

# UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍA



# UCSC

## Estudio del Efecto de Largo de Cables Móviles y Capacidad de Cortocircuito en la Amplificación de Voltaje de Salida de Subestaciones Eléctricas de Potencia en Minas de Rajo Abierto.

Eric Alejandro Montecinos Matamala

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:  
**Ingeniero Civil Eléctrico**

**Profesor Patrocinante:**  
Dr. Aníbal S. Morales M.

**Profesor Guía:**  
Dr. Eduardo E. Espinosa N.  
Dr. Guillermo E. Ramírez A.

Concepción, julio de 2019

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Medio Ambiente y Energía

Profesor Patrocinante:  
Dr. Aníbal S. Morales M.

Estudio del Efecto de Largo de Cables Móviles y Capacidad  
de Cortocircuito en la Amplificación de Voltaje de Salida de  
Subestaciones Eléctricas de Potencia en Minas de Rajo  
Abierto.

Eric Alejandro Montecinos Matamala

Informe de Habilitación Profesional  
para optar al Título de:

Ingeniero Civil Eléctrico

Julio 2019

## Resumen

La minería a rajo abierto presenta diversas particularidades respecto a los sistemas eléctricos debido a los equipamientos que son utilizados, como subestaciones móviles, cables móviles y palas mineras. El uso de estos equipos produce eventualidades adversas de riesgo tanto hacia la persona, como a la calidad de la energía. Una de estas contingencias a analizar es la amplificación del voltaje generado por la variación de la impedancia en frecuencia, que es producida por el fenómeno de resonancia.

El presente documento tiene el propósito dejar en evidencia el impacto del fenómeno de resonancia en la calidad del suministro eléctrico, bajo condiciones de operaciones típicas en el rubro minero.

En primer lugar, se realiza una revisión de la literatura referida al fenómeno de resonancia, considerando los modelos eléctricos y matemáticos que representan las razones de la presencia de este fenómeno en el sistema y su impacto en la calidad de la energía.

Luego se presenta el modelo minero típico donde se describe el equipamiento utilizado en rajo abierto, por medio de la especificación de cada uno de ellos y los parámetros a tener en cuenta para el estudio, apuntando al análisis de la impedancia en frecuencia del sistema.

Se describe el principio de funcionamiento de las palas de cable de corriente alterna, en específico el modelo Bucyrus 495HR, donde se considera relevante el análisis de su sistema eléctrico, principalmente, los convertidores de Frente Activo. Para luego encontrar las frecuencias armónicas a través de la modulación PWM.

A partir de la obtención de los parámetros de cada equipo, se elabora un modelo teórico simplificado para encontrar las frecuencias de resonancia que puedan impactar componentes armónicas de corriente que excitan el sistema, acompañado de un modelo matemático.

Finalmente, luego de la etapa de modelación teórica se obtienen los resultados de resonancia armónica a través de simulaciones y cálculos bajo distintas condiciones de operación, utilizando el Standard IEEE-519, que define las recomendaciones para la calidad de suministro eléctrico.

Los resultados demostraron que la amplificación de voltaje ocasionado por las altas impedancias a la frecuencia de resonancia, producto de la interacción entre la inductancia de la subestación móvil y la capacitancia del cable minero, puede incrementar la tensión hasta un 21% sobre el valor nominal del equipo.

# Summary

The open-pit mining presents distinctive features according to the electric systems, because of the equipment that are used, such as mobile substations, mobile cables and mining shovels. The usage of these equipment produce adverse eventualities of risk for both people and energy quality. One of these contingencies to analyze is the amplification of the voltage generated by the variation of the frequency impedance, which is produced by the resonance phenomenon.

The purpose of this document is to evince the impact of the resonance phenomenon in the quality of electric supply, under typical operation conditions in the mining industry.

Firstly, a revision of the resonance phenomena literature is going to be made, considering the electric models and mathematicians that represent the reasons of the presence of this phenomena in the system and its energy quality impact.

Then the typical mining model will be present, where the usage equipment are described in open-pit mining, through the specification of each one and consider also the parameters for this study, pointing to the impedance analysis in the system frequency.

The working principle of the cable shovels of the alternating current are described, specifically the Bucyrus 495HR model, where the analysis of its electric system are considered, principally, the active front converters. So then find the harmonic frequencies through the pulse width modulation together with the revision of Standard IEEE-519, which defines the recommendations for the quality electric supply.

Starting from the parameters of each equipment obtained, it is elaborated a simplify theoretical model to find the resonance frequencies that impact the current harmonic components that excite the system, accompanied with a mathematical model.

Finally, after the theoretical modeling stage, the results of the harmonic resonance are obtained through the simulations and calculation under different conditions of operation.

The results showed that the voltage amplification caused by the high impedance at the resonant frequency, product of the interaction between the inductance of the mobile substation and the capacitance of the mining cable, can increase the voltage up to 21% over equipment rated value.

Dedicado a mi familia y amigos.

## Agradecimientos

Durante mi camino como estudiante universitario estuve acompañado de mi familia que me dio su apoyo incondicional, lo que fue fundamental en este proceso. Es por esto que quiero darles mis agradecimientos a mis padres y hermanos, cada uno de ellos cumplieron un rol muy importante en este desafío. Durante los malos momentos, ellos fueron los protagonistas en darme la fuerza para seguir adelante y superarme cada vez más.

Amigos con los que he compartido mi vida desde los 5 años han estado presentes en las buenas y en las malas, siempre sacándome sonrisas y dándome tranquilidad, lo que ha sido esencial para mantener la serenidad en los momentos de alta presión estudiantil.

Tuve la oportunidad de conocer compañeros de carrera con los que en conjunto nos apoyamos para alcanzar metas. Siempre nos dimos la ayuda cuando era necesaria, dejando toda competencia de lado. Me gustaría nombrar a una persona en particular con el que batallamos como grupo para salir adelante, él es Luis, mi compañero y amigo que se encuentra en estas mismas circunstancias. A todos ellos mis más sinceros agradecimientos.

Agradecer a mi profesor Aníbal Morales, que dio toda su disposición para cumplir con este objetivo, siendo parte fundamental de mi formación académica. Fue muy grato trabajar con él. Quisiera dar las gracias por su entrega y compromiso durante todo el proceso.

Me siento agradecido de todo el cuerpo docente de la carrera Ingeniería Civil Eléctrica, que estuvo presente en mi formación académica. Tengo la certeza de que tomé una buena decisión en ser estudiante de cada uno de ellos.

# Contenido

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción General .....	1
1.2 Trabajos Previos .....	2
1.2.1 Estudio del Sistema Eléctrico de Potencia Minero .....	2
1.2.2 Modelo y Parámetros de S/E y Líneas de Transmisión.....	4
1.2.3 Palas Mineras de Cable AC .....	4
1.2.4 Convertidor de Frente Activo .....	5
1.2.5 Resonancia y sus Efectos en el Sistema Eléctrico .....	6
1.2.6 Discusión .....	7
1.3 Hipótesis del Trabajo .....	8
1.4 Objetivos.....	8
1.4.1 Objetivo General .....	8
1.4.2 Objetivos Específicos.....	8
1.5 Alcances y Limitaciones .....	9
1.6 Metodología.....	9
<b>CAPÍTULO 2. RESONANCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA .....</b>	<b>12</b>
2.1 Introducción .....	12
2.2 Resonancia Serie .....	12
2.3 Resonancia Paralelo .....	15
2.4 Operación de Capacitor Conexión Paralelo.....	16
2.4.1 Armónicos de Corriente y Voltaje .....	19
2.4.2 Condensadores Para Filtro Armónico .....	20
2.4.3 Reactores Para Filtro Armónico .....	22
2.5 Filtros Pasivos.....	22
2.6 Discusión .....	25
<b>CAPÍTULO 3. SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA MINERO TÍPICO.....</b>	<b>27</b>
3.1 Introducción .....	27
3.2 Modelo SEP Minero .....	29
3.3 Parámetros de interés .....	29
3.3.1 Subestaciones eléctricas de Potencia .....	29
3.3.2 Líneas Aéreas .....	30
3.3.3 Cables Mineros.....	32
3.3.4 Discusión .....	34
<b>CAPÍTULO 4. PALA ELÉCTRICA MINERA A.C: BUCYRUS 495HR.....</b>	<b>35</b>

4.1	Introducción .....	35
4.2	Sistema Eléctrico de Potencia .....	35
4.3	Modulación Sinusoidal – PWM.....	38
4.4	Standard IEEE-519 .....	45
4.5	Discusión .....	46
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE POSIBLES RESONANCIAS .....</b>		<b>47</b>
5.1	Introducción .....	47
5.2	Modelo Equivalente del Sistema .....	47
5.3	Discusión .....	52
<b>CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN SISTEMA ELÉCTRICO MINERO .....</b>		<b>53</b>
6.1	Introducción .....	53
6.2	Conexión de una Pala Minera AC .....	54
6.2.1	<i>Caso 1.a: Cable Minero 1.2 km.....</i>	<i>55</i>
6.2.2	<i>Caso 1.b: Cable Minero 1.8 km.....</i>	<i>56</i>
6.3	Conexión de Dos Palas en Paralelo .....	59
6.3.1	<i>Caso 2.a: Pala 1-1.8km y Pala 2-1.2km.....</i>	<i>60</i>
6.3.2	<i>Caso 2.b: Pala 1-4.2 km y Pala 2-3.3 km.....</i>	<i>62</i>
6.4	Comportamiento de Sistemas Robustos y Débiles .....	63
6.5	Discusión .....	66
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES .....</b>		<b>68</b>
7.1	Sumario .....	68
7.2	Conclusiones .....	69
7.3	Trabajos Futuros .....	70
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>71</b>

## Lista de Tablas

Tabla 2.1 Limites Capacitor .....	17
Tabla 3.1 Parámetros Subestaciones Móviles .....	29
Tabla 3.2 Parámetros Subestación principal.....	30
Tabla 3.3 Características técnicas líneas aéreas .....	31
Tabla 3.4 Parámetros de líneas áreas 500MCM.....	31
Tabla 3.5 Características técnicas cables mineros.....	32
Tabla 3.6 Parámetros de cables mineros .....	33
Tabla 4.1 Parámetros Transformador Bucyrus 495HR .....	35
Tabla 4.2 Frecuencias Armónicas de Voltaje.....	42
Tabla 6.3 Frecuencias Armónicas de Corriente.....	43
Tabla 4.4 Frecuencias Armónicas de Voltaje 4 AFEs.....	44
Tabla 4.5 Frecuencias Armónicas de Corriente 4 AFEs .....	45
Tabla 4.6 Limites de Corriente Armónica para Sistemas de 120[V] a 69[kV] Nominal .....	45
Tabla 4.7 Limites de Distorsión de Voltaje.....	46
Tabla 5.1 Parámetros Circuito Resonante .....	48
Tabla 5.2 Armónica Resonante Para Largos de Cables Móviles .....	51
Tabla 6.1 Parámetros de Largo de Cable Minero.....	53
Tabla 6.2 Parámetros S/E .....	53
Tabla 6.3 Caso 1.a: Voltaje en Resonancia h=100.....	56
Tabla 6.4 Caso 1.b: Voltaje en Resonancia h=76.....	58
Tabla 6.5 Caso 2.a: Voltaje en Resonancia h=76.....	61
Tabla 6.6 Caso 2.b: Voltaje en Resonancia h=44.....	63
Tabla 6.7 Potencia de Cortocircuito S/E 4MVA .....	64
Tabla 6.8 Potencia de Cortocircuito S/E 6MVA .....	64
Tabla 6.9 12 kA <sub>coci</sub> – S/E 4MVA.....	64
Tabla 6.10 6 kA <sub>coci</sub> – S/E 4MVA.....	65
Tabla 6.11 12kA <sub>coci</sub> - 6MVA .....	65
Tabla 6.12 6kA <sub>coci</sub> - 6MVA .....	65
Tabla 6.13 Voltaje de Entrada Pala Promedio.....	66

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Diagrama de Flujo.....	11
Figura 2.1 Circuito Resonante Serie.....	12
Figura 2.2 Impedancia equivalente serie .....	13
Figura 2.3 Corriente en resonancia serie .....	14
Figura 2.4 Voltaje en Inductor y Capacitor .....	14
Figura 2.5 Circuito resonante paralelo .....	15
Figura 2.6 Impedancia equivalente paralelo.....	16
Figura 2.7 Conexión de Banco de capacitores paralelo.....	17
Figura 2.8 Potencia Reactiva Compensada con condensadores en una barra de 380[V].....	23
Figura 2.9 Filtro Serie.....	23
Figura 2.10 Filtro Sintonizado Simple .....	24
Figura 2.11 Filtro Sintonizado Shunt .....	24
Figura 3.1 Suministro Eléctrico Pala Minera AC.....	27
Figura 3.2 Diagrama unilineal Minero .....	28
Figura 3.3 Formación horizontal de conductores .....	30
Figura 3.4 Esquema Constructivo Cable Minero para Equipo de Media Tensión.....	32
Figura 4.1 Bucyrus 495HR.....	35
Figura 4.2 Convertidor AFE.....	36
Figura 4.3 Diagrama SEP y esquema de protecciones pala Bucyrus 495HR.....	37
Figura 4.4 Señal referencia vs Señal portadora .....	39
Figura 4.5 Modulación Sinusoidal-PWM de rectificador AFE 1.....	40
Figura 4.6 Tren de pulsos de línea.....	41
Figura 4.7 Espectro Armónico de Voltaje .....	42
Figura 4.8 Espectro Armónico de Corriente.....	42
Figura 4.9 Espectro Armónico de Voltaje 4 AFEs.....	43
Figura 4.10 Espectro Armónico de Corriente 4 AFEs .....	44
Figura 5.1 Alimentación Pala Minera AC S/E Móvil #1 .....	47
Figura 5.2 Circuito equivalente Monofásico del Sistema.....	49
Figura 5.3 Circuito equivalente Monofásico simplificado .....	49
Figura 5.4 Circuito equivalente Armónico Monofásico.....	50

Figura 6.1 Caso 1: Una Pala Minera 3.5MVA .....	54
Figura 6.2 Caso 1.a: Impedancia Salida S/E .....	55
Figura 6.3 Caso 1.a Armónicos de Voltaje.....	56
Figura 6.4 Caso 1.b: Impedancia Salida S/E .....	57
Figura 6.5 Caso 1.b: Armónicos de Voltaje .....	58
Figura 6.6 Caso 2: Dos Palas en Paralelo.....	59
Figura 6.7 Caso 2.a: Impedancia Salida S/E .....	60
Figura 6.8 Armónicos de Voltaje .....	61
Figura 6.9 Caso 2.b: Impedancia Salida S/E .....	62
Figura 6.10 Caso 2b: Armónicos de Voltaje .....	62
Figura 6.11 Tendencia de los Sistemas .....	67

## Nomenclatura

S/E	: Subestación Eléctrica de Potencia.
SEP	: Sistema Eléctrico de Potencia.
AC	: Corriente Alterna.
DC	: Corriente Continua.
AFE	: Active Front End.
$f_{fund}$	: Frecuencia Fundamental.
THD	: Distorsión Total Armónica.
TDD	: Distorsión Total de Demanda.
PCC	: Punto Común de Acoplamiento.
SPWM	: Modulación por Ancho de Pulsos Sinusoidal.
THD <sub>v</sub>	: Distorsión Total Armónica de Voltaje.
RMS	: Raíz Cuadrada Media (Valor eficaz).
Coci	: Cortocircuito.

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1 Introducción General

Dentro de la minería de nuestro país están presentes las minas de rajo abierto, que se desarrollan sobre la superficie del terreno. La realización del proceso de extracción de mineral a rajo abierto se opera por medio de palas eléctricas DC y AC que se accionan a través de motores eléctricos. Estos equipos, según los datos proporcionados por el Consejo Minero están representando un 7% de la demanda de electricidad durante la operación de la mina.

Las palas eléctricas AC, respecto al sistema de control, utilizan rectificadores de frente activo, que emplean semiconductores de potencia del tipo IGBT. Estos tienen como objetivo disminuir potenciales puntos de falla, mitigar componentes armónicas y optimizar el rendimiento del equipo en términos energéticos.

Estas palas son energizadas por un sistema de alimentación que posee largos cables aéreos y mineros en conjunto con subestaciones móviles. Lo que sucede es que debido a las largas distancias de estos cables, la magnitud de inductancia y capacitancia aumentan. Debido a lo anterior, es posible la generación del fenómeno eléctrico conocido como resonancia.

La resonancia producida en la alimentación de las palas puede provocar efectos que no son deseados dentro del sistema, como por ejemplo, aumentar las componentes armónicas circulantes en la S/E y terminales de entrada de palas mineras AC que inyectan armónicos de alta frecuencia. Ocurre que cuando las frecuencias de resonancia se acercan a una frecuencia armónica, la tensión en la salida de las SS/EE móviles puede ser amplificada. Por lo tanto mientras más cercanas sean estas frecuencias, mayor puede ser la amplificación de la tensión a nivel de alimentadores y terminales de entrada de esta. Como todo equipo, estos poseen rangos de tolerancia de voltaje y corriente máximos. Siendo este fenómeno causante de que estos rangos puedan ser sobrepasados, provocando deterioro en los componentes, exceder las capacidades térmicas de los cables y superar los límites de diseño de los equipos presentes dentro del sistema o bien afectar la operación de estos y por consecuencia provocar pérdidas en la productividad.

Además, si dentro del sistema, aumenta el largo de cable, las reactancias van a crecer y la impedancia equivalente del sistema va a aumentar, impactando en la regulación de voltaje y por ende provocará una disminución de la potencia de cortocircuito en los terminales de entrada de la carga, haciendo que estos equipos no operen a su tensión nominal. Si disminuye el voltaje de alimentación, la corriente deberá subir para producir la potencia demandada, ocasionando que circule una corriente rms mayor por los cables, debido a la demanda de la pala, generando que los alimentadores pierdan sus características de aislación y se degraden.

Es por esto que en esta investigación se realiza una modelación y evaluación para determinar las condiciones adversas en la operación del sistema eléctrico minero, estudiando el largo de cables móviles y capacidad de cortocircuito en la salida SS/EE y terminales de entrada de palas mineras AC.

## **1.2 Trabajos Previos**

Para comprender el motivo del estudio es necesario un análisis conceptual de las contingencias presentes en el sistema eléctrico minero y de forma paralela instruirse respecto a los parámetros de diseño de los equipos y elementos presentes. Lo anterior es necesario para entender el comportamiento de estos en razón a las eventualidades adversas, principalmente, la amplificación del voltaje, efecto de cortocircuito y largos de cables móviles. Por lo que a modo general, este informe se divide en 2 principales segmentos:

- ❖ Modelación Teórica del Sistema Eléctrico de Potencia minero.
- ❖ Evaluación y análisis de contingencias en la salida de subestaciones eléctricas de potencia y terminales de entrada de Palas de cable AC.

### **1.2.1 Estudio del Sistema Eléctrico de Potencia Minero**

1. Guide for Application of Shunt Power Capacitors, IEEE 1036, IEEE Power & Energy Society, IEEE, 2010.

Esta guía entrega la información necesaria para obtener los parámetros de diseño de los condensadores, entregando la tolerancia de voltajes, corriente y potencia reactiva, integrando la posibilidad de resonancia al momento de operar con bancos de condensadores dentro de un sistema.

2. Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, IEEE 1531, Power Engineering Society, IEEE, 2003.

Se establecen las especificaciones para el diseño de filtros dependiendo de las características del sistema eléctrico de potencia, destinados a contaminación armónica, para establecer la tolerancia en sobrecarga de los elementos que componen los filtros.

3. Eduardo P. Wiechmann, “*Filtros Pasivos*”. Seminario, Calidad de Suministro Eléctrico, una Herramienta para Mejorar la Competitividad.

Se menciona el uso de banco de condensadores y filtros sintonizados, para distintos escenarios, con el objetivo de dar a conocer cuando es conveniente utilizar estos equipos. Además estudia el comportamiento de impedancia en frecuencia, respecto a la potencia reactiva que aportan los bancos de condensadores.

4. , Omar J. Abdel-Baqi, Michael G. Onsager, and Peter J. Miller, *The Effect of Available Short-Circuit Capacity and Trail Cable Length on Substation Voltage Amplification in Surface Excavation Industry*, in IEEE Transactions on Industry Applications, 2016.

Este artículo investiga el efecto del largo de cables móviles en la calidad del voltaje de salida de subestaciones eléctricas de potencia en las mineras de rajo abierto. Se da a conocer algunas recomendaciones antes de instalar una nueva máquina (pala de cable AC) con el fin de evitar contingencias por resonancia y capacidad de cortocircuito en los terminales de entrada de estas palas. Este paper es esencial para esta evaluación, ya que se pueden extrapolar ciertas consideraciones mencionadas hacia este trabajo.

5. Michael R. Yenchek and Peter G Kovalchik, “*The Impact of Current Load on Mine-Trailing Cable Thermal Life*”, in Conf. Rec. 10<sup>th</sup> Mining Electrotech. 1993.

