los dispositivos que conducen. Esta clase de circuito es interrumpido por la corriente inversa en el dispositivo de salida. La duración del período de solapamiento depende del ángulo cerrado entre el corto circuito AC y este valor respectivo. El gráfico N° 4 muestra las condiciones de conmutación con  $\alpha$  igual a  $0^\circ$ . El gráfico N° 5 muestra las condiciones de conmutación con  $\alpha$  igual a  $30^\circ$ . Las diferencias entre estos dos casos son debido a las diferentes proporciones de aumento de corriente en la fase entrante. Cuando  $\alpha$  es igual a  $0^\circ$ , las condiciones de corto circuito son aquellas correspondientes a la asimetría máxima con esta característica de elevación inicial lenta. Con  $\alpha$  igual a  $90^\circ$ , las condiciones de corto circuito son aquellas de asimetría cero con una proporción inicialmente rápida de elevación de corriente. A este ángulo de retraso, el ángulo de solapamiento es el más pequeño para un valor particular de corriente. Los gráficos 6 y 7 muestran el voltaje, línea a neutro AC para los mismos dos casos. (6)

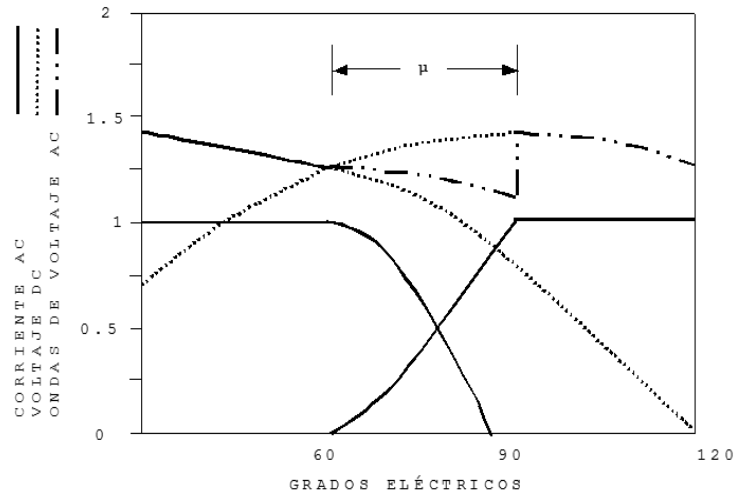


Gráfico 4. Solapamiento de conmutación  $\alpha=0^\circ$ ,  $\mu=25^\circ$   
 Fuente: IEEE std 519 – 1992

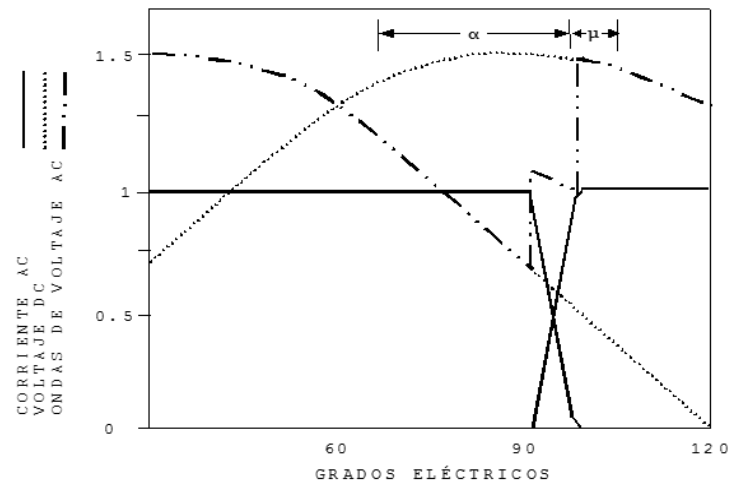


Gráfico 5. Solapamiento de Conmutación  $\alpha=30^\circ$ ,  $\mu=12^\circ$   
 Fuente: IEEE std 519 – 1992



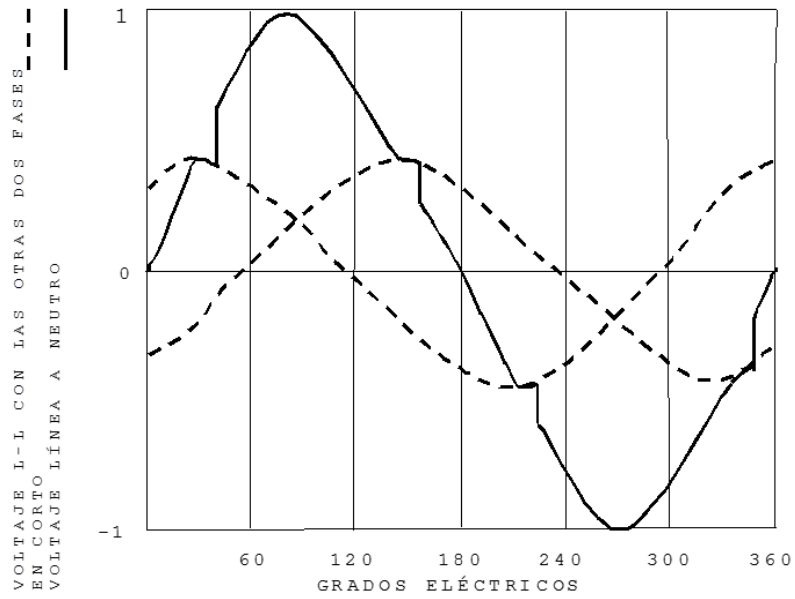


Gráfico 6. Escalonamiento de voltaje rectificado con  $\alpha=0^\circ$

Fuente: IEEE std 519 - 1992

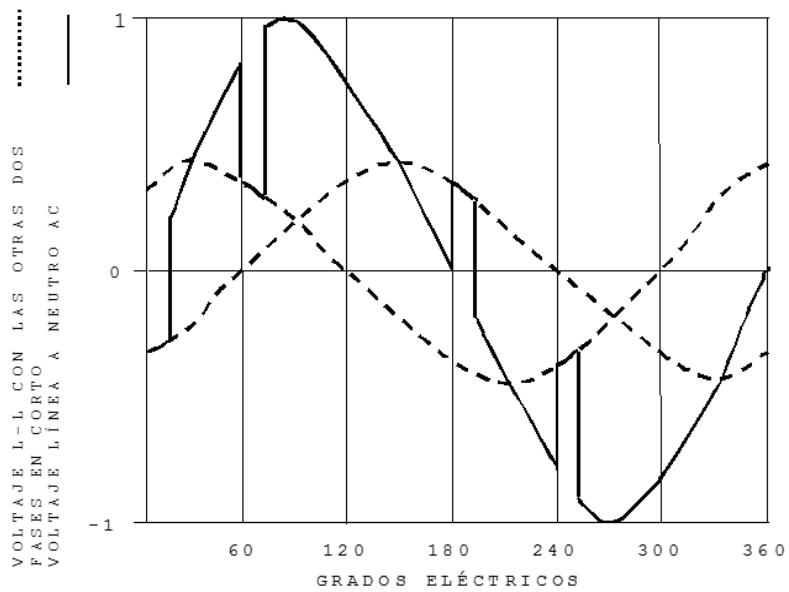


Gráfico 7. Escalonamiento de voltaje rectificado con  $\alpha=30^\circ$

Fuente: IEEE std 519 - 1992

La fórmula para corrientes armónicas, permitida para ángulos de retraso y solapamiento y asumiendo la corriente DC libre de ripple, es:

$$I_h = I_{dc} \left\{ \frac{6}{\pi} \sqrt{\frac{A^2 + B^2 - 2AB \cos(2\alpha + \mu)}{h [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)]}} \right\} \dots\dots\dots \text{Eq. 2.3}$$

Donde:

$$A = \frac{\sin \left[ (h - 1) \frac{\mu}{2} \right]}{h - 1} \dots\dots\dots \text{Eq. 2.4}$$

**NOTA:** Para  $h = 1$  y  $A = \mu/2$ ,  $h =$  entero y  $\mu =$  ángulo de solapamiento con  $h$  que tiene el mismo rango que el anterior.

$$B = \frac{\sin \left[ (h + 1) \frac{\mu}{2} \right]}{h + 1} \dots\dots\dots \text{Eq. 2.5}$$

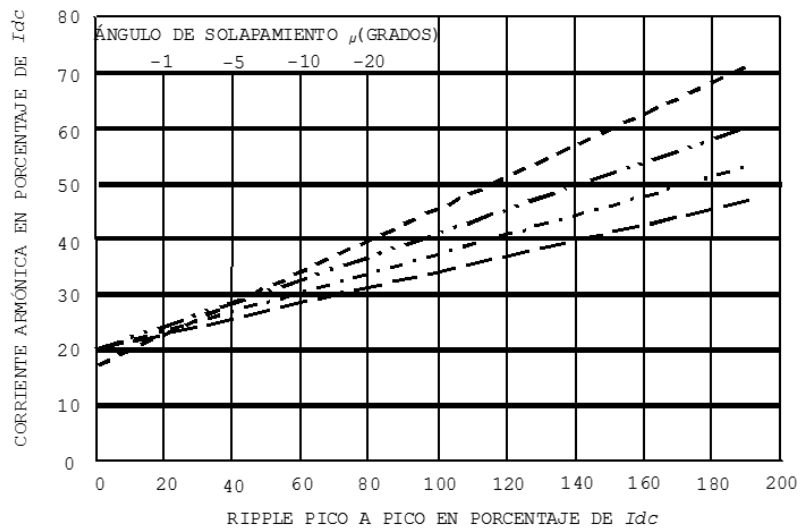


Gráfico 8. Rectificador de seis pulsos con fluctuaciones DC  
Quinto Armónico como una función de fluctuaciones DC

Fuente: IEEE std 519 – 1992

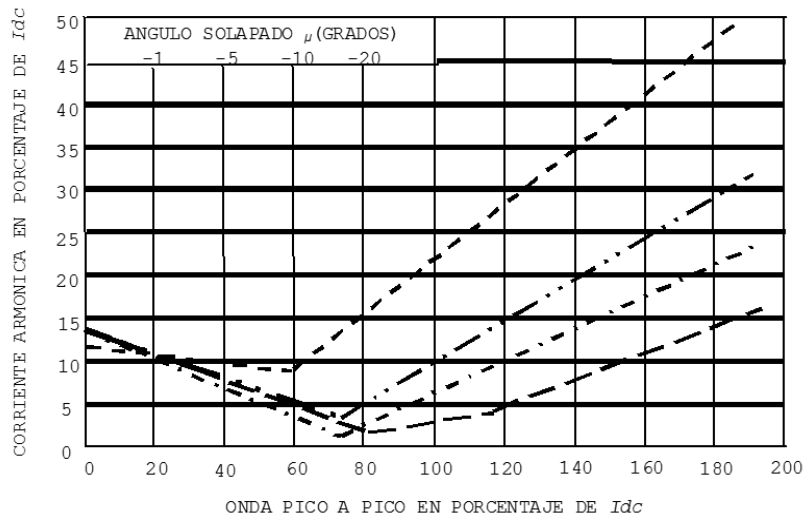


Gráfico 9. Rectificador de seis pulsos con onda DC séptimo armónico como una función de onda DC

Fuente: IEEE std 519 – 1992

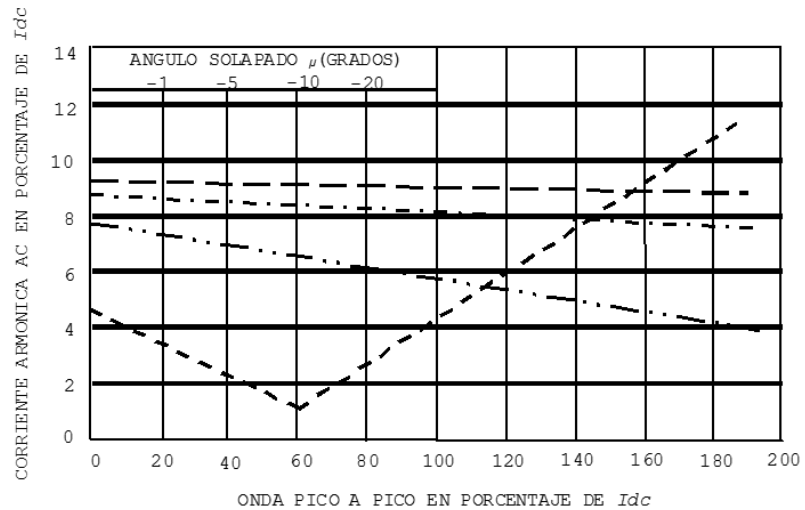


Gráfico 10. Rectificador de seis pulsos con onda DC 11vo armónico como una función de onda DC

Fuente: IEEE std 519 – 1992

- d. **Escalonamiento de tensión.** El escalonamiento de tensión de la onda de voltaje AC es causado por la acción de cambio del rectificador. La forma de onda de corriente AC es un resultado de este escalonamiento. Tradicionalmente, la forma de onda de corriente es

usada como la base para el análisis armónico y el escalonamiento de voltaje es calculado por la caída de I-Z en los armónicos de corriente. La profundidad de la muesca en los puntos cercanos a la fuente de alimentación es proporcional a la impedancia del sistema sobre ese punto. El ancho de la muesca es el ángulo de conmutación. (6)

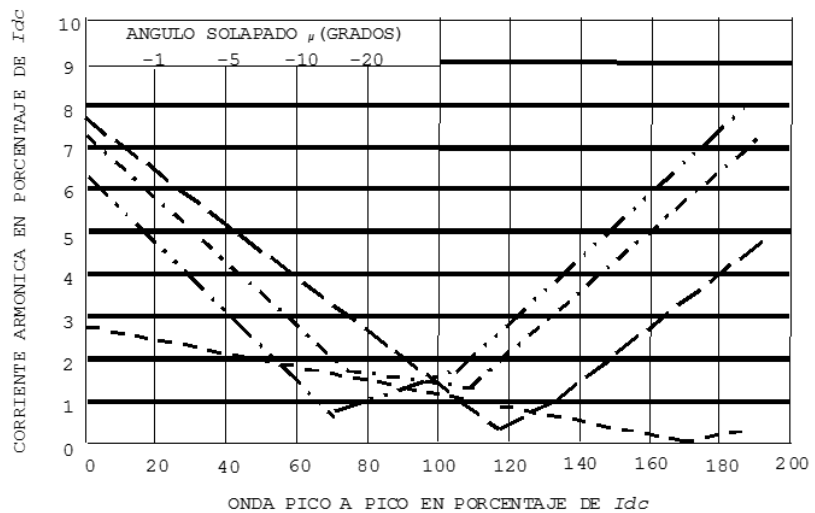


Gráfico 11. Rectificador de seis pulsos con onda DC  
13vo Armónico como una función de onda DC

Fuente: IEEE std 519 – 1992

$$\mu = \cos^{-1}[\cos \alpha - (X_s + X_t)I_d] - \alpha \quad \dots\dots\dots \text{Eq. 2.6}$$

$$\cos \mu = 1 - \frac{2E_x}{E_{d0}} \quad \dots\dots\dots \text{Eq. 2.7}$$

Donde:

Xs = Reactancia del sistema en por unidad del convertidor base.

Xt = Reactancia transformada del convertidor en por unidad del convertidor base.

Id = Corriente DC en por unidad del convertidor base.

e. **Armónicos en el lado DC de un convertidor.** Algunas cargas DC que tienen una constante de tiempo baja (inductancia baja), tal

como un motor DC, no dibujan corrientes libres de ripples. Los armónicos en la onda de tensión producen significativos ripples de corriente en la onda de corriente DC. Los armónicos son relacionados al número de pulsos de los circuitos convertidores: seis pulsos, sexto armónico y 12 pulsos, 12vo armónico. (6)

- f. **Armónicos en líneas AC.** Una fórmula para los armónicos AC en un puente de alimentación trifásica e igual carga es:

$$I_h = I_c \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left[ \frac{\sin\left(\frac{h\pi}{3}\right) \sinh\frac{\mu}{2}}{h^2 \frac{\mu}{2}} + \frac{r_c g_c \cos\left(\frac{h\pi}{6}\right)}{1 - \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\mu}{2}\right)} \right]$$

Eq.....2.8

$$g_h = \frac{\sin\left[(h+1)\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\mu}{2}\right)\right]}{h+1} + \frac{\sin\left[(h-1)\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\mu}{2}\right)\right]}{h-1} - \frac{2 \sin\left[h\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\mu}{2}\right)\right] \sin\left[\frac{\pi}{3} + \frac{\mu}{2}\right]}{h}$$

Eq.....2.9

**NOTA:** Cuando  $(h - 1) = 0$ , el segundo término de  $g_h$  es  $(\pi/6 - \mu/2)$

Donde:

$I_c$  = es el valor de corriente DC al final de la conmutación.

$R_c = \Delta i / I_c$

Los armónicos característicos producidos por un convertidor de potencia estática requieren impedancias balanceadas en el sistema AC e igual disparo de los tiristores en el convertidor. Si el circuito de disparo no opera simétricamente, así como la conmutación de cada dispositivo no es la correcta, los armónicos no característicos se producirán. Estos normalmente son pequeños, pero con una resonancia paralela en uno de ellas, estos pueden amplificarse a un valor que podría causar problemas. (6)

g. **Multiplicación de fase.** Los armónicos pueden ser reducidos por la multiplicación de fase. Si  $m$  son las secciones de un rectificador de seis pulsos:

- Tiene la misma relación de transformación.
- Tienen transformadores con idéntica impedancia.
- La fase está afinada exactamente a  $60/m$  grados de cada fase
- Son controlados a exactamente el mismo ángulo de retraso.
- Comparten equitativamente la carga.

Entonces los únicos armónicos presentes serán del orden de  $kq \pm 1$ , los armónicos característicos  $6m$  es llamado el número del pulso y se da el símbolo 'q,' ver IEEE STD 519 - 1992 Std 223-1966.

No hay dos secciones idénticas del rectificador en todos estos aspectos. Por consiguiente, en la práctica los armónicos no característicos siempre están presentes al grado que no se reúnan los requisitos anteriores. (6)

h. **Corriente con Onda DC de fuentes independientes del rectificador.** Las cargas tales como inversores de frecuencia constante, ajustable y sistemas que recuperan el deslizamiento del rotor devanado tienen fuentes de ondas de corriente DC independientes de la onda rectificada. Estas ondas de corriente a veces están en sincronismo con el rectificador y a veces no. Los armónicos AC debidos a este tipo de carga no pueden reducirse por multiplicación de fase. Tales cargas pueden producir subarmónicos en el circuito AC.

**Hornos de arco.** Los armónicos producidos por los hornos de arco eléctrico usados para la producción de acero son impredecibles, debido a la variación ciclo a ciclo del arco, particularmente cuando se perfora un nuevo trozo de acero. La corriente del arco no es periódica, y los análisis revelan un continuo espectro de frecuencias armónicas de órdenes enteros y no enteros. Sin embargo, las mediciones de armónicos han demostrado que las frecuencias armónicas de orden entero, particularmente las de bajo orden que comienzan con el

segundo y terminan con el séptimo, predominan sobre las otras no enteras. También, ellas deben demostrar que la amplitud decrece con el orden. Como el depósito de fundición del metal se incrementa, el arco se vuelve más estable, produciendo corrientes mucho más uniformes con mucho menos distorsión y menos actividad armónica. La corriente se vuelve simétrica alrededor del eje cero, eliminando así incluso los órdenes de armónicos pares e impares.

**La tabla 1:** ilustra el contenido armónico típico de corriente del horno de arco en dos fases del ciclo de fundición en un horno de arco típico para la producción de acero. Debe darse énfasis a que otros hornos exhibirán modelos algo diferentes de corriente armónica, pero estos valores pueden ser usados en estudios de armónicos si no están disponibles más datos específicos para un horno en particular. (6)

**Tabla 1. Contenido armónico de corriente en un horno de arco en dos fases de un ciclo de fundición.**

F u e n t e :	Corriente armónica en % de la fundamental				
	Orden de armónico				
	2	3	4	5	7
Condición del horno					
Fundición inicial (Arco activo)	77	5.8	2.5	4.2	3.1
Refinamiento (Arco estable)	0.0	2.0	0.0	2.1	0.0

Fuente: IEEE std 519 – 1992

### 2.2.3. Compensador de VAR estático

El reactor controlado por tiristor (TCR) ha sido usado extensamente como un compensador paralelo estático por hornos de arco eléctrico en sistemas de distribución de potencia y en otras aplicaciones para mantener los niveles de voltaje, reducir las fluctuaciones de voltaje (por

ejemplo, hornos de arco), mejorar el factor de potencia, corregir desbalances de fases, y mejorar la estabilidad del sistema de potencia.

Es un esquema del circuito de potencia de un TCR típico. La corriente del reactor, que contiene solo un pequeño componente en fase debido a bajas potencias, retrasa el voltaje a casi 90°. La corriente de conducción total es senoidal; sin embargo, el retardo de disparo de los tiristores no solamente reduce la magnitud de la corriente, sino que también altera la forma de la onda. Las corrientes armónicas producidas por la conducción parcial de todos serán de orden impar si el ángulo de la compuerta es equilibrado para ambos tiristores en un par. (6)

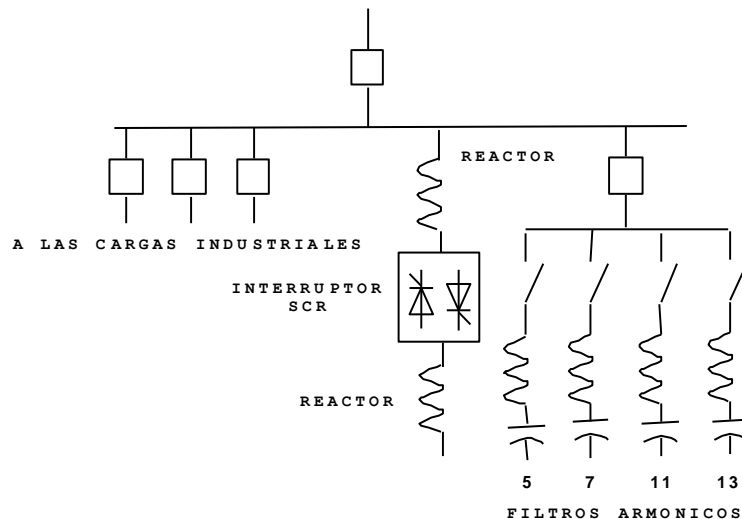


Gráfico 12. Compensador de VAR estático usando un reactor controlado por thyristor

Fuente: IEEE std 519 – 1992

$$I_k = \frac{4}{\pi} \frac{V}{X} \left[ \frac{\sin(h+1)\alpha}{2(h+1)} + \frac{\sin(h-1)\alpha}{2(h-1)} - \cos\alpha \frac{\sinh\alpha}{h} \right] \dots \text{Eq. 2.10}$$

Donde:

$h = 3, 5, 7, \dots$

$V =$  voltaje fundamental línea a línea.



$X$  = reactancia inductiva total de los reactores en cada fase.

$\alpha$  = ángulo de avance.

Las máximas amplitudes de los armónicos hasta el 25° orden. Se puede notar que el máximo no ocurre al mismo ángulo de retraso. Asumiendo condiciones balanceadas, los valores, que son expresados en porcentaje de la amplitud de la fundamental a conducción total, son los mismos para corrientes de fase y de línea. Los valores entre paréntesis son triplens que estarán presentes en las corrientes de fase, pero no estarán en las corrientes de línea, si las condiciones son balanceadas. Sin embargo, en una aplicación típica de horno de arco en el cual las condiciones prevalezcan durante períodos de arco inestables, algunos triplens aparecerán en las corrientes de línea. En donde las corrientes de fase sean desbalanceadas, los armónicos de fase individual aparecerán en las corrientes de línea como la suma fasorial de los armónicos de fase en su propio dominio

#### **2.2.4. Inversores para generación dispersa**

La emergencia de renovación de fuentes de energía alternas, ha resultado en el uso de muchas topologías variadas como acondicionadores de potencia o inversores para utilizarlos en operaciones conjuntas. Estos inversores están disponibles en unidades monofásicas y trifásicas, sus salidas pueden ser senoidales muy limpias con un factor de potencia cercano a la unidad o pueden contener varios armónicos característicos, no característicos y factores de potencia que pueden causar una calidad de potencia inaceptable en la red de la compañía eléctrica o interferir con sus controles, o relés.

(6)

**Tabla 2. Amplitudes Máximas de Corrientes Armónicas en TCR**

Orden de armónico presente		Orden de armónico presente	
1	100	3	(13.78)
5	5.05	7	2.59
9	(1.57)	11	1.05
13	0.75	15	(0.57)
17	0.44	19	0.35
21	(0.29)	23	0.24
25	0.20		

Fuente: IEEE std 519 – 1992

**NOTA:** Aquellos armónicos entre paréntesis son triplens.

Estos inversores pueden actuar como fuentes de corriente ligados a la compañía eléctrica o como fuentes de voltaje vinculadas a la compañía eléctrica a través de una impedancia serie, usualmente un inductor para limitar la corriente entre el inversor y la red de la compañía eléctrica.

