



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRICIDAD

ESTUDIO DE LAS CORRIENTES TRANSITORIAS CAUSADAS POR EL ARRANQUE
DE MOTORES TRIFASICOS EN LA RED DE MEDIO VOLTAGE (13.8kV), CERRO
PELADO MEDIANTE LA HERRAMIENTA ATP DRAW

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: Adrián Mauricio Sánchez Castro
Segundo Erwin Chong Ripalda

TUTOR: Ing. Ervin Geovanny Solano Villegas, MSc

Guayaquil – Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Adrián Mauricio Sánchez Castro con documento de identificación N° 0302227517 y Segundo Erwin Chong Ripalda con documento de identificación N° 1206948356 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo y autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 23 de agosto del año 2024

Atentamente:



Adrián Mauricio Sánchez Castro
0302227517



Segundo Erwin Chong Ripalda
1206948356

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Adrián Mauricio Sánchez Castro con número de identificación N° 0302227517 y Segundo Erwin Chong Ripalda con número de identificación N° 1206948356, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de lo que somos autores del Proyecto Técnico: **“ESTUDIO DE LAS CORRIENTES TRANSITORIAS CAUSADAS POR EL ARRANQUE DE MOTORES TRIFASICOS EN LA RED DE MEDIO VOLTAGE (13.8 KV), CERRO PELADO MEDIANTE LA HERRAMIENTA ATP DRAW”**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de INGENIERO ELECTRICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

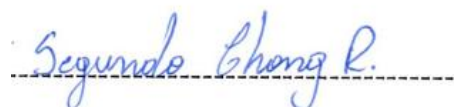
En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en el formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 23 de agosto del año 2024

Atentamente:



Adrián Mauricio Sánchez Castro
0302227517



Segundo Erwin Chong Ripalda
1206948356

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ervin Geovanny Solano Villegas con documento de identificación N° 0923481915 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“ESTUDIO DE LAS CORRIENTES TRANSITORIAS CAUSADAS POR EL ARRANQUE DE MOTORES TRIFASICOS EN LA RED DE MEDIO VOLTAJE (13.8 KV), CERRO PELADO MEDIANTE LA HERRAMIENTA ATP DRAW”**, realizado por Adrián Mauricio Sánchez Castro con número de identificación N° 0302227517 y Segundo Erwin Chong Ripalda con número de identificación N° 1206948356, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Tecnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana. —

Guayaquil, 23 de junio del año 2024

Atentamente;

Ing. Ervin Geovanny Solano Villegas, Msc

0923481915

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios quien ha sido la salida cuando todo se me cerraba, cuya guía y fortaleza han sido fundamentales en este viaje. A mi madre, quien ha sido la pieza clave por su amor incondicional y su apoyo constante, que han sido la base de mi esfuerzo y dedicación. A mi esposa, por su comprensión y aliento, que me han impulsado a seguir adelante en los momentos más difíciles. A mis hermanas, por su cariño y apoyo inquebrantable, que han sido una fuente constante de motivación y confianza. Cada uno de ustedes ha jugado un papel crucial en la culminación de esta tesis, y les estoy eternamente agradecido.

Segundo Erwin Chong Ripalda

DEDICATORIA

A mi amada familia.

En este día tan significativo quiero dedicar este logro a ustedes quienes han sido mi roca y mi inspiración a lo largo de toda mi vida, cada paso en este camino de investigación y aprendizaje ha sido posible gracias a su amor incondicional, paciencia infinita y constante apoyo.

Este trabajo es también el fruto de su sacrificio y confianza en mí. Con profunda gratitud y amor, comparto con ustedes este logro que marca no solo mi crecimiento académico, sino también nuestro vínculo indestructible como familia.