Se describen cuáles son los efectos térmicos bajo los cuales opera un cable minero ya sea 2/0 AWG o 4/0 AWG, en condiciones de altas corrientes demandadas por cargas mineras de alta potencia. Considerando que existen problemas en la regulación de voltaje en los sistemas eléctricos mineros, tanto de rajo abierto como subterráneo.

### 1.2.2 Modelo y Parámetros de S/E y Líneas de Transmisión

1. “Electrical Power Transmission System Engineering, Analysis and Design”, Turan Gönen, Third Edition, 2014.

Este libro es una guía para determinar los parámetros y el modelo equivalente de la alimentación de las palas mineras de cable AC considerando líneas áreas y cables móviles, específicamente el Capítulo 4: “Overhead Power Transmission”, que establece el cálculo de parámetros RLC para líneas áreas trifásicas según su formación (horizontal o triangular) y además indica los distintos modelos para las líneas de transmisión según el largo de estas.

2. Thomas Novak, “*Safety Analysis of Trailing Cables Use on High-Voltage Continuous Miners*”, in IEEE Transactions on Industry Applications, 2012.

Este documento radica principalmente en los riesgos que existen en la mala manipulación de los cables móviles mineros, enfocado en el choque eléctrico que puede producir debido al deterioro de la aislación del cable. Esta información ayuda en la comprensión de los aspectos constructivos de los cables móviles.

### 1.2.3 Palas Mineras de Cable AC

1. Gerald M. Brown, Bernard J. Ebacher, Walter G, “*Increased Productivity with AC Drives for Mining Excavators and Haul Trucks*”, in Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, Italy.

Se detalla cuáles son los puntos principales que hacen que sea efectiva la implementación de sistemas de accionamiento AC en excavación minera por sobre los sistemas DC. Basándose principalmente en el uso de rectificadores AFE y su potente rendimiento dinámico.

2. José Rodríguez, Luis Morán, Jorge Pontt, José Espinoza, Rodrigo Díaz, Eduardo Silva, “*Operating Experience of Shovel Drives for Mining Applications*”, in Industry Applications Conference, 2002, 37<sup>th</sup> IAS Annual Meeting, USA.

Se evalúa las diferentes topologías de palas AC, específicamente, la experiencia en el rendimiento a través de la reducción de la potencia reactiva y disminución de armónicos de corriente en la entrada, mediante la implementación de rectificadores AFE, lo que además permite la regeneración de potencia de los motores hacia la red.

Finalmente se destaca el uso de semiconductores de potencia tipo IGBT por sobre el GTO, debido la reducción de componentes en su construcción y protección de sobrecorriente más eficiente, haciendo que el equipo posea una mayor confiabilidad durante la operación.

#### 1.2.4 Convertidor de Frente Activo

1. Frank G. Wickert, “*AFE IGBT AC Drives For Bucyrus 495BII Shovels*”, The Western Mining Electrical Association, New Mexico, 2000.

Se describe la topología de las palas mineras AC Bucyrus 495BII y los beneficios en la operación basados en la implementación convertidores AFE. Donde además se realiza una revisión del contenido armónico que generan estas palas considerando una modulación PWM. Por lo que es de uso base para encontrar las frecuencias armónicas de voltaje y corriente generadas por la pala.

2. Power Electronics Handbook, Muhammad H. Rashid, 2001.

Capítulo 14: “Inverters”, se describen las distintas topologías de los inversores monofásicos y trifásicos fuente de voltaje y corriente, para obtener a partir de una fuente DC, una forma de onda sinusoidal de salida AC. Se presentan las técnicas de modulación como: PWM unipolar y bipolar, eliminación selectiva de armónicos y vector espacial. Además, se mencionan los modos de operación en la regeneración de energía. Se detalla que en aplicaciones mineras, los procesos que cuentan con correas transportadoras a partir de la energía cinética generada, pueden regenerar energía eléctrica hacia el sistema de distribución, a través de los convertidores multinivel de frente activo.

3. Babak Parkhideh, Hesam Mirzaee and Subhashish Bhattacharya, “*Supplementary Energy Storage and Hybrid Front-End Converters for High-Power Mobile Mining Equipment*”, in IEEE Transactions on Industry Applications, 2013.

Este documento es una investigación acerca del funcionamiento de los sistemas de conversión de accionamiento de corriente alterna en aplicaciones multimotor de alta potencia para equipos móviles de minería con capacidad de energía regenerativa, basado en la topología de los convertidores de frente activo.

### 1.2.5 Resonancia y sus Efectos en el Sistema Eléctrico

1. M.A Karimi, M. Tavakoli, “*Harmonic Resonance in Power System – A Documented Case*”, in 16<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality for Power, Romania, 2014.

Este Paper estudia un caso real de resonancia armónica, que da fallo en fusible de banco de condensadores. Se investigan los armónicos de corriente y la impedancia en frecuencia de un sistema, y luego la tensión RMS en fusible dañado por la amplificación de voltaje a causa de la resonancia paralelo generada por el largo de cables y la inductancia de la subestación.

2. Caixia Yang, Kaipei Liu, Dongxu Wang, “*Harmonic Resonance Circuit’s Modeling and Simulation*”, Department of Electrical engineering, in Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, China, 2009.

Se da a conocer el modelo de circuito analítico simplificado para estimar la resonancia armónica paralelo y serie en distintos puntos de un sistema eléctrico específico, basado en el algoritmo de matriz de impedancia. Luego se compara el impacto en la impedancia del sistema.

3. J. Rodriguez, “*Resonance and overvoltages in a medium voltaje fan motor drive with long cables in an underground mine*”, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.

Este artículo presenta un análisis y mitigación de sobretensiones detectadas en motores de inducción que producían falla de los devanados. Estos equipos son alimentados por un inversor de 1400 HP a 13.8 kV, que son utilizados para ventilación de aire en una mina subterránea, donde la resonancia paralelo producida era la causa base de esta amplificación.

### 1.2.6 Discusión

La literatura expresa que existe un corrimiento de la impedancia en frecuencia dependiendo de la potencia reactiva presente en los sistemas eléctricos. En este trabajo se demuestra por medio de modelos matemáticos y simulaciones, cual es la relación entre la frecuencia de resonancia y la potencia reactiva que se origina dentro del sistema eléctrico minero.

La revisión referida a la topología de las palas mineras AC muestran que el uso de semiconductores de potencia IGBT se consolida como el dispositivo más robusto y compacto para estos equipos, principalmente por sus características tales como, bajo contenido armónico de corriente en la entrada y flujo de potencia bidireccional. Lo que permite la regeneración de energía y corrección del factor de potencia.

Las revisiones que tratan acerca de la resonancia producida en la alimentación de palas mineras, muestra que la capacidad de cortocircuito de salida de las subestaciones afecta a la frecuencia donde se genera la resonancia. El presente escrito da a conocer una modelación teórica para evidenciar cual es la incidencia de la capacidad de cortocircuito en los parámetros de las subestaciones, que alteran la resonancia.

La literatura menciona que las posibles resonancias producidas en el sistema debido a las componentes capacitivas e inductivas generada por las SS/EE y cables móviles ya sea en operación subterránea o de rajo abierto, afectan directamente a la distorsión presente en las variables de corriente y voltaje de entrada de las palas mineras AC, de manera que equipos y componentes (reactores y capacitores) estarán trabajando en condiciones no establecidas en su diseño, disminuyendo la vida útil o bien produciéndose fallas que puedan ocasionar un completo deterioro, provocando grandes pérdidas en productividad y la obligación de grandes reinversiones para adquirir el equipo en cuestión. Siendo estas las razones de estudiar las características eléctricas en la salida de las SS/EE, por medio del análisis del SEP minero, específicamente, evaluar la amplificación del voltaje respecto a la capacidad de cortocircuito y largos de cables móviles.

### **1.3 Hipótesis del Trabajo**

Existen condiciones de operación de sistemas eléctricos mineros en que puede ocurrir resonancia y por consecuencia, amplificación de tensión en los terminales de entrada de palas mineras.

### **1.4 Objetivos**

Se propone objetivo general y específico para el seguimiento del estudio analítico y evaluación del sistema eléctrico minero.

#### **1.4.1 Objetivo General**

Desarrollar una modelación teórica y evaluación del efecto de largo de cables móviles y capacidad de cortocircuito en la amplitud de voltaje de salida de SS/EE móviles de potencia en operaciones mineras de rajo abierto.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar el fenómeno de resonancia en sistemas eléctricos de potencia mineros.
- Determinar modelo de Sistema Eléctrico de Potencia minero típico.
- Analizar parámetros de líneas aéreas y cables mineros típicos.
- Caracterizar las variables de voltaje y corriente de entrada de una pala minera típica AC.
- Determinar circuito eléctrico equivalente para análisis de posibles resonancias en la salida de subestaciones eléctricas de potencia móviles.
- Evaluar el efecto del largo de cables móviles en la amplificación de voltaje de entrada de palas mineras AC.
- Evaluar el efecto de la capacidad de cortocircuito en la amplificación de voltaje de salida de SS/EE y entrada de palas mineras AC.
- Evaluar el efecto combinado de largo de cables mineros y potencia de cortocircuito en la amplificación de voltaje de entrada de palas mineras AC.

## 1.5 Alcances y Limitaciones

- El análisis se realizará en base a una modelación típica de un Sistema Eléctrico de Potencia de una faena minera de rajo abierto, considerando parámetros típicos realistas de largo de líneas aéreas, cables móviles, parámetros de cortocircuito a nivel de barras de alimentadores, parámetros de subestaciones móviles y palas mineras AC.
- Los análisis propuestos se realizaran a través de modelos teóricos y simulaciones en ambiente de software eléctrico “EasyPower” sintonizado con mediciones previas reportadas en la literatura y parámetros típicos de operación de sistemas eléctricos mineros de faenas a rajo abierto.

## 1.6 Metodología

La primera etapa consta en recopilación de datos respecto al fenómeno de resonancia y sus efectos adversos dentro de los sistemas eléctricos de potencia, considerando la tolerancia de diseño de los capacitores y filtros armónicos que son entregados por el estándar IEEE 1036-2010: “Guide for Application of Shunt Power Capacitor” y IEEE 1531-2003: “Guide for Application and Specification of Harmonic Filters”. Además de la determinación de parámetros de líneas aéreas y cables mineros para estructurar el modelo de circuito equivalente. Se identifican las frecuencias armónicas de voltaje y corriente, para luego obtener las frecuencias resonantes, con el fin de hacer un contraste entre las frecuencias armónicas encontradas en la modulación SPWM y las potenciales frecuencias de resonancia que puedan impactar armónicas de corriente, a través de una modelación teórica.

En la segunda etapa se realiza la evaluación del sistema eléctrico minero por medio de simulaciones, tomando todos los parámetros determinados y recopilados. Considerando como puntos específicos de mediciones, la capacidad de cortocircuito en la salida de SS/EE móviles, las resonancias producidas en este punto y el efecto en el voltaje RMS de alimentación de pala mineras, bajo diversas condiciones de operación.

A continuación se presenta una reseña de los capítulos referidos a la investigación.

Capítulo 2: Se caracteriza de forma teórica el concepto de fenómeno de resonancia serie y paralelo, considerando la conexión de capacitores y filtros armónicos, mencionando los efectos dentro del sistema en términos del voltaje y la corriente.

Capítulo 3: Se describe el funcionamiento de los sistemas eléctricos mineros, detallando de manera técnica los equipos que son utilizados. Además del cálculo para obtener los parámetros de interés.

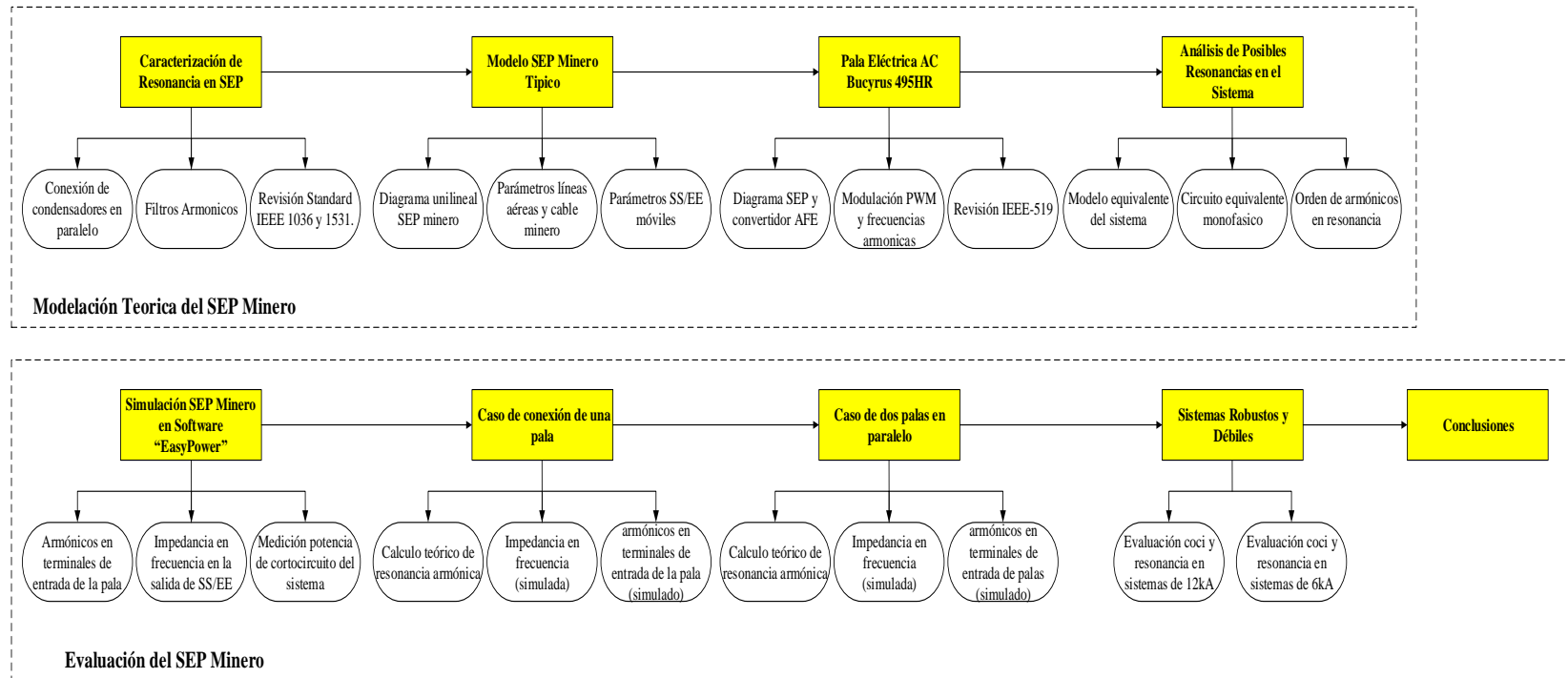
Capítulo 4: Presenta el detalle del principio de funcionamiento de la pala eléctrica Bucyrus 495HR, especificando la composición de su sistema eléctrico interno, destacando el equipamiento de interés, convertidor de Frente Activo. Además de encontrar las frecuencias armónicas presente en el sistema por medio de la modulación PWM.

Capítulo 5: Determina el circuito equivalente para obtener el modelo matemático para el cálculo de resonancia armónica y encontrar la relación entre la capacidad de cortocircuito y largo de cables móviles.

Capítulo 6: A partir de los parámetros y modelos teóricos obtenidos, se realiza una simulación por medio de software comercial “EasyPower”, donde se logró determinar la resonancia involucrada y la amplificación de voltaje en los puntos de interés.

Capítulo 7: Finalmente se concluye en base a los resultados obtenidos, considerando la modelación teórica y evaluación realizada por medio de simulaciones.

Se presenta un diagrama de flujo en la Figura 1.1 que representa la metodología.



*Figura 1.1 Diagrama de Flujo*

## Capítulo 2. Resonancia en Sistemas Eléctricos de Potencia

---

### 2.1 Introducción

El fenómeno de resonancia que es producido por presencia de capacitores e inductores ya sea en serie o paralelo, provoca distintos comportamientos en corriente y voltaje, debido a que se igualan sus reactancias alterando la impedancia equivalente.

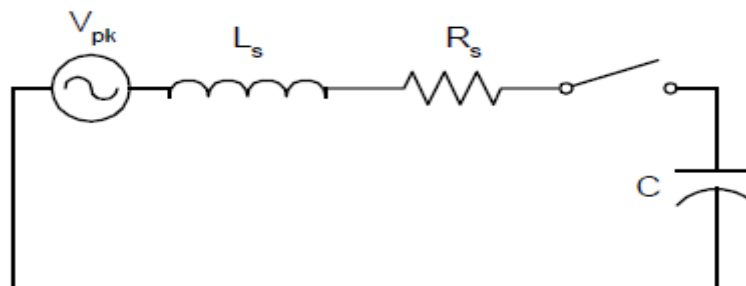
### 2.2 Resonancia Serie

Cuando un inductor y capacitor se encuentran en serie sucede que las reactancias de estos elemento se igualan, es decir,  $X_L = X_C$ . Haciendo que la impedancia equivalente del circuito (Figura 2.1) se aproxime a la resistencia eléctrica.

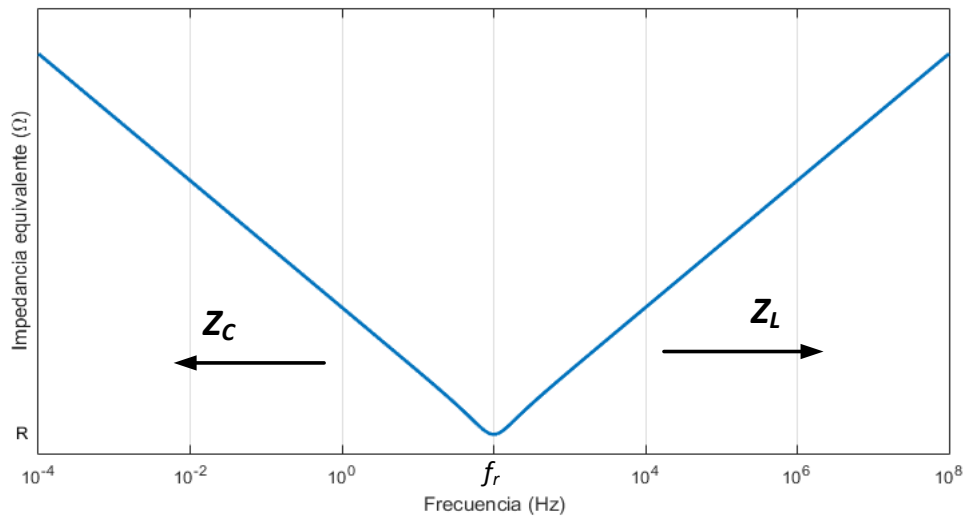
El fenómeno se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (2.1)$$

Luego, por igualdad de reactancias:  $Z = R$  (véase Figura 2.2).



*Figura 2.1 Circuito Resonante Serie*



**Figura 2.2 Impedancia equivalente serie**

La Figura 2.2 indica que a la frecuencia de resonancia la impedancia es mínima, donde las frecuencias menores a  $f_r$ , predominará la reactancia del capacitor (véase ecuación (2.2)), por el contrario, frecuencias sobre  $f_r$ , es la reactancia inductiva la dominante.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (2.2)$$

De manera contraria para frecuencias mayores a la de resonancia, la reactancia del inductor comenzará a aumentar (ecuación (2.3)), por el contrario  $X_C$  va a decrecer.

$$X_L = \omega L \quad (2.3)$$

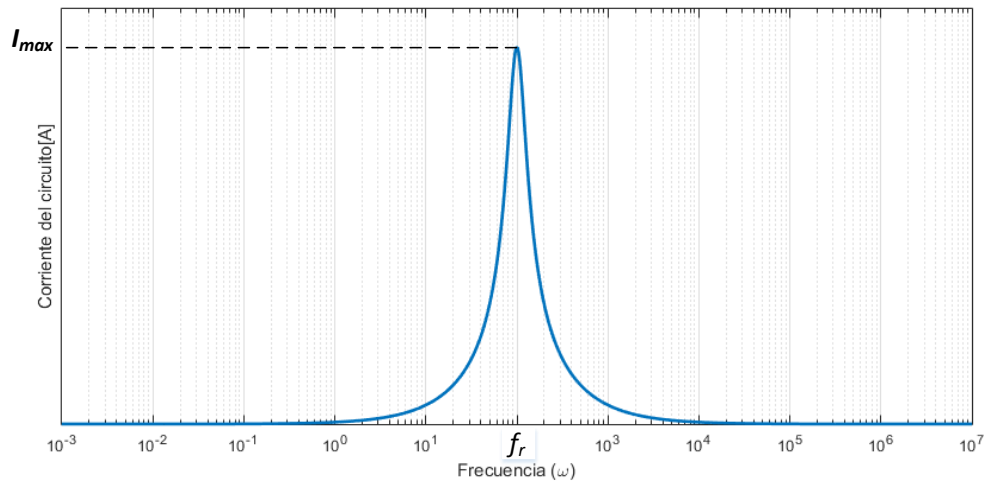
Donde:

$$\omega = 2\pi f$$

El comportamiento de la impedancia provocará que la corriente respecto a la frecuencia se represente por la Figura 2.3.