Esta sección discutirá varias topologías de inversores y los armónicos asociados con cada uno. Los tipos de inversores incluyen:

- Conmutación de línea
- Modulador del ancho de pulso (conmutación propia PWM)
- Enlace de alta frecuencia con conmutación propia
- Amplificador de cambio con pulso programado con conmutación propia (6)

### **2.2.5. Inversores monofásicos**

Los inversores monofásicos para la generación dispersa, generalmente son proporcionados para menos de 10 kW y típicamente no pueden causar problemas para una compañía en números pequeños. Como su uso se incrementa; sin embargo, grandes números de inversores

ligados a la misma alimentación pueden causar problemas si los armónicos de los inversores son excesivos. (6)

#### **2.2.6. Inversores trifásicos**

Los inversores trifásicos para la generación dispersa son típicamente proporcionados desde los 10 kW hasta 1 MW y probablemente son por lo menos en términos cercanos, causa de formas de onda inaceptables para la subestación alimentadora si los inversores de las formas de onda de salida contienen altos porcentajes de armónicos. Como con los inversores monofásicos, los inversores trifásicos pueden ser topologías de conmutación lineal o de conmutación propia (algunas veces llamada conmutación forzada). También, como con los inversores monofásicos, los armónicos de salida dependen de muchas variables. El nivel de voltaje de operación DC para estos inversores varía por sobre una amplia gama para la mayoría de las fuentes de energía renovables. Estas variaciones dependen del clima, hora del día, temperatura, algoritmos de localización, envejecimiento de colectores y muchos otros factores no controlados.

Adicionalmente, las subestaciones de alimentación eléctricas AC pueden tener efectos no deseados en la salida del inversor. Las variables tales como armónicos de uso ambiental, voltajes de línea desbalanceados, separación de fase desigual, niveles altos y bajos de voltaje AC, e impedancias de línea son variables severas que afectan los armónicos de salida de los inversores. (6)

#### **2.2.7. Control de fase electrónico**

El control de potencia para cargas por fase de control de tiristores creará corrientes armónicas. La TCR discutida es simplemente un caso especial de control electrónico en el cual el factor de potencia es esencialmente cero. Las cargas caloríficas, que tienen un desplazamiento en el factor de potencia de cerca del 100%, algunas veces son controladas por control de fase de tiristores. La forma de onda diferirá en 0% para el caso del factor de potencia, pero solo armónicos de orden impar todavía se producirán, aunque con diferentes magnitudes.

Excepto para la aplicación TCR, las cargas usualmente no serán ni inductivas puras ni resistivas puras. Para el caso general de cargas con otro factor de potencia diferente de 0% o 100%, las magnitudes máximas de los armónicos quedarán entre los valores de estos casos puros. (6)

### 2.2.8. Armónicos de ciclo convertidores

Las expresiones para ciclo convertidores de corriente armónica son extremadamente complejas. Ellas varían en función de la proporción de frecuencia del ciclo convertidor.

El primer término en la ecuación representa las componentes de un convertidor de seis pulsos y el segundo término denota las frecuencias características de la banda lateral del convertidor.

Donde:

$f_h$ : es la frecuencia armónica impuesta por el sistema AC.

k y n: son enteros.

$f_o$  es la frecuencia de salida del ciclo convertidor. (6)

**Tabla 3. Espectro del modo de cambio típico en la fuente de poder**

Armónico	Magnitud	Armónico	Magnitud
1	1.000	9	0.157
3	0.810	11	0.024
5	0.606	13	0.063
7	0.370	15	0.079

Fuente: IEEE std 519 – 1992

### 2.2.8. Variador de modulación con ancho de pulso (PWM).

Este variador de enlace DC es diferente de los demás circuitos convertidores de potencia estática ya que posee un rectificador de

diodo que proporciona un factor de potencia de alto desplazamiento; además, este tiene un gran condensador en el enlace DC que se encarga de regular el voltaje en dicho enlace. Como resultado, en una carga ligera (entre un 30 y un 50%), la corriente solo fluirá cuando el voltaje de salida del diodo rectificador circule por el condensador. En cargas ligeras, la corriente en el circuito AC no es continua.

En el gráfico N°14 muestra esta forma de onda. Esta es similar a la fuente de poder con modo de cambio excepto que esta es un alto circuito trifásico para la corriente del quinto armónico. Como la carga en el variador se incrementa, la corriente llega a ser continua. El punto en el cual la corriente se hace discontinua es determinado por el tamaño de la inductancia del enlace DC. (6)

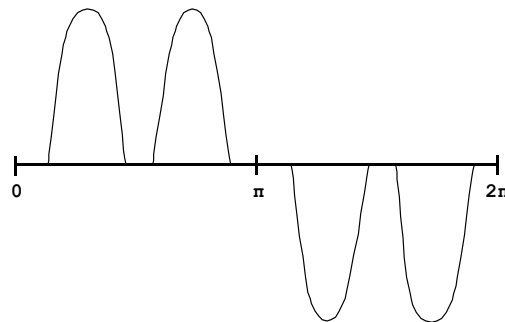


Gráfico 13. Onda de Corriente de una Fuente de Poder de Seis Pulsos PWM. Bajo Carga Ligera (Corriente Discontinua)

Fuente: IEEE std 519 – 1992

### 2.2.9. Efectos de los armónicos

- a. **Generalidades.** El ángulo al cual los armónicos pueden ser tolerados es determinado por la susceptibilidad de la carga (o fuente de potencia) hacia ellos. El mínimo tipo de susceptibilidad de equipos es aquel en el cual la función principal es un calentador, tal como un horno u hogar de caldera. En este caso, la energía armónica generalmente es utilizada y es del todo completamente tolerable. El mayor tipo de susceptibilidad de

equipos es aquel cuyo diseño o constitución asume una entrada fundamental sinusoidal (casi) perfecta. Este equipo está frecuentemente en las categorías de comunicación o equipo de procesamiento de datos. Un tipo de carga que normalmente cae entre estos dos extremos de susceptibilidad es la carga del motor. Muchas cargas de motores son relativamente tolerantes de armónicos.

Incluso en el caso de los equipos menos susceptibles, los armónicos pueden ser dañinos. En el caso de un horno, por ejemplo, ellos pueden causar calentamiento dieléctrico o esfuerzo eléctrico, el cual ocasiona envejecimiento prematuro del aislamiento eléctrico. (6)

- b. Motores y generadores.** Un mayor efecto de los voltajes y corrientes armónicas en las máquinas rotativas (inducción y sincrónicas) incrementa el calentamiento debido a las pérdidas en el cobre y en el hierro a frecuencias armónicas. Los componentes armónicos de este modo afectan la eficiencia de la máquina, y pueden entonces afectar el par desarrollado por el motor.

Las corrientes armónicas de un motor pueden dar aumento a una alta emisión de ruido audible al compararlas con una excitación sinusoidal. Inclusive los armónicos producen una distribución de flujo resultante en el entrehierro, el cual puede causar o intensificar el fenómeno llamado muesca (negándose a comenzar fácilmente) o arrastre (deslizamiento muy alto) en motores de inducción.

Los armónicos impares, tal como el quinto y el séptimo armónico, tienen el potencial para crear oscilaciones mecánicas en una combinación turbina-generator o en un sistema motor-carga. Las oscilaciones mecánicas resultan cuando el par del motor oscilante, causado por la interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético de frecuencia fundamental, excita una frecuencia de resonancia mecánica. Por ejemplo, el quinto y el séptimo armónico pueden combinarse para producir una

estimulación de torsión sobre un rotor generador en la frecuencia armónica sexta. Si la frecuencia de una resonancia mecánica existe cerca de la frecuencia de excitación eléctrica, pueden desarrollarse grandes esfuerzos mecánicos.

La tabla 4: define la característica del orden armónico derivado de un convertidor de seis pulsos y amplía el efecto cuando es aplicado a los terminales de la máquina rotativa. Cada armónico de voltaje, el 5to, 7mo, 11mo, etc., inducirá una corriente armónica correspondiente en el estator de la máquina. Cada uno de estos armónicos estará a una secuencia negativa o positiva del componente simétrico de corriente total. Estas corrientes inducirán un calentamiento en el devanado del estator, de este modo adicionará un aumento de temperatura causado por la corriente fundamental. (6)

**Tabla 4. Convertidor Armónico de Seis Pulsos**

Orden del Armónico	Frecuencia (Hz)	Red de Secuencia	Armónico del Estator	Rotación Armónico	del Armónico del Rotor
1	60	+	1	Hacia delante	-
5	300	-	5	Hacia atrás	6
7	420	+	7	Hacia delante	6
11	660	-	11	Hacia atrás	12
13	780	+	13	Hacia delante	12
17	1020	-	17	Hacia atrás	18
19	1140	+	19	Hacia delante	18
23	1380	-	23	Hacia atrás	24
25	1500	+	25	Hacia delante	24

Fuente: IEEE std 519 – 1992

Otro punto de importancia, es el flujo de corrientes armónicas en el rotor. El flujo de cada corriente producirá una fuerza magnetomotriz en el entrehierro, que inducirá flujos de corriente en el rotor de la máquina. Justo como cada armónico característico puede ser definido con una secuencia positiva o negativa la rotación de este armónico será hacia delante o hacia atrás con respecto a la rotación del rotor. El quinto armónico rotará en dirección hacia atrás (secuencia negativa), así un armónico de corriente inducirá en el rotor una frecuencia correspondiente a la diferencia rotacional de la red entre la frecuencia del entrehierro fundamental y el quinto, p.e. el quinto más uno, o el sexto armónico. Puesto que el séptimo armónico rotará en una dirección adelantada (secuencia positiva), una corriente armónica será inducida en el rotor con una correspondiente frecuencia a la diferencia rotacional de la red entre el séptimo y la frecuencia fundamental del entrehierro, p.e. el séptimo menos uno o sea el sexto armónico. Así, desde el punto de vista del calentamiento del rotor, el quinto y el séptimo armónico en el estator se combinan para producir una corriente de sexto armónico en el rotor. El undécimo y el decimotercero armónico actúan de la misma manera para producir la 12da corriente armónica en el rotor, y así sobre los más altos armónicos pares. Hay dos mayores puntos de importancia con estos armónicos del rotor.

- Calentamiento resultante del rotor.
- Pulsaciones o reducciones en el par del motor.

La magnitud de calentamiento del rotor que puede ser tolerada como la magnitud que incurre en un caso dado, dependiendo del tipo de rotor implicado. La máquina de rotor bobinado se ve seriamente más afectada que la ordinaria máquina de jaula de ardilla, y los rotores jaula de ardilla con barra profunda son más afectados que las ordinarias jaulas de ardilla. Las pérdidas en el devanado generalmente conciernen a las pérdidas en el hierro. El efecto sumado de los armónicos reduce la eficiencia y la vida útil de la máquina. Ninguna reducción es pronunciada para



encontrar normalmente un contenido armónico, pero el calentamiento armónico típicamente reduce el funcionamiento entre 90 y 95% del que puede ser experimentado por la onda senoidal fundamental pura aplicada.

Como se puede notar, los armónicos pueden causar una pulsación de par en el motor de salida. Esta puede afectar la calidad del producto en lugares donde las cargas de los motores sean sensibles a tales variaciones, p.e., en un spin de fibra sintética o en algunas aplicaciones de trabajos con metal. En casos en los cuales la inercia substancial está acoplada al eje del rotor, p.e., en un motor generador, el armónico eléctrico puede excitar a la resonancia mecánica. La resultante de las oscilaciones mecánicas puede causar fatiga y envejecimiento en el eje y en partes mecánicas conectadas. (6)

**c. Transformadores.** Con la excepción de aquellos armónicos aplicados a transformadores que pueden resultar en incremento del ruido audible, los efectos en estos componentes usualmente son aquellos de calentamiento parásito.

El efecto de los armónicos en transformadores es doble: las corrientes armónicas causan un incremento de las pérdidas en el cobre y pérdidas de flujos dispersos, y los voltajes armónicos causan un incremento de las pérdidas en el hierro. El efecto total es un incremento en el calentamiento del transformador, al ser comparado con una operación puramente sinusoidal (fundamental).

Proporciona un límite de armónicos para el transformador de corriente. El límite superior del factor de distorsión de corrientes es el 5% de la cantidad de corriente. La recomendación práctica puede dar el máximo sobrevoltaje RMS que el transformador pueda ser capaz de resistir en estado seguro: el 5% de la cantidad con carga y el 10% sin carga. Las corrientes armónicas en el voltaje aplicado no deben resultar en un voltaje total RMS

que exceda estas proporciones.

Puede notarse que las pérdidas del transformador causadas por voltajes y corrientes armónicas dependen de la frecuencia. El incremento de pérdidas con el incremento de frecuencia y, por tanto, los componentes armónicos de alta frecuencia pueden ser más importantes que los componentes armónicos de baja frecuencia causando calentamiento en el transformador. Los armónicos de alta frecuencia ocurren con la disminución de la amplitud, que tienden a cancelar su gran efecto. Sin embargo, una situación real dada puede exhibir inesperadamente altas amplitudes para ciertas frecuencias altas. IEEE STD 519 - 1992 C57.110-1986 provee guías relacionadas con los efectos esperados.

Las pérdidas del transformador pueden ser agregadas dentro de las pérdidas con cargas y dentro de las pérdidas sin cargas. La pérdida de la carga puede ser dividida por  $I^2R$  (pérdidas en el devanado) y pérdidas extraviadas. Las pérdidas extraviadas son de especial importancia cuando se evalúa la adición de calor debido al efecto de una forma de onda de corriente no sinusoidal.

Las pérdidas extraviadas son corrientes de Eddy debido al flujo electromagnético extraviado en el devanado, núcleo, abrazadera del núcleo, campo magnético, pared del tanque y otras partes estructurales del transformador. Las pérdidas extraviadas del devanado incluyen pérdidas aisladas de corrientes de Eddy en los conductores del devanado y pérdidas debido a la circulación de corrientes entre circuitos devanados paralelos o aislados. Esta pérdida aumentará en proporción al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia. La temperatura también aumentará en las partes estructurales por las corrientes de Eddy, de nuevo aproximadamente al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia.

La IEEE STD 519 - 1992 C57.110-1986 proporciona un procedimiento de cálculo para obtener las pérdidas de corriente

de Eddy para un transformador dado. (6)

- d. Conductores de potencia.** Los conductores implicados en la resonancia del sistema, pueden estar sujetos a fuerzas y coronas de voltaje, que pueden conducir a fallas en el dieléctrico (aislamiento). Los conductores que están sujetos a niveles “ordinarios” de corrientes armónicas son propensos a calentamientos.

El flujo de una corriente no sinusoidal en un conductor causará un calentamiento adicional por encima de lo que se esperaría para el valor rms de la forma de onda. Esto es debido a dos fenómenos conocidos como “efecto piel” y “efecto proximidad”, que varían en función de la frecuencia, así como también del tamaño y calibre del conductor. Como resultado de estos dos efectos, la resistencia efectiva AC,  $R_{AC}$ , es elevada con respecto a la resistencia DC,  $R_{DC}$ , especialmente para conductores largos. Cuando una forma de onda de corriente que es abundante en armónicos de alta frecuencia circula por un conductor, la resistencia  $R_{AC}$  equivalente para este conductor es elevada, que se traduce en un aumento de las pérdidas  $I^2R_{AC}$ .

La curva típica de corrección para condensadores trazada para un número de medidas de conductores, es mostrada en el gráfico para distribución de armónicos de seis pulsos.

El efecto del calentamiento armónico en conductores normalmente no es materia de gran preocupación. El diseño prudente; sin embargo, proporcionará el requerimiento de corrección. (6)

- e. Condensadores.** Un mayor inconveniente se presenta con el uso de condensadores en un sistema de potencia debido a la posibilidad de resonancia del sistema. Este efecto emplea

voltajes y corrientes que son considerablemente superiores a lo que sería el caso sin resonancia.

La reactancia de un banco de condensadores disminuye con la frecuencia, y el banco, actúa como una carga para corrientes armónicas altas. Este efecto incrementa el calentamiento y el esfuerzo dieléctrico. El cambio frecuente de componentes no magnéticos (p.e. núcleo de hierro), tal como transformadores y reactores, puede producir corrientes que se agregarán a la carga de condensadores. (6)

- f. **Equipo electrónico.** El equipo electrónico de potencia es susceptible a mal funcionamiento causado por las distorsiones armónicas. Este equipo a menudo depende de la determinación exacta del cruce por voltaje cero o de otros aspectos de la forma de onda de voltaje. La distorsión armónica puede resultar en un cambio en el cruce por voltaje cero o en el punto al cual un voltaje fase a fase se vuelve mayor que otro voltaje fase a fase. Estos son dos puntos críticos para muchos tipos de controles de circuitos electrónicos, y estos cambios pueden llevar al mal funcionamiento del equipo. (6)

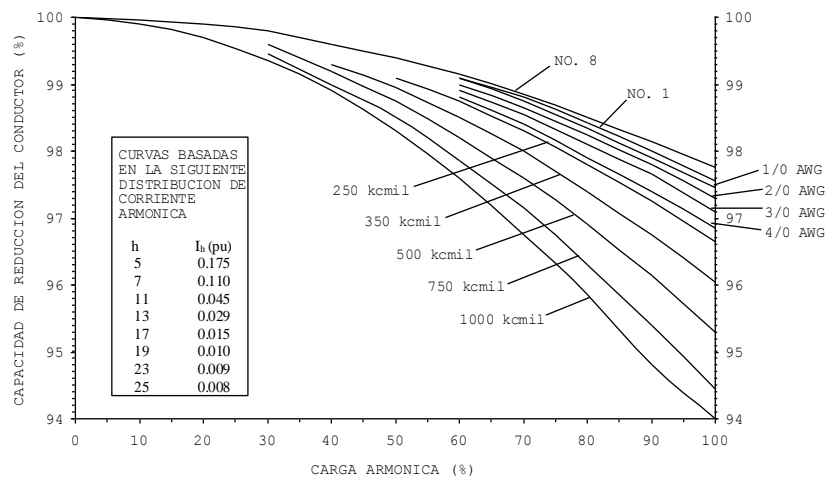


Gráfico 14. Reducción del Conductor vs. Armónicos con Distribución de Corriente Armónica de Seis Pulsos.

Fuente: IEEE std 519 - 1992

Otros tipos de equipos electrónicos pueden ser afectados por la transmisión de fuentes armónicas AC a través de equipos alimentadores de potencia o por acoplamiento magnético de armónicos dentro de componentes de equipos. Las computadoras y equipos asociados tal como los controladores programables frecuentemente requieren fuentes AC con un factor de distorsión de voltaje armónico menor al 5%, con el mayor armónico sólo siendo menor al 3% del voltaje fundamental. Los altos niveles de armónicos resultan en irregularidades, algunas veces sutiles, malfuncionamiento de los equipos que pueden, en algunos casos, tener serias consecuencias. Los instrumentos pueden ser afectados similarmente, dando datos erróneos o de otra manera funcionamiento impredecible. Tal vez lo más serio de esto es el mal funcionamiento de los instrumentos médicos. Consecuentemente, muchos instrumentos médicos son proporcionados con potencia de condición lineal. La interferencia menos dramática de los efectos de los armónicos puede ocasionalmente ser observada en equipos de radio y televisión, así como también en videograbadoras y en sistemas de reproducción de audio.

Desde que se localiza la mayoría del equipo electrónico a un nivel de voltaje inferior al del sistema de distribución de potencia asociado, este es frecuentemente expuesto a los efectos del escalonamiento de voltaje. El escalonamiento frecuentemente introduce frecuencias armónicas y no armónicas, que son mucho mayores que lo normalmente exhibido en 5 kV y en sistemas de distribución de alto voltaje. Estas frecuencias pueden estar dentro del rango de radio frecuencias (RF), y, como tal, pueden introducir efectos dañinos asociados con RF falsas. Estos efectos usualmente son los de señales de interferencia introducidas en circuitos lógicos o de comunicación. Ocasionalmente, el efecto de escalonamiento es de suficiente potencia como para sobrecargar los filtros mediante la interferencia electromagnética (EMI), y asemejar circuitos

capacitivos sensibles a alta frecuencia. (6)

**g. Medidores.** Los instrumentos son afectados por componentes armónicos, particularmente si la existencia de condiciones de resonancia puede resultar en altos voltajes y corrientes armónicas en los circuitos. Los dispositivos con disco de inducción, tal como vatímetros, normalmente ven solo la corriente fundamental; sin embargo, el desbalance de fase ocasionado por las distorsiones armónicas puede causar operaciones erróneas en estos dispositivos. Los estudios demuestran que son posibles errores positivos y negativos con la presencia de distorsiones armónicas, dependiendo del tipo de medidor bajo consideración y de los armónicos involucrados. En general, el factor de distorsión debe ser severo (>20%) antes de que se descubran errores significativos. Los transformadores de instrumentos a 60 Hz, usados en relés y medidores, no son afectados por los niveles de armónicos normalmente encontrados. (6)

**h. Mecanismos de control y relés.** Como con otros tipos de equipos, las corrientes armónicas pueden incrementar el calentamiento y las pérdidas en mecanismos de control, por lo tanto, reducen la capacidad de carga de la corriente de estado sólido y acortan la vida de algunos componentes aislantes.

Los fusibles sufren una reducción en su capacidad nominal debido al calentamiento generado por los armónicos durante la operación "normal".

No hay actualmente ninguna norma para los niveles de corrientes armónicas requeridas por los dispositivos de maniobra o fusibles para la interrupción o carga. Todas las pruebas son realizadas en rangos de frecuencias de alimentación.

El Comité de Relés para Sistemas de Potencia de la Sociedad

de Ingeniería de Potencia de la IEEE STD 519 - 1992 ha preparado un reporte titulado "Distorsiones de Onda Senoidal en Sistemas de Potencia y el Impacto en los Relés de Protección". Este informe cubre muchos tipos de distorsiones que pueden ocurrir en sistemas de potencia y discute su impacto en la operación de los relés de protección. El informe aclara la imposibilidad de definir completamente las respuestas del relé debido a la variedad de relés en uso y a las variaciones en la naturaleza de las distorsiones que pueden ocurrir, aun cuando la discusión se limita a los armónicos característicos de convertidores de seis o 12 pulsos. No solo pueden la magnitud armónica y el orden de armónico predominante variar, sino que también los ángulos de fase relativa pueden variar. Dos formas de onda con la misma magnitud armónica característica pueden diferenciarse sustancialmente si sus armónicos tienen diferentes ángulos de fase relativos a la fundamental. Un relé puede responder diferente a cada forma de onda aun cuando cada una contenga la misma magnitud armónica. El informe del Comité de Relés establece:

"Los relés de protección generalmente no responden a ningún parámetro identificable tal como valores rms de una cantidad primaria o la componente de frecuencia fundamental de esta cantidad. Como una consideración relacionada, el funcionamiento de un relé a un rango entradas de frecuencia simple no es una indicación de cuánto responderá este relé a una onda distorsionada conteniendo esas frecuencias. La superposición no es aplicada. Los relés de múltiples entradas pueden ser más impredecibles que los relés de una sola entrada en presencia de la onda distorsionada. La respuesta de los relés bajo condiciones de distorsión puede variar entre relés que tienen las mismas características de frecuencia fundamental, no solo entre diferentes fabricantes, sino también entre diferentes modelos de relés del mismo fabricante."

Un estudio canadiense ha establecido los efectos de los

armónicos en operaciones de relés tal como sigue:

- Los relés muestran una tendencia a operar más lentamente y/o con valores pico muy altos, mejor que operar más rápidamente y/o con valores pico muy bajos.
- Los relés de baja frecuencia estática son susceptibles a sustanciales cambios en las características de operación.
- En muchos casos, los cambios en las características son relativamente pequeños sobre el rango moderado de distorsiones esperadas durante la operación normal (p.e. un factor armónico de 5%).
- Para diferentes fabricantes, los relés de sobrecorriente o sobrevoltaje muestran diferentes cambios en las características de operación.
- Dependiendo del contenido armónico, la operación de torsión de los relés es a veces inversa.
- Los relés que emiten una impedancia balanceada muestran exceso y escasez, dependiendo de la distorsión.
- A veces los armónicos dañan la operación de alta velocidad de los relés diferenciales. Algunas pruebas demuestran que los relés pueden exhibir fijación completa.

En general, los niveles de armónicos requeridos para causar mal funcionamiento de los relés son mayores que los niveles recomendados. Los factores de distorsión entre 10 y 20% generalmente son requeridos para causar problemas en la operación del relé.

La primera o segunda generación de dispositivos de disparo de estado sólido en interruptores de circuitos de bajo voltaje responde a corrientes picos. Subsecuentemente después de 1978, estos dispositivos han estado respondiendo a valores de corrientes rms. Los modelos anteriores podían causar disparos molestos a las corrientes armónicas de carga de los circuitos. (6)

- Interferencia telefónica.** La presencia de voltajes o corrientes armónicas en los circuitos asociados con aparatos convertidores



de potencia pueden producir campos magnéticos y eléctricos que dañarán el funcionamiento satisfactorio de los sistemas de comunicación que, por virtud o por su proximidad y susceptibilidad, pueden ser distorsionados. Para un arreglo físico dado, es aparente que la distorsión es una función de la amplitud y la frecuencia de la componente distorsionada en el equipo de conversión.