Adrián Mauricio Sánchez Castro

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, cuyo apoyo y guía han sido fundamentales a lo largo de este proyecto. A mi madre, por su amor incondicional y su constante aliento, su apoyo a pesar de las dificultades que nos pasaron, que me ha dado fuerzas para superar los desafíos. A mi esposa, por su comprensión y paciencia, y por estar siempre a mi lado, brindándome el apoyo necesario en cada etapa de este viaje. A mis hermanas, por su apoyo inquebrantable y sus palabras de ánimo. Finalmente, al Ingeniero Otto Astudillo, por su invaluable orientación y asesoramiento, que han sido cruciales para el desarrollo y la culminación de esta investigación. Y como ultimo a mi tío quien ha sido un apoyo fundamental en estos últimos momentos. Sin el apoyo y la ayuda de todos ustedes, este trabajo no habría sido posible

Segundo Erwin Chong Ripalda

AGRADECIMIENTO

A mi familia.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento por estar siempre a mi lado durante esta travesía académica. Sus palabras de ánimo, sus gestos de apoyo y su comprensión incondicional han sido mi luz en los momentos de desafío. A ustedes, quienes han sacrificado tanto para que yo pueda perseguir mis sueños, les debo más de lo que las palabras pueden expresar.

Que este estudio, dedicado a comprender las complejidades de las corrientes transitorias causadas por el arranque de motores trifásicos en la red de medio voltaje, sirva como testimonio de nuestro compromiso mutuo y del poder del apoyo familiar en la consecución de metas difíciles.

Con amor y gratitud infinitos.

Adrián Mauricio Sánchez Castro

ÍNDICE

PORTADA.....	I
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	II
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN	IV
DEDICATORIA	V
DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTO	VII
AGRADECIMIENTO	VIII
ÍNDICE	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT	XVI
ACRÓNIMOS.....	XVII
CAPITULO I	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.4 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.5 BENEFICIARIOS DE LA PROPUESTA	4
1.6 OBJETIVOS	5

1.6.1.	Objetivo General	5
1.6.2	Objetivos Específicos	5
1.6.3	Metodología y Medios.....	5

CAPITULO II..... 7

2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA..... 7

2.1.1	Redes de distribución de energía eléctrica.....	7
2.1.1.1	Redes eléctricas con topología en anillo:.....	8
2.1.1.2	Redes eléctricas con topología mallada:	9
2.1.1.3	Redes eléctricas con topología radial:	10
2.1.2	Motores de inducción.	11
2.1.2.1	Motores de corriente continua (DC).....	12
2.1.2.2	Motores de corriente alterna (AC)	12
2.1.2.3	Partes de un motor.	13
2.1.2.4	Modelo dinámico de un motor de inducción.....	14
2.1.2.5	Ejes del Estator d, q de un motor de inducción.	15
2.1.2.6	Eje del Rotor 1, 2 de un motor de inducción.	16
2.1.3	Arrancadores de Motores de inducción Trifásicos.	17
2.1.3.1	Arrancador Directo en Línea (DOL - Directo En Línea).	17
2.1.3.2	Arrancador Estrella-Triángulo.	18
2.1.3.3	Arrancador con Autotransformador.....	19
2.1.3.4	Arrancador Suave.	20
2.1.3.5	Arrancador con Variador de Frecuencia (VFD - Variable Frequency Drive).	22
2.1.3.6	Arrancador Resistencia Serie.....	23
2.1.4	Protección contra sobrecorriente por sobrecorriente.	24
2.1.4.1	Curvas de tiempo de operación.	25
2.1.5	Líneas de distribución.	25
2.1.5.1	Postes para líneas de distribución.	27
2.1.5.2	Tensores para cables.....	28
2.1.5.3	Conductores de aluminio (13.8 kV).	29
2.1.5.4	Aisladores de porcelana.	30
2.1.6	Programas utilizados para el diseño de la propuesta	31
2.1.6.1	Software ATP Draw:	31
2.1.6.2	Software de calculadora Induction Motor Data:	32