La frecuencia a la que está presente este fenómeno está dado por la expresión (2.4).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.4)$$

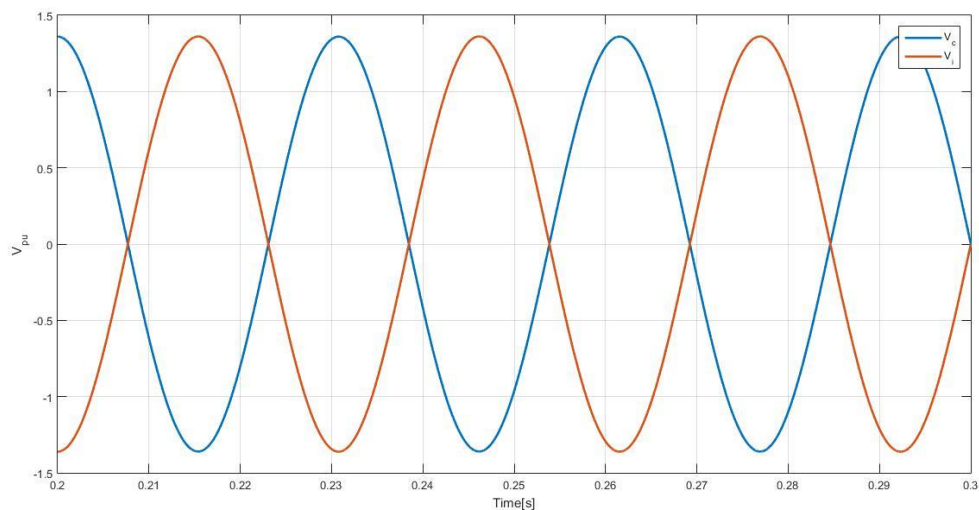


**Figura 2.3 Corriente en resonancia serie**

Por lo tanto la impedancia equivalente será pequeña, por lo que la corriente será máxima debido a  $Z_{min}$ , como lo indica la ecuación (2.5).

$$I_{max} = \frac{V_{in}}{Z_{min}} \quad (2.5)$$

Luego, el comportamiento el voltaje en el capacitor e inductor se indica en la Figura 2.4, estando estos dos componentes en contrafase.

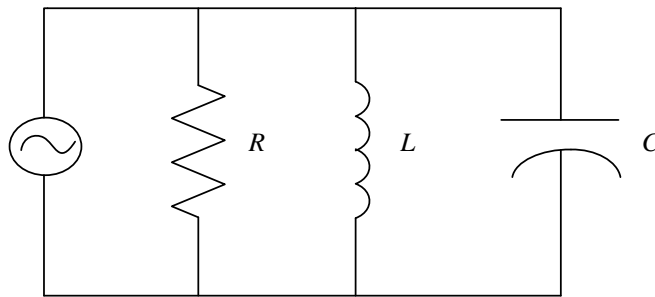


**Figura 2.4 Voltaje en Inductor y Capacitor**

La corriente máxima circulante por el circuito en una resonancia serie, debe ser estudiada, debido a las consecuencias en los equipamientos eléctricos. Principalmente, a que se ven sometidos a altas temperaturas en función de la corriente.

## 2.3 Resonancia Paralelo

A diferencia de la resonancia serie, para este caso la impedancia del circuito tiende a ser alta para  $f_r$ , (véase Figura 2.6), por lo que es posible que armónicos de corriente estén circulando cercano o en  $f_r$ , amplificando el voltaje de manera significativa, en función de la magnitud de la impedancia a la frecuencia de resonancia.



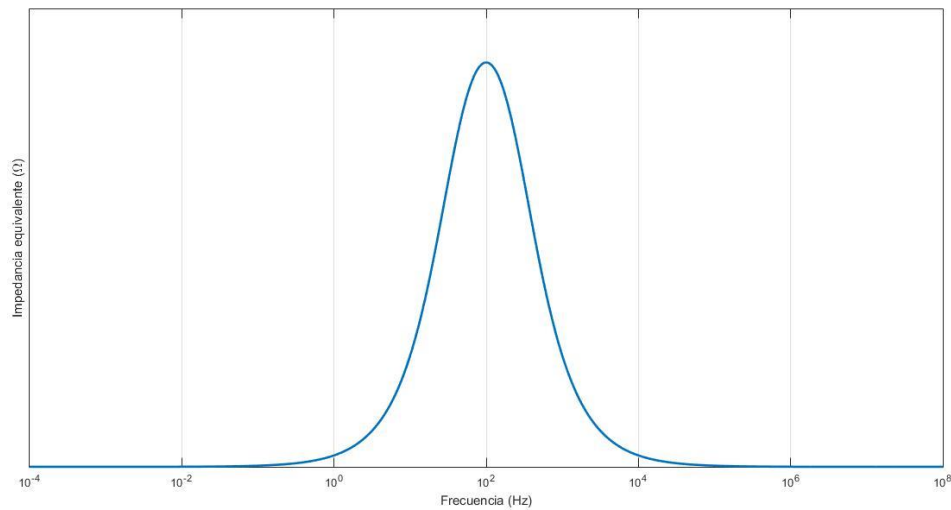
*Figura 2.5 Circuito resonante paralelo*

La admitancia equivalente de la resonancia paralelo está dado por la ecuación (2.6). Al igual que la resonancia serie, a la frecuencia  $f_r$ , la magnitud de la reactancia capacitiva e inductiva son iguales. Por lo tanto, bajo estas condiciones, la impedancia es máxima como indica la ecuación (2.8).

$$Y = \frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_L} - \frac{1}{Z_C} \quad (2.6)$$

$$Y = \frac{1}{Z_{eq}} = 0 \quad (2.7)$$

$$Z_{eq} = Z_{max} \quad (2.8)$$



**Figura 2.6 Impedancia equivalente paralelo**

Es común que se presente resonancia paralela cuando dentro del sistema se encuentren bancos de condensadores o líneas AC de largas longitudes conectadas a transformadores de grandes potencias, y por consecuencia habrá grandes capacitancias e inductancias que resonaran entre sí.

Luego las corrientes que circulan en el inductor y capacitor están en contrafase a la frecuencia de resonancia entre los dos componentes.

Los principales problemas asociados a la resonancia paralelo son elevadas temperaturas relacionadas con armónicos, fusibles quemados, circuitos de protección dañados y fallas de equipamientos en general [10].

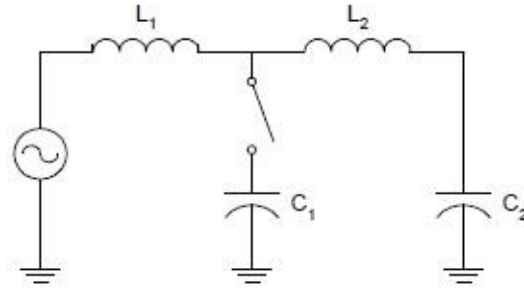
Por lo tanto la armónica de voltaje obedece a la siguiente ecuación:

$$V_{max,h} = I_h Z_h \quad (2.9)$$

## 2.4 Operación de Capacitor Conexión Paralelo

El capacitor por diseño posee una tolerancia respecto al sobrevoltaje, de manera que no puede operar fuera de los límites o por el contrario se verá sobrepasada la capacidad haciendo que disminuya la vida útil o bien provocando el total deterioro.

Los límites establecidos por el Standard IEEE 1036-2010: “Guide for Application of Shunt Power Capacitors”, se pueden ver en Tabla 2.1.



**Figura 2.7 Conexión de Banco de capacitores paralelo**

**Tabla 2.1 Limites Capacitor**

Variable	Limite (%)
$V_{rms}$	110
$I_{rms}$	135
$Q_{nominal}$	135

Donde:

- $V_{rms}$  : Voltaje rms.
- $I_{rms}$  : Corriente rms.
- $Q_{nominal}$  : Potencia reactiva nominal.

Los condensadores tienen un funcionamiento continuo adecuado, hasta un 135% de la potencia reactiva nominal de la placa de identificación. Las condiciones que pueden exceder este límite son las siguientes [1]:

- Voltaje aplicado a frecuencia fundamental, fuera de los límites permisibles establecidos en la placa.
- Voltaje rms que exceden el 110% de lo indicado en la placa, debido al contenido armónico.

La razón principal de que la operación continua sea sobre los límites de diseño, es la presencia de contenido armónico de altas magnitudes amplificando la corriente y voltaje rms en el momento en que la frecuencia de resonancia coincide o se acerca a las frecuencias de las componentes armónicas.

El aumento del voltaje en el capacitor está aproximadamente determinado por la corriente que circula por el capacitor, multiplicado por la reactancia como lo muestra la ecuación (2.10) [1].

$$\Delta V = I_C X_L \quad (2.10)$$

Donde:

$I_C$  : Corriente del condensador.

$X_L$  : Reactancia del inductor.

Es posible calcular el aumento del voltaje por medio de la corriente de cortocircuito del sistema en la ubicación del condensador, considerando que la relación  $X/R$  del sistema es razonablemente alta [1].

La relación  $X/R$  es una de las características que define la robustez de un sistema, es decir, si la resistencia aguas arriba de la barra que alimentan las cargas es alta ( $X/R$  bajo), gran parte del voltaje va a caer en esta resistencia equivalente generando pérdidas en la línea y por lo tanto, la regulación de voltaje del sistema será compleja. Por el contrario, si la resistencia es pequeña, las pérdidas serán bajas y la regulación estará definida por la reactancia que posee el sistema.

Entonces para esta condición  $X/R$ , donde la impedancia de cortocircuito en el capacitor sea aproximadamente la reactancia inductiva  $X_L$  que determina la corriente de cortocircuito que circula a través del condensador, se puede estimar el aumento de la tensión como lo muestra la ecuación (2.11) [1].

Conociendo la cantidad de reactivos que compensará el condensador, calculado como indica la ecuación ( 2.12).

$$\Delta V = \frac{I_C}{I_{SC}} = \frac{Q_C \text{ kVAr}}{S_{SC} \text{ kVA}} \quad (2.11)$$

Donde:

$I_{SC}$  : Corriente de cortocircuito.

$X_L$  : Reactancia del inductor.

$S_{SC}$  : Potencia de cortocircuito.

$Q_C$  : Potencia reactiva del condensador.

Considerando que:

$$Q_C = \frac{V^2}{X_C} \quad (2.12)$$

### 2.4.1 Armónicos de Corriente y Voltaje

Los condensadores como componente no aportan a la generación de armónicos, pero si pueden proporcionar cambios en la red de manera que influyen en la magnitud de corrientes y voltajes armónicos que se propagan por el sistema o bien, hacia las cargas. Es vital además tener el conocimiento de que las corrientes armónicas de mayor frecuencia son las que generarán un calentamiento significativamente mayor en equipamientos, como transformadores y motores de inducción, a causa de las corrientes de Foucault, que son proporcionales al cuadrado de la frecuencia.

Durante la operación de los bancos de condensadores en paralelo, ocurren problemas en forma de fusibles quemados debido a que su capacidad se ve sobrepasada o una unidad de capacitor falla por la amplificación de componentes armónicos en los bancos [1].

De manera típica se aplican ciertas medidas para evitar la contaminación armónica en los bancos de condensadores, que son las siguientes [1]:

- Reubicar los condensadores a otro lugar del circuito, puede reducir la sobrecorriente provocada por resonancia.
- Los condensadores pueden ser desconectados del circuito, durante el periodo en que se produzca la sobrecorriente o corriente inrush.

Si bien esto puede reducir algunos problemas, pero puede que no se cubran las necesidades del todo para satisfacer un buen funcionamiento, por lo que es necesario recurrir al uso de filtros de armónicos.

### 2.4.2 Condensadores Para Filtro Armónico

El condensador para filtro armónico debe estar diseñado de manera que durante su operación, no genere voltaje o potencia reactiva que supere el 100% de su capacidad nominal. Los límites de placa del condensador, indican valores superiores al nominal, sin embargo, estos corresponden a las capacidades de sobrecarga y deben conservarse solo para operaciones de contingencia [2].

La capacidad de voltaje o “Voltage Rating”, es determinado por la sumatoria de la tensión a frecuencia fundamental más las componentes armónicas como se muestra en ecuación (2.13) [2].

$$V_r = \sum_{h=1}^{\infty} I(h)X_C(h) \quad (2.13)$$

Donde:

$I(h)$  : Corriente rms del capacitor en el orden armónico  $h$ .

$X_C(h)$  : Reactancia capacitiva en el orden armónico  $h$ .

También puede ser expresado de la siguiente forma:

$$V_r = V_C(1) + \sum_{h=2}^{\infty} I(h)X_C(h) \quad (2.14)$$

Donde:

$V_C(1)$  : Voltaje del condensador a frecuencia fundamental.

Si no se especifica la corriente a frecuencia fundamental para obtener el voltaje en el capacitor para  $h = 1$ , entonces utilizamos la ecuación (2.15).

$$V_C(1) = V_s \left( \frac{h^2}{h^2 - 1} \right) \quad (2.15)$$

Donde:

$V_s$  : Voltaje rms del capacitor en el orden armónico  $h$ .

Ahora, si podemos contar con la corriente a frecuencia fundamental que especifica la ecuación (2.16), el voltaje a frecuencia fundamental en el condensador es definido por la expresión (2.17).

$$I_f(1) = \frac{V_s}{(X_C - X_L)} \quad (2.16)$$

$$V_C(1) = I_f(1)X_C \quad (2.17)$$

Luego el voltaje en el capacitor del filtro causado por el armónico de corriente se define como:

$$V_C(h) = I_f(h) \frac{X_C}{h} \quad (2.18)$$

Donde la corriente  $I_f(h)$ , es la corriente armónica máxima presente en el sistema a la frecuencia de resonancia.

Por lo tanto el “voltage rating” del capacitor esta dado de la siguiente forma:

$$V_r = V_C(1) + V_C(h) \quad (2.19)$$

Luego, para su diseño, la corriente rms total que circula por el filtro, se calcula mediante la ecuación (2.20).

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{1}^{\infty} I_f(h)} \quad (2.20)$$

### 2.4.3 Reactores Para Filtro Armónico

En sistemas donde el rendimiento de la red es crítico, se debe evitar incorporar reactores de filtro armónico, ya que realizar el ajuste de la inductancia de una fase sin que afecte la inductancia de otra fase es muy complejo [2]. Esto es causado por el fenómeno de “inductancia mutua”, es decir, se induce un voltaje en los terminales de una bobina hacia otra, por lo que no habría garantía de que las tres fases permanezcan constante a medida que aumenta la frecuencia.

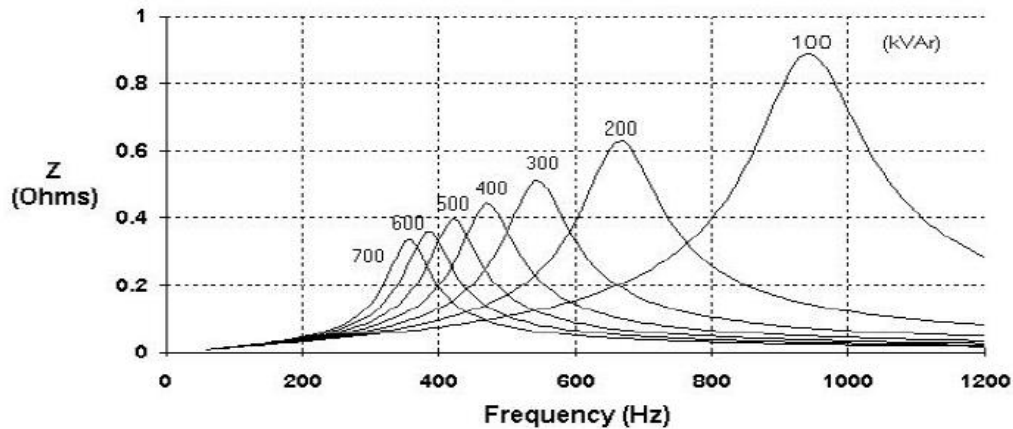
La inductancia y el factor de calidad  $Q$ , para el reactor de filtro armonico debe ser especificado respecto a la frecuencia de resonancia que es sintonizado el filtro, donde la tolerancia de inductancia está en el rango de  $\pm 3\%$  o  $0\%$  a  $-6\%$ , considerando que el factor de calidad típicamente es de  $+20\%$  [2].

Al igual que el capacitor, es posible estimar la capacidad de voltaje por medio de la ecuación (2.21).

$$V_r = \sum_{h=1}^{\infty} I(h)X_L(h) \quad (2.21)$$

## 2.5 Filtros Pasivos

Dentro de los sistemas eléctricos de potencia industriales, los bancos de condensadores son un método para compensar el factor de potencia, pero detrás de este método hay una serie de inconvenientes que se refieren a la alta posibilidad de resonancia. La gravedad de este problema va a variar respecto a la potencia reactiva compensada como lo muestra la Figura 2.8 [3].



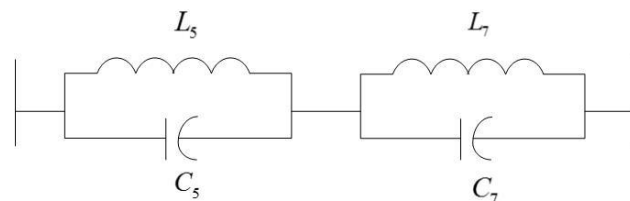
*Figura 2.8 Potencia Reactiva Compensada con condensadores en una barra de 380[V]*

A medida que va variando los kVAr de los bancos de condensadores, se produce un peak en la impedancia a la frecuencia de resonancia, por lo tanto, lo que va a ocurrir es que si un armónico está presente dentro de la frecuencia donde la impedancia es elevada, se presentaran sobrevoltajes.

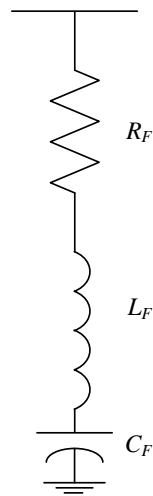
Entonces la conexión de filtros de armónicas sintonizados puede minimizar las resonancias del sistema, disminuyendo la impedancia en las frecuencias a la que se inyecta armónicas [3].

Los filtros pasivos pueden variar, según el propósito específico que se persigue. Existen dos tipos:

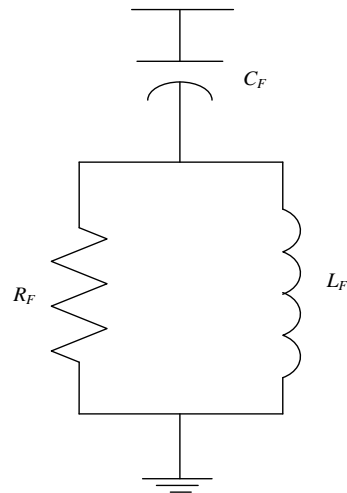
- Filtro Serie: Evitan el paso de una componente armónica a una frecuencia específica mediante una alta impedancia serie a la frecuencia contaminante. Estos se componen de un inductor y capacitor en paralelo conectados en serie a el lugar de la red que se quiere proteger. Su desventaja recae en que la conexión del filtro es en serie a un punto de la red, lo que implica que el filtro deba ser diseñado para soportar toda la corriente suministrada por la fuente de alimentación.



*Figura 2.9 Filtro Serie*



**Figura 2.10 Filtro Sintonizado Simple**



**Figura 2.11 Filtro Sintonizado Shunt**

- Filtro Shunt o Paralelo: Estos proveen un paso alternativo de baja impedancia para la circulación de armónicos, que consiste en una rama resonante serie RLC con conexión paralela al sistema de alimentación como lo representa la Figura 2.11 y Figura 2.10.

Este filtro tiene la ventaja de que solo transporta las corrientes armónicas en las que fue sintonizado, proporcionando parte de la potencia reactiva.

El filtro sintonizado simple se sintoniza a la frecuencia que se desea mitigar, donde la reactancia capacitiva e inductiva son iguales de manera que se anulan, por lo tanto la impedancia presente en el filtro a la frecuencia del armónico es mínima, y este absorberá gran parte de la corriente contaminante.

El filtro pasa alto, al igual que el de la Figura 2.10, se sintoniza a una frecuencia determinada, pero la particularidad que tiene es que debido a la resistencia en paralelo a la inductancia, este posee una característica amortiguada, es decir, presenta una impedancia pequeña para la frecuencia sintonizada en adelante, por el contrario, para frecuencia menores a la de sintonía, su impedancia es alta.

El elevado consumo de potencia reactiva en un sistema quiere decir que el factor de potencia del sistema es bajo. Un sistema que opera con un bajo factor de potencia, está subutilizando sus componentes de transmisión y distribución, lo que implica una mala regulación de voltaje [3].

Entonces, a modo resumen, se entrega lo principal a considerar al momento de diseñar y dimensionar un filtro [3]:

- Consumo de potencias activa y reactiva.
- Regulación de voltaje.
- Distorsión armónica de corriente y voltaje.
- Armónica presentes en el sistema en términos de orden y frecuencia.
- Características de las cargas más relevantes del sistema.