El estudio de medidas para minimizar la interferencia que los sistemas de potencia pueden causar a los sistemas de comunicación es una propiedad sujeta a una coordinación inductiva, que es seguida activamente por el Subcomité Adjunto para el Desarrollo y la Investigación del Instituto Eléctrico Edison y el Sistema de Telefonía Bell. Subsecuentemente una fuente primaria de interferencia es la presencia de corrientes o voltajes armónicos en sistemas de potencia, una fuerte tarea del anterior subcomité adjunto que revisó los factores de peso a ser colocados en los componentes de frecuencia armónica para actualizarlos con el progreso del estado de los sistemas de comunicación de 1960, continuando con la introducción del conjunto de teléfonos tipo 500. Por subjetivas y objetivas pruebas de audición en un grupo de individuos, los pesos relativos fueron establecidos para varias frecuencias armónicas que indicaron perturbación con la comunicación a frecuencias de voz, ya que la inyección de una señal de frecuencia armónica en las redes de comunicación se producirá igual a aquella ocasionada por una señal de 1000 Hz de inyección similar. (6)

- **Factor de peso TIF.** El factor de peso TIF es una combinación de la característica de peso de mensaje C, que cuenta para el efecto de interferencia relativa con varias frecuencias en la banda de voz (incluyendo la respuesta del conjunto telefónico y del oído), y un condensador, que proporciona el peso y que es directamente proporcional a la frecuencia considerada para la función de acoplamiento

asumida. El TIF es una cantidad adimensional indicativa de la forma de onda y no de la amplitud y viene dada por: (6)

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum (I_f \cdot W_f)^2}}{X_T} \dots\dots\dots \text{Eq. 2.11}$$

O equivalentemente:

$$TIF = \sqrt{\sum \left[ \frac{(X_f \cdot W_f)}{X_t} \right]^2} \dots\dots\dots \text{Eq. 2.12}$$

Donde:

Xt = voltaje o corriente total rms.

Xf = frecuencia simple rms a corriente o voltaje de frecuencia f.

Wf = frecuencia simple TIF pesada a la frecuencia f.

La función pesada TIF, Wf, que refleja la presencia del mensaje C pesado y el acoplamiento (componente proporcional) normalizado a 1 kHz, viene dada por:

Donde:

5 = constante

Pf = mensaje C pesado a la frecuencia f.

f = frecuencia bajo consideración.

Como un ejemplo, el peso TIF a 1 kHz es 5000 porque la atenuación del mensaje C es la unidad, que es:

$$Wf = (5)(1)(1000) = 5000 \dots\dots\dots \text{Eq. 2.13}$$

En la práctica, la interferencia telefónica es a menudo expresada como el producto de la corriente y la TIF, p.e., el producto  $I \cdot T$ , donde  $I$  es la corriente rms en amperios y  $T$  es la TIF. Alternativamente, es algunas veces expresada como el producto del voltaje y el peso TIF, donde el voltaje está dado en kV rms, p.e., el producto  $kV \cdot T$ . Los valores de frecuencia simple TIF son presentados en la Tabla 5. (6)

**Tabla 5. Valores TIF de frecuencia simple para 1960**

FREQ	TIF	FREQ	TIF	FREQ	TIF	FREQ	TIF
60	0.5	1020	5100	1860	7820	3000	9670
180	30	1080	5400	1980	8330	3180	8740
300	225	1140	5630	2100	8830	3300	8090
360	400	1260	6050	2160	9080	3540	6730
420	650	1380	6370	2220	9330	3660	6130
540	1320	1440	6560	2340	9840	3900	4400
660	2260	1500	6680	2460	10340	4020	3700
720	2760	1620	6970	2580	10600	4260	2750
780	3360	1740	7320	2820	10210	4380	2190
900	4350	1800	7570	2940	9820	5000	840
1000	5000						

Fuente: IEEE std 519 – 1992

### 2.2.10. Métodos de reducir la interferencia

Cuando el equipo de conversión de potencia está directamente conectado a un sistema de la compañía eléctrica, la mayoría de la interferencia será el resultado de perturbaciones de corrientes y

voltajes armónicos que han sido colocados en la red por el convertidor. Esto es debido a la proximidad y a la mayor exposición que los circuitos de comunicación tendrán en esta red. Otras exposiciones para la interferencia con el convertidor están contenidas más estrechamente dentro del complejo industrial, y sus efectos de interferencia pueden sostenerse a niveles despreciables por la colocación conveniente y protegida de la instalación eléctrica. Las perturbaciones en los sistemas de comunicación pueden reducirse por las siguientes medidas. (6)

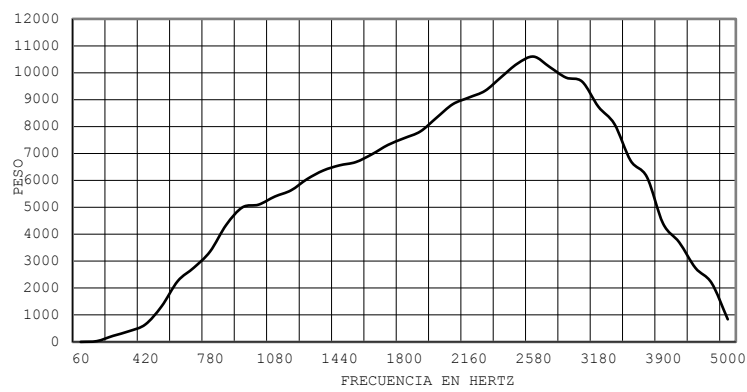


Gráfico 15. Valores de Peso TIF en 1960

Fuente: IEEE std 519 – 1992

### 2.2.11. Multifaseado del equipo de conversión

Incrementando el número de fases o número de pulsos del sistema de conversión generalmente se reducirán ciertos componentes armónicos en el primario del convertidor. (6)

### 2.2.12. Corrientes de retorno residuales o por el neutro

Los circuitos telefónicos son particularmente susceptibles a las corrientes de retorno armónicas. Debe ejercerse especial cuidado llevando estas a un mínimo absoluto. Con tal de que ambos conductores de un circuito telefónico tengan igual exposición a un circuito de potencia trifásico balanceado, como el caso de pares

gemelos, la inducción de voltajes y corrientes armónicas se cancelará. (6)

#### **2.2.13. Efectos de conmutación**

La presencia de reactancias en la fuente y reactancia (subestación alimentadora) de los transformadores de los convertidores pueden contribuir a la reactancia de conmutación, causando el producto  $I \cdot T$  y  $kV \cdot T$  en los terminales de línea del convertidor, para aumentar rápidamente con el atraso del ángulo de fase. Para minimizar la influencia inductiva, es deseable, donde sea factible, mantener el ángulo de fase de conmutación del convertidor atrasado a un valor tan pequeño como sea posible. (6)

#### **2.2.14. Filtrado**

La influencia de corrientes y voltajes en el sistema de la subestación alimentadora causados por componentes armónicas en el convertidor puede ser reducida por una opción razonable de filtros reactivos en serie y paralelo colocados en la interfaz que une a ambos sistemas.

Un extremo cuidado y precaución deben ser tomados en cuenta en la aplicación de tales filtros para evitar posibles condiciones de resonancia que traigan como resultado armónico inesperados que puedan aparecer en algún futuro en el sistema de la subestación alimentadora, causando daños catastróficos. (6)

#### **2.2.15. Convertidores de potencia estática**

Los dispositivos convertidores de potencia estática generalmente son los responsables de que ellos generen armónicos como un requisito conveniente de su función. En algunas situaciones, los convertidores pueden ser afectados por armónicos, por el mismo generador o producidos (más frecuentemente) por otras fuentes de armónicos. A menudo, la otra fuente de armónicos es un convertidor similar o idéntico que está en paralelo con la fuente AC.

Los convertidores existen en un número de formas funcionales y topológicas. La definición del convertidor tal como es utilizado en

este documento. Algunas de estas formas son relativamente insensibles a los armónicos. El diodo rectificador normalmente no es afectado. Sin embargo, si se usan condensadores con voltaje compartido de la red (p.e., diodos en serie y un rectificador de alto voltaje), aquellos condensadores pueden estar sujetos a esfuerzos térmicos mayores de aquellos contemplados en el diseño debido a las impresionantes altas corrientes ocasionadas por los armónicos en la fuente AC. Estos armónicos también serán pasados a la carga del rectificador, pudiendo dañar o perturbar el equipo de proceso lateral DC.

La solución al problema de armónicos es eliminar los síntomas y no el origen, los aparatos los aparatos que crean los armónicos generalmente constituyen una pequeña parte de la carga, eliminar su uso no es posible, modificar esos equipos para que no causen armónicos tampoco es factible. Lo que nos queda es reducir los síntomas ya sea incrementando tolerancia del equipo y del sistema a los armónicos o modificar los circuitos y los sistemas para reducir su impacto, atrapar, o bloquear los armónicos con filtros. Por supuesto hay excepciones. En casos de sobrecarga, daño de equipo o diseño inapropiado, estas causas que generan armónicos pueden ser corregidas, similarmente un aparato o equipo particular que produce un alto nivel de armónicos debe ser modificado o reemplazado. (6)

## **2.2.16. Compensación de potencia reactiva**

### **a. Conceptos básicos**

Numerosos consumidores eléctricos toman la red, no solo potencia activa aprovechable, sino también potencia reactiva que, por ejemplo, en los motores y transformadores provee magnetización, potencia reactiva de conmutación y control.

El transporte de la potencia reactiva es antieconómico, porque no es posible convertirla en otra clase de energía.

La relación entre potencia activa **P** y potencia aparente **S** se representa mediante el coseno del ángulo de **φ**, (denominado factor de potencia)  $\cos\phi = \frac{P}{S}$ , el ángulo  $\phi$  es idéntico al desfase que se tiene entre los vectores de la corriente y la tensión.

La potencia reactiva  $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$  (en kvar).

Un condensador de igual potencia  $Q_c$  compensaría esta potencia reactiva y llevaría el factor de potencia ( $\cos \phi$ ) a 1.

En la práctica no es usual llevar el  $\cos\phi$  a 1 mediante la conexión de condensadores, porque cuando se producen fluctuaciones de carga y debido a la inercia de reacción. (7)

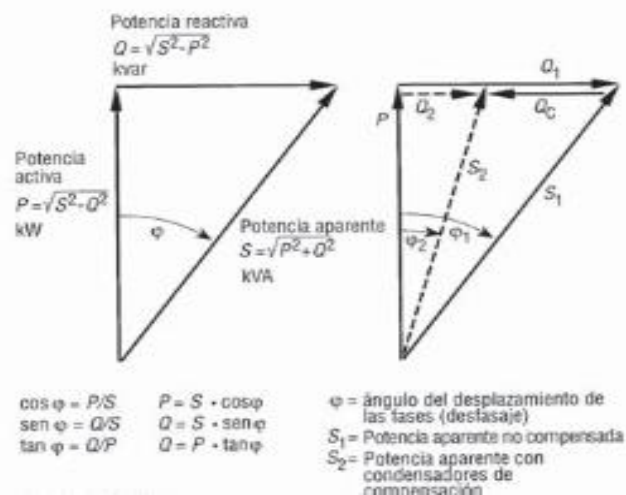


Gráfico 16. Potencia reactiva

Fuente: Manual Baja tensión Siemens

Factor de potencia como relación de las potencias activa y aparente del regulador se podría tener una sobre compensación. Por lo general, las empresas prestatarias del servicio eléctrico indican a qué valor debe ser llevado el  $\cos \phi$ .

La potencia necesaria de los condensadores  $Q_c$  se puede calcular en

función de los valores de la tangente con la siguiente formula. (7)

$$Q_C = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \text{ Eq. } \dots\dots\dots (2.14)$$

Para la compensación de un motor de corriente continua con rectificador, con un par de motor constante se tiene lo siguiente.

$$Q_C = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{1}{n} \cdot P_{dn} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \dots\dots\dots (2.15)$$

### 2.2.17. Tipos de compensación

En redes eléctricas en las cuales se conectan y se desconectan consumidores inductivos (motores), el factor de potencia ( $\cos \varphi$ ) varía con cada maniobra. Las empresas prestatarias del servicio eléctrico exigen a sus clientes que la relación de potencia activa P y potencia aparente S consumidas no supere el valor preestablecido.

#### **Elección del tipo de compensación más conveniente**

Para decidir si al compensar a cada uno de los consumidores es más conveniente hacerlo con unidades fijas de condensadores o con un equipamiento centralizado regulable, deben tenerse en cuenta tanto consideraciones económicas como de la técnica de instalaciones. Las unidades reguladoras para la compensación centralizada tienen un costo mayor por unidad de potencia. Pero se debe considerar que en la mayoría de las instalaciones los consumidores no se conectan todos al mismo tiempo y, por lo tanto, con frecuencia es suficiente si se instala una potencia capacitiva de menor valor.

- **Compensación individual**

Los condensadores se conectan directamente.

- **Compensación por grupos**



El equipamiento se asigna a un grupo de consumidores.

- **Compensación centralizada**

La potencia reactiva suministrada por los condensadores se ajusta.

Por pasos al requerimiento de potencia reactiva de los consumidores Existen varias posibilidades para determinar la potencia de compensación  $Q_c$  de los condensadores. Una posibilidad es determinar la potencia reactiva capacitiva sobre la base de los valores de las correspondientes tangentes de los ángulos de desfasaje. (7)

### **Compensación centralizada con regulación automática**

En instalaciones donde diferentes consumidores se conectan y desconectan permanentemente durante el servicio el  $\cos\phi$  se modifica continuamente. Para estas instalaciones se recomienda el empleo de un equipo de compensación centralizado, que conecta y desconecta condensadores de acuerdo a los estados instantáneos de la red. Según las condiciones de servicio de la instalación; también, es factible idear una instalación mixta, donde los consumidores grandes con tiempo de servicios largos se compensan con una batería fija individual, el resto sería con una compensación centralizada regulable. (7)

### **Aumento de tensión causado por los condensadores**

Al circular a través de una reactancia inductiva circula una corriente capacitiva, la tensión a la salida del circuito aumenta con respecto de la tensión de entrada, en un valor igual a la caída de tensión que se produce en la inductancia.

En el día a día se dan casos parecidos, cuando se conecta un banco de condensadores al secundario de un transformador, la carga inductiva se reduce y los condensadores permanecen conectados. En ese caso, en función de la relación entre la potencia

del banco de condensadores y el transformador, se producirán sobretensiones que se puedan calcular con suficiente exactitud, en porcentaje, con la formula siguiente. (11)

$$\Delta U = u_{kr} \cdot \frac{Q}{S_r} (En\%) \dots\dots\dots (2.16)$$

$\Delta U$  Aumento de tensión

$U_{kr}$  Tensión de cortocircuito asignada del transformador, en %

$Q$  potencia del banco de condensadores en kvar

$S_r$  Potencia aparente asignada del transformador en KVA

En el día a día, ya casi no se presentan sobretensiones considerables causadas por el uso de condensadores, porque la potencia reactiva casi siempre es regulada de manera automática.

Ejemplo.

$$\Delta U = 6 \cdot \frac{200}{630} = 1,9\%$$

Transformador: potencia aparente asignada 630 KVA

Tensión de cortocircuito  $u_{kr} = 6\%$

Carga capacitiva: 200kvar, ..... Eq. 2.17

Esto significa, que la tensión  $U_2$  aumenta con respecto a la tensión en vacío  $U_1$  en un 1,9%. (7)

### **Efectos de resonancia cuando se emplean condensadores**

Con frecuencia se realizan compensaciones de energía reactiva en redes industriales con rectificadores; sin embargo, cuando se emplean condensadores se deben tomar ciertas precauciones porque pueden presentarse resonancias, dado que en la parte de baja tensión, los condensadores conectados a la red forman con la inductancia del

transformador de alimentación y el resto de las inductancias de la red, un circuito resonante.

Cuando la frecuencia de resonancia propia de este circuito oscilante coincide con la frecuencia de una de las armónicas, se excitará el circuito resonante. Se producirán entonces corrientes elevadas que pueden sobrecargar la instalación y hacer que actúen los dispositivos de protección de la misma. (7)

## Fundamentos de la teoría armónica

El término "armónicos" se originó en el campo de la acústica, donde se relacionó a la vibración de una cuerda o una columna de aire a una frecuencia que es un múltiplo de la Frecuencia Base. Un componente armónico en un sistema de alimentación de CA se define como:

- Sinusoidal de una forma de onda periódica que tiene una frecuencia igual a múltiplo de la frecuencia fundamental del sistema.
- Los armónicos en formas de onda de tensión o corriente pueden ser concebidos como perfectamente componentes sinusoidales de frecuencias múltiples de la frecuencia.

$$F_h = (h) \text{ (Frecuencia fundamental)}$$

Donde h es un número entero.

Por ejemplo, un quinto armónico produciría una componente armónica

$$F_h = (5) \times (60) = 300 \text{ Hz y } F_h = 5 \times (50) = 250 \text{ Hz}$$

En sistemas de 60 y 50 Hz, respectivamente.

En el gráfico 18. Muestra una forma de onda ideal de 60 Hz con un valor máximo de alrededor de 100<sup>a</sup>, que se puede tomar como uno por unidad. También, se presentan formas de onda de amplitudes (1/7), (1/5) y (1/3) por unidad y las frecuencias siete, cinco, tres veces la fundamental frecuencia respectivamente.

Este comportamiento que muestra los componentes armónicos de amplitud decreciente a menudo siguiendo una ley inversa con orden armónico es típico En sistemas de potencia. (8)

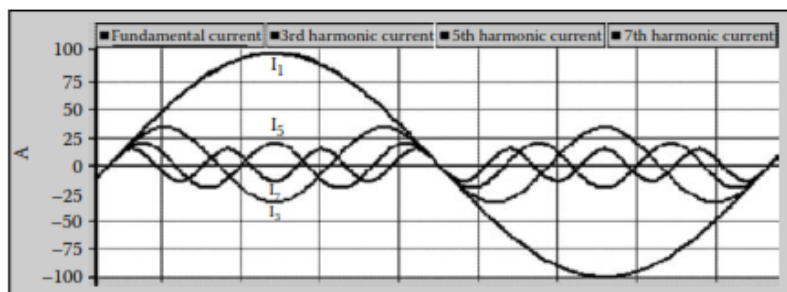


Gráfico 17. Forma de onda sinusoidal de 60 Hz y algunos armónicos  
Fuente: *Harmonics and power systems*

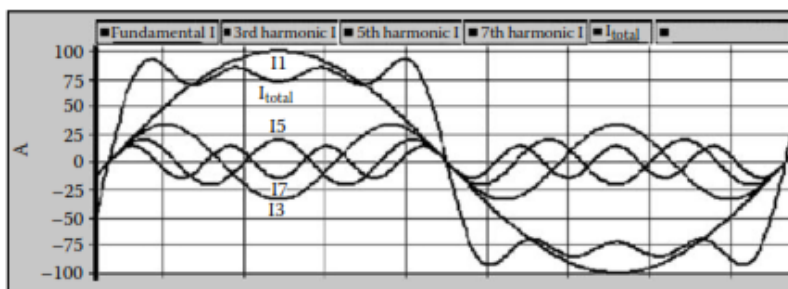


Gráfico 18. Forma de onda sinusoidal distorsionada por Tercer quinto y séptimo armónicos.  
Fuente: *Harmonics and power systems*

Estas formas de onda pueden expresarse como

$$I_1 = I_{m1} \sin \omega t \dots \dots \dots (1.2)$$

$$I_3 = I_{m3} \sin (3\omega t - \delta_3) \dots \dots \dots (1.3)$$

$$I_5 = I_{m5} \sin (5\omega t - \delta_5) \dots \dots \dots (1.4)$$

$$I_7 = I_{m7} \sin (7\omega t - \delta_7) \dots \dots \dots (1.5)$$

Donde  $I_{mh}$  es el valor RMS máximo de la corriente armónica  $h$ .

Si sólo tomamos el primero de tres componentes armónicos, una forma de onda distorsionada de corriente  $A$ , en terminales de un convertidor de seis impulsos haría mira. Ahí habría armónicos adicionales, eso podría imponer una distorsión adicional.

La forma de onda distorsionada resultante puede expresarse así:

$$Im_1 \sin(3\omega t - \delta_3) + Im_5 \sin(5\omega t - \delta_5) + Im_7 \sin(7\omega t - \delta_7) + \dots \quad (1.6)$$

De esta manera, una suma de formas de onda perfectamente sinusoidales puede dar lugar a una forma de onda distorsionada. Por el contrario, una forma de onda distorsionada puede ser representada como la superposición de una forma de onda de frecuencia fundamental con otras formas de onda de frecuencias armónicas y amplitudes. (8)

### Capacidad de un transformador

La capacidad nominal de un transformador representa la potencia máxima que este puede transformar en forma permanente. Se mide en MVA, y está determinada por el calentamiento admisible en el aislamiento, en la tabla N° 6 se resumen las clases de aislamiento usuales y las temperaturas que cada uno admite. (9)

**Tabla 6. Temperaturas admisibles**

	Clase de aislamiento					
	A	A <sub>0</sub>	E	B	F	H
	Orgánico con barniz orgánico	Orgánico en aceite	Papel con esmalte sintético	Inorgánico con barniz sintético	Inorgánico con silicona modificada	Inorgánico con silicona pura
Enrollados	60	65	75	80	100	135
Puntos alta Temp.	105	115	120	130	155	180
Núcleo	La temperatura no debe dañar materiales adyacentes					

Fuente: Los sistemas eléctricos de potencia

### Regulación de tensiones y control de la potencia reactiva

La tensión existente en un punto cualquiera de una red eléctrica afecta directamente a los equipos allí conectados tanto en cuanto a su aislamiento como a su correcta operación. En vista de ello, se han normalizado los niveles de tensión posibles a ocupar (tensiones nominales o de servicio), en algunos pocos valores internacionalmente aceptados. Con ello se consigue una mayor seguridad y calidad de

servicio, así como facilitar y abaratar la fabricación de los diversos equipos eléctricos

### **Compensadores estáticos de reactivos (CER)**

También, conocidos por sus siglas en Ingles (SVC = static Var compensador, o SVS = static V Ar system), consisten en bancos de condensadores estáticos (conectables o no mediante tiristores), en paralelo con un reactor controlado por tiristores. Los tiristores permiten controlar la magnitud de la potencia reactiva consumida en el reactor y con ello hacer que el conjunto sea capacitivo o inductivo permitiendo así realizar una compensación de reactivos completa y rápida (menos de medio ciclo por fase). Inclusive una parte de los condensadores debe cumplir el papel de filtro para las corrientes armónicas generadas por la forma de operar del reactor.

El conjunto se conecta al sistema de transmisión mediante un transformador. Cuyo secundario va normalmente en delta, para eliminar las terceras armónicas. (9)

Tanto el reactor como los condensadores van conectados en delta.

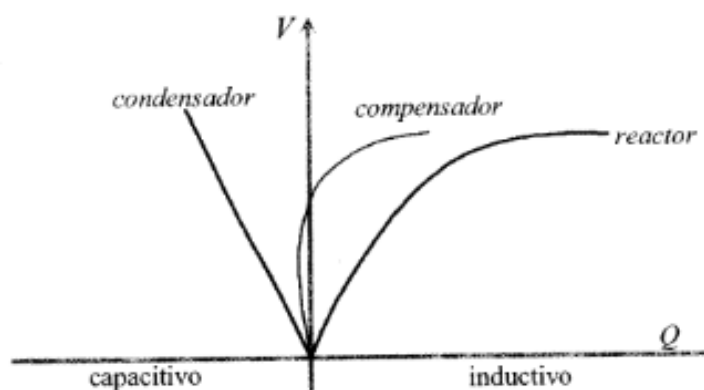


Gráfico 19. Operación de un CER

Fuente: Los sistemas eléctricos de potencia

### **2.3. Definición de términos básicos**

**COES.** - El Comité de Operación Económica del Sistema.

**Demanda.** - Demanda de potencia y/o energía eléctrica.

**Distribuidor.** - Titular de una concesión de distribución.

**Generador.** - Titular de una concesión o autorización de generación. En la generación se incluye la cogeneración y la generación distribuida.

**Grandes usuarios.** - Usuarios libres con una potencia contratada igual o superior a 10MW, o agrupaciones de usuarios libres cuya potencia contratada total sume por lo menos 10MW.

**Ley de Concesiones Eléctricas (LCE).** - Decreto Ley N° 25844, promulgado el 6 de noviembre de 1992 y sus modificatorias.

**Refuerzos.** - Son las instalaciones realizadas por un concesionario sobre redes y subestaciones en operación, destinadas a mejorar el sistema de transmisión y la calidad del servicio para alcanzar y preservar los estándares de calidad establecidos en las normas aplicables, así como aquellas necesarias para permitir el libre acceso a las redes y las interconexiones. No constituyen refuerzos aquellas instalaciones que se carguen contablemente como gasto de acuerdo a las normas aplicables o que superen el monto definido en el Reglamento.