Con la finalidad de cumplir con los siguientes objetivos dentro del sistema:

- Mejorar la regulación de voltaje.
- Reducir el consumo de potencia reactiva.
- Reducir la distorsión de voltaje.
- Reducir la inyección de contaminación armónica al suministro.

## **2.6 Discusión**

Es importante destacar también que existen problemas asociados a la desintonización del filtro, a causa de que los filtros pasivos no poseen gran flexibilidad para adaptarse a los cambiantes requerimientos del sistema, como resultado se pueden dar variaciones de temperatura, deterioro de los condensadores, disminuyendo la capacitancia total. Aumentando la frecuencia a la que fue sintonizado el filtro.

Si se habla de compensador ya sea banco de capacitores o filtro pasivo para reducir el nivel de contaminación armónica en el sistema, se tiene que tener en cuenta como este afecta a la impedancia cuando varía la frecuencia, con el propósito de determinar una resonancia serie (impedancia pequeña al paso de la corriente) o paralelo (alta impedancia al voltaje de alimentación). Por lo tanto, incluir este componente dentro del sistema, si bien trae beneficios, también hay consecuencias en relación a la resonancia que puede producir.

Se revisaron los standards IEEE 1036 y 1531 de forma complementaria para obtener los parámetros de diseño y dimensionamiento de capacitores, que serán relevantes tener en cuenta al momento de evaluar el sistema eléctrico minero, específicamente, las posibles resonancias producidas y la amplificación de voltaje en los terminales de entrada de palas mineras, de forma que será posible concluir, cual es el impacto de altas tensiones en los componentes descritos en este capítulo.

## Capítulo 3. Sistema Eléctrico de Potencia Minero Típico

### 3.1 Introducción

Para la realización del estudio de cortocircuito, es necesario modelar el SEP minero con todos sus parámetros, específicamente, tensión, distancias de cables y líneas aéreas, potencia de subestaciones, entre otros.

De manera general, el sistema se compone por el transformador principal a una barra con una tensión de 13.8 kV, luego las líneas aéreas de transmisión van a una 2° barra que alimenta un Switchgear que es un equipo de maniobra que cuenta con protecciones e interruptores para la energización y desenergización de un equipo o del circuito. Para luego alimentar la subestación móvil que reduce el nivel de tensión a la salida a 7.2kV que suministra energía a la pala minera AC por medio de cables móviles como lo muestra la Figura 3.1 Los parámetros del SEP, SS/EE, cortocircuito en la barra principal, fueron obtenidos a través de una faena minera a rajo abierto. De manera resumida, se puede ver en la alimentación de la pala minera AC.

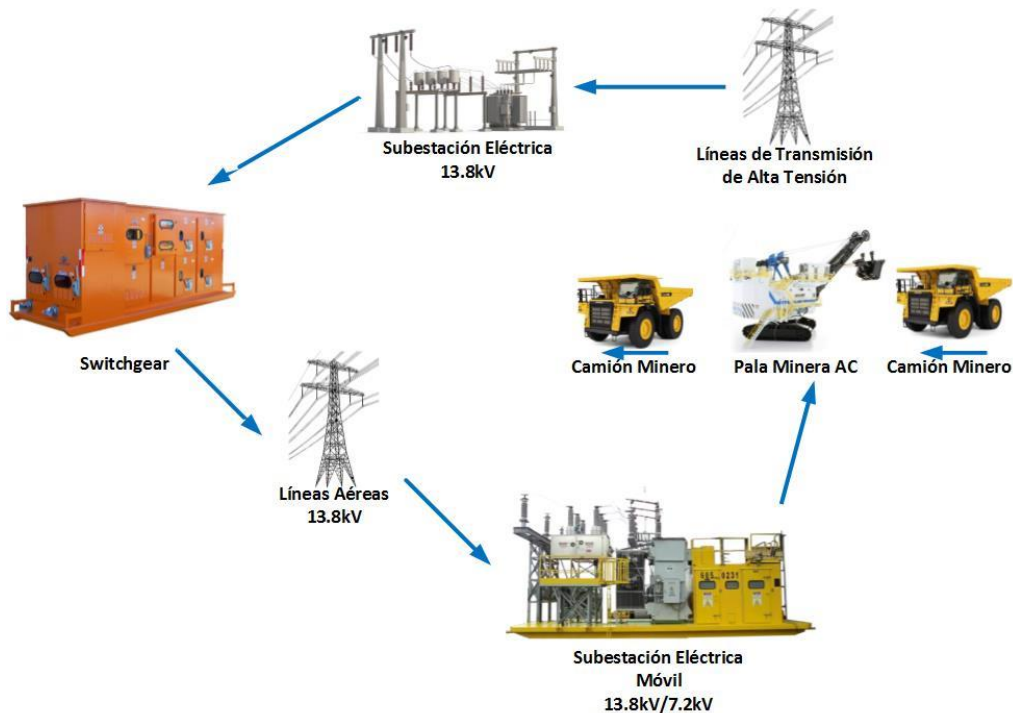


Figura 3.1 Suministro Eléctrico Pala Minera AC

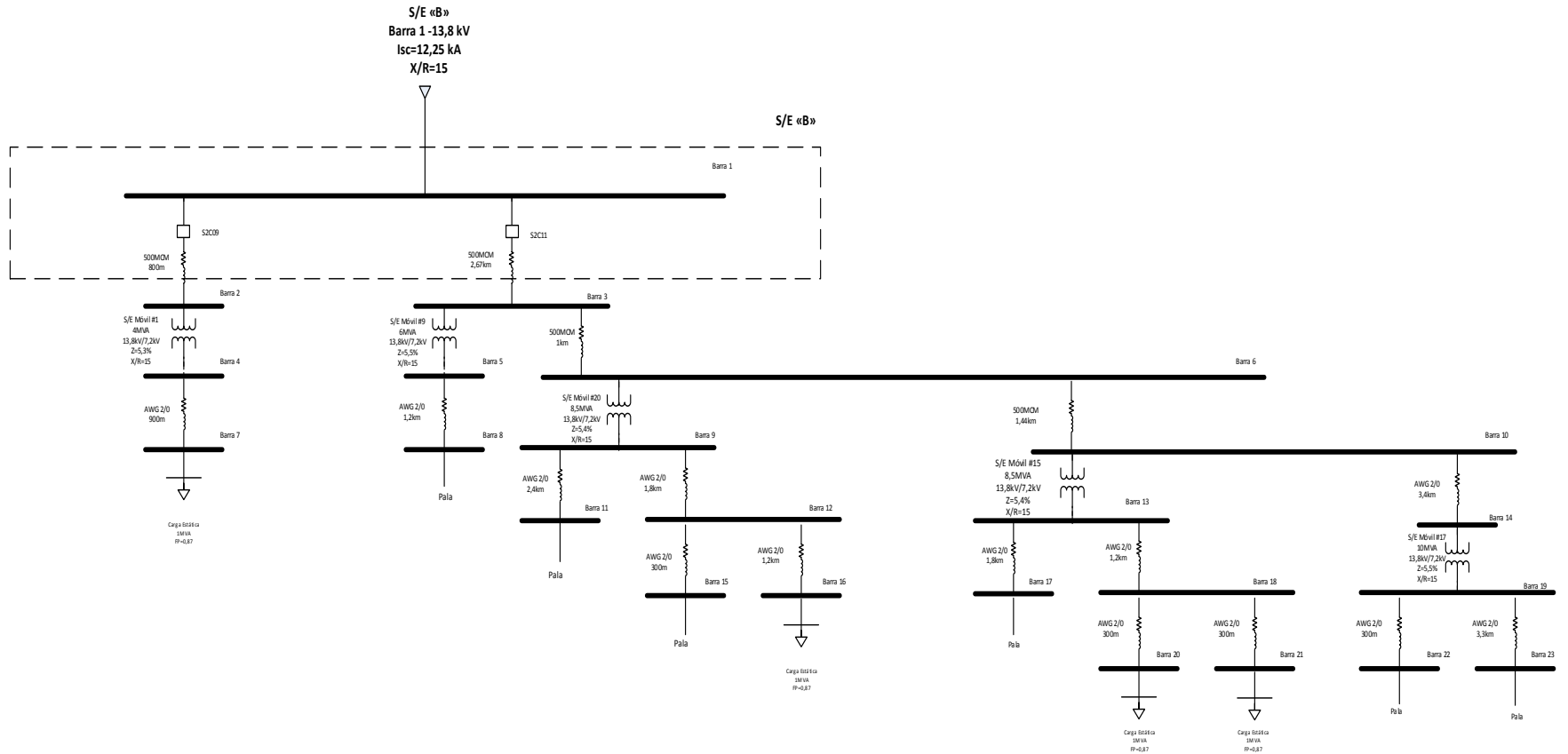


Figura 3.2 Diagrama unilineal Minero

## 3.2 Modelo SEP Minero

A partir de la Figura 3.2, se puede ver un diagrama unilineal del modelo SEP minero, que representa la distribución que posee la barra principal de la subestación B en la cual están conectado 2 alimentadores, donde uno aguas abajo está conectado con subestaciones móviles entre 6MVA y 10MVA, con 13.8kV en el primario y 7.2kV en el secundario. Para así suministrar 6 palas de cable AC y 3 cargas estáticas de 1MVA cada una con un factor de potencia de 0.87.

## 3.3 Parámetros de interés

Como es mencionado anteriormente, la amplificación de voltaje en la entrada de las palas mineras AC va a depender de lo que este aguas arriba de esta carga, por lo tanto debemos considerar los parámetros RLC presentes en el largo de los cables mineros y líneas aéreas que alimentan las subestaciones móviles.

### 3.3.1 Subestaciones eléctricas de Potencia

Para el análisis de cortocircuito del SEP minero, se debe tener en cuenta diversos parámetros tanto referidos a las líneas de transmisión como a los equipos presentes dentro del sistema.

En Tabla 3.1 se presenta los parámetros referidos a las subestaciones móviles.

*Tabla 3.1 Parámetros Subestaciones Móviles*

Potencia (MVA)	Tensión (kV) primario/Secundario	Impedancia Z (%)	X/R	Taps (%)
4	13.8/7.2	5.3	15	+5; +2.5; 0; -2.5; -5
6	13.8/7.2	5.5	15	+5; +2.5; 0; -2.5; -5
8.5	13.8/7.2	5.4	15	+5; +2.5; 0; -2.5; -5
10	13.8/7.2	5.5	15	+5; +2.5; 0; -2.5; -5

*Tabla 3.2 Parámetros Subestación principal*

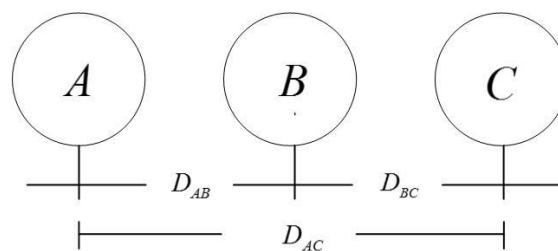
Tensión (kV)	Corriente cortocircuito $I_{coci} [kA]$	X/R	Potencia aparente cortocircuito $S_{coci} [MVA]$
13.8	12.25	15	292.80

### 3.3.2 Líneas Aéreas

La Figura 3.3 muestra las líneas aéreas que alimentan las subestaciones móviles, donde el calibre utilizado es de 500MCM, cable de cobre duro con distintos largos. Por lo tanto para estimar los parámetros RLC de las líneas debemos utilizar las características técnicas del cable y por medio de las ecuaciones, (3.1), (3.2) y (3.3) [4], se calcula la resistencia, inductancia y capacitancia respectivamente.

Para el cálculo de la resistencia de la líneas se considera el dato proporcionado por la ficha técnica:  $0.074 \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$ .

Si se quiere calcular la capacitancia e inductancia de una línea de transmisión trifásica, estos parámetros serán distintos en magnitud dependiendo del espaciamiento entre las fases, por lo tanto sabiendo que para una tensión de 15kV la separación típica entre fases entre 1[m] y 1.5[m], considerando que la línea trifásica está transmitiendo 13.8kV, se tomó un valor de 1.3[m] de separación entre fases como referencia para estimar los parámetros de las líneas.



*Figura 3.3 Formación horizontal de conductores*

La siguiente tabla representa las características técnicas necesarias para el cálculo RLC de las líneas aéreas.

*Tabla 3.3 Características técnicas líneas aéreas*

Calibre	Diámetro exterior nominal[mm]	Resistencia[Ω/km]	Temperatura[°C]
500MCM	20.6	0.074	20

$$R_{linea} = 0.074L \text{ [}\Omega\text{]} \quad (3.1)$$

$$L_a = 2 \cdot 10^{-4} \ln \left( \frac{D_{eq}}{D_s} \right) \left[ \frac{H}{km} \right] \quad (3.2)$$

Donde:

$D_{eq}$  : Distancia media geométrica (distancia entre conductores para formación horizontal), calculado como,  $\sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{AC}}$ .

$D_s$  : Radio medio geométrico.  $0.768r$  para conductor cilíndrico de 37 alambres.

La capacitancia de la línea trifásica está determinada por la siguiente ecuación:

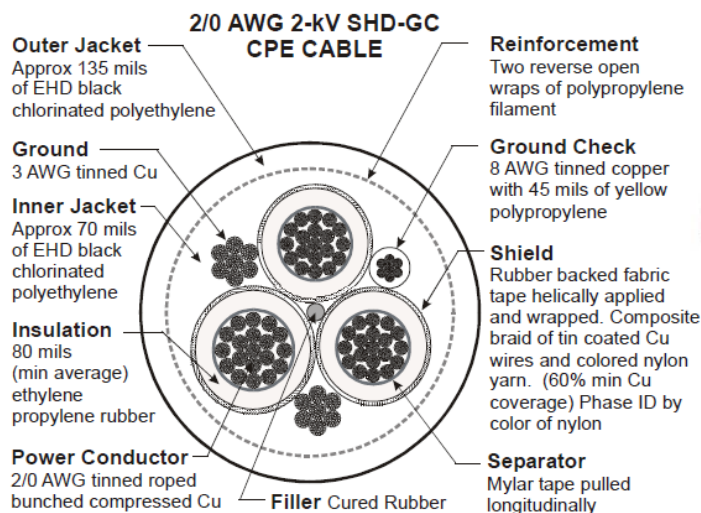
$$C_N = \frac{0.0241}{\log_{10} \left( \frac{D_{eq}}{r} \right)} \left[ \frac{\mu F}{km} \right] \quad (3.3)$$

A continuación se presenta los parámetros de las líneas áreas entre barras:

*Tabla 3.4 Parámetros de líneas áreas 500MCM*

Posición entre barras	Largo[km]	Resistencia[Ω]	Inductancia[mH]	Capacitancia[μF]
1 y 2	0.800	0.059	0.853	0.009
1 y 3	2.670	0.198	2.848	0.029
3 y 6	1.000	0.074	1.067	0.011
6 y 10	1.440	0.107	1.536	0.016

### 3.3.3 Cables Mineros



*Figura 3.4 Esquema Constructivo Cable Minero para Equipo de Media Tensión*

Los cables mineros utilizados son del tipo multiconductor compuesto de 3 fases con 2 tierras desnudas y un conductor piloto, su calibre es de AWG 2/0 con tensión nominal de 8kV y 15kV. La estructura constructiva del cable está representado por la Figura 3.4 [7].

Esta estructura permite que estos cables seas del tipo portátil para uso minero en la alimentación de equipos eléctricos que operan en movimiento.

Para el cálculo de los parámetros del cable se utilizan las siguientes características proporcionadas por la ficha técnica presente en Tabla 3.5.

*Tabla 3.5 Características técnicas cables mineros*

Calibre AWG	Tensión nominal [kV]	Resistencia [ $\Omega/km$ ]	Inductancia [mH/km]	Capacitancia [ $\mu F/km$ ]
2/0	8	0.2847	0.351	0.361
2/0	15	0.2847	0.377	0.295

❖ Las características eléctricas del cable están dadas para una temperatura de 90°C.

Mantener la temperatura del cable resulta relevante, ya que operar sobre este valor, el aislamiento se comienza a perder acumulando polvo de carbón inflamable, causando quemaduras al personal que manipule el cable [15].

Luego, utilizando los datos técnicos de los cables, se determinan los parámetros RLC de cada cable minero como lo muestra la Tabla 3.6.

*Tabla 3.6 Parámetros de cables mineros*

<b>Posición entre barras</b>	<b>Largo[<i>km</i>]</b>	<b>Resistencia[<math>\Omega</math>]</b>	<b>Inductancia[<i>mH</i>]</b>	<b>Capacitancia[<math>\mu F</math>]</b>
4 y 7	0.9	0.256	0.316	0.325
5 y 8	1.2	0.342	0.421	0.433
9 y 11	2.4	0.683	0.843	0.866
9 y 12	1.8	0.513	0.632	0.649
12 y 15	0.3	0.085	0.105	0.108
12 y 16	1.2	0.341	0.421	0.433
13 y 17	1.8	0.512	0.632	0.649
13 y 18	1.2	0.342	0.421	0.433
18 y 20	0.3	0.085	0.105	0.108
18 y 21	0.3	0.085	0.105	0.108
10 y 14	3.4	0.968	1.282	1.003
19 y 22	0.3	0.085	0.105	0.108
19 y 23	3.3	0.939	1.158	1.190

### 3.3.4 Discusión

La importancia de este capítulo reside en el cálculo de los parámetros RLC de las líneas aéreas y cable minero. La impedancia de la línea va a definir una relación X/R, lo que conlleva a una determinada regulación de voltaje a frecuencia fundamental y potencia de cortocircuito en el primario de las SS/EE y en la salida del transformador. Luego la inductancia de las SS/EE son definidas por la potencia de cortocircuito en el secundario del equipo. Por otro lado, el estudio del cable minero también define una regulación de tensión y un parámetro importante dentro del sistema, que es la capacitancia existente entre el transformador y la pala.

El conjunto de líneas aéreas, SS/EE y cable minero, va a definir la potencia de cortocircuito y regulación de tensión en los terminales de entrada de la pala. El cálculo de estos dos parámetros definidos por el equipamiento de alimentación de la pala, serán considerados para analizar sus valores bajo diferentes condiciones típicas del sistema eléctrico minero, teniendo en cuenta los requerimientos mínimos que proporciona el fabricante del equipo.

Existe una característica constructiva de los cables mineros, que es el apantallado que poseen. Los cables son apantallados para evitar las interferencias electromagnéticas a las que se pueda ver sometido, pero a su vez aumenta su capacitancia. Por lo que las mineras restringuen que el cable minero no sea superior a un largo de 4.2km, para evitar las altas capacitancias.

Se utilizaron fichas técnicas para S/E móvil, líneas aéreas y cables mineros en los que se presentan valores típicos usados en mineras de rajo abierto, basados en los parámetros presente en el diagrama unilineal minero.

## Capítulo 4. Pala Eléctrica Minera A.C: Bucyrus 495HR

### 4.1 Introducción

En este capítulo, se describe el principio de funcionamiento de la pala eléctrica minera de corriente alterna utilizada en las mineras a rajo abierto. Principalmente se estudia la electrónica de potencia que compone el equipo con el fin caracterizar las variables de voltaje y corriente típicas de entrada en términos de sus componentes armónicas a través de la modulación PWM.

### 4.2 Sistema Eléctrico de Potencia

Las palas eléctricas Bucyrus 495HR son alimentadas por una red trifásica de 7.2kV conectada a 2 transformadores con conexión estrella en el primario con sus respectivos fusibles de 200[A] y delta en el secundario. Los dos transformadores poseen los mismos parámetros que los resume en la Tabla 4.1. La Figura 4.1 [16] muestra el modelo analizado.

*Tabla 4.1 Parámetros Transformador Bucyrus 495HR*

Potencia (MVA)	Tensión (V) primario/Secundario	Conexión primario/secundario	Impedancia Z (%)
1.2	7200/900	Estrella/Delta	12.15%



*Figura 4.1 Bucyrus 495HR*

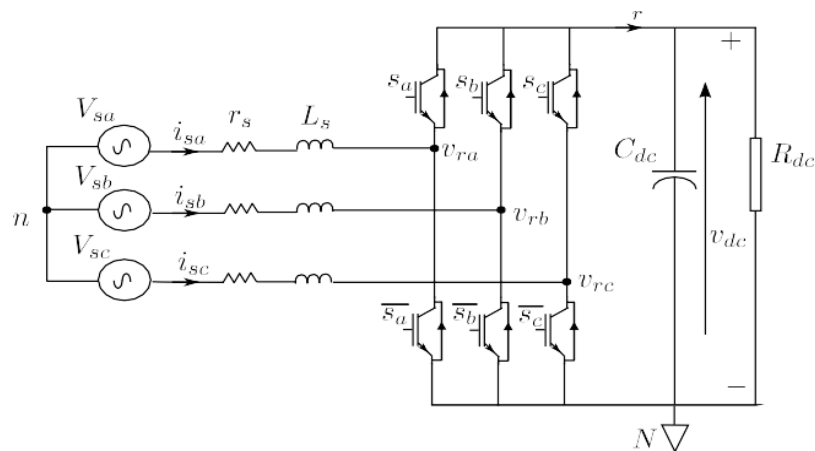
Cada transformador alimenta 2 convertidores AFE AC-DC a 900V y a la salida se tiene una barra de 1200V DC. Luego se hace la conversión DC-AC por medio de 4 inversores que corresponden al accionamiento de los motores de jaula de ardilla que definen los movimientos de la pala.