**Transferencia.** - Diferencia entre la cantidad inyectada por un agente y la cantidad retirada por este, según corresponda. La transferencia puede ser de potencia y/o de energía.

**Transmisor.** - Titular de una concesión de transmisión eléctrica.

**Armónico.** - Una componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental.

**Armónico característico.** - Aquellos armónicos producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de la operación normal. En un convertidor de seis pulsos, los armónicos característicos son los armónicos impares diferentes a los múltiplos de tres, por ejemplo, los 5th, 7th, 11th, 13th.

**Armónico no característico.** - Armónicos que no son producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de la operación normal. Estos pueden ser el resultado de frecuencias oscilatorias; una demodulación

de armónicos característicos y la fundamental; o un desbalance en los sistemas de potencia AC, el ángulo de retardo asimétrico, o el funcionamiento del ciclo convertidor.

**Carga no lineal.** - Una carga que dibuja una onda de corriente no sinusoidal cuando es proporcionada por una fuente de voltaje sinusoidal.

**Conmutación.** - Transferencia de corriente unidireccional entre los elementos del circuito convertidor del tiristor (o diodo) que conducen la sucesión.

**Convertidor.** - Un dispositivo que cambia la energía eléctrica de una forma a otra. Un convertidor semiconductor es un convertidor que usa semiconductores como elementos activos en el proceso de conversión.

**Desviación de una onda seno.** - Un sencillo número de mediciones de la distorsión de una sinusoidal debido a componentes armónicos. Esto es igual a la relación del valor absoluto de la diferencia máxima entre la onda distorsionada y el valor pico de la fundamental.

**Desviación de una onda seno, teóricamente máxima.** - Para una onda no sinusoidal, es la relación de la suma aritmética de las amplitudes (rms) de todos los armónicos en la onda a la amplitud (rms) de la fundamental.

**Distorsión armónica total (THD).** - Este término ha entrado en el uso común para definir el “factor de distorsión de tensión o corriente”.

**Distorsión demandada total (TDD).** - La suma de la raíz cuadrada total de las distorsiones de corriente armónica en porcentaje de la máxima corriente de carga demandada (15 o 30 demanda min).

**Efectividad del filtro (Paralelo).**- Es definido por los siguientes dos términos:

$p_f$  = la relación de la impedancia que determina la corriente por unidad que fluirá dentro del filtro paralelo.

$p_s$  = la relación de la impedancia que determina la corriente por unidad que fluirá dentro de la fuente de potencia.



$p_f$  = puede acercarse a la unidad y  $p_s$  puede ser muy pequeño a la frecuencia afinada.

**Factor armónico.** - La relación del valor de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (rss) de todos los armónicos al valor efectivo (rms) de la fundamental.

**Factor de calidad.** - Dos veces  $\pi$  la relación de la máxima energía guardada a la energía disipada por ciclo a una determinada frecuencia. Una definición equivalente aproximada es que la Q es la relación de la frecuencia de resonancia al ancho de banda entre aquellas frecuencias sobre los lados opuestos de la frecuencia de resonancia, donde la respuesta de la estructura resonante difiere en 3dB de la resonancia.

**Factor de distorsión (Factor Armónico).** - La relación de la raíz cuadrada de los armónicos contenidos al valor efectivo de la cantidad fundamental, expresado en porcentaje de la fundamental.

**Factor de potencia, desplazamiento.** - La componente de desplazamiento del factor de potencia; la relación de la potencia activa de la onda fundamental, en vatios, a la potencia aparente de la onda fundamental, en voltamperios (incluyendo la corriente de excitación del transformador convertidor del tiristor).

**Factor de potencia, total.** - La relación de la potencia total de entrada, en vatios, a la entrada en voltamperios total del convertidor.

**Factor proporcional de impedancia.** - La relación de la impedancia de la fuente, en el punto del sistema bajo consideración, a la impedancia total equivalente desde la fuente a los elementos del circuito convertidor que conmutan simultáneamente.

**Filtro.** - Un término genérico usado para definir aquellos tipos de equipos cuyo propósito es reducir el flujo de corriente o voltaje armónico en o ó aplicado a las partes específicas de un sistema de potencia eléctrica, o en ambos.

**Filtro ajustado.** - Un filtro que generalmente consiste de combinaciones de condensadores, inductores, y resistores que se han seleccionado de tal

manera que presenten una impedancia mínima (máxima) relativa a una o más frecuencias específicas. Para un filtro paralelo (serie), la impedancia es un mínimo (máximo). Los filtros ajustados generalmente tienen una relativamente alta  $Q$  ( $X/R$ ).

**Filtro, amortiguado.** - Un filtro que generalmente consiste de combinaciones de condensadores, inductores, y resistores que han sido seleccionados de tal manera que se presente una impedancia baja en un ancho rango de frecuencias. El filtro usualmente tiene una relatividad baja  $Q$  ( $X/R$ ).

**Filtro paralelo.** - Un tipo de filtro que reduce los armónicos proporcionando un camino de baja impedancia para desviar los armónicos lejos de la fuente del sistema a ser protegido.

**Filtro Pasa Alto.** - Un filtro que tiene una banda de transmisión sencilla extendida desde alguna frecuencia de corte, diferente de cero, hasta la frecuencia infinita.

**Filtro Serie.** - Un tipo de filtro que reduce los armónicos colocando una impedancia alta en serie entre la fuente armónica y el sistema a ser protegido.

**Prospectiva.** - Palabra prospectiva es un adjetivo que menciona aquello vinculado con el futuro. Como sustantivo, este término que tiene su origen en el latín *prospicere* se refiere a las investigaciones y exploraciones que se llevan a cabo con la intención de anticipar lo que está por venir en una cierta materia.

## **CAPÍTULO III**

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.2. Método y alcance de la investigación**

##### **3.1.1. Método**

El método empleado es de tipo inductivo, ya que se parten de hechos particulares para llegar a la conclusión por partir de premisas, teorías, conceptos, leyes y resultados en la aseveración de los resultados obtenidos de la investigación en función al análisis de potencia por incremento en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín.

##### **3.1.2. Alcance de la investigación**

El alcance de la investigación fue experimental, por su naturaleza de intervención de causa efecto de las variables en relación al análisis de flujo potencia por incremento en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín. (10)

#### **3.2. Diseño de la investigación**

El diseño de la investigación fue de tipo experimental, porque se manipula a la variable independiente para medir la variable dependiente, por la aplicación de la pre test y post test, y por la no realización de la aleatorización de la muestra, respecto al análisis de flujo de potencia por incremento en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín. (10)

### 3.3. Población y muestra

#### 3.3.1. Población

La población de la investigación fue un transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera UNACEM - Condorcocha.

#### 3.3.2. Muestra

La muestra de la investigación fue un transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera UNACEM – Condorcocha.

### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Fuentes	Técnicas	Instrumentos
Primarias	Observación	Guía de observación
Secundarias	Análisis documental	Libros, tesis, manuales e internet.

#### Fuentes primarias

La técnica de la observación fue empleada; a través, de una guía de observación para el análisis, interpretación y conclusión de los resultados respecto al análisis de flujo de potencia por incremento en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera UNACEM, Condorcocha.

#### Fuentes secundarias

Las fuentes secundarias utilizadas son:

- **Libros y manuales:** se utilizaron con la finalidad de explicar el conocimiento teórico del problema investigación.
- **Tesis:** se usaron como antecedentes para analizar el estado de la

problemática de investigación y así mismo como un modelo metodológico.

- **Internet:** Se usó como fuentes de información: artículos científicos, fuentes bibliográficas y manuales.

## **CAPÍTULO IV**

### **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información**

##### **4.1.1. Pre observación**

###### **Evaluación del nivel de armónicas con respecto a la NTCSE**

- Los niveles de distorsión armónica total (THD) encontrados en el sistema eléctrico se encuentran dentro de lo exigido por la NTCSE para todos los circuitos evaluados durante el 100% del periodo de medición.
- Las armónicas que escapan de los niveles permitidos y que, a su vez, como se verá más adelante, generan la mayor distorsión por orden de armónica, son las armónicas de orden 23 y 25 presentes en la barra 403 correspondiente al secundario del transformador T4.
- En el análisis a realizarse en el flujo de potencia, se podrá observar la influencia de estas armónicas en las próximas ampliaciones de la planta.
- A continuación, se muestra una tabla en la que se resumen los niveles de THD encontrados en cada uno de los circuitos medidos y el límite correspondiente según la NTCSE.

**Tabla 7. THD**

NOMBRE DEL CIRCUITO	THD		LIMITES NTCSE
	MINIMO	MAXIMO	THD
Secundario del transformador T4 Celda +B70 - 6.6 Kv	0.57	3.22	8
Celda de Enlace Provisional a Horno 4 Celda +B67 - 6.6 kV	0.93	2.9	8
Motor 2000 kW - Molino IV Celda +B73 - 6.6 kV	1.19	3.36	8
S.E. 7 - Transformador 2000 kVA Celda +B72 - 6,6 kV	0.85	2.01	8
Ventilador SEPOL del Molino 6 Celda +B75 - 6.6 kV	0.81	3.07	8

**Fuente:** elaboración propia

#### **Evaluación de armónicas con respecto al STD. IEEE 519**

- Los niveles de distorsión armónica total (THD) de tensión encontrados en el sistema eléctrico se encuentran dentro de lo recomendado por el estándar para todos los circuitos evaluados durante el 100% del periodo de medición.
- En el caso de las armónicas de corriente y los niveles de TDD, sus cumplimientos con lo recomendado por el estándar son variables, siendo en muchos casos las armónicas de mayor orden las que escapan de lo permitido debido a que sus límites son mucho más exigentes.
- Nuevamente se puede comprobar que es el circuito del alimentador correspondiente a la celda +B73, el mayor generador de armónicos que se presenta en el sistema. Este dato es de suma importancia para el análisis que se realizará en el flujo de potencia, ya que se podrá observar la influencia de esta fuente en las próximas ampliaciones.

- A continuación, se muestra una tabla en la que se resumen los niveles de THD y TDD encontrados en cada uno de los circuitos medidos y el límite correspondiente según el estándar IEEE-519.

**Tabla 8. Niveles de THD y TDD**

NOMBRE DEL CIRCUITO	THD		TDD		LIMITES IEEE	
	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO	THD	TDD
Secundario del transformador T4 Celda +B70 - 6.6 kV	0.57	3.22	1.93	4.18	5	5
Celda de Enlace Provisional a Horno 4 Celda +B67 - 6.6 kV	0.93	2.9	3.36	4.86	5	5
Motor 2000 kW - Molino IV Celda +B73 - 6.6 kV	1.19	3.36	6.52	24.98	5	5
S.E. 7 - Transformador 2000 kVA Celda +B72 - 6,6 kV	0.85	2.01	3.69	4.99	5	5
Ventilador SEPOL del Molino 6 Celda +B75 - 6.6 kV	0.81	3.07	0.02	2.09	5	5

**Fuente:** elaboración propia

#### **Determinación de las fuentes armónicas.**

- Para realizar el análisis de direccionalidad de armónicas y poder determinar las fuentes armónicas presentes en el sistema, se han empleado los métodos de potencia armónica y de correlación.
- Este análisis dio como resultado que las fuentes armónicas se concentran mayormente en la barra 403 correspondiente al secundario del transformador T4 con un total de 17 fuentes armónicas.
- Las fuentes armónicas más apreciables son la 23va y 25va armónica de corriente del alimentador de la celda +B73 ya que representan aproximadamente el 9% y 10% del valor de corriente rms.
- El detalle de las fuentes armónicas presentes en el sistema se puede observar en la siguiente tabla:



**Tabla 9. Fuentes armónicas**

Circuito	Barra / Celda	Tensión	Existencia de Fuente	Orden Armónico	Módulo Fase R	Módulo Fase S	Módulo Fase T
Secundario del Transformador T4	.B67	6.6 kV	Si	21	0.38 A	0.25 A	0.33 A
				23	3.72 A	3.44 A	3.25 A
				25	6.05 A	6.09 A	6.60 A
				27	0.58 A	0.64 A	0.76 A
				29	0.62 A	0.62 A	0.57 A
Secundario del Transformador T4	.B73	6.6 kV	Si	11	3.31 A	3.26 A	3.65 A
				13	2.85 A	2.89 A	2.85 A
				21	0.50 A	0.37 A	0.43 A
				23	11.41 A	11.04 A	10.66 A
				25	14.89 A	15.91 A	16.66 A
				27	1.13 A	1.16 A	1.47 A
				29	1.50 A	1.38 A	1.35 A
				37	0.80 A	0.99 A	0.98 A
Secundario del Transformador T4	.B72	6.6 kV	Si	11	1.25 A	-	1.15 A
Secundario del Transformador T4	.B75	6.6 kV	Si	23	0.015 A	0.014 A	0.012 A
				25	0.015 A	0.015 A	0.015 A
				29	0.005 A	0.005 A	0.005 A
Secundario del Transformador T4	.B74A	0.44 kV	Si	11	14.95 A	19.38 A	12.46 A

**Fuente:** elaboración propia

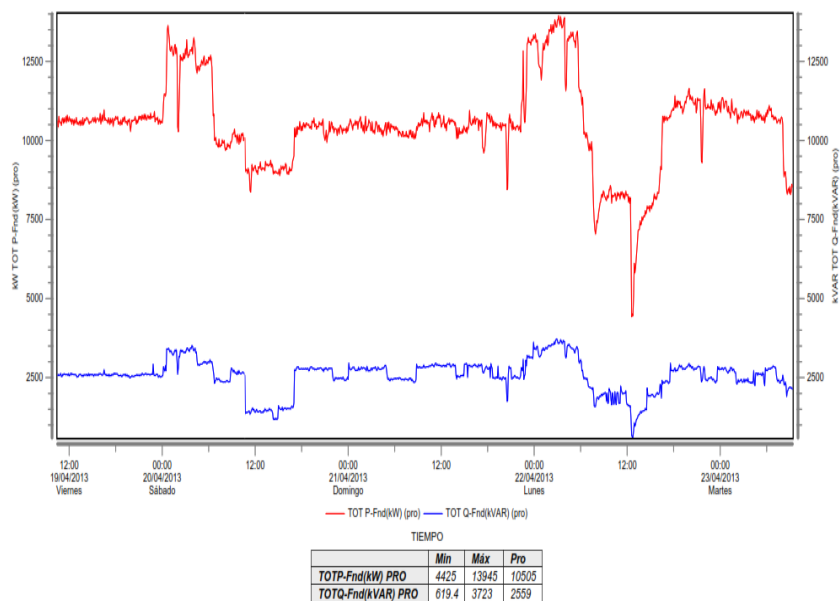


Gráfico 20. Diagrama de potencia activa (kW) y de potencia reactiva (kVAr)

Fuente: Elaboración propia

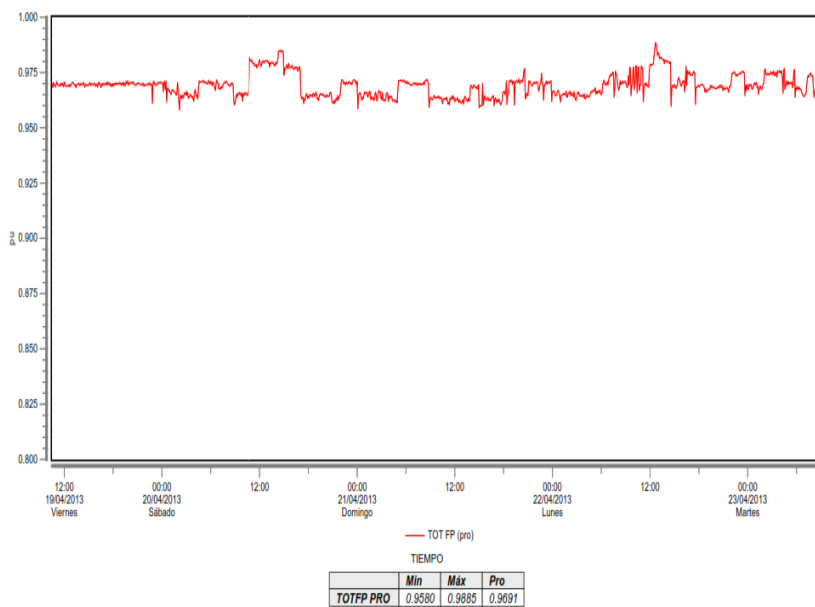


Gráfico 21. Diagrama de factor de potencia (p.u.)

Fuente: Elaboración propia

### **Secundario del Transformador T4 – Celda +B70 en 6.6kV**

- Los niveles de THD de tensión obtenidos durante el periodo de medición se encuentran entre el 0.57% y el 3.37%, cumpliendo con lo recomendado por el estándar durante el 100% del tiempo de medida. Por tal motivo los niveles de THD se encuentran dentro de lo recomendado por el estándar.
- Adicionalmente se observa que los niveles de distorsión individual (HD) para las primeras 49 armónicas de tensión, se encuentran dentro de lo recomendado por el estándar durante el 100% del periodo de medición.
- En lo que respecta al TDD, los niveles obtenidos durante el periodo de medición se encuentran entre el 1.93% y el 4.18%, cumpliendo con lo recomendado por el estándar durante el 100% del tiempo de medida. Por tal motivo los niveles de TDD se encuentran dentro de lo recomendado por el estándar.
- Adicionalmente se observa que los niveles de distorsión individual (HD) para las primeras 49 armónicas de corriente, se encuentran dentro de lo recomendado por el estándar salvo en los casos de la 23va y 25va armónica que superan el límite recomendado hasta en un 15% y 46% respectivamente

### **Celda de enlace provisional a Horno IV –Celda +B67 en 6.6kV**

- Los niveles de TDD, obtenidos durante el periodo de medición se encuentran entre el 3.36% y el 4.86%, cumpliendo con lo recomendado por el estándar durante el 100% del tiempo de medida. Por tal motivo los niveles de TDD se encuentran dentro de lo recomendado por el estándar.
- Adicionalmente se observa que los niveles de distorsión individual (HD) para las primeras 49 armónicas de corriente, se encuentran dentro de lo recomendado por el estándar salvo en los casos de la 5ta, 23va y 25va armónica que superan el límite recomendado hasta en un 36%, 19% y 48% respectivamente.

### **Motor de 2000kW – Molino IV – Celda +B73 en 6.6kV**

- Los niveles de TDD, obtenidos durante el periodo de medición se encuentran entre el 6.52% y el 24.98%, cumpliendo con lo recomendado por el estándar durante el 71.33% del tiempo de medida en promedio. Por tal motivo los niveles de TDD se encuentran fuera de lo recomendado por el estándar.
- Se observa que los niveles de distorsión individual (THD) para las primeras 49 armónicas de corriente, se encuentran dentro de lo recomendado por el estándar salvo en los casos de la 23va, 25va, 27va, 29va, 35va y 37va armónica que se encuentran fuera de lo recomendado por el estándar incluso hasta en un 100% del tiempo de medición como es el caso de la 23va y 25va armónica.

### **S.E.7 – Transformador de 2000kVA – Celda +B72 en 6.6kV**

- Los niveles de TDD, obtenidos durante el periodo de medición se encuentran entre el 0.03% y el 2.09%, cumpliendo con lo recomendado por el estándar durante el 100% del tiempo de medida en promedio. Por tal motivo los niveles de TDD se encuentran fuera de lo recomendado por el estándar.
- Adicionalmente se observa que los niveles de distorsión individual (HD) para las primeras 49 armónicas de corriente, se encuentran dentro de lo recomendado por el estándar durante el 100% del periodo de medición.

### **Celda +B75 Ventilador SEPOL de Molino 6 en 6.6kV**

- Los niveles de TDD, obtenidos durante el periodo de medición se encuentran entre el 3.80% y el 4.99%, cumpliendo con lo recomendado por el estándar durante el 100% del tiempo de medida en promedio. Por tal motivo los niveles de TDD se encuentran fuera de lo recomendado por el estándar.
- Adicionalmente se observa que los niveles de distorsión individual (HD) para las primeras 49 armónicas de corriente, se encuentran

dentro de lo recomendado por el estándar durante el 100% del periodo de medición.

## **Conclusiones**

De la evaluación respecto a la NTCSE

- Los niveles de armónicas de tensión se encuentran dentro de los rangos establecidos por la norma.
- Para llegar a esta conclusión es necesario tener en consideración que la evaluación se realizó en los puntos donde la carga o el suministro se centralizaba y de manera informativa en los alimentadores de la barra 403 (celda+B70) que fueron medidos por un día cada uno.
- Se debe prestar atención a la evolución de la 23va y 25va armónica ya que los niveles encontrados superan los rangos establecidos por la norma, y se reflejan en el análisis realizado en cada uno de los alimentadores de la barra 403.
- Es necesario tener en cuenta que el tiempo de medición considerado en el análisis es de cinco (05) días.

## **De la evaluación con el Std. IEEE-519**

- Los niveles de armónicas de tensión se encuentran en su gran mayoría dentro delo recomendado por el estándar.
- Los niveles de armónicas de corriente se encuentran en su gran mayoría; también, dentro de lo recomendado por el estándar; sin embargo, debido a la existencia de fuentes armónicas de órdenes armónicos altos ya que los límites para las armónicas de mayor orden son muy exigentes, estos son superados en muchos casos.
- Así mismo se debe tener en cuenta que las armónicas pares que existen en la red poseen niveles límite mucho más exigentes que las armónicas impares (50%).
- Sin embargo, los niveles de armónicas de corriente pueden ser considerados aceptables en el sistema debido a que su presencia no genera una mayor distorsión en tensión que se refleje en el sistema.

- Para el caso de los alimentadores de la barra 403, se presentan armónicas de valores elevados en el alimentador +B73 que significan a su vez la fuente armónica más influyente en el sistema eléctrico (teniendo en cuenta la relación entre el módulo de su fuente armónica y la corriente rms).

### **De las fuentes armónicas**

- Se detectaron en total 20 fuentes armónicas en el sistema.
- Las armónicas fuente varían desde el orden 7 al orden 37 y todas son de orden impar.
- La armónica que inyecta más corriente armónica al sistema es la de orden 25.
- Las fuentes armónicas presentes son por lo general de órdenes elevados y según lo mostrado en los análisis de niveles de distorsión armónica de tensión, no representan fuentes distorsionantes considerables.

**Tabla 10. Fuentes armónicas detectadas en el sistema eléctrico principal**

Circuito	Barra Celda /	Tensión	Descripción	Corriente de Carga	Existencia de Fuente	Orden Armónico	Módulo Fase R	Módulo Fase S	Módulo Fase T
Secundario del Transformador T4	+B67	6.6 kV	Fuente Armónica del Alimentador	781.00 A	Si	21	0.38 A	0.25 A	0.33 A
						23	3.72 A	3.44 A	3.25 A
						25	6.05 A	6.09 A	6.60 A
						27	0.58 A	0.64 A	0.76 A
						29	0.62 A	0.62 A	0.57 A
Secundario del Transformador T4	+B73	6.6 kV	Fuente Armónica del Alimentador	156.10 A	Si	11	3.31 A	3.26 A	3.65 A
						13	2.85 A	2.89 A	2.85 A
						21	0.50 A	0.37 A	0.43 A
						23	11.41 A	11.04 A	10.66 A
						25	14.89 A	15.91 A	16.66 A
						27	1.13 A	1.16 A	1.47 A
						29	1.50 A	1.38 A	1.35 A
						37	0.80 A	0.99 A	0.98 A
Secundario del Transformador	+B72	6.6 kV	Fuente Armónica del Alimentador	76.02 A	Si	11	1.25 A	-	1.15 A
Secundario del Transformador T4	+B75	6.6 kV	Fuente Armónica del Alimentador	30.07 A	Si	23	0.015 A	0.014 A	0.012 A
						25	0.015 A	0.015 A	0.015 A
						29	0.005 A	0.005 A	0.005 A

**Fuente:** elaboración propia

#### 4.1.2. Post observación

Para llegar a estos resultados se contó con las siguientes informaciones y se tuvieron las siguientes consideraciones:

- “Esquema Unifilar General Condorcocha”.
- Esquema Unifilar Molino8 –Embolsado5 – Diagrama Unifilar General Subestación Principal.
- Resultados del muestreo de armónicas y flujo de carga del sistema eléctrico de Unacem planta Condorcocha.

- Datos de placas de los cuatro transformadores del sistema eléctrico de Unacem– Condorcocha.
- Datos de los condensadores presentes en M.T para el sistema eléctrico de planta Condorcocha.
- Consumo proyectado de potencia activa y reactiva de la futura carga del Molino8 y el Envase 5 y de cada uno de los transformadores de potencia.

Los transformadores de potencia fueron modelados según placa de características.

### Modelamiento de las Cargas

Se modelaron como cargas toda aquella carga presente en las barras de 2.3kV y 6.6 kV.

Además, para tener en cuenta el consumo nominal por barra se tomó en consideración los consumos proyectados de Unacem y que se muestran en la tabla N° 13.