Los rectificadores correspondientes a la conversión AC-DC son el tipo AFE, que están representados por el esquema de la Figura 4.2.

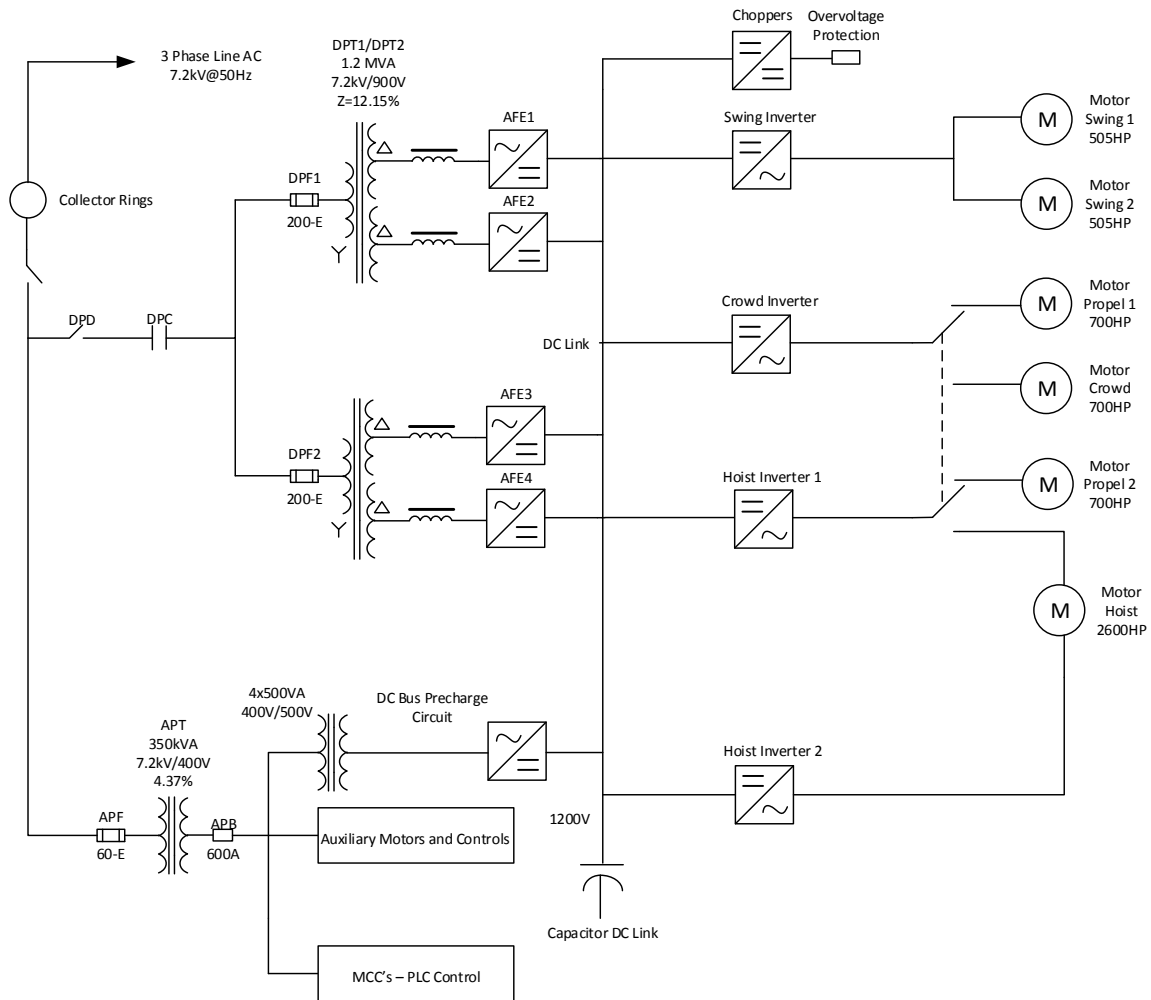
A diferencia de los rectificadores que operan con baja frecuencia de conmutación, como por ejemplo los rectificadores de tiristores y diodos. Existen topologías que operan con alta frecuencia de conmutación. Se distinguen los rectificadores de Frente Activo fuente de voltaje que permiten obtener una corriente de entrada con una baja distorsión armónica y un factor de potencia unitario. La estructura IGBT-Diodo y control de voltaje en el enlace DC, permite un flujo de potencia bidireccional, por lo tanto a través de esta característica la pala tiene la capacidad de realizar la regeneración al momento de bajar el cucharón de carguío [11]-[12].

Como lo muestra la Figura 4.2, este rectificador está compuesto por un puente trifásico, controlado, posee un filtro inductivo conectado en la entrada AC. Donde las pérdidas del filtro de entrada están representadas por la resistencia  $r_s$  y  $L_s$ . Luego el lado DC está representado por un condensador  $C_{dc}$ . La potencia a la que va a operar o que necesita el inversor, lo representa una carga resistiva  $R_{dc}$ .

Por medio del diagrama del SEP de la pala que se muestra en la Figura 4.3 [17], se puede determinar el principio de funcionamiento de esta.



**Figura 4.2 Convertidor AFE**



**Figura 4.3 Diagrama SEP y esquema de protecciones para Bucyrus 495HR**

Respecto a los movimientos que se realizan al momento de la excavación del mineral y el depósito en el camión minero. Existe una composición de motores referidos al movimiento del cucharón.

Los movimientos que definen la operación del cucharón de la pala de forma secuencial son:

- **Hoist:** Durante la excavación, esta transmisión proporciona levante o bajada de forma controlada del carguío por medio de la tensión aplicada a los cables.
- **Crowd:** Es el movimiento de empuje que proporciona la fuerza necesaria para forzar el balde en la excavación y al momento de vaciar la carga dentro del camión minero.
- **Swing:** Es el movimiento de giro que involucra girar la sobreestructura de la pala hasta que el balde se encuentre en el camión a través de rotación de 180° hacia la derecha o izquierda.

- Propel: Es el mecanismo de propulsión para asegurar el movimiento de avance, para reubicar la pala y mantener la posición de excavación apropiada.

### 4.3 Modulación Sinusoidal – PWM

La modulación SPWM consiste en construir señales de disparo a través de la comparación de dos ondas, una de ellas es la señal de referencia sinusoidal y una triangular. El objetivo de esto es poder controlar la señal en la salida por medio de la amplitud de la señal de referencia y lograr eliminar el contenido de componentes armónicas mediante la designación de apropiadas frecuencias en la señal portadora. La frecuencia de la señal moduladora es la que definirá la frecuencia que tendrá el convertidor en su salida, por otro lado la frecuencia de conmutación de los interruptores de potencia la establece la frecuencia de la señal portadora.

Para realizar la modulación, se crean 4 señales portadoras, debido a que se debe encontrar los espectros armónicos de corriente y voltaje de los 4 rectificadores AFE en paralelo presentes en la Figura 4.3. Por lo tanto, se determina el desfase ( $\theta$ ) entre las señales triangulares como lo muestra la ecuación (4.1). Se considera rectificadores de 9 pulsos.

Dentro de esta modulación, se realiza un desfase de portadoras entre cada AFE con el fin de obtener una forma de onda sinusoidal con menor distorsión armónica, ya que la suma de la tensión de los 4 AFEs desfasados, permite obtener más niveles por ciclo que una modulación con la misma portadora en cada uno de los rectificadores.

$$\theta = \frac{360f_{fund}}{f_{pulse}(\#AFEs)} \quad (4.1)$$

Donde:

$f_{fund}$  : Frecuencia de la red (50Hz).

$f_{pulse}$  : Numero de pulsos del rectificador, es decir,  $9f_{fund}$ .

$\#AFEs$  : Cantidad de rectificadores en paralelo.

Entonces, por medio de la ecuación (4.1), se determina que  $\theta = 10^\circ$ .

Se realiza el modelo con un índice de modulación de 0.8, que está determinado por la amplitud de la señal de referencia y la portadora, como lo muestra la ecuación (4.2).

$$m_a = \frac{V_m}{V_{cr}} \quad (4.2)$$

Donde:

$V_m$ : Valor peak de la señal moduladora.

$V_{cr}$ : Valor peak de la señal portadora.

El voltaje en [pu] de la señal de referencia es 0.8 [pu] y el de la señal portadora es 1 [pu], es decir,  $m_a = 0.8$  (véase Figura 4.4).

El índice de modulación de frecuencia lo determina el número de pulsos del rectificador, donde anteriormente se menciona que es 9. Luego se define la frecuencia de las portadoras utilizando la ecuación (4.3).

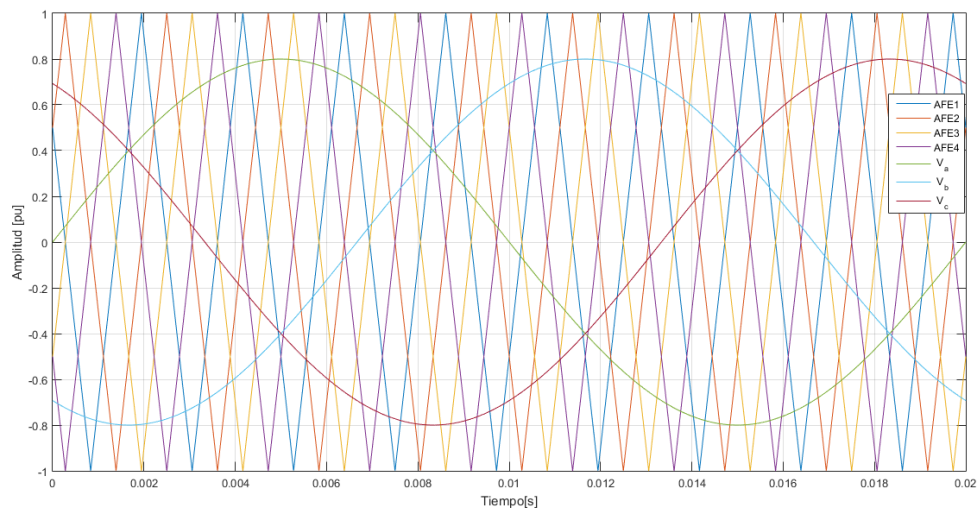
$$m_f = \frac{f_{cr}}{f_m} \quad (4.3)$$

Donde:

$f_{cr}$ : Frecuencia de la señal portadora.

$f_m$ : Frecuencia de la señal moduladora (50Hz)

Por lo tanto, sabiendo que el índice de modulación de frecuencia es  $m_f = 9$ . A través de la ecuación (4.3), se determina que  $f_m = 450[Hz]$ .

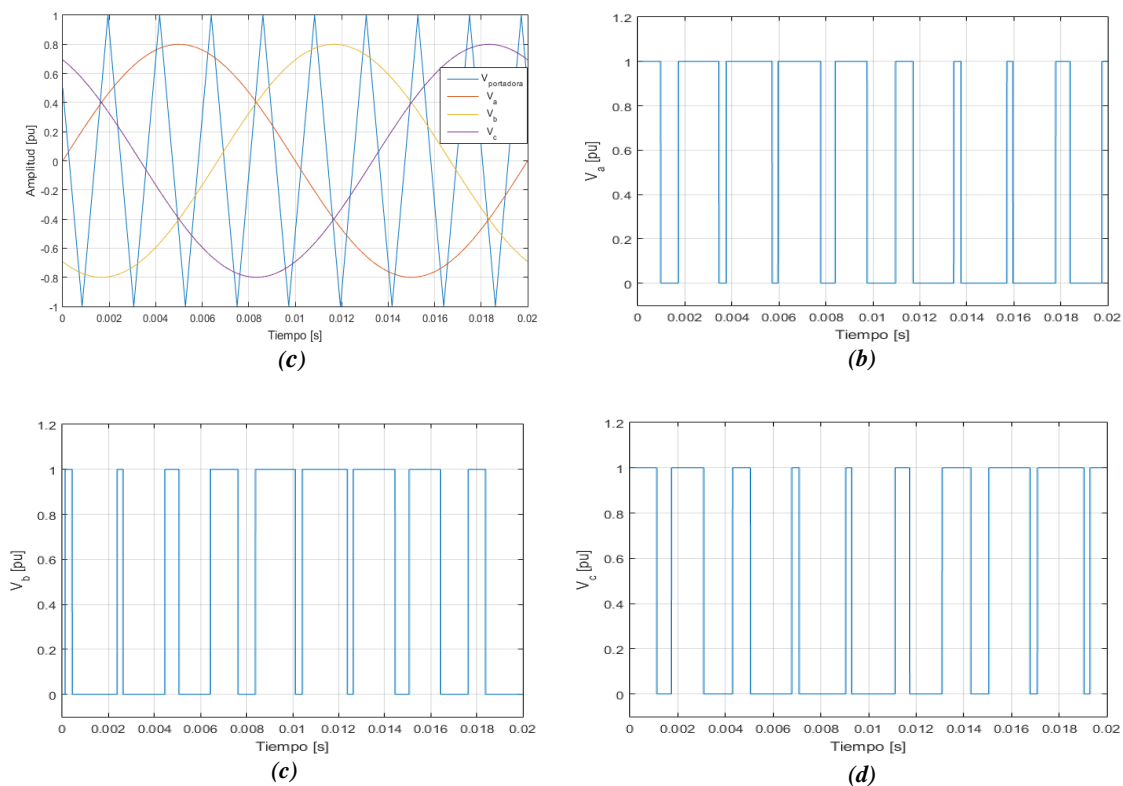


**Figura 4.4 Señal referencia vs Señal portadora**

Para generar el tren de pulso se controla cada switch en pares, es decir:  $(S_1, S_4)$ ,  $(S_3, S_6)$ ,  $(S_5, S_2)$ . La lógica para el control es la siguiente [5]:

- $S_1$  estado ON cuando  $V_a > V_{cr}$
- $S_3$  estado ON cuando  $V_b > V_{cr}$
- $S_5$  estado ON cuando  $V_c > V_{cr}$
- $S_4$  estado ON cuando  $V_a < V_{cr}$
- $S_6$  estado ON cuando  $V_b < V_{cr}$
- $S_2$  estado ON cuando  $V_c < V_{cr}$

La Figura 4.5 nos indica la obtención del tren de pulso por fase de un rectificador AFE que compone la pala minera AC.



**Figura 4.5 Modulación Sinusoidal-PWM de rectificador AFE 1.**

(a) Señal portadora vs señal de referencia por fase; (b) Tren de pulsos fase a; (c) Tren de pulsos fase b; (d) Tren de pulsos fase c.

Luego el tren de pulso que define los voltajes entre líneas se determinan de la siguiente manera [5]:

$$V_{ab} = V_a - V_b$$

$$V_{bc} = V_b - V_c$$

$$V_{ca} = V_c - V_a$$

El orden de las componentes armónicas de voltaje está dado por la ecuación (4.4) para armónicos múltiplos de 3 [5].

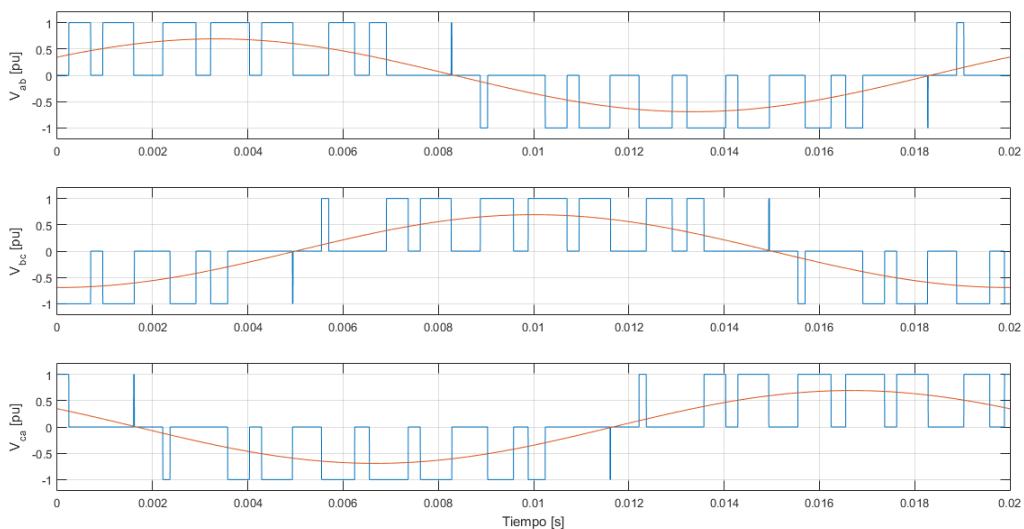
$$h = (lm_f \pm k) \quad l = 1, 3, 5 \dots \quad k = 2, 4, 6, \dots \quad (4.4)$$

$$l = 2, 4, \dots \quad k = 1, 5, 7, \dots$$

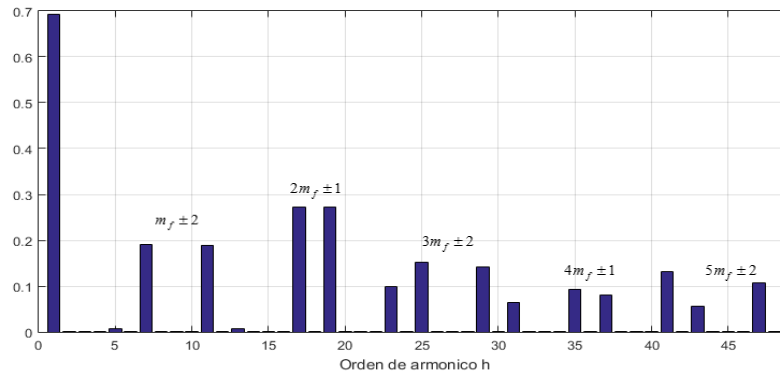
Para  $m_f \geq 9$ , mientras  $m_f$  sea múltiplo de 3. Se cumple que todas las armónicas en el voltaje, de orden menor a  $m_f - 2$  son eliminadas y todas las armónicas están centradas alrededor de  $m_f$  y sus múltiplos enteros.

Luego las armónicas que corresponden a la Figura 4.7 son:  $m_f \pm 2$ ,  $2m_f \pm 1$ ,  $3m_f \pm 2$ ,  $4m_f \pm 1$ , ...

La Figura 4.6 representa en forma gráfica el tren de pulso y el voltaje entre líneas.



**Figura 4.6** Tren de pulsos de línea



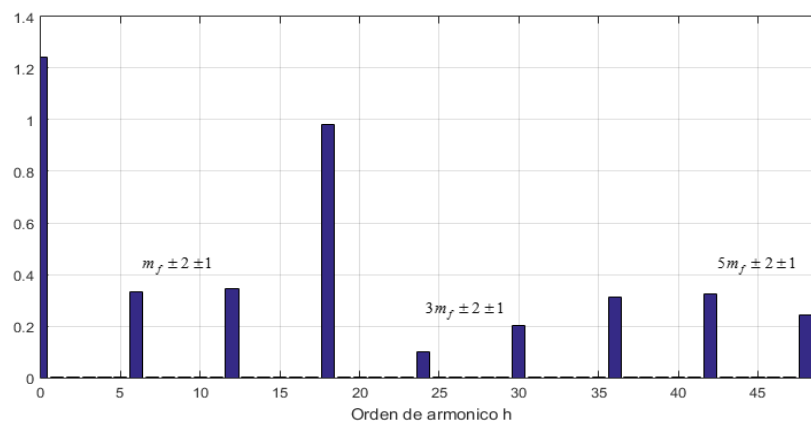
**Figura 4.7 Espectro Armónico de Voltaje**

**Tabla 4.2 Frecuencias Armónicas de Voltaje**

$h$	Frecuencia [Hz]
7	350
11	550
17	850
19	950
25	1250
29	1450
35	1750
37	1850
43	2150
47	2350

Luego las componentes armónicas de corriente están dadas por la ecuación (4.5) [5].

$$h = (lm_f \pm k \pm 1) \quad l = 1, 2, \dots \quad (4.5)$$



**Figura 4.8 Espectro Armónico de Corriente**

**Tabla 4.3 Frecuencias Armónicas de Corriente**

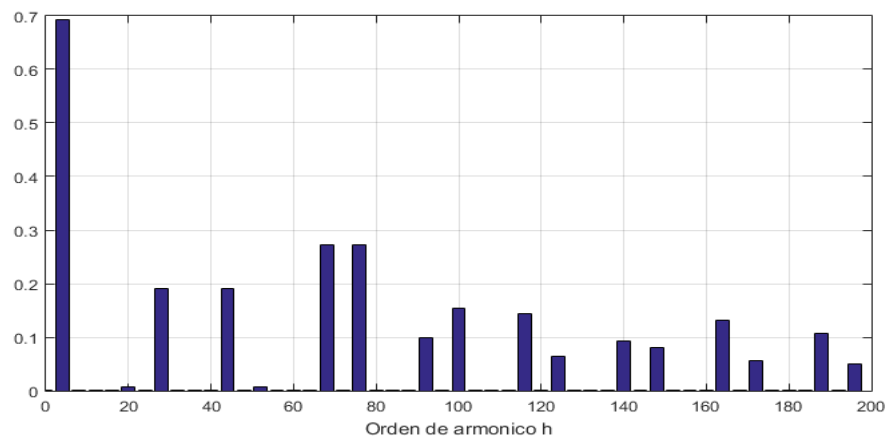
<b><i>h</i></b>	<b>Frecuencia [Hz]</b>
6	300
12	600
18	900
24	1200
30	1500
36	1800
42	2100
48	2400

Aplicando este mismo concepto a los 4 rectificadores en paralelo, va a suceder que las componentes armónicas tanto de voltaje y corriente, seguirán las ecuaciones (4.4) y (4.5) respectivamente, pero ahora considerando que se desplazan 4 veces en frecuencia debido al efecto que causa la conexión paralelo de los AFEs.