**Tabla 11. Consumo de los transformadores de potencia**

TRANSFORMADOR	POTENCIA PLACA (MVA)	PMAX (MW)	QMAX (MVAR)	PMAX (MW)	QMAX (MVAR)
		ACTUAL		PROYECTADO	
T1	16	14.04	4.07	14.89	4.32
T2	20	16.46	9.06	16.91	9.31
T4	20	17.17	6.61	15.17	3.94
T5	25	---	---	12	5.92

**Fuente:** elaboración propia

### Modelamiento de los bancos de condensadores

Se consideró 6 bancos que están conectados al sistema.

Los bancos que fueron modelados son los mostrados en la tabla N° 12



**Tabla 12. Banco de condensadores en media tensión de UNACEM**

	Nivel de Tensión (kV)	Barra	Pasos	Q (MVar) Diseño	Q (MVar) Trabajo
Transformador AT-1	6.6	8DH10	3	3	2.5
Transformador T1	6.6	9-4508AC01	3	2.7	1.8
	2.3	17	4	3.15	3.15
Transformador T2	6.6	+B42	6	3	3
Transformador T5	6.6	+B103	6	3	3

**Fuente:** elaboración propia

### **Modelamiento de las fuentes armónicas**

De acuerdo a los resultados de muestreo, las fuentes armónicas consideradas son las mostradas en la siguiente tabla.

Además, es necesario considerar el aporte de contenido armónico para las cargas proyectadas – Molino 8, Envase 5 y cargas del transformador T5.

**a. En el caso de las cargas del Molino 8 y Envase 5** las cargas armónicas consideradas son:

- Convertidor de 6 pulsos de 2x0,4 MW para la prensa KHD.
- Convertidor de 6 pulsos de 0,5 MW para el motor Sepol.
- Convertidor de 12 pulsos de 0,78 MW para el motor del ventilador separador Sepol.
- CCM molino 8 2.0 MW, CCM envase 5 2.0 MW.
- Consumo armónico similar a lo registrado en la celda +B74 para el CCM envase 5
- Motor de 6000 HP que posee su propio modelo armónico.
- En el caso de las cargas del Transformador T5, las cargas armónicas medidas en el enlace +B67 durante la etapa de muestreo.

Finalmente, para obtener los valores de las corrientes armónicas para los consumos actuales y proyectados brindados por Unacem se realizó una proporción según las ecuaciones:

$$h(\text{actual}) = I_{h(\text{medido})} * P_{(\text{actual})} / P_{(\text{medido})} \dots\dots\dots 1$$

$$I_{h(\text{proy})} = I_{h(\text{actual})} * P_{(\text{proy})} / P_{(\text{actual})} \dots\dots\dots 2$$

**Tabla 13. Fuentes armónicas en media tensión de UNACEM**

Circuito	Barra / Celda	Tensión	Existencia de Fuente	Orden Armónico	Corriente armónica Actual	Corriente armónica Proyectada
Transformador T1	+B18 y +B22	2.3 kV	Si	11	13.00 A	13.78 A
Secundario del Transformador T2	+B13	2.3 kV	Si	7	20.88 A	21.06 A
Secundario del Transformador T4	+B72 - CCM7	6.6 kV	Si	11	1.25 A	1.25 A
Secundario del Transformador T4	+B73 - Molino Cemento VI	6.6 kV		11	3.65 A	3.65 A
				13	2.89 A	2.89 A
				21	0.50 A	0.50 A
				23	11.41 A	11.41 A
			Si	25	16.66 A	16.66 A
			27	1.47 A	1.47 A	
			29	1.50 A	1.50 A	
			37	0.99 A	0.99 A	
Secundario del Transformador T4	+B74 - Embolsado	6.6 kV	Si	11	1.29 A	1.29 A
				23	0.015 A	0.015 A
				25	0.015 A	0.015 A
				29	0.005 A	0.005 A
				21	0.38 A	0.38 A
Secundario del Transformador T4				23	3.72 A	3.72 A
Secundario del Transformador T5	+B67 - Enlace con T5	6.6 kV	Si	25	6.60 A	6.60 A
				27	0.76 A	0.76 A
				29	0.62 A	0.62 A
Secundario del Transformador T4	CCM Molino 8	6.6 kV	Si	11	-	1.25 A
Secundario del Transformador T5	Envase 5	6.6 kV	Si	11	-	1.29 A

**Fuente:** elaboración propia

### Dimensionamiento de la Compensación Reactiva del T4

Consideraciones: previo al análisis realizado se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones para el sistema proyectado con puesta en paralelo.

- a. El sistema opera de manera normal con la carga en 2.3kV de las celdas +B9 hasta la +B20 para el transformador T2 debido a que

- el transformador T4 tomara nueva carga.
- b. El suministro en Carpapata, suministrara 18.41 MW y 2.82 MVAR por aporte de las Centrales Carpapata I y Carpapata II.
  - c. Los niveles de cortocircuito fueron tomados para el año 2016 de la base de datos del COES:
    - Potencia de cortocircuito en 138kV 1007 MVA
    - Potencia de cortocircuito en 72.5 kV 462.1 MV
  - d. Los transformadores T2 y T5 operan en paralelo.
  - e. La compensación tiene los siguientes objetivos:
    - Una corrección del factor de potencia a 0.93 p.u.
    - Arranque normal del motor de 6000HP.

### Corrección del Factor Potencia

En este acápite con ayuda de la corrección del factor de potencia, se determinará la compensación total necesaria en la barra de 6.6 kV del transformador T4.

**Tabla 14. Consumos en el transformador T4 sin compensación**

Trasnformador T4	P (MW)	Q (MVAr)	S (MVA)	fdp (p.u.)	Tensión (p.u)
Primario 138 kV	15.89	9.87	18.71	0.849	0.86
Secundario 6.6kV	15.86	8.27	17.89	0.887	1.01
Cargas Actuales	5.08	2.05	5.48	0.927	1
Cargas Proyectadas	10.6	6.22	12.29	0.862	1

Fuente: elaboración propia

Como se observa, el factor de potencia es muy bajo al estar alrededor de 0.85 p.u.

De la misma forma, se ha realizado una sensibilidad entre la potencia reactiva (en MVar) a compensar, es decir el tamaño del banco de compensación, versus el factor de potencia obtenido. Este análisis se muestra en el gráfico 22

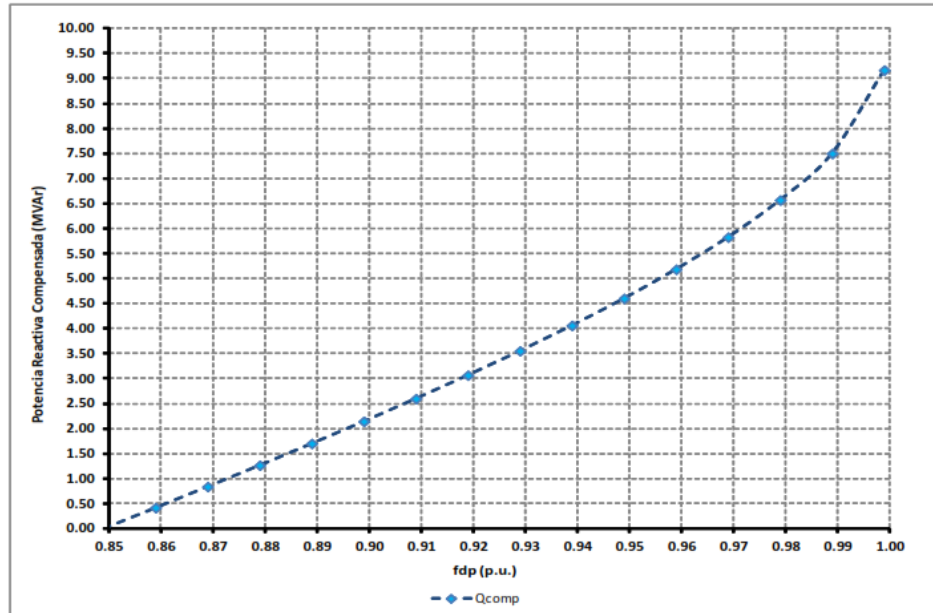


Gráfico 22. Sensibilidad entre  $Q_{\text{banco}}$  y fdp.

Fuente: elaboración propia

El estudio tiene un factor de potencia por objetivo de 0.93 p.u. para el transformador T4. Viendo el gráfico se observa que la compensación necesaria para este valor objetivo es de 3.5 MVar.

Por tanto, el tamaño del banco de compensación para la barra de 6.6 kV del Transformador T4 es de 3.50 MVar.

En los acápites siguientes se determinará la distribución de esta compensación y de los pasos correspondientes.

**Tabla 15. Consumos en el transformador T4 con compensación**

Trasformador T4	P (MW)	Q (MVAR)	S (MVA)	fdp (p.u.)	Tensión (p.u.)	Compensación (MVAR)
Primario 138 kV	5 15.8	5.83	16.89	0.939	0.86	<b>3.5MVAR</b>
Secundario 6.6kV	3 15.8	4.52	16.46	0.962	1.01	
Cargas Actuales	5.08	2.05	5.48	0.927	1	
Cargas Proyectadas	10.6	6.22	12.29	0.862	1	

**Fuente:** elaboración propia

### **Determinación de la compensación variable**

Al no poseer un diagrama de carga de las cargas proyectadas, se tomaron los registros de las celdas +B72, +B73 y +B75 realizados en la etapa de medición y recolección de datos, como los diagramas de carga típicos considerando la siguiente:

- El consumo registrado en la celda +B72, correspondiente al CCM7, se considera el mismo al que tendrían el embolsado 5 y el CCM del Molino 8.
- El consumo registrado en la celda +B73, correspondiente al molino 6 de 2000kW, aplicado por un factor de 2.9 (5800kW/2000kW) da el consumo que tendrían en conjunto el Molino 8 (4500kW), el motor de la prensa KHD (800kW) y el motor del separador Sepol (500kW).
- El consumo registrado en la celda +B75, correspondiente al ventilador Sepol, aplicado por un factor de 2.3 (780kW/336kW) da el consumo que tendría el motor del ventilador separador Sepol.

Finalmente, el diagrama de carga se obtiene de la suma de los consumos proyectados más los consumos registrados en las celdas +B72, +B73, +B74 y +B75 afectados por un factor tal que se obtenga la máxima demanda dada, cuyo resultado se muestra en el gráfico N°23.

Del gráfico se observa que:

- La potencia activa se mantiene constante en aproximadamente en 15MW y cae en un determinado tiempo a 13.5 MW.
- La potencia reactiva se mantiene constante en aproximadamente 8.5 MVAR y cae en un determinado tiempo a 7 MVAR.
- El factor de potencia se mantiene constante en 0.87 p.u. y sube en un determinado tiempo a 0.88 p.u.

Del gráfico N°24, se observa que, durante la operación normal, los 3.5 MVAR son necesarios para obtener el factor de potencia objetivo mientras que, al momento de perder carga, la potencia reactiva demandada pasa a ser de 3 MVAR.

Por tal motivo es necesario al menos un paso de 0.5 MVAR en el banco de compensación:

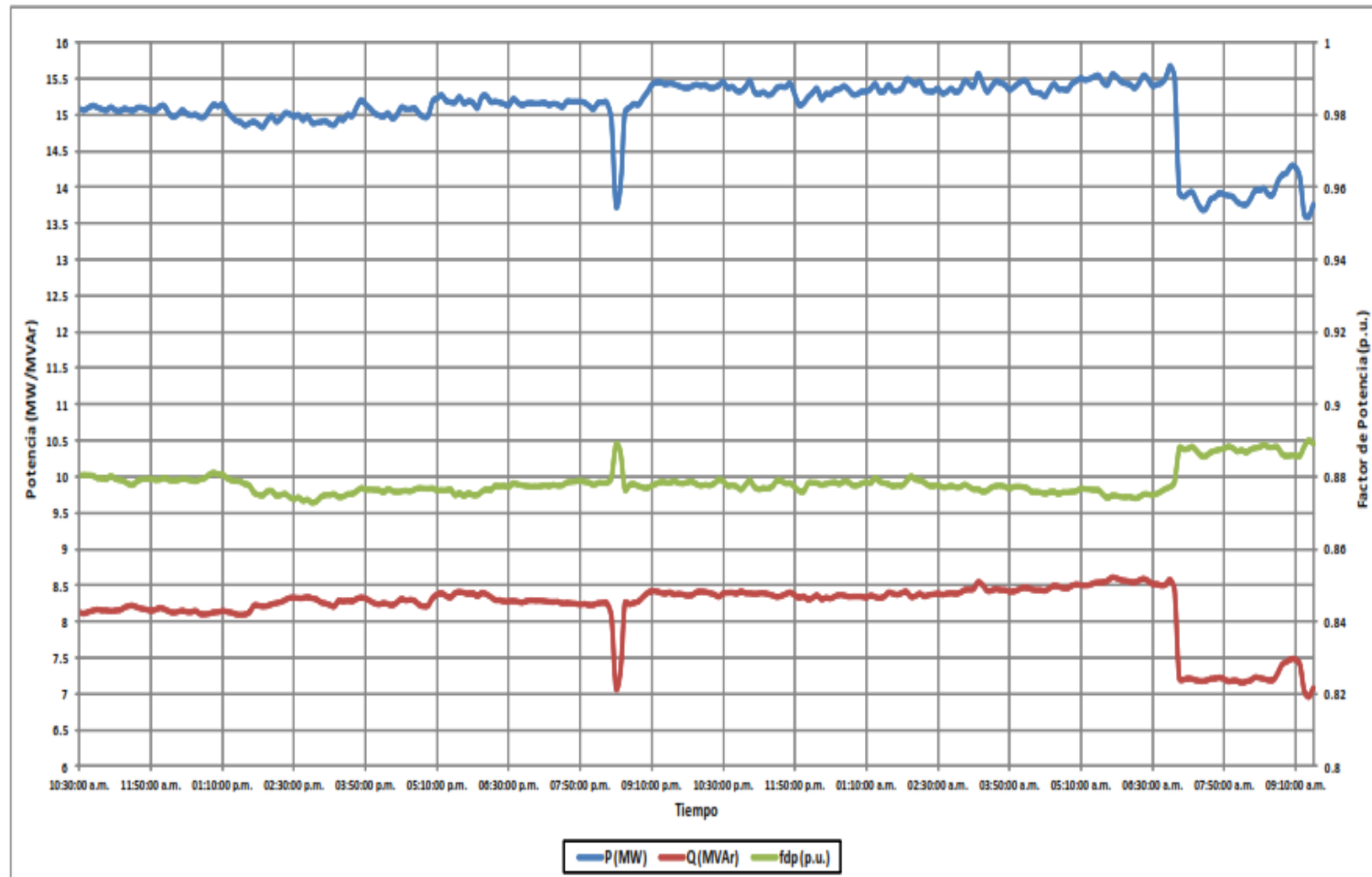


Gráfico 23. Diagrama de carga – Transformador T4

Fuente: elaboración propia

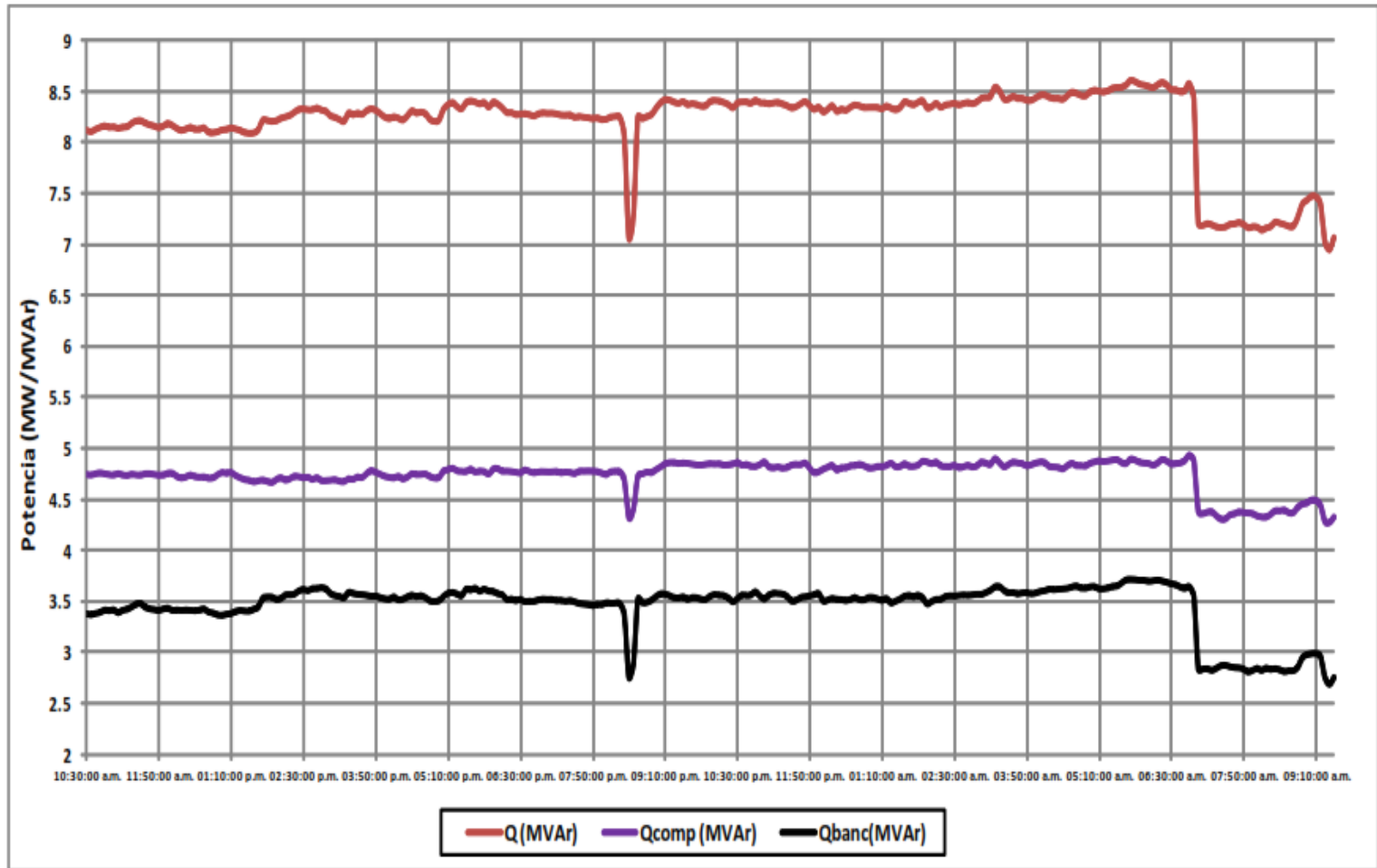


Gráfico 24. Diagrama de carga – Transformador T4

Fuente: elaboración Propia



## Verificación del arranque del motor de 6000 Hp

Una vez determinado el bloque de compensación necesaria en la barra de 6.6 kV del T4, es necesario conocer si debido al arranque del motor de 6000HP, se requiere de un bloque adicional de compensación para colaborar con las tensiones en barras durante el arranque. Como valores de referencia se ha tomado lo indicado en la tabla N°16 del Std. IEEE STD 519 - 1992 399-1990 “*Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis*” y cuyos valores se muestran en la Tabla N°16 a continuación:

**Tabla 16.Detalle de la tabla N° 16 – Std IEEE 399**

Caída de tensión	Tensión Mínima Permitida (%Nominal)
Ubicación del Problema	
En terminales del motor que arranca	80%
En todos los terminales de otros motores que deben reacelerar	71%
Contactores AC (Pick up)	85%
Contactores DC (Pick up)	80%
Dispositivos de control de estado sólido	90%

### Fuente: IEEE- std. 399

Para esto se ha simulado la condición de arranque en el peor caso que es con toda la carga del T4 en servicio y sin compensación en la barra de 6.6 kV.

Como resultado de esta simulación, se obtuvieron los valores de las tensiones en barra en los niveles de 138 kV, 6.6 kV, 0.69 kV y 0.44 kV.

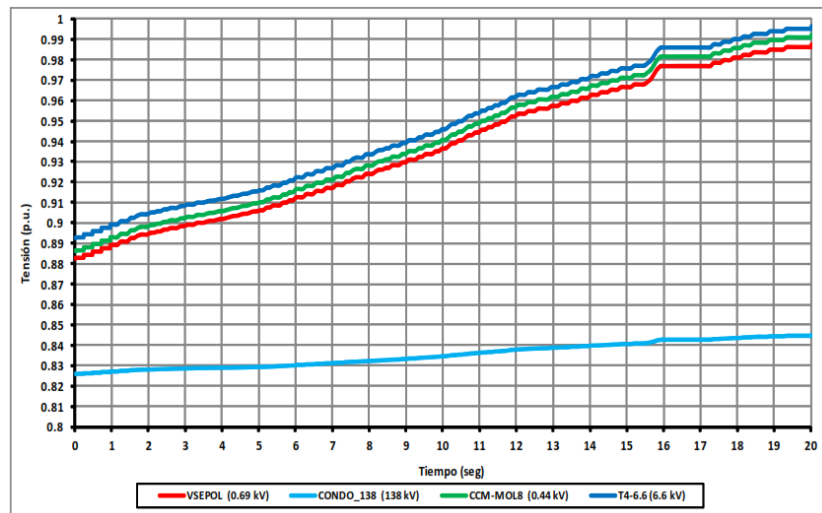


Gráfico 25. Niveles de tensión barras T4 – Sin Compensación

Adicionalmente en el gráfico N° 26 muestra la variación de la tensión en 0.69 kV considerando que la compensación aumenta progresivamente en pasos de 0.5 MVar.

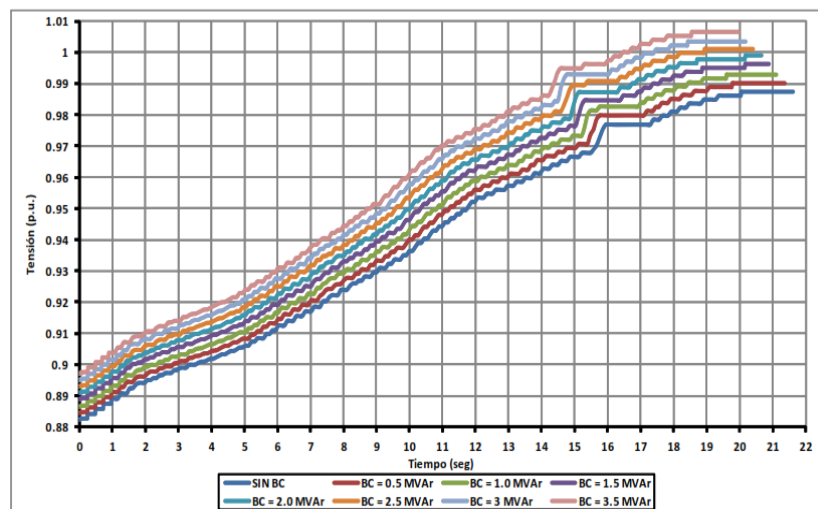


Gráfico 26. Niveles de tensión barras 0.69 kV - Rectificador del Motor de Ventilador Separador Sepol

De ambos gráficos se puede concluir:

- a. Sin compensación (salida de servicio del banco) se requieren 4 segundos para que los niveles de tensión para las barras en media y baja tensión del transformador T4 se encuentren sobre

los 0.90 p.u. (tensión mínima en el arranque requerida para los rectificadores, convertidores, variadores, etc) y de 11 segundos para que se encuentren sobre los 0.95 p.u. (tensión mínima para el estado estable).

b. Para los variadores de velocidad se requiere:

- Tener una compensación permanente de 3.5 MVar para alcanzar los 0.9 p.u. en 0.5 seg.
- Tener una compensación permanente de 2.5 MVar para alcanzar los 0.9 p.u. en 1 seg.
- Tener una compensación permanente de 1.5 MVar para alcanzar los 0.9 p.u. en 2 seg.

Debido a que los tiempos necesarios para alcanzar los 0.9 p.u. objetivo son cortos, es suficiente con tener una compensación mínima permanente de 1.5 MVar.

### **Dimensionamiento final del banco de compensación**

Con los resultados obtenidos en los acápites se ha determinado el banco de capacitores necesario en la barra de 6.6 kV del transformador T4 y cuyos datos se muestran en la Tabla N° 17.

**Tabla 17. Detalle del dimensionamiento del banco de compensación – 6.6 kV**

	MVar
Potencia Reactiva Total	3.5
Paso 1	1 x 0.5
Paso 2	2 x 0.5
Paso 3	4 x 0.5

Fuente: Elaboración propia

### **Análisis de flujo de potencia**

#### **Consideraciones**

Previo a los análisis realizados se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

### **Sistema actual**

- a. El sistema opera de manera normal con la carga en 2.3kV de la celda +B9 hasta +B20 para el transformador T2 debido a que el transformador T4 tomará nueva carga.
- b. El suministro en Carpapata suministra 11.19 MW y 1.44 MVA por aporte de la central de Carpapata I.
  - Potencia de Cortocircuito en 138 kV – 829.4 MVA
  - Potencia de Cortocircuito en 72.5 kV – 407.7 MVA

### **Sistema proyectado con puesta en paralelo**

- a. El sistema opera de manera normal con la carga en 2.3kV de la celda +B9 hasta +B20 para el transformador T2 debido a que el transformador T4 tomará nueva carga.
- b. El suministro en Carpapata suministra 18.41 MW y 2.82 MVA por aporte de las centrales de Carpapata I y Carpapata II
- c. Los niveles de cortocircuito se tomaron para el año 2016 de la base de datos del COES:
  - Potencia de Cortocircuito en 138 kV – 1007 MVA
  - Potencia de Cortocircuito en 72.5 kV – 462.1 MVA
  - Los transformadores T2 Y T5 operan en paralelo.