Por lo tanto el orden de los armónicos de voltaje sigue la ecuación (4.6).

$$h = 4(lm_f \pm k) \quad l = 1, 2, \dots \quad (4.6)$$

Luego el espectro armónico de voltaje para los 4 AFEs está dado por la Figura 4.9.

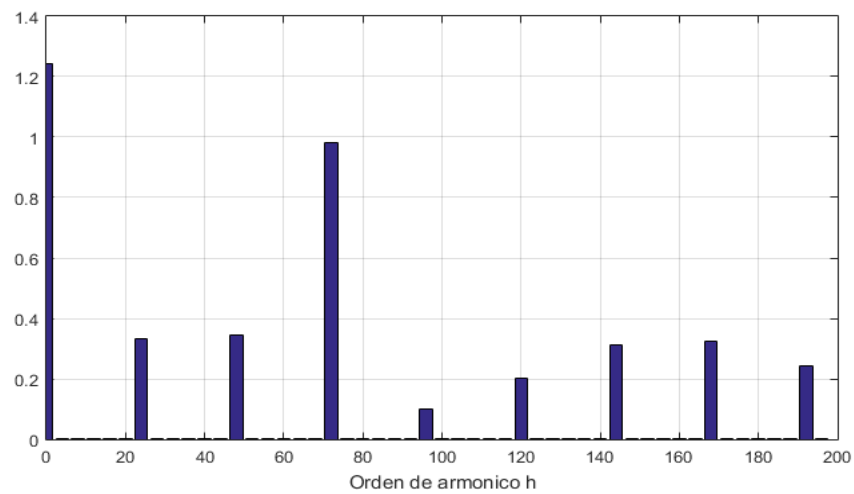
**Figura 4.9 Espectro Armónico de Voltaje 4 AFEs**

**Tabla 4.4 Frecuencias Armónicas de Voltaje 4 AFEs**

<b><i>h</i></b>	<b>Frecuencia [Hz]</b>
28	1400
44	2200
68	3400
76	3800
100	5000
116	5800
140	7000
148	7400
172	8600
188	9400

Por tanto, las componentes armónicas de corriente siguen la ecuación (4.7), que están representadas gráficamente en la Figura 4.10.

$$h = 4(lm_f \pm k \pm 1) \quad l = 1, 2, \dots \quad (4.7)$$



**Figura 4.10 Espectro Armónico de Corriente 4 AFEs**

**Tabla 4.5 Frecuencias Armónicas de Corriente 4 AFEs**

<b><i>h</i></b>	<b>Frecuencia [Hz]</b>
24	1200
48	2400
72	3600
96	4800
120	6000
144	7200
168	8400
192	9600

## 4.4 Standard IEEE-519

El objetivo de este standard es, establecer las recomendaciones para el diseño de sistemas eléctricos incluyendo las cargas lineales y no lineales (pilas mineras AC para este caso). Se describen los límites de distorsión de voltaje y corriente que puede existir en el sistema. Las mediciones del sistema para el estudio de la calidad de la energía se realizan en el punto común de acoplamiento [8].

Las limitaciones de corriente armónica y de voltaje se muestran en la Tabla 4.6 y Tabla 4.7 respectivamente.

**Tabla 4.6 Límites de Corriente Armónica para Sistemas de 120[V] a 69[kV] Nominal**

Máxima Distorsión Armónica de Corriente en el Sistema Eléctrico Expresada en % del valor de Corriente Máxima de Carga a frecuencia fundamental						
$I_{sc} / I_L$	Orden de la armónica (armónicas impares)					TDD
	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	
$\leq 20$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$\geq 1000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Las armónicas pares están limitadas a un 25% de los límites establecidos de armónicas impares.

$I_{sc}$  : Corriente máxima de cortocircuito en el PCC.

$I_L$ : Corriente máxima de demanda (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.

La corriente  $I_L$  se determina como la suma de las corrientes que corresponden a la demanda máxima durante los doce meses anteriores dividido por 12 [8].

*Tabla 4.7 Límites de Distorsión de Voltaje*

<b>Voltaje en barra de PCC</b>	<b>Distorsión armónica individual (%)</b>	<b><math>THD_v</math> (%) total</b>
$V \leq 1.0kV$	5.0	8.0
$1kV \leq 69kV$	3.0	5.0
$69kV \leq 161kV$	1.5	2.5
$161kV < V$	1.0	1.5

Se puede ver en la Figura 4.9 y Figura 4.10 que existen armónicas de voltaje y corriente presentes en los terminales de entrada de la pala que están sobre la 50<sup>a</sup>, que pueden ser significativas si se ven afectadas por resonancia. Por lo tanto, no existe en la actualidad un estándar que establezca las recomendaciones de distorsión de tensión y corriente para los equipamientos de extracción minera, que generan armónicos de alta frecuencia.

## 4.5 Discusión

El valor del índice de modulación de frecuencia o número de pulsos del convertidor, define la cantidad de muestras por ciclo del voltaje por fase y entre líneas como se presenta en el tren de pulsos. Por lo tanto, es posible tener un mejor control de la tensión de salida del convertidor a medida que este índice es mayor, pero se debe considerar que un valor más alto, implica mayor conmutación de los semiconductores y por ende las pérdidas de potencia por conmutación crecen.

Es importante identificar cuáles son las frecuencias armónicas que están presentes en la entrada de la pala, para posteriormente reconocer las resonancias producidas en el sistema que coinciden o bien se acercan a alguna componente armónica.

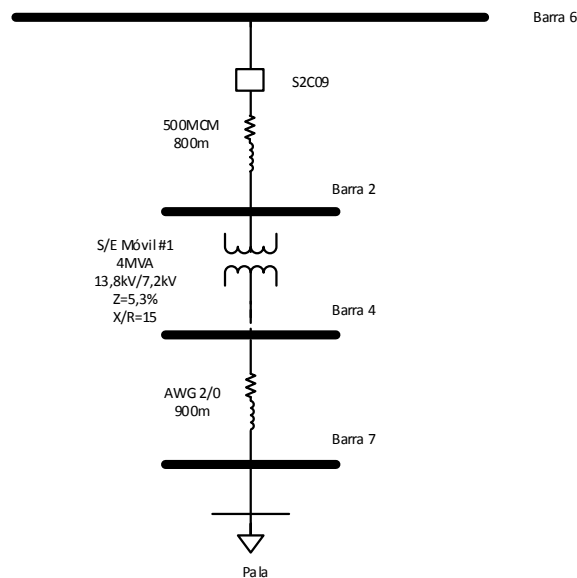
## Capítulo 5. Análisis de Posibles Resonancias

### 5.1 Introducción

Como se menciona en el Capítulo 4, el objetivo de determinar las frecuencias armónicas, es hacer un estudio en conjunto con las frecuencias de resonancia serie o paralelo que se pueda producir en el sistema. Entonces para esto, es necesario realizar un modelo que pueda determinar la resonancia, considerando los parámetros de S/E móviles y cables mineros.

### 5.2 Modelo Equivalente del Sistema

Para demostrar la ocurrencia de este fenómeno en la realidad minera, a través de los parámetros mostrados en la Figura 5.1, que considera, 800 [m] de línea aérea trifásica entre barra 6 y 2, una S/E móvil de 4 [MVA] e impedancia de 5.3%, una relación X/R de 15 en barra 4 y 900 [m] de cable minero entre el secundario del transformador y los terminales de entrada de la pala. Este sistema es utilizado para encontrar las frecuencias de resonancia de forma teórica, de acuerdo a un modelo equivalente.



*Figura 5.1 Alimentación Pala Minera AC S/E Móvil #1*

Los parámetros de líneas áreas 500MCM y cable minero están dado en la Tabla 3.4 y Tabla 3.6 respectivamente. Luego se debe considerar para nuestro modelo, la impedancia del transformador en el secundario (7.2kV). Por lo tanto, teniendo en cuenta que esta impedancia se ve afectada por la línea aérea (13.8kV) y el cable minero (7.2kV). El circuito para determinar los parámetros de la subestación móvil.

Se puede modelar un circuito equivalente monofásico donde este va a depender de la frecuencia, con el fin de que se pueda evidenciar el impacto de las corrientes armónicas en la entrada de las palas mineras AC [9]. Este circuito es la base para lograr comparar frecuencias de resonancia con las componentes armónicas que excita el circuito equivalente.

Las consideraciones que se tienen para la construcción del modelo son:

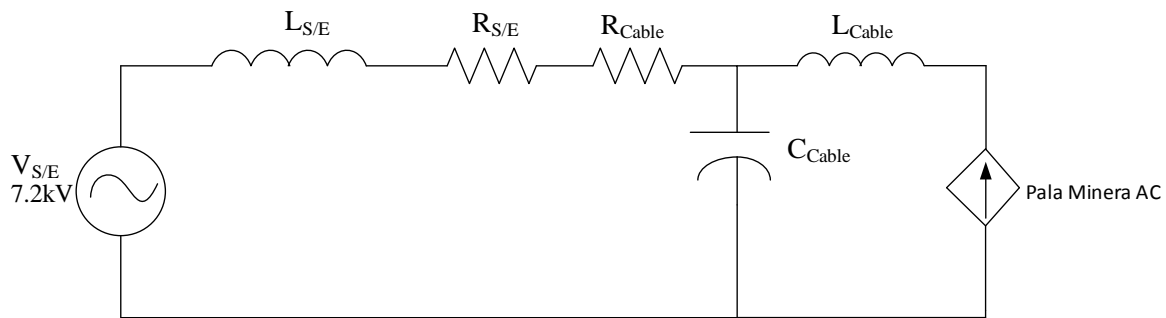
- Las SS/EE móviles están representadas como una fuente en serie con una impedancia RL.
- Se utiliza el modelo RLC equivalente para el cable minero, establecido para líneas cortas de transmisión que tienen longitudes de hasta 150 mi o 240 km [4].
- La pala minera AC se modela como una fuente controlada dependiente.

*El circuito de potencia equivalente monofásico se muestra en la Figura 5.2 y los parámetros considerados se muestran en la*

Tabla 5.1.

*Tabla 5.1 Parámetros Circuito Resonante*

Parámetro	Magnitud
$L_{S/E}$	3.034 [mH]
$R_{S/E}$	0.0153 [ $\Omega$ ]
$R_{Cable}$	0.2560 [ $\Omega$ ]
$C_{Cable}$	0.3250 [ $\mu F$ ]
$L_{Cable}$	0.3160 [mH]

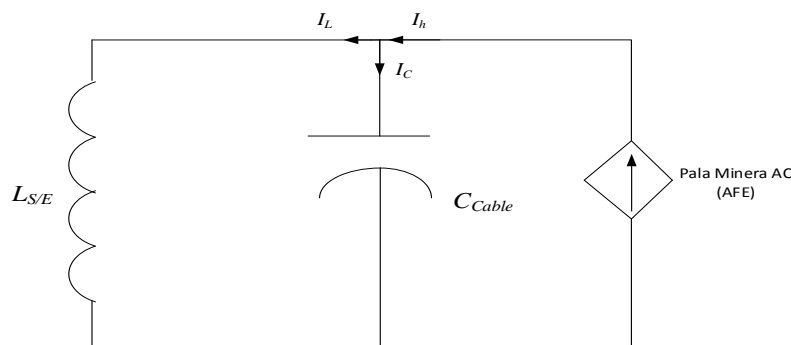


**Figura 5.2 Circuito equivalente Monofásico del Sistema**

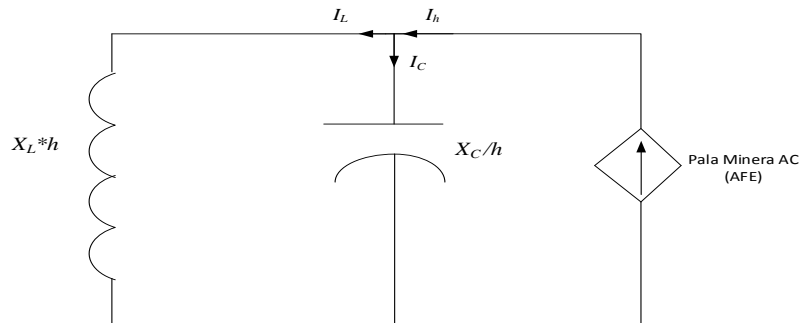
Para el análisis podemos simplificar el circuito equivalente, ya que si se quiere determinar el orden de armónico que está siendo afectado por resonancia se tendrá que la frecuencia del circuito será múltiplo de 50[Hz]. Por lo tanto si la fuente de alimentación está a la frecuencia fundamental, no es relevante incluirla en este análisis.

Luego, la resistencia tanto del transformador como de la línea es despreciada para simplificar el modelo. El análisis de la frecuencia de resonancia es dependiente de la inductancia y capacitancia del sistema.

La Figura 5.3 muestra el circuito simplificado en términos de la capacitancia e inductancia. Se puede ver que la inductancia del cable no está considerada dentro del modelo equivalente monofásico. Esto es debido a que esta inductancia está en serie con la fuente que está inyectando armónicos, por lo que la corriente armónica inyectada es la que circula por esta inductancia, por lo tanto, la inductancia del cable minero no está aportando en el análisis.



**Figura 5.3 Circuito equivalente Monofásico simplificado**



**Figura 5.4 Circuito equivalente Armónico Monofásico**

La Figura 5.4 es el circuito equivalente expresado en términos de la reactancia capacitiva e inductiva dependiendo de múltiplos de la frecuencia fundamental que obedecen a las ecuaciones (5.1) y (5.2) [12]. Luego, haciendo un contraste con la caracterización de resonancia en sistemas eléctricos de potencia del Capítulo 2. La Figura 5.4 nos indica que lo que se está produciendo dentro del “Loop Mina”, es una resonancia paralela entre la inductancia de las subestaciones móviles y la capacitancia del cable minero, siendo estas las componentes dominantes del sistema [9].

$$X_L h = 2\pi f h L \quad (5.1)$$

$$\frac{X_C}{h} = \frac{1}{2\pi f_{fund} h C} \quad (5.2)$$

Entonces realizando el análisis a través de las corrientes en el nodo:

$$I_h = I_C + I_L \quad (5.3)$$

Luego como se menciona en el Capítulo 2, las corrientes del capacitor e inductor se encuentran en contrafase ( $180^\circ$ ) y sujetos a la misma tensión. Por lo tanto, es posible reescribir la ecuación (5.3) de la siguiente forma:

$$I_C \left( -\frac{X_C}{h} \right) = I_L X_L h \quad (5.4)$$

Reemplazando la ecuación (5.4) en (5.3), se obtiene:

$$I_h = I_C \frac{X_L h^2 - X_C}{X_L h^2} \quad (5.5)$$

A la frecuencia de resonancia se tiene que  $I_h = 0$

$$X_L h^2 - X_C = 0 \quad (5.6)$$

Finalmente el orden de la resonancia armónica se puede determinar como:

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{1}{\frac{2\pi f_{fund} C_{Cable}}{2\pi f_{fund} L_{S/E}}}} \quad (5.7)$$

Utilizando los datos de la Tabla 5.1:

$$h \approx 101$$

Por lo tanto, si hacemos un contraste con las componentes armónica de la Tabla 4.5, para este caso, no está afectando en gran magnitud al sistema, ya que no se acerca al orden de las frecuencias armónicas. Esto siempre considerando que se está trabajando con 9 pulsos.

Dentro del “Loop Mina”, se tienen distintos casos, para diferentes largos de líneas áreas, cables mineros y parámetros de SS/EE.

Se considera necesario un método para escanear las frecuencias de resonancias [11].

Por ejemplo si consideramos tramos más largos de cable minero para este mismo caso, tendremos los resultados de resonancia armónica como se muestra en la Tabla 5.2.

*Tabla 5.2 Armónica Resonante Para Largos de Cables Móviles*

<b>Largo[km]</b>	<b><math>R_{cable}[\Omega]</math></b>	<b><math>L_{cable}[mH]</math></b>	<b><math>C_{cable}[\mu F]</math></b>	<b><math>L_{SE}[mH]</math></b>	<b><i>h resonante</i></b>
0.9	0.256	0.316	0.325	3.034	101
1.2	0.342	0.421	0.433	3.034	88
2.4	0.683	0.843	0.866	3.034	62
3.3	0.939	1.158	1.190	3.034	53
3.4	0.968	1.282	1.227	3.034	52

Por lo tanto a partir de estos resultados, se puede ver que el largo de cable provoca que la resonancia este en torno a las armónicas presenten en el sistema.

Si bien el análisis teórico planteado es una ecuación que relaciona los parámetros de inductancia de S/E y capacitancia del cable minero, también es posible realizar esta relación en base a los parámetros de potencia de cortocircuito y potencia reactiva equivalente a la componente capacitiva del cable, lo que permite estudiar y correlacionar la capacidad de cortocircuito de salida en la S/E y largo de cables.

Se tiene las ecuaciones (5.8) y (5.9) para la reactancia inductiva de la S/E y capacitiva del cable respectivamente.

$$X_L = \frac{V_{SE,sec}^2}{kVA_{coci,sec}} \quad (5.8)$$

$$X_c = \frac{V_{SE,sec}^2}{kVAr_{cable}} \quad (5.9)$$

Luego la ecuación (5.7) se puede representar de la siguiente forma:

$$h = \sqrt{\frac{kVA_{coci,sec}}{kVAr_{cable}}} \quad (5.10)$$

### 5.3 Discusión

Es evidente que en la realidad minera la presencia de resonancia, cercana a frecuencias armónicas es posible en un sistema eléctrico minero, cuando se desconoce el efecto que causa introducir paños y paños de cable minero. Por lo tanto se recomienda considerar un estudio previo del largo de estos cables al momento de alimentar una pala de cable AC.

Se debe tener en cuenta además que este fenómeno no solo está afectando las palas de cable AC, sino que además, a nivel de protecciones también podemos tener fallas o bien, la actuación de estas ante la detección de sobretensión o sobretemperatura.

De forma implícita se justifica el efecto de la capacidad de cortocircuito a través de las ecuaciones obtenidas del modelo teórico, donde finalmente existe una relación entre los kVA de cortocircuito y los kVAr del cable minero.

## Capítulo 6. Evaluación Sistema Eléctrico Minero

### 6.1 Introducción

En esta etapa se elabora la evaluación del sistema de la Figura 3.2. Este fue construido en software “EasyPower”, utilizando los modulos “Harmonic Analysis” y “Short Circuit”. Esta herramienta permite obtener la resonancia, contenido armónico generado por librería y niveles de cortocircuito en cada barra del sistema, considerando todos los parámetros calculados anteriormente.

Este capítulo tiene como fin evaluar el sistema para analizar el impacto en el voltaje de salida de SS/EE y terminales de entrada de palas mineras AC. Se determina bajo qué condiciones la contaminación armónica se ve afectada por resonancia y como se involucra la potencia de cortocircuito en los terminales de entrada de SS/EE en la amplificación de voltaje.

La siguiente tabla indica los parámetros utilizados en los casos de análisis.

*Tabla 6.1 Parámetros de Largo de Cable Minero*

<i>Largo [km]</i>	<i>Capacitancia [<math>\mu F</math>]</i>	<i>Reactancia [<math>k\Omega</math>]</i>	<i>Potencia Reactiva [<math>kVAr</math>]</i>
1.2	0.433	7.350	7.053
1.8	0.650	4.900	10.580
3.3	1.191	2.672	19.395
4.2	1.515	2.100	24.685

*Tabla 6.2 Parámetros S/E*

<i>S/E [MVA]</i>	<i>Inductancia [mH]</i>	<i><math>kVA_{coci,sec}</math></i>
4	3.035	56628
10	1.760	100905

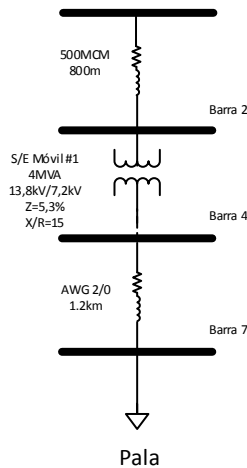
Para cubrir diversos sistemas de faenas mineras se debe considerar que la robustez de un sistema está definido por la potencia de cortocircuito en la barra principal, que para todo este análisis es de 292.8 MVA, lo que es lo indicado en el diagrama unilineal minero de la Figura 3.2. Por lo que requiere de un estudio para realizar la comparativa entre distintos sistemas típicos mineros con potencias de cortocircuito de menor valor o bien sistemas que son más débiles. Este contraste aplica a partir del Capítulo 6.4.