### **Sistema proyectado con puesta en paralelo y en contingencia**

Se consideran las siguientes contingencias simples (N-1).

- Salida del enlace entre el transformador T2 y T5.
- Salida de servicio del banco de compensación en 6.6 kV del T4.

### **Resultados**

#### **Sistema actual**

Los resultados del análisis de flujo de potencia para la condición actual fueron:

- Salvo por las barras de alta tensión de 72.5kV y 138 kV las cuales

operan según los requerimientos del operador del sistema, los niveles de tensión en barra del sistema eléctrico de Condorcocha se encuentran dentro del rango del  $\pm 5\%$ .

- Se demandan 11.90 MW y 1.44 MVAR del suministro de Carpapata y 35.80 MW y 16.62 MVAR de los suministros de Caripa y Electrocentro.
- No existe sobrecarga de ningún elemento presente en la red.
- Existe una pérdida de 0.118 MW (0.25%) de potencia activa en toda la red.

El detalle del reporte generado por el software se muestra en el anexo II.

**Tabla 18. Reporte Sumario de Potencias**

Datos sumarios	Potencia activa (M W)	Potencia reactiva (M VAr )
Total de generaciones	47.699	18.055
Carga esática	47.579	27.33
Cargas s hunts	0.002	-13.749
Cargas de l motor	0	0
Carga total	47.581	13.581
Pérdidas e n las líneas / cables	0.035	0.361
Pérdidas de los transformadores	0.082	4.126
Pérdidas totals	0.118	4.487

Fuente: elaboración propia

**Tabla 19. Resumen de Resultados de Tensión en Barras**

Barra	kV Base	V sol (p.u.)	V sol (p.u.)
CONDO_138	138	117.99	0.855
CONDO_72.5	72.5	68.44	0.944
T1-2.3	2.3	2.3	1.001
T1-6.6	6.6	6.66	1.009
T2-6.6	6.6	6.62	1.003
T2/T4-2.3	2.3	2.3	0.999
T4-6.6	6.6	6.62	1.003
T5-6.6	6.6	6.62	1.003

Fuente: elaboración Propia

**Tabla 20. Resumen de Resultados de % de Carga en Transformadores**

Transformador	S nominal Primario [MVA]	S Primario [MVA]	S Secundario [MVA]	S TERCARIO [MVA]	CARGA [%] Capacidad
TRAFO - T1	16	14.49	7.18	7.11	90.56%
TRAFO - T2	20	19.08	12.37	6.15	95.40%
TRAFO - T4	20	18.12	18.12	0	90.60%
TRAFO - T5	25				0.00%

Fuente: elaboración propia

### **Sistema proyectado**

Los resultados del análisis de flujo de potencia para la condición proyectada fueron:

- Salvo por las barras de alta tensión de 72.5kV y 138 kV las cuales operan según los requerimientos del operador del sistema, los niveles de tensión en barra del sistema eléctrico de Condorcocha se encuentran dentro del rango del  $\pm 5\%$ .
- Se demandan 18.41 MW y 2.82 MVAR del suministro de Carpapata y 41.17MW y 19.36 MVAR de los suministros de Caripa
- No existe sobrecarga de ningún elemento presente en la red.
- Existe una pérdida de 0.156 MW (0.26%) de potencia activa en toda la red. En las Tablas N° 21, N°22y N°23, se muestra un resumen de los resultados obtenidos.

El detalle del reporte generado por el software se encuentra en el anexo II.

**Tabla 21. Reporte Sumario de Potencias**

Datos sumarios	Potencia activa (M W)	Potencia reactiva (M VAr )
Total de generaciones	59.584	22.185
Carga estática	54.75	31.87
Cargas shunts	0.001	-18.688
Cargas del motor	4.614	4.069
Carga total	59.365	17.251
Pérdidas en las líneas / cable s	0.064	0.386
Pérdidas de los transformadores	0.092	4.551
Pérdidas totales	0.156	4.937

Fuente: elaboración propia

**Tabla 22. Resumen de Tensión en Barras**

Nombre	kV Base	V sol [kV]	V sol [%]
CONDO_138	138	117.99	0.855
CONDO_6.9	6.9	6.57	0.952
CONDO_72.5	72.5	68.44	0.944
T1-2.3	2.3	2.27	0.988
T1-6.6	6.6	6.59	0.998
T2-6.6	6.6	6.61	1.002
T2/T4-2.3	2.3	2.29	0.994
T4-6.6	6.6	6.82	1.033
T4-6.6_1	6.6	6.82	1.033
T5-6.6	6.6	6.63	1.004

Fuente: elaboración propia

**Tabla 23. Resumen de Resultados de % de Carga en Transformadores**

Transformador	S nominal Primario [MVA]	S Primario [MVA]	S Secundario [MVA]	S TERCARIO [MVA]	CARGA [%] Capacidad
TRAFO - T1	16	15.59	7.66	7.63	97.44%
TRAFO - T2	20	15.12	8.57	6.23	75.60%
TRAFO - T4	20	16.72	16.31	0	83.60%
TRAFO - T5	25	17.06			68.24%

Fuente: elaboración propia

**Tabla 24. Niveles de THD en barras – Sistema Proyectado**

Orden	Limite NTCSE	Limite IEEE	Barra					
			T1-2.3	T2/T4-2.3	T1-6.6	T2-6.6	T4-6.6	T5-6.6
2	2	3	0.49	0.4	0.47	0.41	0.38	0.41
3	5	3	0.28	0.2	0.25	0.2	0.21	0.2
4	1	3	0.36	0.19	0.29	0.21	0.24	0.21
5	6	3	0.31	0.13	0.21	0.15	1.15	0.15
6	0.5	3	0.55	0.28	0.3	0.34	0.57	0.34
7	5	3	0.4	0.37	0.17	0.26	0.94	0.26
8	0.5	3	0	0.09	0	0.12	0.05	0.12
9	1.5	3	0.02	0.05	0.02	0.07	0.02	0.07
11	3.5	3	0.22	0.14	0.23	0.28	0.1	0.28
13	3	3	0.03	0.03	0.15	0.08	0.21	0.08
15	0.3	3	0.04	0.04	0.4	0.17	0.21	0.17
17	2	3	0	0	0.02	0.01	0.41	0.01
19	1.5	3	0	0	0.01	0	0.2	0
21	0.2	3	0	0	0	0	0.01	0
23	1.5	3	0	0.02	0	0.03	0.07	0.03
25	1.5	3	0	0.03	0.01	0.05	0.4	0.05
27	0.2	3	0	0	0	0.01	0.02	0.01
29	0.63	3	0	0	0	0	0.03	0
31	0.6	3	0	0	0	0	0.04	0
35	0.56	3	0	0	0	0	0.05	0
37	0.54	3	0	0	0	0	0.06	0
41	0.5	3	0	0	0	0	0.02	0
43	0.49	3	0	0	0	0	0.02	0
47	0.47	3	0	0	0	0	0.03	0
49	0.46	3	0	0	0	0	0.03	0
<b>THD</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>1.03</b>	<b>0.71</b>	<b>0.87</b>	<b>0.77</b>	<b>1.81</b>	<b>0.87</b>

Fuente: elaboración propia



## **Sistema Proyectado en contingencia por salida del enlace entre T2 y T5**

- Los niveles de distorsión armónica se encuentran por debajo del 1.80%
- El máximo nivel de distorsión armónica fue en la barra en 6.6 kV del transformador T4 con 1.80% de distorsión.
- En relación a lo exigido por la NTCSE para los niveles de distorsión armónica total (THD) e individuales (HD) se observó que en ningún caso se supera los límites máximos permisibles.
- En relación a lo recomendado por el Std. IEEE STD 519 - 1992-519 para los niveles de distorsión armónica total (THD) e individuales (HD) se observó que en ningún caso se supera los límites máximos permisibles.
- Los niveles de distorsión armónica aumentaron con relación a la condición de operación normal, para la barra del transformador T5 mientras que para el transformador T2 la distorsión armónica disminuyó.
- En la tabla N° 25 se muestra un resumen de los resultados obtenidos a continuación, se muestra el detalle de los resultados.

**Tabla 25. Tabla de THD en barras – Sistema en Contingencia**

Orden	Limite NTCSE	Limite IEEE	Barra					
			T1-2.3	T2/T4-2.3	T1-6.6	T2-6.6	T4-6.6	T5-6.6
2	2	3	0.49	0.39	0.47	0.4	0.38	0.41
3	5	3	0.28	0.19	0.25	0.2	0.21	0.21
4	1	3	0.36	0.19	0.29	0.2	0.24	0.21
5	6	3	0.31	0.13	0.21	0.14	1.15	0.15
6	0.5	3	0.55	0.27	0.3	0.32	0.57	0.34
7	5	3	0.4	0.43	0.17	0.33	0.94	0.27
8	0.5	3	0	0.07	0	0.11	0.06	0.14
9	1.5	3	0.02	0.04	0.02	0.06	0.02	0.09
11	3.5	3	0.22	0.1	0.23	0.22	0.1	0.34
13	3	3	0.03	0.02	0.15	0.07	0.21	0.1
15	0.3	3	0.04	0.03	0.39	0.15	0.21	0.2
17	2	3	0	0	0.02	0.01	0.41	0.01
19	1.5	3	0	0	0.01	0	0.2	0
21	0.2	3	0	0	0	0	0.01	0.01
23	1.5	3	0	0	0	0	0.07	0.07
25	1.5	3	0	0.01	0.01	0.01	0.4	0.1
27	0.2	3	0	0	0	0	0.02	0.01
29	0.63	3	0	0	0	0	0.03	0.01
31	0.6	3	0	0	0	0	0.04	0
35	0.56	3	0	0	0	0	0.05	0
37	0.54	3	0	0	0	0	0.06	0
41	0.5	3	0	0	0	0	0.02	0
43	0.49	3	0	0	0	0	0.02	0
47	0.47	3	0	0	0	0	0.03	0
49	0.46	3	0	0	0	0	0.03	0
<b>THD</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>1.03</b>	<b>0.72</b>	<b>0.87</b>	<b>0.75</b>	<b>1.8</b>	<b>0.82</b>

Fuente: elaboración propia

### **Sistema Proyectado en contingencia por salida del banco de 3.5 MVAr.**

- Los niveles de distorsión armónica se encuentran por debajo del 1.93%.
- El máximo nivel de distorsión armónica fue en la barra en 6.6 kV del transformador T4 con 1.93% de distorsión.
- En relación a lo exigido por la NTCSE para los niveles de distorsión armónica total (THD) e individuales (HD) se observó que en ningún caso se supera los límites máximos permisibles.
- En relación a lo recomendado por el Std. IEEE STD 519 - 1992-519 para los niveles de distorsión armónica total (THD) e individuales (HD) se observó que en ningún caso se supera los límites máximos permisibles.
- Los niveles de distorsión armónica aumentaron en todas las barras del sistema, en comparación con los niveles obtenidos en la operación normal, haciendo de esta la peor contingencia desde el punto de vista de las armónicas.

En la Tabla N°26 se muestra un resumen de los resultados obtenidos y a continuación, se muestra el detalle de los resultados.

## Niveles de THD en barras – Sistema en Contingencia

**Tabla 26. Salida del Banco de 3.5 MVAR**

Orden	Limite NTCSE	Limite IEEE	Barra					
			T1-2.3	T2/T4-2.3	T1-6.6	T2-6.6	T4-6.6	T5-6.6
2	2	3	0.48	0.39	0.46	0.4	0.35	0.4
3	5	3	0.27	0.19	0.24	0.2	0.17	0.2
4	1	3	0.37	0.2	0.3	0.21	0.18	0.21
5	6	3	0.11	0.05	0.08	0.05	0.65	0.05
6	0.5	3	0.7	0.35	0.38	0.42	0.32	0.42
7	5	3	0.69	0.41	0.29	0.5	0.87	0.5
8	0.5	3	0	0.09	0	0.13	0.09	0.13
9	1.5	3	0.02	0.05	0.02	0.07	0.04	0.07
11	3.5	3	0.22	0.13	0.23	0.27	0.13	0.27
13	3	3	0.03	0.03	0.16	0.09	0.17	0.09
15	0.3	3	0.04	0.04	0.46	0.2	0.09	0.2
17	2	3	0	0	0.01	0	0.16	0
19	1.5	3	0	0	0.01	0	0.18	0
21	0.2	3	0	0	0	0	0.02	0
23	1.5	3	0	0.02	0	0.04	0.15	0.04
25	1.5	3	0	0.02	0.01	0.07	1.16	0.07
27	0.2	3	0	0	0	0.01	0.07	0.01
29	0.63	3	0	0	0	0.01	0.13	0.01
31	0.6	3	0	0	0	0	0.22	0
35	0.56	3	0	0	0	0	0.36	0
37	0.54	3	0	0	0	0	0.43	0
41	0.5	3	0	0	0	0	0.22	0
43	0.49	3	0	0	0	0	0.22	0
47	0.47	3	0	0	0	0	0.36	0
49	0.46	3	0	0	0	0	0.36	0
<b>THD</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>1.21</b>	<b>0.75</b>	<b>0.94</b>	<b>0.91</b>	<b>1.93</b>	<b>0.91</b>

Fuente: elaboración propia

## Evaluación de sensibilidad del banco de 3.5 MVAR.

Para esto se realiza una evaluación de sensibilidad bajo las siguientes condiciones:

- La capacidad del banco varía desde 0 hasta 120%.
- Se evalúa la distorsión en la barra del T4 en 6.6 kV.

En el gráfico N° 27 muestra el resultado de esta evaluación de donde se observa que:

- Si el banco operara con una compensación de 0.5 MVAR (solo paso 3), el THD en la barra del T4 en 6.6 kV será de 3.29%.
- Si el banco operara con una compensación de 1.5 MVAR (solo paso 1 o paso 2), el THD en la barra del T4 en 6.6 kV será de 2.42%.
- Si el banco operara con una compensación de 2MVAR (paso 3 + paso 1 o paso 2), el THD en la barra del T4 en 6.6 kV será de 2.13%.
- Si el banco operara con una compensación de 3 MVAR (paso 1 + paso 2) el THD en la barra del T4 en 6.6 kV será de 1.91%.

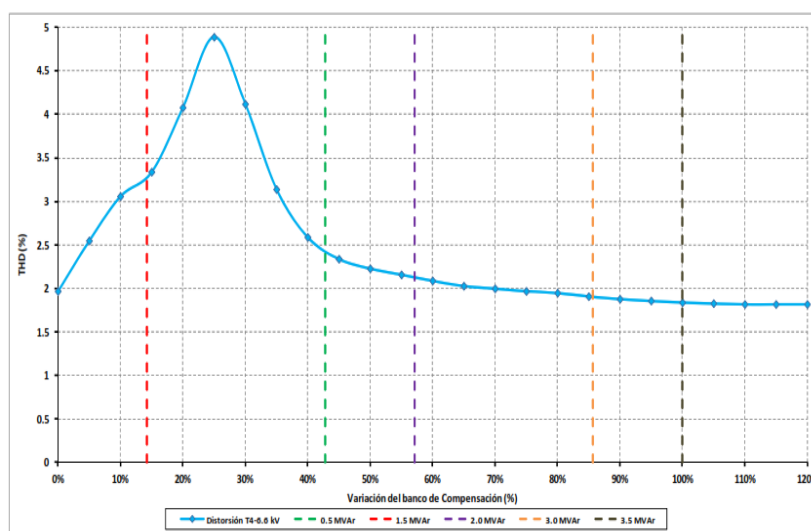


Gráfico 27. Niveles de THD en barra de 6.6 kV del T4 por variación de la capacidad del banco de 3.5 MVAR

Fuente: Elaboración propia

Bajo este resultado, el banco podría operar sin ningún inconveniente, ya que la zona cuya distorsión es mayor, se encuentra entre el 20% (0.7 MVar) y el 35% (1.23 MVar) capacidades que no son nominales para el banco de compensación de 3.5 MVar.

#### **4.2. Prueba de hipótesis**

H0 =“El análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en un nivel bajo en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”.

Ha =“El análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en un nivel medio en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”.

Contrastación de hipótesis de la distorsión armónica

Tabla 27. Distorsión armónica (pre y post observación)

ORDEN ARMONICO	LÍMITE NTCSE %	LÍMITE IEEE %	BARRA										
			T4-6.6 ARMO. PRE OBS. %	T4-6.6 POTENCIA (kW) PR	T4-6.6 CORRIENTE (A) PRE	T4-6.6 FACTOR DE POTENCIA	T4-6.6 POTENCIA REACTIVA (kVAR) PR	T4-6.6 TENSION (kV) PRE OBS.	T4-6.6 ARMO. POST. OBS. %	T4-6.6 POTENCIA (kW) POS	T4-6.6 CORRIENTE	T4-6.6 FACTOR DE POTENCIA	T4-6.6 TENSION (kV) POST OBS.
2	2	3	2	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.38	15680	1379	0.97	6,9
3	5	3	5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.21	15680	1379	0.97	6,9
4	1	3	1	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.24	15680	1379	0.97	6,9
5	6	3	6	10505	938	0.9691	2559	6,651	1.15	15680	1379	0.97	6,9
6	0.5	3	0.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.57	15680	1379	0.97	6,9
7	5	3	5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.94	15680	1379	0.97	6,9
8	0.5	3	0.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.06	15680	1379	0.97	6,9
9	1.5	3	1.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.02	15680	1379	0.97	6,9
11	3.5	3	3.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.1	15680	1379	0.97	6,9
13	3	3	3	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.21	15680	1379	0.97	6,9
15	0.3	3	0.3	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.21	15680	1379	0.97	6,9
17	2	3	2	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.41	15680	1379	0.97	6,9
19	1.5	3	1.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.2	15680	1379	0.97	6,9
21	0.2	3	1.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.01	15680	1379	0.97	6,9
23	1.5	3	1.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.07	15680	1379	0.97	6,9
25	1.5	3	1.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.4	15680	1379	0.97	6,9
27	0.2	3	0.2	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.02	15680	1379	0.97	6,9
29	0.63	3	0.6	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.03	15680	1379	0.97	6,9
31	0.6	3	0.6	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.04	15680	1379	0.97	6,9
35	0.56	3	0.6	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.05	15680	1379	0.97	6,9
37	0.54	3	0.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.06	15680	1379	0.97	6,9
41	0.5	3	0.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.02	15680	1379	0.97	6,9
43	0.49	3	0.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.02	15680	1379	0.97	6,9
47	0.47	3	0.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.03	15680	1379	0.97	6,9
49	0.46	3	0.5	10505	938	0.9691	2559	6,651	0.03	15680	1379	0.97	6,9