## 6.2 Conexión de una Pala Minera AC

Se considera el caso presentado en la Figura 6.1, donde la enumeración de las barras representa los puntos de análisis del sistema de la Figura 3.2. Se establecen distintos largos de cables móviles típicos: 1.2 km y 1.8 km.

Las simulaciones son realizadas para 2 puntos de interés, que corresponden a la Barra 4 (Salida de S/E) y Barra 7 (entrada de pala minera).

La resonancia es medida solo en la Barra 4, obedeciendo al análisis teórico planteado a partir de la Figura 5.4, donde se concluye que la resonancia está ocurriendo entre la capacitancia distribuida del cable minero y la inductancia de la S/E.



**Figura 6.1 Caso 1: Una Pala Minera 3.5MVA**

### 6.2.1 Caso 1.a: Cable Minero 1.2 km

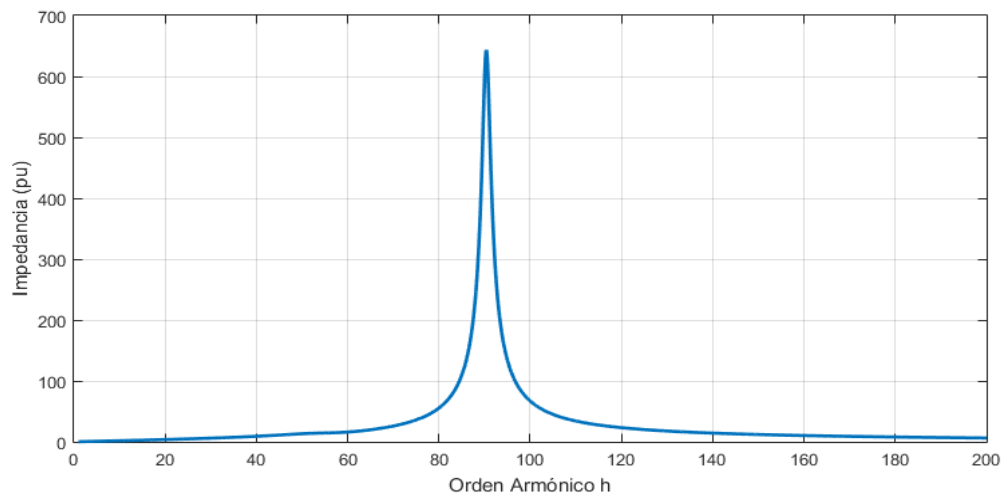
Utilizando los parámetros de cable y S/E indicados en la Tabla 6.1 y Tabla 6.2 respectivamente. Se determinará de forma teórica a partir de la ecuación (5.7), el impacto armónico en resonancia se muestra gráficamente en la Figura 6.2.

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{7350.06}{0.953}} \approx 88 \quad (6.1)$$

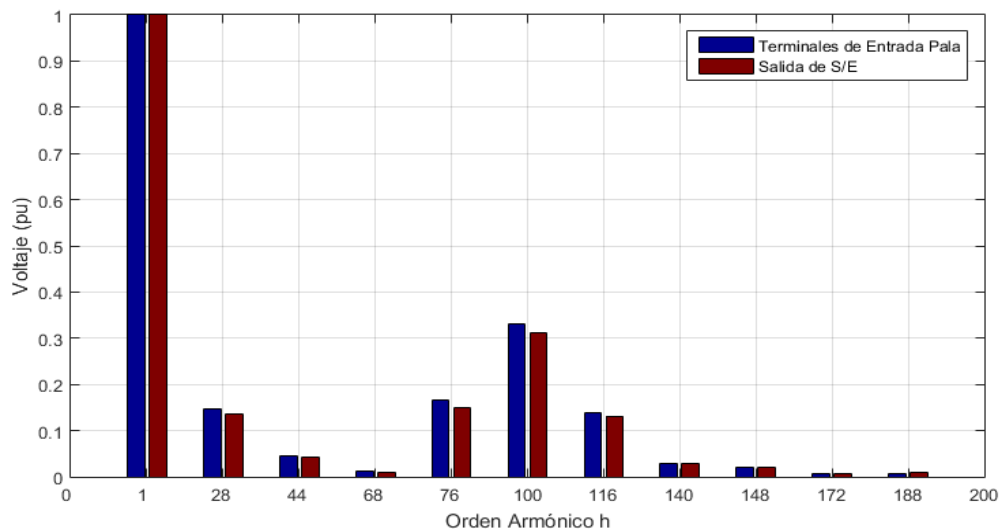
Realizando el contraste entre los resultados teóricos y la medición de la impedancia mostrada en la Figura 6.2, se verifica la aproximación del impacto armónico. Luego la magnitud de la impedancia es tal que alcanza 650[pu]. Las frecuencias afectadas por el incremento de la resonancia se encuentran entre los 4[kHz] y 5[kHz].

El impacto provocado en la amplificación del voltaje dependerá de la impedancia que verá la frecuencia armónica de corriente.

La Figura 6.3 deja en evidencia como una alta impedancia provoca una amplificación de tensión, en gran parte a  $h = 100, 116$  y  $76$ .



**Figura 6.2 Caso 1.a: Impedancia Salida S/E**



*Figura 6.3 Caso 1.a Armónicos de Voltaje*

Si bien la frecuencia de resonancia no es coincidente del todo con  $h = 100$ . Es posible ver que el crecimiento del voltaje a esa frecuencia, es tal que, su valor alcanza un 35% en los terminales de entrada de la pala y 31% en la salida de la S/E.

El aumento del voltaje rms se muestra en la Tabla 6.3.

*Tabla 6.3 Caso 1.a: Voltaje en Resonancia  $h=100$*

<i>PCC</i>	<i>Voltaje [pu]</i>	<i>Voltaje [kVrms]</i>	$\Delta V(\%)$
Salida S/E	1.078	7.762	+7.8
Entrada Pala	1.089	7.841	+8.9

Estos resultados comienzan a dar a conocer como el largo de cables e inductancia de S/E generan efectos en la amplificación del voltaje en la alimentación de palas mineras. Para estimar que tan crítico pueden llegar a ser estos parámetros, se realiza otro caso bajo las mismas condiciones a excepción del largo del cable minero.

## 6.2.2 Caso 1.b: Cable Minero 1.8 km

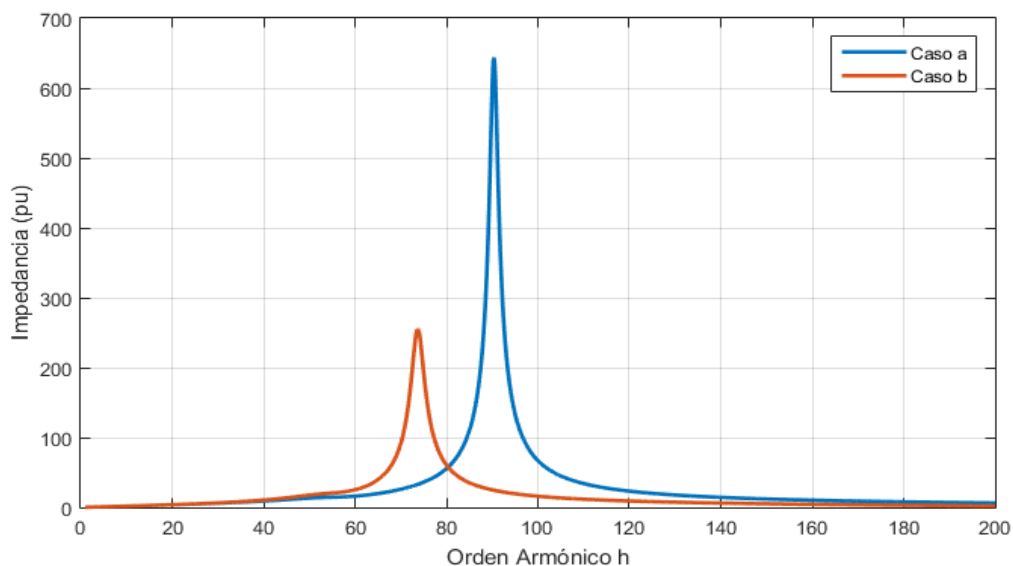
Volviendo a el caso en cuestión, si hacemos uso de la ecuación (5.10) que relaciona la capacidad de cortocircuito de la S/E, potencia reactiva equivalente del cable minero y los

datos señalados en Tabla 6.1 y Tabla 6.2 se estima el orden donde se ubica la resonancia paralelo.

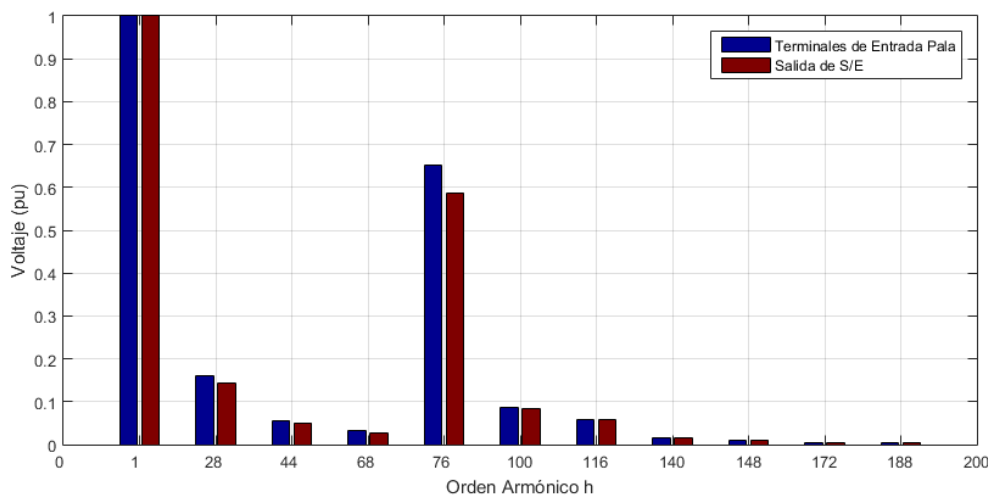
$$h = \sqrt{\frac{56628}{10.58}} \approx 73 \quad (6.2)$$

El caso b de la Figura 6.4 muestra que la armónica de corriente  $76^\circ$  se encuentra con una impedancia de alta magnitud superior a 200 [pu] y en consecuencia, una componente de voltaje que alcanza el 65% en los terminales de entrada de la pala como se muestra en la Figura 6.5.

El corrimiento producido en la frecuencia de resonancia entre los dos casos, es provocado por el aumento de la capacitancia al agregar 2 paños más de cable minero. Por otro lado, la magnitud de la impedancia equivalente es de menor valor para el caso b, esto es debido a que la reactancia capacitiva solo tiene parte imaginaria negativa y el ángulo de la impedancia en el condensador es de  $-90^\circ$ .



**Figura 6.4 Caso 1.b: Impedancia Salida S/E**



**Figura 6.5 Caso 1.b: Armónicos de Voltaje**

Esta figura indica la particularidad de que los armónicos de voltaje en los terminales de entrada de la pala son superiores en magnitud que en la salida de la S/E. Este fenómeno va a ocurrir a mayor proporción, cuando el cable sea más largo, debido a que el cable minero actúa como filtro a causa de sus parámetros LC por lo que van atenuando la contaminación armónica, por lo que si la medición se realiza aguas arriba de la carga, irá disminuyendo el THD en función del largo de cable minero y línea de transmisión.

**Tabla 6.4 Caso 1.b: Voltaje en Resonancia  $h=76$**

<i>PCC</i>	<i>Voltaje [pu]</i>	<i>Voltaje [kVrms]</i>	$\Delta V$ (%)
Salida S/E	1.178	8.482	+17.8
Entrada Pala	1.212	8.723	+21.2

El crecimiento del voltaje es considerable en los terminales de entrada de la pala, el voltaje de operación es de 121%, es decir un 11% por sobre la tolerancia máxima del equipo y un 9% sobre la tensión nominal del cable minero.

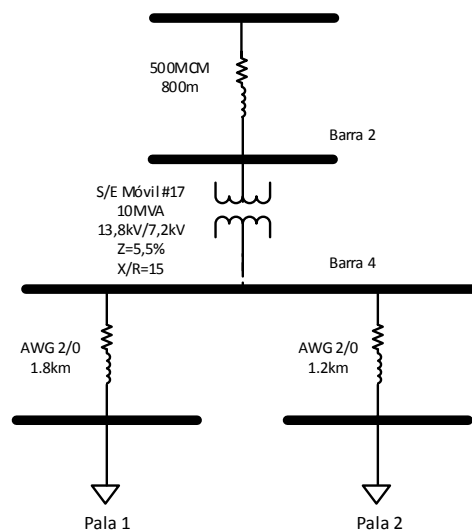
Si bien los casos de análisis demuestran el efecto del largo de cables móviles, existen otros tipos de conexiones y capacidad de SS/EE que deben ser estudiadas para complementar este fenómeno. Por lo tanto, se evalúa la conexión de dos palas en paralelo.

### 6.3 Conexión de Dos Palas en Paralelo

La conexión de dos palas tiene un mayor riesgo en la amplificación de voltaje por el motivo de que la capacitancia equivalente es igual a la suma de las capacidades individuales de los alimentadores de cada pala. Por lo tanto existen diversas combinaciones de largos de cable que provocan resonancia armónica. Además considerando que la capacitancia distribuida se vuelve tan alta que provoca una resonancia en bajas frecuencias, impactando armónicas de corriente dominantes en términos de amplitud.

La alta gravedad de este caso se encuentra principalmente en que la resonancia paralelo provocara que dos equipos de alto costo operen en condiciones de alta probabilidad de falla de sus componentes por sobretensión, además de pérdidas económicas por la posible detención de las palas, deterioro de los alimentadores a causa de las altas temperaturas y potenciamiento de riesgos por arco eléctrico que conllevan las perdidas por aislamiento.

Se utilizan los mismos parámetros aguas arriba de la S/E de la Figura 6.1 para esta evaluación, donde el largo de cables y MVA de la S/E móvil se indican en la Figura 6.6.



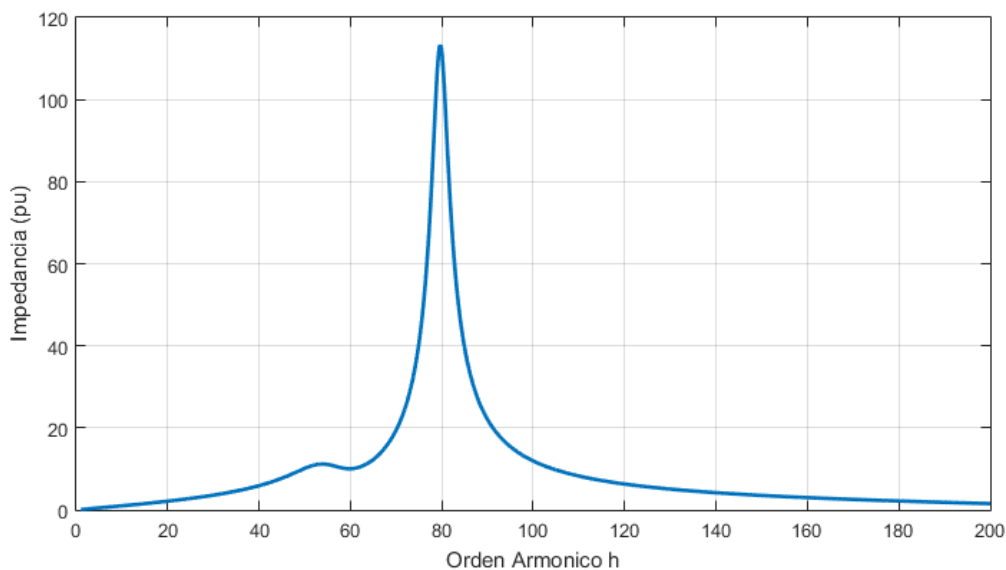
*Figura 6.6 Caso 2: Dos Palas en Paralelo*

### 6.3.1 Caso 2.a: Pala 1-1.8km y Pala 2-1.2km

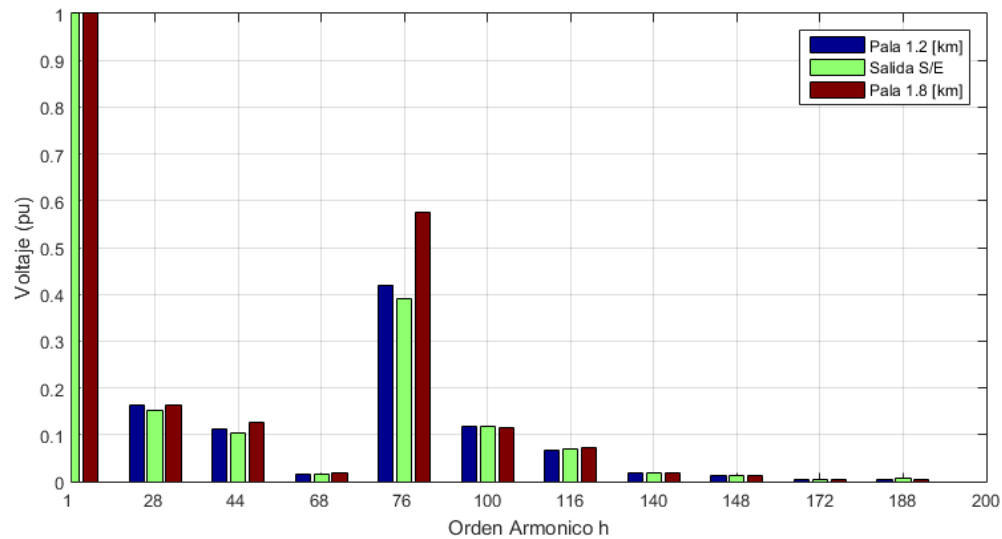
Determinando de forma teórica la resonancia armónica obedeciendo a los parámetros de capacitancia de 1.8 km y 1.2 km indicados en Tabla 6.1 y kVA de cortocircuito de Tabla 6.2 para SS/EE de 10 MVA, que son utilizadas para alimentar 2 palas en paralelo.

$$h = \sqrt{\frac{kVA_{coci,sec}}{kVA_{r_{1.8km}} + kVA_{r_{1.2km}}} \approx 78 \quad (6.3)$$

El impacto armónico en este caso, en términos de la frecuencia es muy cercano a lo que ocurre en el caso 1.b, a pesar de que la capacitancia es mucho mayor. La causa es que en la salida de la S/E de 10 MVA la potencia de cortocircuito es mayor que la de 4 MVA, haciendo que la frecuencia de resonancia se presente a mayor frecuencia. Por otro lado, aunque el aumento de la capacidad de las SS/EE provoque este efecto, la capacitancia equivalente de los dos cables de alimentación acercará a la resonancia a bajas frecuencias.



**Figura 6.7 Caso 2.a: Impedancia Salida S/E**



**Figura 6.8 Armónicos de Voltaje**

La Figura 6.7 muestra el efecto de resonancia en el uso de cables de mediano largo (4 y 6 paños), donde la armónica 76<sup>o</sup> se ve amplificada, llegando a un 58% de la frecuencia fundamental para la pala 1, 42% en la pala 2 y 38% en la salida de la S/E como se muestra en la Figura 6.8.

**Tabla 6.5 Caso 2.a: Voltaje en Resonancia h=76**

<b>PCC</b>	<b>Voltaje [pu]</b>	<b>Voltaje [kVrms]</b>	<b><math>\Delta V</math> (%)</b>
Salida S/E	1.098	7.905	+9.8
Entrada Pala 1.2km	1.111	8.111	+11.1
Entrada Pala 1.8km	1.127	8.114	+12.7

Tanto la pala 1 como la pala 2 están operando sobre el 10% del voltaje nominal, con una diferencia del 1.6% entre ellos, lo que implica que la magnitud de la impedancia en los terminales de entrada de la pala 1 es mayor debido a que tanto la capacitancia del cable como la inductancia crecen en función del largo del cable.

### 6.3.2 Caso 2.b: Pala 1-4.2 km y Pala 2-3.3 km

Se determina de forma analítica la resonancia armónica:

$$h = \sqrt{\frac{kVA_{coci,sec}}{kVA_{r_{4.2km}} + kVA_{r_{3.3km}}} \approx 47 \quad (6.4)$$

Dado este resultado teórico, se puede esperar que la amplitud de la armónica 44 sea de gran magnitud, a causa de que la diferencia esta armónica y la de resonancia es de 150 Hz.

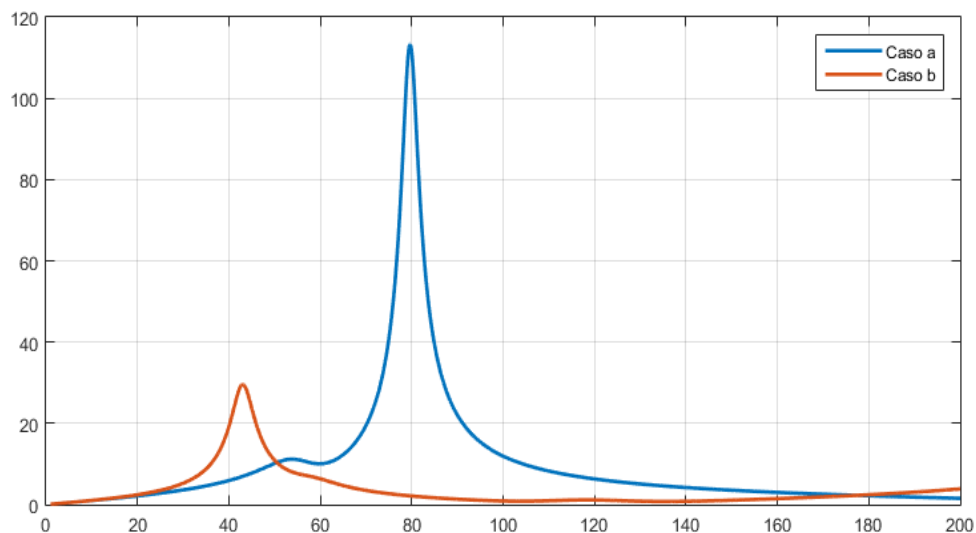


Figura 6.9 Caso 2.b: Impedancia Salida S/E

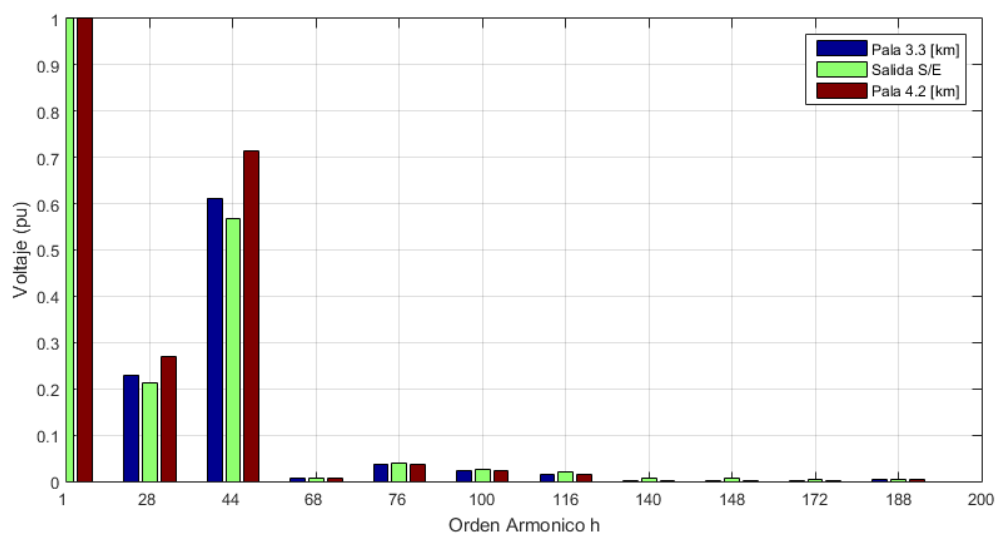


Figura 6.10 Caso 2b: Armónicos de Voltaje

Al igual que el caso 1, la resonancia es desplazada a las armónicas de menor orden, producto del aumento de la capacitancia en el caso b.

La principal causa de la diferencia de magnitud del voltaje armónico entre las palas y salida de SS/EE, es debido a que la distorsión armónica es más significativa mientras la medición sea más cercana a la fuente de corriente armónica que está excitando el circuito. Por otro lado, el sistema se vuelve débil en función del largo del cable minero, es decir, los niveles de cortocircuito en la entrada de la pala disminuyen a medida que el número de paños de cable crece. La Figura 6.10 muestra además, que la armónica 28<sup>o</sup> también se ve amplificada por sobre el 20% ya que la impedancia a esa frecuencia está en 5[pu], aportando en el valor RMS del voltaje.

**Tabla 6.6 Caso 2.b: Voltaje en Resonancia  $h=44$**

<b>PCC</b>	<b>Voltaje [pu]</b>	<b>Voltaje [kVrms]</b>	<b><math>\Delta V</math> (%)</b>
Salida S/E	1.136	8.179	+13.6
Entrada Pala 3.3km	1.185	8.532	+18.5
Entrada Pala 4.2km	1.198	8.625	+19.8

En este caso tenemos 2 palas operando casi al 20% por sobre las condiciones nominales y además un total de 25 paños equivalente entre los dos cables mineros haciendo que operar en estas condiciones sea un riesgo económico aún más importante.

Queda en evidencia que evitar ciertas combinaciones de largos de cables es un factor importante al momento de operar, además, de acuerdo a los resultados obtenidos, se demuestra que es suficiente con que una sola armónica se vea afectada por estos peak de impedancias y la subida del voltaje puede ser hasta de 8.43 [kV] en la entrada de la pala.

## **6.4 Comportamiento de Sistemas Robustos y Débiles**

La robustez del sistema es crucial en el comportamiento de la resonancia, es decir, mientras más débil sea el sistema, la resonancia se acercará aún más a bajas frecuencias ya que la capacidad de cortocircuito en la salida de las SS/EE móviles se debilita.

Se utilizaran dos valores para esta evaluación: 12.25 kA de cortocircuito, que es el valor correspondiente a la capacidad de cortocircuito usado en la evaluación anterior y 6 kA que compete a faenas con sistemas más débiles. Considerando la conexión de una pala mostrada en la Figura 6.1 para una S/E de 4 MVA y 6 MVA.

La Tabla 6.7 y Tabla 6.8 muestran los valores de cortocircuito en la salida de cada S/E, respecto a sistemas con diferente capacidad de cortocircuito.

**Tabla 6.7 Potencia de Cortocircuito S/E 4MVA**

$kA_{coci}$ Barra 1	$MVA_{coci}$ Barra 1	S/E $MVA_{coci}$
12	292.8	56.63
6	74.82	47.15

**Tabla 6.8 Potencia de Cortocircuito S/E 6MVA**

$kA_{coci}$ Barra 1	$MVA_{coci}$ Barra 1	S/E $MVA_{coci}$
12	292.8	75.51
6	74.82	59.55

Luego, se calcula a través de la ecuación (5.10) la armónica resonante, indicando el valor de voltaje RMS en los terminales de entrada de la pala en pu.

El objetivo de esta evaluación, es poder evidenciar cual es el efecto de la capacidad de cortocircuito del sistema en la resonancia, por medio de la comparación de sistemas respecto a la amplificación de voltaje para diferentes largos de cable minero.

La Tabla 6.9 y Tabla 6.10 muestran el impacto de cada potencia de cortocircuito de la S/E de 4MVA, en función del largo de cable al igual que la Tabla 6.11 y Tabla 6.12 para la S/E de 6MVA.

**Tabla 6.9 12  $kA_{coci}$  – S/E 4MVA**

Largo Cable [km]	$MVA_{coci}$ Pala	$h_{Resonante}$	Voltaje Pala [pu]
1.2	47.73	90	1.089
1.8	42.22	73	1.211
2.1	40.16	68	1.048
2.4	38.24	63	1.035
3.0	34.77	57	1.047
3.3	33.22	54	1.067
3.6	31.78	52	1.111
3.9	30.44	50	1.107
4.2	29.20	48	1.201

**Tabla 6.10 6 kA<sub>coci</sub> – S/E 4MVA**

<b>Largo Cable [km]</b>	<b>MVA<sub>coci</sub> Pala</b>	<b>h<sub>Resonante</sub></b>	<b>Voltaje Pala [pu]</b>
1.2	40.27	82	1.095
1.8	37.01	67	1.125
2.1	35.48	62	1.076
2.4	34.03	58	1.079
3.0	31.36	52	1.114
3.3	30.14	49	1.132
3.6	28.99	47	1.136
3.9	27.90	46	1.201
4.2	26.88	44	1.261

**Tabla 6.11 12kA<sub>coci</sub> - 6MVA**

<b>Largo Cable [km]</b>	<b>MVA<sub>coci</sub> Pala</b>	<b>h<sub>Resonante</sub></b>	<b>Voltaje Pala [pu]</b>
1.2	58.17	103	1.194
1.8	50.91	84	1.045
2.1	47.77	78	1.164
2.4	44.91	73	1.076
3.0	39.97	65	1.019
3.3	37.84	62	1.030
3.6	35.90	60	1.036
3.9	34.13	58	1.046
4.2	32.51	55	1.063

**Tabla 6.12 6kA<sub>coci</sub> - 6MVA**

<b>Largo Cable [km]</b>	<b>MVA<sub>coci</sub> Pala</b>	<b>h<sub>Resonante</sub></b>	<b>Voltaje Pala [pu]</b>
1.2	48.63	92	1.189
1.8	43.71	75	1.077
2.1	41.484	69	1.183
2.4	39.412	65	1.073
3.0	35.709	58	1.071
3.3	34.061	55	1.081
3.6	32.536	53	1.092
3.9	31.123	52	1.102
4.2	29.813	49	1.072

Un análisis que es capaz de demostrar cual es la tendencia de la amplificación del voltaje en función de la potencia de cortocircuito del sistema y SS/EE es el promedio de la amplificación del voltaje para cada caso utilizando la ecuación (6.5).

$$V_{Pala,prom} [pu] = \frac{\sum Voltaje Pala [pu]}{N^{\circ} Mediciones} \quad (6.5)$$

Por lo que resumiendo los promedios de cada tabla, se obtiene los resultados mostrados en la Tabla 6.13.

*Tabla 6.13 Voltaje de Entrada Pala Promedio*

<b><math>kA_{coci}</math> Barra 1</b>	$V_{Pala,prom} [pu] - 4MVA$	$V_{Pala,prom} [pu] - 6MVA$
12.25	1.102	1.075
6	1.135	1.104

Existen tendencias que reflejan formas de mitigar el efecto de la resonancia en la contaminación armónica. El uso de una subestación más grande puede hacer más flexible el uso de diferentes largos de cables. Se muestran que en los promedios tanto para 12.25 kA y 6 kA existe una diferencia de aproximadamente del 3% entre el uso de SS/EE.

## 6.5 Discusión

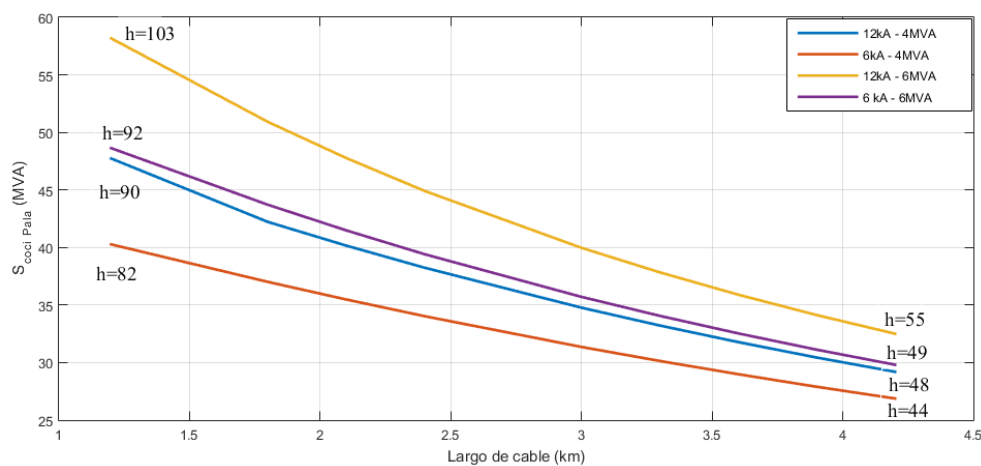
Resumiendo los resultados de cada casos correspondientes a la conexión de una pala minera AC y dos palas en paralelo, es posible identificar el desplazamiento de la resonancia y como afecta el largo de cable en la amplitud. La Figura 6.4 y Figura 6.9 indican como la magnitud de la impedancia en resonancia es reducida a medida que se agregan más paños de cable en paralelo, esto es a causa de que el aumento de la capacitancia provoca que la reactancia equivalente disminuya y en consecuencia, también la impedancia equivalente en resonancia.

Si bien la resonancia debe ser analizada, para controlar este fenómeno es necesario ir más a fondo, es decir, llegar al estudio de lo que está provocando esta anomalía. Partiendo desde el diseño del sistema eléctrico hasta las decisiones del uso de equipamientos y su manejo durante la operación.

Para resumir la tendencia de los sistemas robustos y débiles respecto a los niveles de cortocircuito de la pala y resonancia armónica, la Figura 6.11 representa el comportamiento de cada sistema, donde se indica la frecuencia armónica que entra en resonancia cuando el largo de cables es de 1.2km hasta 4.2km. Todos los sistemas se comportan de forma que tienden a llegar a frecuencias armónicas bajo  $h = 60$ , lo que varía según la robustez de cada uno.

El uso de un sistema más débil, conservando una S/E de 4MVA provoca que la frecuencia de resonancia sea crítica impactando en  $h=44$  y además causando que la potencia de cortocircuito en los terminales de la pala estén bajo la restricción de 30 MVA que indica el fabricante, lo que quiere decir que los problemas de regulación de voltaje a frecuencia fundamental se vuelve compleja.

Por lo tanto, se justifica que el reemplazo de SS/EE para alimentar palas de cable AC este dentro de las consideraciones al momento de operar bajo ciertos largos de cable.



**Figura 6.11 Tendencia de los Sistemas**

## Capítulo 7. Conclusiones

---

### 7.1 Sumario

Se caracterizó el fenómeno de resonancia en sistemas eléctricos de potencia mineros de forma teórica y práctica, a través de una modelación que fue utilizada para respaldar los resultados simulados en software “EasyPower”, de manera que se corroboró cada resultado por medio del modelo matemático, utilizando los parámetros de subestaciones, líneas áreas y cables mineros obtenidos a través de sus características eléctricas indicadas por el fabricante y calculadas por medio de algoritmos extraídos de la literatura.

A través de la caracterización de las variables de voltaje y corrientes obtenidos de la modulación SPWM, fue posible determinar las frecuencias armónicas para analizar el impacto de la resonancia en el sistema eléctrico minero.

Se evaluó la consecuencia de largos de cables móviles, para luego encontrar el efecto de la capacidad de cortocircuito de salida de SS/EE y entrada en las palas mineras bajo diversas condiciones, demostrando el comportamiento de los sistemas bajo el efecto combinado de la capacitancia del cable y capacidad de cortocircuito en la amplificación de voltaje, tanto de salida de las SS/EE como en la alimentación de la carga.

Cabe mencionar que el problema está presente con la excitación del sistema en corriente alterna, por lo tanto, la realización de un análisis en corriente continua no es relevante para responder a los objetivos planteados ya que se trabaja con fuentes de corriente controladas que excitan los sistemas a distintas frecuencias armónicas.

Este informe no propone estrategias para enfrentar el problema, pero si, es posible decir que los resultados son suficientes para dar recomendaciones durante la operación, como por ejemplo, considerar el uso de SS/EE con diferentes capacidades para evitar la resonancia armónica bajo diversos largos de cable minero.

## 7.2 Conclusiones

El análisis de los parámetros de líneas aéreas es relevante, ya que sus parámetros definen la potencia de cortocircuito que llega en los terminales de entrada las SS/EE, por lo que es un factor para el cálculo de la inductancia de la S/E y por ende para la evaluación de resonancia.

Se puede deducir que la incorporación de capacitores en el sistema puede provocar una amplificación del voltaje dependiendo del dimensionamiento de este y el contenido armónico de la carga no lineal, por lo que una evaluación de resonancia previa a la implementación de banco de capacitores resulta necesario.

El efecto de la resonancia en el voltaje es dinámico, ya que su amplificación es dependiente de la magnitud de la impedancia presente en las armónicas de corriente, del posicionamiento de las frecuencias de la resonancia y la amplitud de las armónicas. Es por esto que el análisis de la tendencia de los sistemas, bajo equipamientos de cable minero y SS/EE de diversas capacidades no es trivial.

La modulación SPWM, puede ser un aporte en evitar las amplificaciones para sistemas de altas capacitancias. Es decir, desplazar el contenido armónico hacia frecuencias más altas a través del aumento del número de pulsos, lo que implica un mejor control debido a que el número de muestras resulta mayor. Pero en consecuencia, la velocidad de conmutación de los semiconductores, van a generar mayores pérdidas de potencia.

Existen condiciones en que la restricción de 30 MVA de cortocircuito en los terminales de entrada de la pala no se cumple, debido a los problemas de regulación de voltaje al utilizar largos de cables sobre 12 paños, esto hace que las pérdidas de voltaje a frecuencia fundamental sean considerables disminuyendo el factor de potencia de desplazamiento.

Luego, tanto el flujo de potencia del sistema como el fenómeno de resonancia, están provocando que el sistema no opere en buenas condiciones, produciendo pérdidas económicas considerables dentro de la minería.

Finalmente lo que está ocurriendo es que la inductancia de la S/E está determinada por la potencia de cortocircuito que es definida por el sistema aguas arriba de este equipo y sus características técnicas. Además la topología constructiva del cable minero, provoca que existan altas capacitancias. Dicho esto, como fue definido durante este documento, la resonancia se produce entre la inductancia de la S/E y la capacitancia del cable o dicho de

otra manera, la resonancia está definida por la capacidad de cortocircuito en la salida de la S/E y la capacitancia del cable minero, por lo que fue posible dejar en evidencia el efecto combinado de largo de cables móviles y potencia de cortocircuito, que puede amplificar la tensión hasta un 121% durante la operación.

### **7.3 Trabajos Futuros**

- Desarrollar estrategias operacionales para impedir resonancia armónica.
- Incorporar tecnologías para robustecer el sistema.
- Buscar tecnologías de cables que puedan tener una menor capacitancia.
- Recomendar consideraciones para la actualización del Standard IEEE-519, para incorporar el tema de resonancia y su efecto en la calidad del suministro eléctrico con cargas no lineales que generan armónicos de alta frecuencia.
- Investigar el diseño de cables mineros para proponer una topología que pueda evitar altas capacitancias.

## Bibliografía

---

- [1] Guide for Application of Shunt Power Capacitors, IEEE 1036, IEEE Power & Energy Society, 2010
- [2] Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, IEEE 1531, Power Engineering Society, IEEE, 2003.
- [3] Eduardo P. Wichmann, “*Filtros Pasivos*”. Seminario, Calidad de Suministro Eléctrico, una Herramienta para Mejorar la Competitividad.
- [4] “*Electrical Power Transmission System Engineering, Analysis and Design*”, Turan Gönen, Third Edition, 2014.
- [5] “*Power Electronics Handbook*”, Muhammad H. Rashid, 2001.
- [6] Frank G. Wichert, “*AFE IGBT AC Drives For Bucyrus 495HR Shovels*”, The Western Mining Electrical Association, New Mexico, 2000.
- [7] Thomas Novak, “*Safety Analysis of Trailing Cables Use on High-Voltage Continuous Miners*”, in IEEE Transactions on Industry Applications, 2012.
- [8] Recommended Practice and Requeriments for Harmonic Control in Electric Power System, IEEE-519, Power Energy Society, 2014.
- [9] Omar J. Abdel-Baqi, Michael G. Onsager and Peter J. Miller, “*The Effect of Available Short-Circuit Capacity and Trail Cable Length on Substation Voltage Amplification in Surface Excavation Industry*”, in IEEE Transactions on Industry Applications, 2016.
- [10] M.A Karimi, M. Tavakoli, “*Harmonic Resonance in Power System – A Documented Case*”, in 16<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality for Power, Romania, 2014.
- [11] Babak Parkhideh, Hesam Mirzaee and Subhashish Bhattacharya, “*Suppementary Energy Storage and Hybrid Front-End Converters for High-Power Mobile Mining Equipment, Members*”, in IEEE Transaction on Industry Applications, 2013.
- [12] José Rodríguez, *Operating Experience of Shovel Drives for Mining Applications*”, in Industry Applications Conference, 2002, 37<sup>th</sup> IAS Annual Meeting, USA.

- [13] Michael R. Yenchek and Peter G Kovalchik, “*The Impact of Current Load on Mine-Trailing Cable Thermal Life*”, in Conf Rec 10<sup>th</sup> Mining Electrotech, 1993.
- [14] Gerald M. Brown, Bernard J. Ebacher, Walter G. Koellner, “*Increased Productivity with AC Drives for Mining Excavators and Haul Trucks*”, in Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, Italy.
- [15] J Rodriguez, “*Resonance and overvoltages in a medium voltaje fan motor drive with long cables in an underground mine*”, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- [16] Curso, Pala Cable Eléctrica 495HR, Maquinaria Pesada, Bucyrus
- [17] Ricardo A. Lizana, “*Rectificadores de Frente Activo*”, Control y Aplicaciones de Electrónica Industrial, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.