Gráfico 28.CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

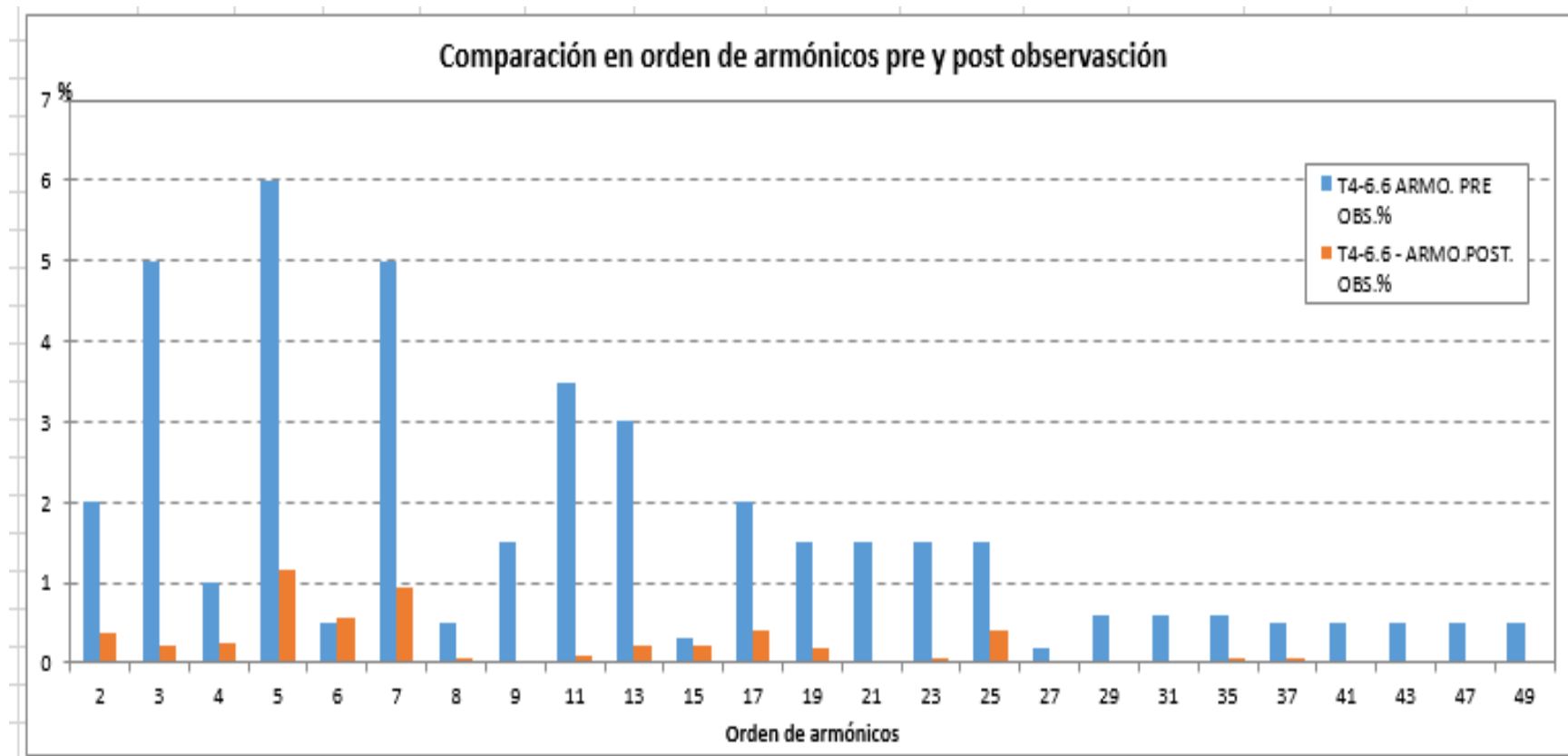




Gráfico 29. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS II

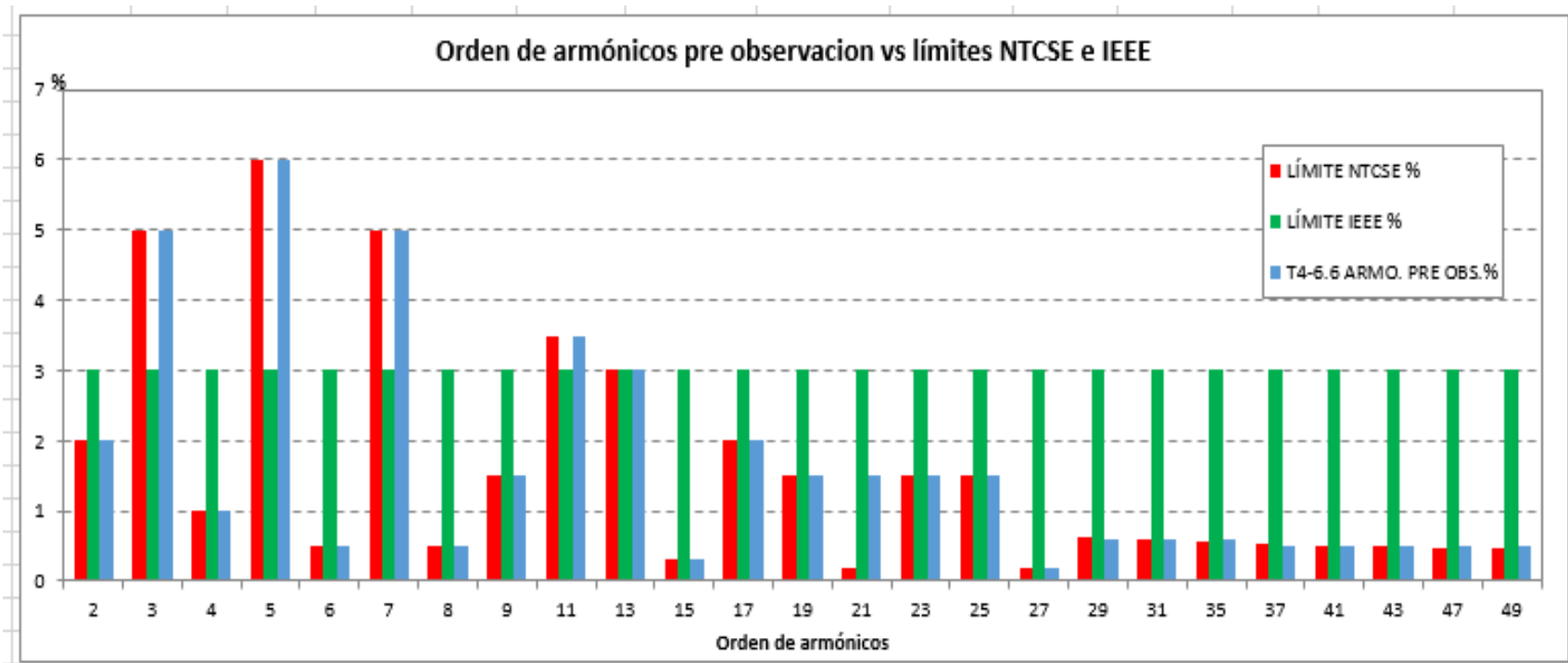
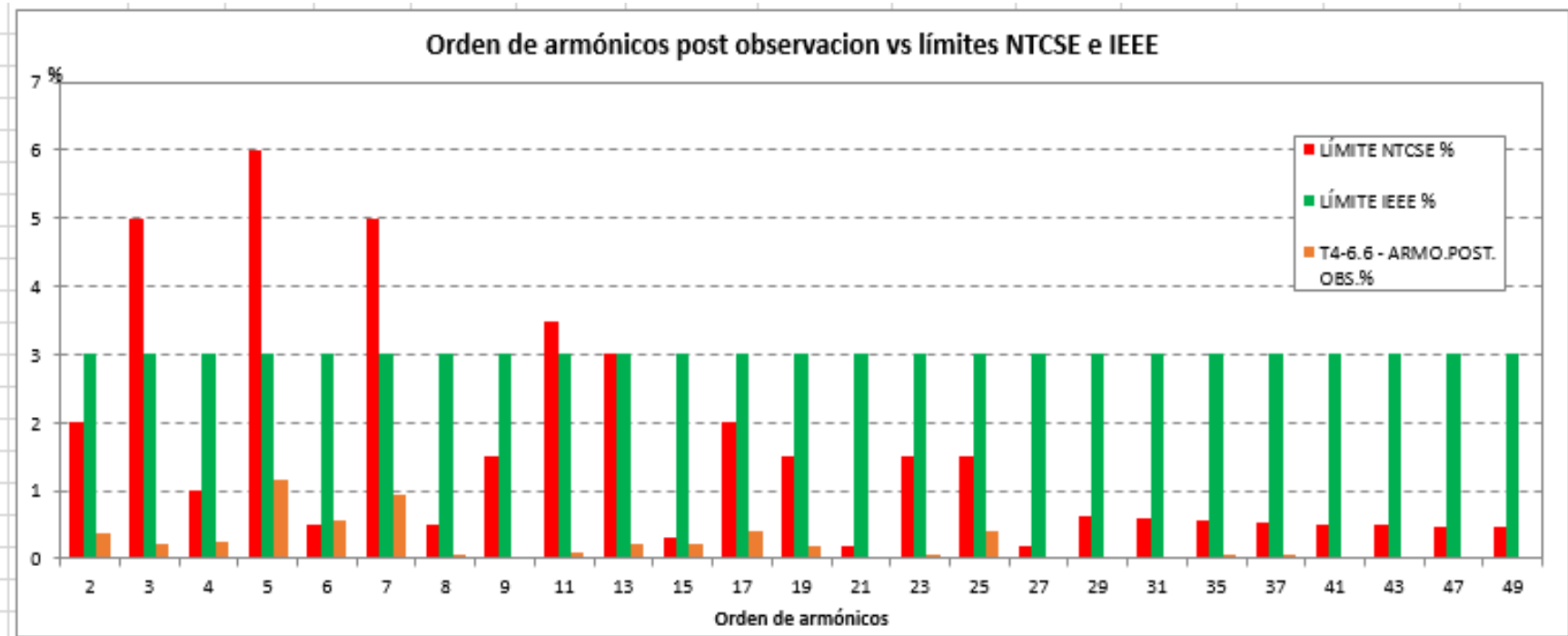


Gráfico 30.CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS III



**Tabla 28. Contrastación de hipótesis de la distorsión armónica**

<b>PRUEBA T PARA DOS MUESTRAS SUPONIENDO VARIANZAS IGUALES</b>		
<b>OBSERVACIÓN</b>	<b>PRE</b>	<b>POST</b>
Media	1.61666667	0.2125
Varianza	2.77101449	0.08851522
Observaciones	24	24
Varianza agrupada	1.42976486	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	46	
Estadístico t	4.06796281	
P(T<=t) una cola	9.2048E-05	
Valor crítico de t (una cola)	1.67866041	
P(T<=t) dos colas	0.0001841	
Valor crítico de t (dos colas)	2.0128956	

**Fuente:** elaboración propia

**Contrastación de hipótesis del Cos  $\phi$  (Coseno de phi).**

**Tabla 29. Cos  $\phi$  - (Pre observación – Post observación)**

<b>PRE</b>	<b>POST</b>
0.96	0.96
0.97	0.97
0.94	0.98
0.92	0.98
0.96	0.97

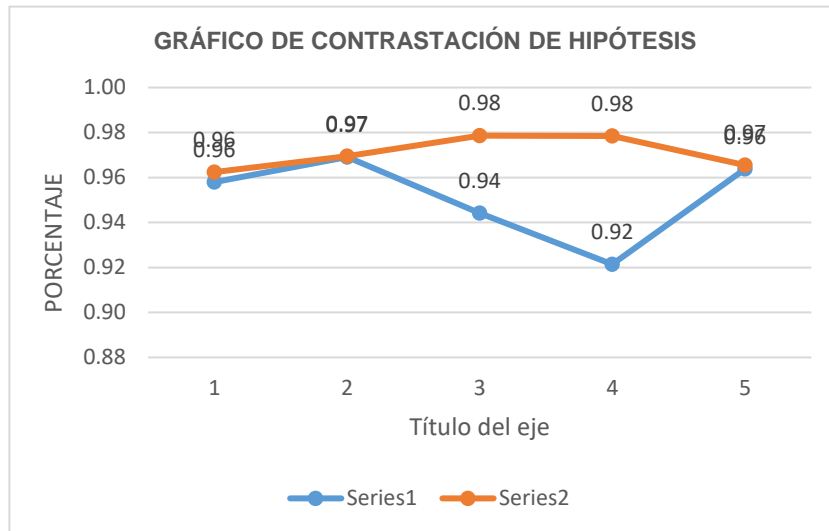


Gráfico 31. Contrastación de hipótesis de Cos ø

Fuente: elaboración propia

Tabla 30. Contrastación de hipótesis de Cos ø

PRUEBA T PARA DOS MUESTRAS SUPONIENDO VARIANZAS IGUALES		
	<i>Pre</i>	<i>Post</i>
Media	0.95	0.972
Varianza	0.0004	0.0001
Observaciones	5	5
Varianza agrupada	0.000235	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	-2.2691	
P(T<=t) una cola	0.0265	
Valor crítico de t (una cola)	1.8595	
P(T<=t) dos colas	0.0493	
Valor crítico de t (dos colas)	2.3060	

Fuente: elaboración propia

Se concluye que el análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en un nivel medio en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín, con un nivel de significancia de 0.00018% (Distorsión armónica) y 0.0493% (Coseno de phi).

### **Decisión estadística**

Se concluye que el análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en un nivel medio en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín, con un nivel de significancia de 0.00018%.

### **4.3. Discusión de resultados**

A partir de los hallazgos encontrados aceptamos la hipótesis alterna general que establece que el análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en un nivel medio en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín, con un nivel de significancia de 0.00018% (Distorsión armónica) y 0.0493% (Coseno de phi). Estos resultados guardan relación con la teoría: el ángulo al cual los armónicos pueden ser tolerados es determinado por la susceptibilidad de la carga (o fuente de potencia) hacia ellos. El mínimo tipo de susceptibilidad de equipos es aquel en el cual la función principal es un calentador, tal como un horno u hogar de caldera. En este caso, la energía armónica generalmente es utilizada y es del todo completamente tolerable. El mayor tipo de susceptibilidad de equipos es aquel cuyo diseño o constitución asume una entrada fundamental sinusoidal (casi) perfecta. Este equipo está frecuentemente en las categorías de comunicación o equipo de procesamiento de datos. Un tipo de carga que normalmente cae entre

estos dos extremos de susceptibilidad es la carga del motor. Muchas cargas de motores son relativamente tolerantes de armónicos [5].

En lo que respecta al hipótesis específica 1: “La distorsión armónica en relación al análisis del flujo de potencia se encuentra en un nivel medio del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”, cuyo resultado concuerda con la tesis: “Análisis del flujo de potencia reactiva en el sistema eléctrico de Pereira”, en dónde la inyección de reactivos a través de bancos de condensadores es una solución para las bajas tensiones en los nodos; además, evita que tengan que comprarse reactivos para mejorar estas tensiones[8].

En función a la hipótesis 2: “El  $\cos \phi$  (coseno de phi) en relación al análisis del flujo de potencia se encuentra en un nivel alto del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”, guarda relación con la tesis: “Metodología de estudio del diagrama de carga para el mejoramiento del factor de potencia de la planta frigorífica de la corporación Hayduk S.A.”, en la cual concluyen que el factor de potencia global obtenida es de 0.9598 desde un valor inicial de 0.8712, mejorando en un 0.33 % el valor meta fijado de 0.9567, valor en el cual se suprime la penalidad por consumo de energía reactiva[2].

Finalmente, el nivel del resultado esperado por el análisis del flujo de potencia por incremento de carga en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín, es medio”, debido a que se mejoró la distorsión armónica y el coseno de phi contrarrestando los problemas de sobrecarga de los conductores neutros, disparos intempestivos de los interruptores automáticos de lado secundario de los transformadores de distribución, sobrecalentamiento del transformador de potencia, sobrecarga de los condensadores de corrección del factor de potencia, distorsión de la tensión, ruido de paso por cero y desconexión de los variadores de frecuencia.

## CONCLUSIONES

- El análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en un nivel medio en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín.
- La distorsión armónica en relación al análisis del flujo de potencia se encuentra en un nivel medio del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”, en 1.81 debido al incremento de cargas (Molino 8 y embolsado 5) y la implementación del banco de condensadores, respecto al análisis de la pre observación, en la cual se afirma que la mejora de la distorsión armónica se encuentra dentro del rango de eficiencia.
- El  $\cos \varphi$  (coseno de phi) en relación al análisis del flujo de potencia se encuentra en un nivel alto del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”, en un 92%, el cual se encuentra dentro del parámetro de la eficiencia, por estar próximo a la unidad.
- El nivel del resultado esperado por el análisis del flujo de potencia por incremento de carga en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín, es medio, porque la distorsión armónica y el  $\cos \varphi$  (coseno de phi) oscilan dentro del nivel de eficiencia en 1.81 y 92% respectivamente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Flores Quistial, Cristian Gustavo.** “Análisis de demanda del sistema eléctrico en la empresa aromas del Tungurahua, ubicada en Ambato, utilizando el software de simulación neplan, para determinar el nivel de cargabilidad del sistema y realizar propuestas de mejora”. [En línea] 2016. <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/3658/1/T-UTC-000092.pdf>.
2. **Paz Polindara, Fabiany.** Análisis del flujo de potencia reactiva en el sistema eléctrico de Pereira. [En línea] 2013. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3952/6213743P348.pdf?sequence=1>.
3. **Calderón Villanueva, José Jesús y Medina Quezada, Edwin Wilfredo.** Metodología de estudio del diagrama de carga para el mejoramiento del factor de potencia de la planta frigorífica de la corporación HAYDUK S.A. [En línea] 2015. file:///C:/Users/Admin/Downloads/30752.pdf.
4. **Añazgo Barrantes, Francisco Jesús.** Utilización de la energía proveniente de la distorsión armónica de un sistema eléctrico. [En línea] 2015. <http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/UNAC/259/T.621.3.A61.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
5. *Prospectiva Energetica.* **Osinorming, Oficina de Estudios Economicos.** Lima : s.n., Marzo del 2009.
6. **IEEE STD 519 .** *IEEE STD 519 - 1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.* 1992.
7. **SIEMENS.** *Manual de baja tensión.* berlin : Siemens, 2000.
8. **De la Rosa, Francisco.** *Harmonics and Power Systems.* Missori : Taylor Francis Group, 2006.
9. **Palma Behnke, Rodrigo, Brokering Christie, Walter y Vargas Díaz, Luis.** *Los Saitemas Eléctricos de Potencia.* Santiago : Peason, 2008.
10. **Roberto Hern{andez Sampieri. Carlos Fernandez, Pilar Baptista.** *Metodoligía de la Investigación.* Mexico : Marcela Rocha , 2006.
11. **MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS.** Normas Técnicas de los Servicios Eléctricos. [En línea] 2011. [https://www.osinergmin.gob.pe/cartas/documentos/electricidad/normativa/NTCSE\\_DS020-97-EM.pdf](https://www.osinergmin.gob.pe/cartas/documentos/electricidad/normativa/NTCSE_DS020-97-EM.pdf).



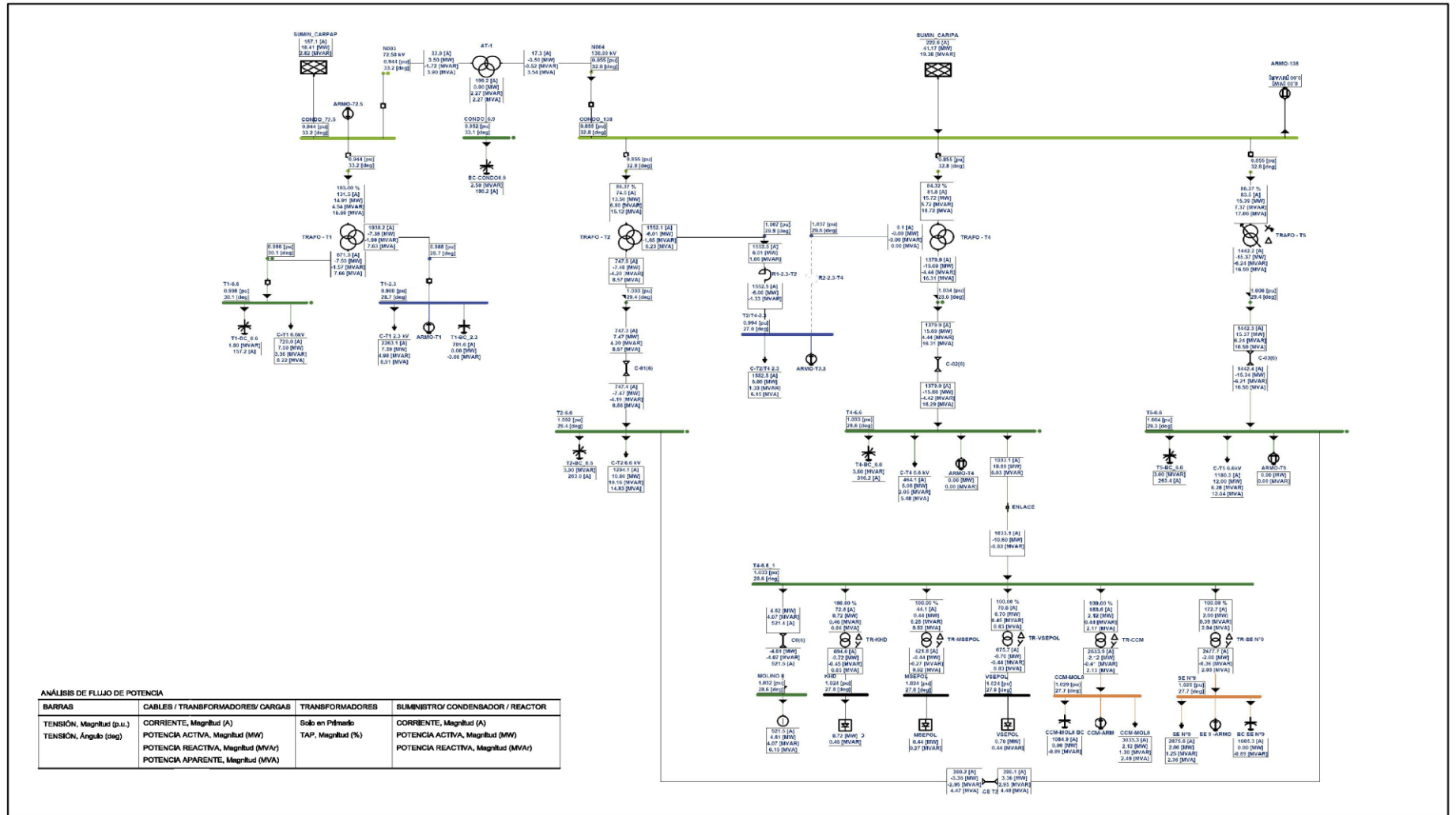
## **ANEXOS**

## Anexo 1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

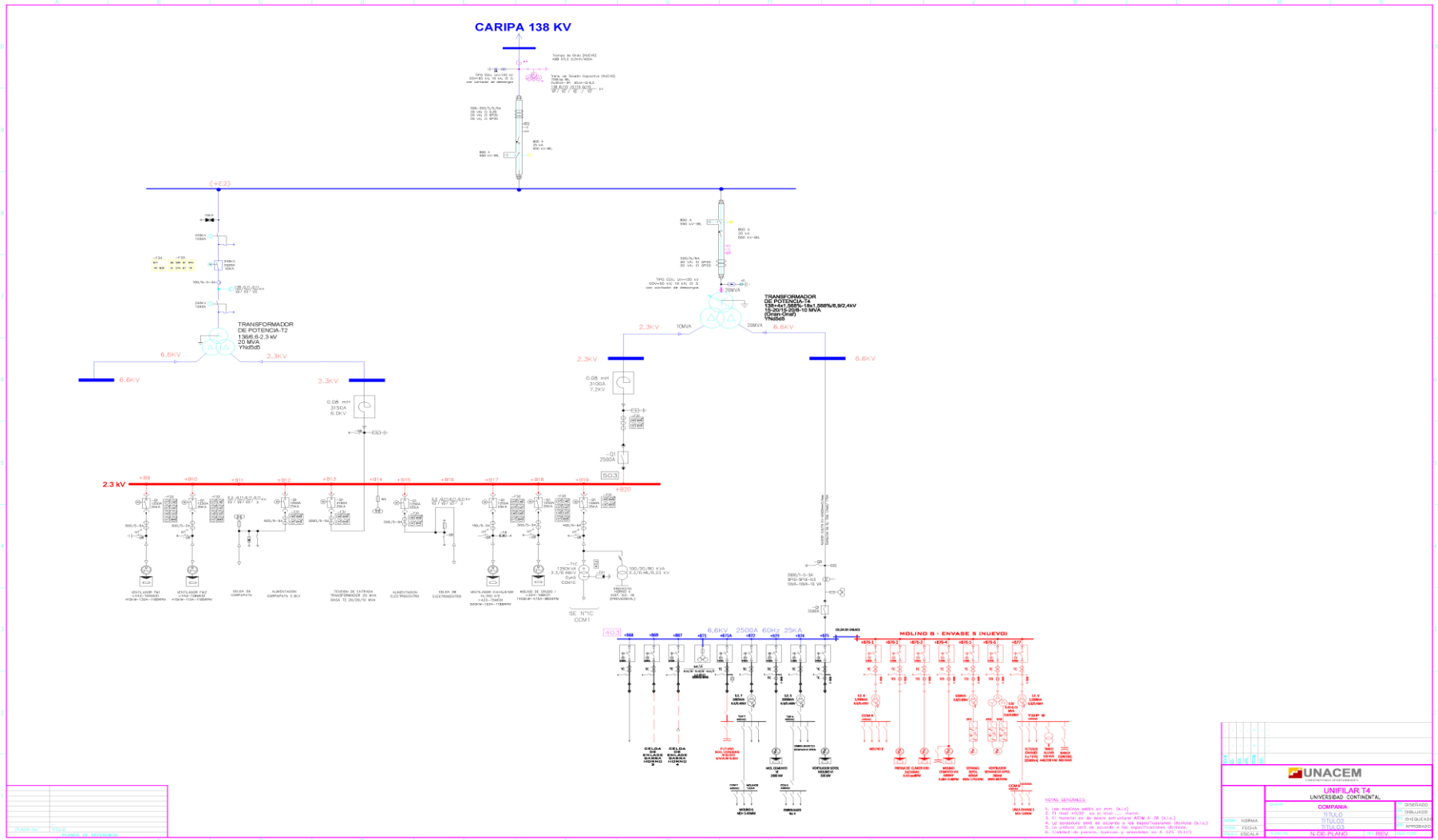
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES Y DIMENSIONES	METODOLOGÍA
¿En qué nivel el análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma - Junín?	Determinar en qué nivel el análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín.	“El análisis de flujo de potencia por incremento de carga influye en un nivel medio en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”.	<p>Con estas variables nos es útil para demostrar la hipótesis en mención lo cual se mencionan a continuación:</p> <p><b>VARIABLE INDEPENDIENTE (X):</b> Análisis de flujo de potencia</p> <p><b>VARIABLE DEPENDIENTE (Y):</b> Prospectiva energética</p> <p><b>DIMENSIONES:</b></p>	<p>El método es deductivo por basarse en teorías, conceptos y leyes donde se obtienen resultados en función al análisis de potencia por incremento en la prospectiva energética del transformador T4 de 20 MVA</p> <p>FUENTE: Hernández, Fernández y Baptista. Metodología de la Investigación. 5° Ed.</p>
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICO		DISEÑO
¿Cuál es el nivel de la distorsión armónica en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma - Junín?	Identificar el nivel de la distorsión armónica en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín.	“La distorsión armónica en relación al análisis del flujo de potencia se encuentra en un nivel medio del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”.	<p>Análisis de flujo de potencia:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Distorsión armónica</li> <li>- Coseno <math>\emptyset</math></li> </ul> <p>Prospectiva energética:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Flujo de potencia.</li> </ul>	<p>El diseño es experimental.</p> <p><b>DESCRIPTIVO: PRE Y POST TEST.</b></p> <p>Pre-Test Genera valores Post- Test.</p>
¿Cuál es el nivel de eficiencia del cos $\Phi$ (Coseno de phi) en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma - Junín?	Determinar y analizar el nivel de eficiencia del cos $\Phi$ (Coseno de phi) en relación al análisis del flujo de potencia en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín.	“El cos $\Phi$ (coseno de phi) en relación al análisis del flujo de potencia se encuentra en un nivel alto del transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín”.		
¿Cuál es el nivel del resultado esperado por el análisis del flujo de potencia por incremento de carga en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma - Junín?	Estimar el nivel del resultado esperado por el análisis del flujo de potencia por incremento de carga en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín.	“El nivel del resultado esperado por el análisis del flujo de potencia por incremento de carga en el transformador T4 de 20 MVA en la planta cementera Unacem, Condorcocha, provincia de Tarma – Junín, es medio”.		

## Anexo 2. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELÉCTRICO PROYECTADO

Nº DE PLANO B145-01-01-001



### Anexo 3. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELÉCTRICO PROYECTADO



Grado	5.00
Fecha	05/05/2024
Nombre	UNACEM
Apellido	ALVARO
Matrícula	10001
Curso	INGENIERIA EN ELECTRICIDAD

**UNACEM**  
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

**UNIFILAR T4**  
UNIVERSIDAD CONTINENTAL

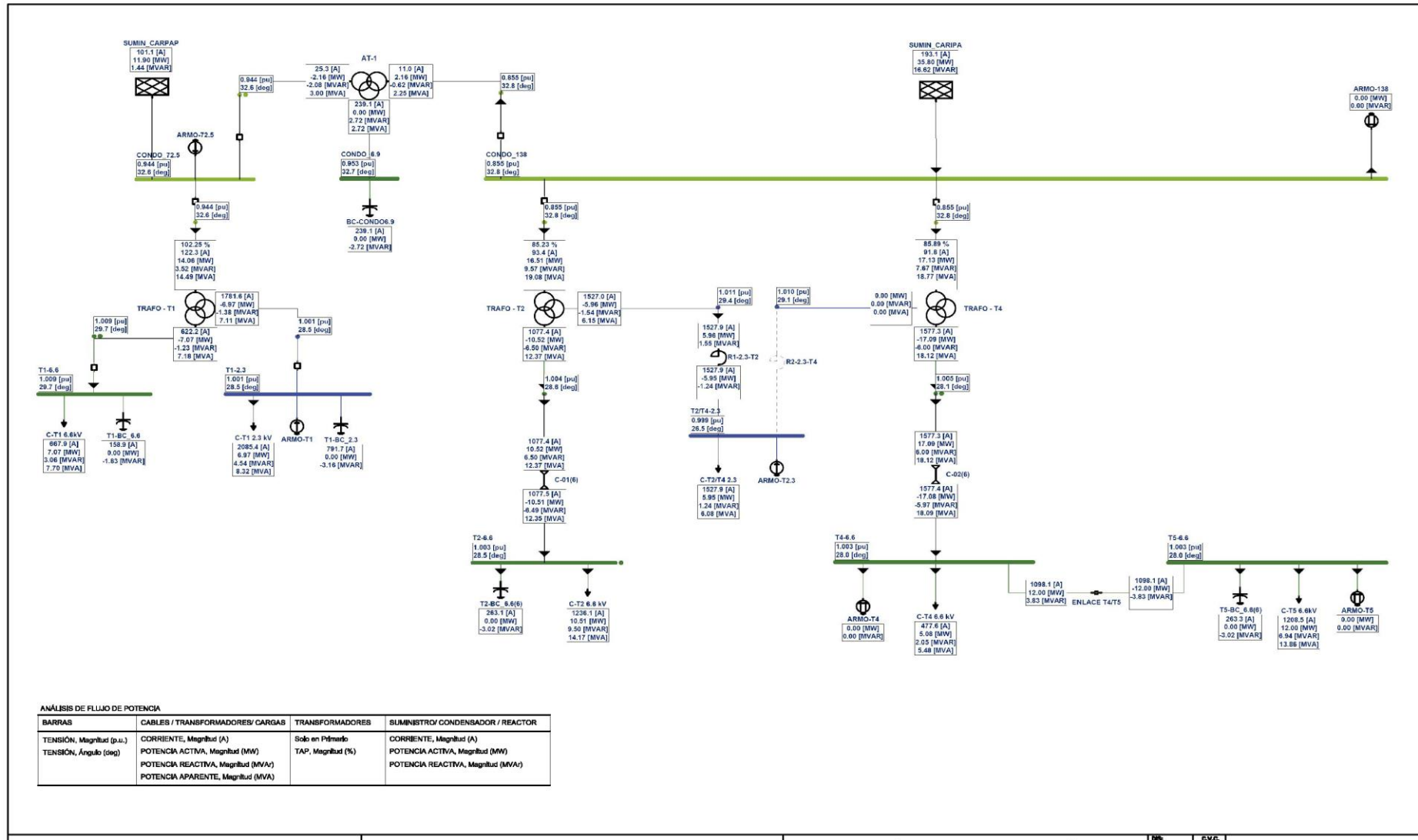
ELABORADO	ALVARO ALVARO	REVISADO	ALVARO ALVARO
VERIFICADO	ALVARO ALVARO	APROBADO	ALVARO ALVARO
FECHA	05/05/2024	FECHA	05/05/2024

**NOTAS ADICIONALES:**

1. Verificar el estado de los equipos.
2. Verificar el estado de los cables.
3. Verificar el estado de los interruptores.
4. Verificar el estado de los transformadores.
5. Verificar el estado de los fusibles.
6. Verificar el estado de los relés.
7. Verificar el estado de los contactores.
8. Verificar el estado de los motores.
9. Verificar el estado de los sistemas de protección.
10. Verificar el estado de los sistemas de control.

## Anexo 4. SISTEMA ELÉCTRICO ACTUAL

### RESULTADO DE FLUJO DE POTENCIA EN OPERACIÓN NORMAL N° DE PLANO B145-02-01-001



**ANÁLISIS DE FLUJO DE POTENCIA**

BARRAS	CABLES / TRANSFORMADORES/ CARGAS	TRANSFORMADORES	SUMINISTROS/ CONDENSADOR / REACTOR
TENSIÓN, Magnitud (p.u.)	CORRIENTE, Magnitud (A)	Solo en Primario	CORRIENTE, Magnitud (A)
TENSIÓN, Ángulo (deg)	POTENCIA ACTIVA, Magnitud (MW)	TAP, Magnitud (%)	POTENCIA ACTIVA, Magnitud (MW)
	POTENCIA REACTIVA, Magnitud (MVA)		POTENCIA REACTIVA, Magnitud (MVAR)
	POTENCIA APARENTE, Magnitud (MVA)		

Anexo 5. RESULTADOS DEL FLUJO DE POTENCIA I

**ESTUDIO DE ARMÓNICAS Y FLUJO DE CARGA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE UNACEM**

Nombre	kVBase	V sol [kV]	Vmin [kV]	Vmax [kV]	P Gen [MW]	Q Gen [MVAR]	Carga P [MW]	Carga Q [MVAR]	P motor [MW]	Q motor [MVAR]	P shunt [MW]	Q shunt [MVAR]
CONDO_138	138	0.855	0.95	1.05	35.8	16.62	0	0	0	0	0	0
CONDO_6.9	6.9	0.953	0.95	1.05	0	0	0	0	0	0	0	-2.72
CONDO_72.5	72.5	0.944	0.95	1.05	11.9	1.44	0	0	0	0	0	0
T1-2.3	2.3	1.001	0.95	1.05	0	0	6.97	4.54	0	0	0	-3.16
T2/T4-2.3	2.3	0.999	0.95	1.05	0	0	5.95	1.24	0	0	0	0
T1-6.6	6.6	1.009	0.95	1.05	0	0	7.07	3.06	0	0	0	-1.83
T2-6.6	6.6	1.003	0.95	1.05	0	0	10.51	9.5	0	0	0	-3.02
T4-6.6	6.6	1.003	0.95	1.05	0	0	5.08	2.05	0	0	0	0
T5-6.6	6.6	1.003	0.95	1.05	0	0	12	6.94	0	0	0	-3.02

Nombre	Nombre barra	P [MW]	Q [MVAR]	S [MVA]	Factor P. [pu]	R [MW]	X [MVAR]	Tipo
T1-BC_6.6	T1-6.6	0	-1.83	1.83	0	0	-1.8	Condensador shunt
T2-BC_6.6	T2-6.6	0	-3.02	3.02	0	0	-3	Condensador shunt
T5-BC_6.6	T5-6.6	0	-3.02	3.02	0	0	-3	Condensador shunt
BC-CONDO6.9	CONDO_6.9	0	-2.72	2.72	0	0	-3	Condensador shunt
T1-BC_2.3	T1-2.3	0	-3.16	3.16	0	0	-3.15	Condensador shunt

Nombre	Nombre barra	P [MW]	Q [MVAR]	S [MVA]	Factor P. [pu]
C-T4 6.6 kV	T4-6.6	5.08	2.05	5.48	0.93
C-T5 6.6kV	T5-6.6	12	6.94	13.86	0.87
C-T1 6.6kV	T1-6.6	7.07	3.06	7.7	0.92
C-T1 2.3 kV	T1-2.3	6.97	4.54	8.32	0.84
C-T2 6.6 kV	T2-6.6	10.51	9.5	14.17	0.74
C-T2/T4 2.3	T2/T4-2.3	5.95	1.24	6.08	0.98

Anexo 6. RESULTADOS DEL FLUJO DE POTENCIA II

**ESTUDIO DE ARMÓNICAS Y FLUJO DE CARGA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE UNACEM**

Nombre	LONGITUD	P [MW]	Q [MVAR]	S [MVA]	Factor P. [pu]	I [A]	Perdidas P [MW]	Perdidas Q [MVAR]	Ampacity (Norm.) [A]	CARGA %
C-01	0.14	10.52	6.5	12.37	0.85	1077.4	0.02	0.01	2400	44.9
C-02	0.16	17.09	6	18.12	0.94	1577.3	0.01	0.03	3600	43.8
R1-2.3-T2	1	5.96	1.55	6.16	0.97	1527.9	0.01	0.32	3150	48.5
ENLACE T4/T5	1	12	3.83	12.6	0.95	1098.1	0	0	0	0

NOMBRE TXFO	S nominal Primario [MVA]	S nominal Secundario [MVA]	S nominal TERCARIO [MVA]	kV nominal Primario	kV nominal Secundario	kV nominal TERCARIO	P Primario [MW]	P Secundario [MW]	P TERCARIO [MW]	Q Primario [MVAR]	Q Secundario [MVAR]	Q TERCARIO [MVAR]
AT-1	20	20	4	132	72	6.9	2.16	-2.16	0	-0.62	-2.08	2.72
TRAFO - T4	20	20	10	138	6.9	2.4	17.13	-17.09	0	7.67	-6	0
TRAFO - T1	16	9	7	68.5	6.9	2.4	14.06	-7.07	-6.97	3.52	-1.23	-1.38
TRAFO - T2	20	15	5	138	6.9	2.4	16.51	-10.52	-5.96	9.57	-6.5	-1.54

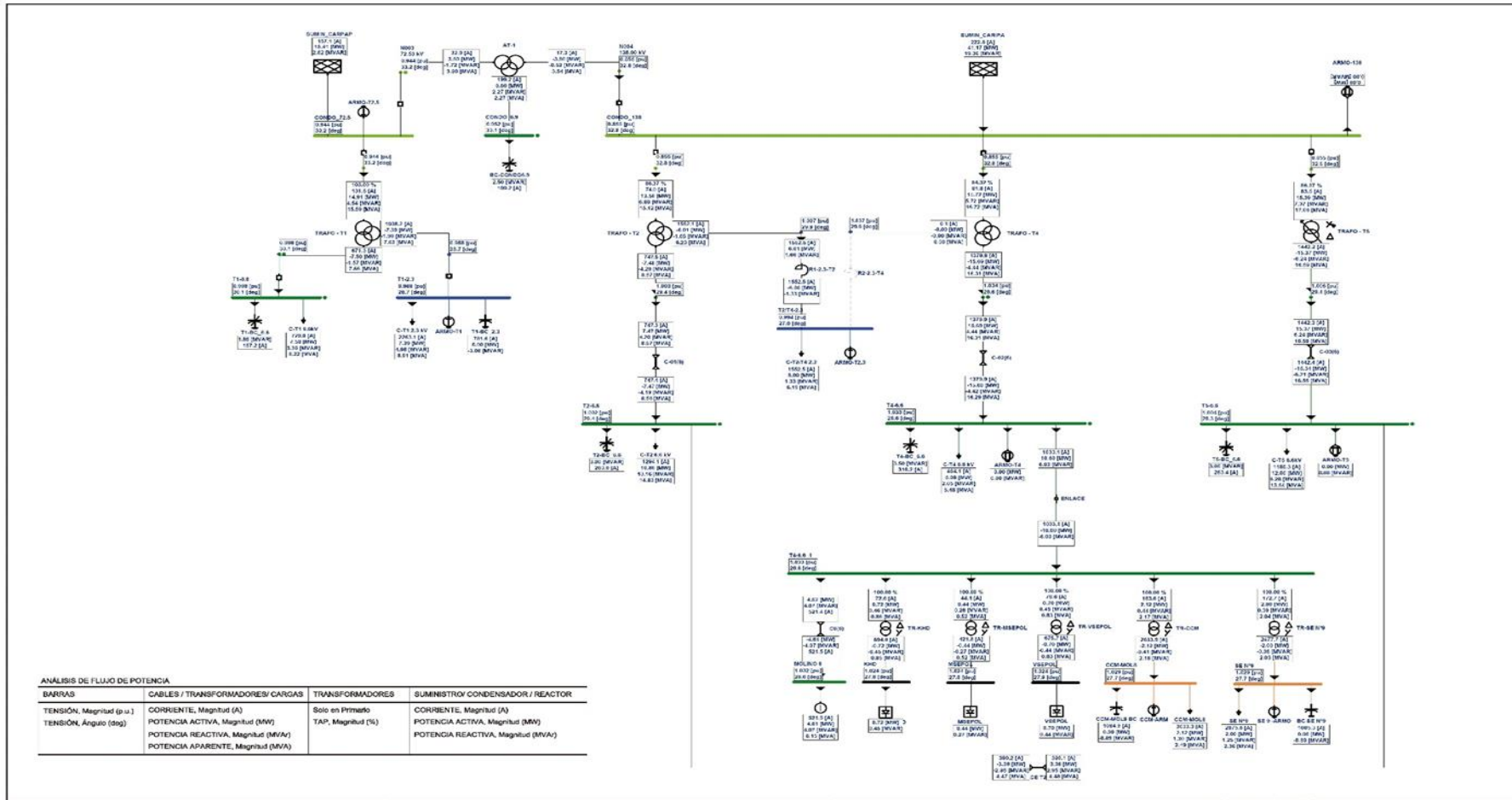
NOMBRE TXFO	S Primario [MVA]	S Secundario [MVA]	S TERCARIO [MVA]	I Primario [A]	I Secundario [A]	I TERCARIO [A]	Perdidas P [MW]	Perdidas Q [MVAR]	Capacidad (Norm.) [MVA]	CARGA [%] Capacidad	Toma mínima [kV]	Toma máxima [kV]	POSIC. TOMA S [kV]
AT-1	2.25	3	2.72	11	<b>25.3</b>	239.1	0	0.01	20	11.2	95	105	94
TRAFO - T4	18.77	18.12	0	91.8	<b>1577.3</b>	0.2	0.03	1.67	20	93.8	71.78	106.27	85.888
TRAFO - T1	14.49	7.18	7.11	122.3	<b>622.2</b>	1781.6	0.02	0.91	16	90.6	91.25	108.75	102.25
TRAFO - T2	19.08	12.37	6.15	93.4	<b>1077.4</b>	1527	0.03	1.53	20	95.4	79.55	104.54	85.232

# Anexo 7. SISTEMA ELÉCTRICO PROYECTADO

## SISTEMA ACTUAL CONDICIÓN DE OPERACIÓN PROYECTADO

### RESULTADO DE FLUJO DE POTENCIA EN OPERACIÓN NORMAL

Nº DE PLANO B145-02-02-001



ANÁLISIS DE FLUJO DE POTENCIA			
BARRAS	CABLES / TRANSFORMADORES/ CARGAS	TRANSFORMADORES	SUMINISTRO CONDENSADOR/ REACTOR
TENSIÓN, Magnitud (p.u.)	CORRIENTE, Magnitud (A)	Solo en Primario	CORRIENTE, Magnitud (A)
TENSIÓN, Ángulo (deg)	POTENCIA ACTIVA, Magnitud (MW)	TAP, Magnitud (%)	POTENCIA ACTIVA, Magnitud (MW)
	POTENCIA REACTIVA, Magnitud (MVar)		POTENCIA REACTIVA, Magnitud (MVar)
	POTENCIA APARENTE, Magnitud (MVA)		



Anexo 8. RESULTADOS DEL FLUJO DE POTENCIA III

**ESTUDIO DE ARMÓNICAS Y FLUJO DE CARGA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE UNACEM**

Nombre	kV Base	V sol [pu]	Vmin [pu]	Vmax [pu]	P Gen [MW]	Q Gen [MVAR]	Carga P [MW]	Carga Q [MVAR]	P motor [MW]	Q motor [MVAR]	P shunt [MW]	Q shunt [MVAR]
CCM-MOL8	0.46	1.029	0.95	1.05	0	0	2.12	1.3	0	0	0	-0.89
CONDO_138	138	0.855	0.95	1.05	41.17	19.36	0	0	0	0	0	0
CONDO_6.9	6.9	0.952	0.95	1.05	0	0	0	0	0	0	0	-2.27
CONDO_72.5	72.5	0.944	0.95	1.05	18.41	2.82	0	0	0	0	0	0
KHD	0.69	1.024	0.95	1.05	0	0	0.72	0.45	0	0	0	0
MOLINO 8	6.6	1.032	0.9	1.1	0	0	0	0	4.61	4.07	0	0
MSEPOL	0.69	1.024	0.95	1.05	0	0	0.44	0.27	0	0	0	0
SE N°9	0.46	1.029	0.95	1.05	0	0	2	1.25	0	0	0	-0.89
T1-2.3	2.3	0.988	0.95	1.05	0	0	7.39	4.98	0	0	0	-3.08
T1-6.6	6.6	0.998	0.95	1.05	0	0	7.5	3.36	0	0	0	-1.79
T2-6.6	6.6	1.002	0.95	1.05	0	0	10.8	10.16	0	0	0	-3.01
T2/T4-2.3	2.3	0.994	0.95	1.05	0	0	6	1.33	0	0	0	0
T4-6.6	6.6	1.033	0.95	1.05	0	0	5.08	2.05	0	0	0	-3.73
T4-6.6_1	6.6	1.033	0.95	1.05	0	0	0	0	0	0	0	0
T5-6.6	6.6	1.004	0.95	1.05	0	0	12	6.28	0	0	0	-3.02
VSEPOL	0.69	1.024	0.95	1.05	0	0	0.7	0.44	0	0	0	0

Nombre	Nombre barra	P [MW]	Q [MVAR]	S [MVA]	Factor P. [pu]	R [MW]	X [MVAR]	Tipo
BC SE N°9	SE N°9	0	-0.89	0.89	0	0	-0.84	Condensador shunt
CCM-MOL8 BC	CCM-MOL8	0	-0.89	0.89	0	0	-0.84	Condensador shunt
T1-BC_2.3	T1-2.3	0	-3.08	3.08	0	0	-3.15	Condensador shunt
T1-BC_6.6	T1-6.6	0	-1.79	1.79	0	0	-1.79	Condensador shunt
T2-BC_6.6	T2-6.6	0	-3.01	3.01	0	0	-3.01	Condensador shunt
T5-BC_6.6	T5-6.6	0	-3.02	3.02	0	0	-3.02	Condensador shunt
T4-BC_6.6	T4-6.6	0	-3.73	3.73	0	0	-3.73	Condensador shunt
BC-CONDO6.9	CONDO_6.9	0	-2.27	2.27	0	0	-2.27	Condensador shunt

Anexo 9. RESULTADOS DEL FLUJO DE POTENCIA IV

**ESTUDIO DE ARMÓNICAS Y FLUJO DE CARGA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE UNACEM**

Nombre	Nombre barra	P [MW]	Q [MVAR]	S [MVA]	Factor P. [pu]
C-T4 6.6 kV	T4-6.6	5.08	2.05	5.48	0.93
C-T5 6.6kV	T5-6.6	12	6.28	13.54	0.89
SE N°9	SE N°9	2	1.25	2.36	0.85
C-T1 6.6kV	T1-6.6	7.5	3.36	8.22	0.91
C-T1 2.3 kV	T1-2.3	7.39	4.98	8.91	0.83
C-T2 6.6 kV	T2-6.6	10.8	10.16	14.83	0.73
C-T2/T4 2.3	T2/T4 2.3	6	1.33	6.15	0.98
CCM-MOL8	CCM-MOL8	2.12	1.3	2.49	0.85
VSEPOL	VSEPOL	0.7	0.44	0.83	0.85
PRENSA KHD	KHD	0.72	0.45	0.85	0.85
MSEPOL	MSEPOL	0.44	0.27	0.52	0.85

Nombre	LONGITUD	P [MW]	Q [MVAR]	S [MVA]	Factor P. [pu]	I [A]	Perdidas P [MW]	Perdidas Q [MVAR]	Ampacity (Norm.) [A]	CARGA %
C-03	0.15	15.37	6.24	16.59	0.93	1442.3	0.03	0.03	2400	60.1
C-01	0.14	7.47	4.2	8.57	0.87	747.3	0.01	0.01	2400	31.1
C-02	0.16	15.68	4.44	16.31	0.96	1379.9	0.01	0.02	3600	38.3
ENLACE T2/T5	0.07	-3.36	-2.95	4.47	-0.75	390.2	0.01	0	3000	13
C0	0.1	4.62	4.07	6.15	0.75	521.4	0	0	2400	21.7
R1-2.3-T2	1	6.01	1.66	6.23	0.96	1552.5	0.01	0.33	3150	49.3
ENLACE	1	10.6	6.03	12.2	0.87	1033.1	0	0	0	0

Anexo 10. RESULTADOS DEL FLUJO DE POTENCIA V

**ESTUDIO DE ARMÓNICAS Y FLUJO DE CARGA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE UNACEM**

Nombre	Nombre barra	P [MW]	Q [MVAR]	S [MVA]	Factor P. [pu]
C-T4 6.6 kV	T4-6.6	5.08	2.05	5.48	0.93
C-T5 6.6kV	T5-6.6	12	6.28	13.54	0.89
SEN°9	SE N°9	2	1.25	2.36	0.85
C-T1 6.6kV	T1-6.6	7.5	3.36	8.22	0.91
C-T1 2.3 kV	T1-2.3	7.39	4.98	8.91	0.83
C-T2 6.6 kV	T2-6.6	10.8	10.16	14.83	0.73
C-T2/T4 2.3	T2/T4-2.3	6	1.33	6.15	0.98
CCM-MOL8	CCM-MOL8	2.12	1.3	2.49	0.85
VSEPOL	VSEPOL	0.7	0.44	0.83	0.85
PRENSA KHD	KHD	0.72	0.45	0.85	0.85
MSEPOL	MSEPOL	0.44	0.27	0.52	0.85

Nombre	LONGITUD	P [MW]	Q [MVAR]	S [MVA]	Factor P. [pu]	I [A]	Perdidas P [MW]	Perdidas Q [MVAR]	Ampacity (Norm.) [A]	CARGA %
C-03	0.15	15.37	8.24	16.59	0.93	1442.3	0.03	0.03	2400	80.1
C-01	0.14	7.47	4.2	8.57	0.87	747.3	0.01	0.01	2400	31.1
C-02	0.16	15.69	4.44	16.31	0.96	1379.9	0.01	0.02	3600	38.3
ENLACE T2/T5	0.07	-3.36	-2.95	4.47	-0.75	390.2	0.01	0	3000	13
C0	0.1	4.62	4.07	6.15	0.75	521.4	0	0	2400	21.7
R1-2.3-T2	1	6.01	1.66	6.23	0.96	1552.5	0.01	0.33	3150	49.3
ENLACE	1	10.6	6.03	12.2	0.87	1033.1	0	0	0	0

Anexo 11. RESULTADOS DEL FLUJO DE POTENCIA VI

**ESTUDIO DE ARMÓNICAS Y FLUJO DE CARGA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE UNACEM**

NOMBRE TXFO	S nominal [MVA]	kV nominal Primario	kV nominal Secundario	P [MW]	Q [MVAR]	S [MVA]	Factor P. [pu]	I [A]	Perdidas P [MW]	Perdidas Q [MVAR]	Capacidad (Norm.) [MVA]	CARGA [%] Capacidad	Relación de las tomas %	POSIC.TOMAS [%]	Min	Max
TR-SEN9	2.5	6.6	0.46	2	0.39	2.04	0.98	172.7	0	0.03	2.5	81.5	100	100		
TR-CCM	2.5	6.6	0.46	2.12	0.44	2.17	0.98	183.6	0	0.03	2.5	86.7	100	100		
TR-KHD	1	6.6	0.69	0.72	0.46	0.86	0.84	72.6	0	0.01	1	85.6	100	100		
TR-MSEPOL	0.6	6.6	0.69	0.44	0.28	0.52	0.85	44.1	0	0.01	0.6	86.7	100	100		
TR-VSEPOL	1	6.6	0.69	0.7	0.45	0.83	0.84	70.6	0	0.01	1	83.4	100	100		
TRAFO - T5	25	138	6.9	15.39	7.37	17.06	0.9	83.5	0.02	1.13	25	68.3	82.611	86.366	79.55	104.54

NOMBRE TXFO	S nominal Primario [MVA]	S nominal Secundario [MVA]	S nominal TERCARIO [MVA]	kV nominal Primario	kV nominal Secundario	kV nominal TERCARIO	P Primario [MW]	P Secundario [MW]	P TERCARIO [MW]	Q Primario [MVAR]	Q Secundario [MVAR]	Q TERCARIO [MVAR]
AT-1	20	20	4	132	72	6.9	-3.5	3.5	0	-0.52	-1.72	2.27
TRAFO - T4	20	20	10	138	6.9	2.4	15.72	-15.69	0	5.72	-4.44	0
TRAFO - T1	16	9	7	68.5	6.9	2.4	14.91	-7.5	-7.39	4.54	-1.57	-1.9
TRAFO - T2	20	15	5	138	6.9	2.4	13.5	-7.48	-6.01	6.8	-4.2	-1.65

NOMBRE TXFO	S Primario [MVA]	S Secundario [MVA]	S TERCARIO [MVA]	I Primario [A]	I Secundario [A]	I TERCARIO [A]	Perdidas P [MW]	Perdidas Q [MVAR]	Capacidad (Norm.) [MVA]	CARGA [%] Capacidad	Toma mínima [%]	Toma máxima [%]	POSIC.TOMAS [%]
AT-1	3.54	3.9	2.27	17.3	<b>32.9</b>	199.2	0	0.03	20	17.7	95	105	94
TRAFO - T4	16.72	16.31	0	81.8	<b>1379.9</b>	0.1	0.03	1.28	20	83.6	71.78	106.27	84.32
TRAFO - T1	15.59	7.66	7.63	131.5	<b>671.3</b>	1938.2	0.02	1.07	16	97.4	91.25	108.75	103
TRAFO - T2	15.12	8.57	6.23	74	<b>747.5</b>	1552.1	0.02	0.95	20	75.6	79.55	104.54	86.366

Anexo 32. SUBESTACIÓN PRINCIPAL UNACEM S.A.A. PLANTA CONDORCOCHA





## Anexo 43. FOTOGRAFÍAS DE TRABAJOS REALIZADOS