CAPITULO III34

3.1 DESARROLLO DEL FUNCIONAMIENTO 34

3.1.1	Modelado De Partes:	34
3.1.1.1	Motor estrella delta.....	34
3.1.1.1.1	Comportamiento de un motor trifásico en las redes de distribución.	34
3.1.1.1.2	Tabla de datos:	36
3.1.1.1.2	Calculadora Induction motor data.	38
3.1.1.1.2	Bloques de operación de un motor.....	39
3.1.1.1.2	Líneas de distribución (13.8 kV).....	47
3.1.1.1.2	Reconector trifásico:	51
3.1.1.1.2	Cargas concentradas.	54

CAPITULO IV.....55

4.1 ANALISIS Y RESULTADOS:..... 55

4.2 Arranque de motores con disparo 57

4.2.1	Curva C1 del reconnector disparando.....	59
4.3	Diagrama final arrancando 4 motores.	60
4.3.2	Curva C1 del reconnector sin disparo.	62
4.4	Caída de tensión en la línea.	62
CONCLUSIONES.....		63
RECOMENDACIONES		64
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		65
ANEXO		67

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 DIAGRAMA UNIFILAR.....	3
FIGURA 2 REDES DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	8
FIGURA 3 RED ELÉCTRICA EN FORMA DE ANILLO.	9
FIGURA 4 RED ELÉCTRICA CON TOPOLOGÍA MALLADA.....	10
FIGURA 5 REDES ELÉCTRICAS CON TOPOLOGÍAS RADIALES.	11
FIGURA 6 MOTOR DE INDUCCION	12
FIGURA 7 PARTES DE UN MOTOR.....	14
FIGURA 8 ESTATOR DE UN MOTOR	16
FIGURA 9 ROTOR DE UN MOTOR.....	17
FIGURA 10 DIAGRAMA DE FUERZA DE ARRANQUE DIRECTO DE UN MOTOR	18
FIGURA 11 DIAGRAMA DE FUERZA DE UN ARRANQUE ESTRELLA DELTA.....	19
FIGURA 12 DIAGRAMA DE UN ARRANCADOR CON AUTOTRANSFORMADOR	20
FIGURA 13 DIAGRAMA DE FUERZA DE UN ARRANCADOR SUAVE.....	21
FIGURA 14 DIAGRAMA DE UN ARRANCADOR CON VARIADOR DE FRECUENCIA.....	23
FIGURA 15 DIAGRAMA DE FUERZA DE UN ARRANCADOR RESISTENCIA SERIE.....	24
FIGURA 16 LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN.....	27
FIGURA 17 POSTE METÁLICO	28
FIGURA 18 TENSORES PARA CABLES.	29
FIGURA 19 CONDUCTORES DE ALUMINIO.....	30
FIGURA 20 AISLADORES DE PORCELANA.	31
FIGURA 21 SOFTWARE ATP DRAW	32
FIGURA 22 SOFTWARE INDUCTION MOTOR DATA	33
FIGURA 23 RESULTADOS TOMADOS DE INDUCTION MOTOR DATA	38
FIGURA 24 MODELADO DEL MOTOR.	39
FIGURA 25 VOLTAJE TRIFÁSICO DE PICO.....	40
FIGURA 26 CORRIENTES TRIFÁSICO DE PICO.....	41
FIGURA 27 TORQUE INDUCIDO.	42
FIGURA 28 TORQUE DE CARGA Y TORQUE INDUCIDO.	43
FIGURA 29 VELOCIDAD DEL MOTOR.	43
FIGURA 30 CORRIENTES ESTRELLA DELTA.....	44

FIGURA 31 CORRIENTES ESTRELLA DELTA MÁS CERCA.....	44
FIGURA 32 TORQUE DELTA ESTRELLA.....	45
FIGURA 33 VELOCIDAD DELTA ESTRELLA.	46
FIGURA 34 DATOS DE LA LÍNEA 10 KM.....	48
FIGURA 35 REPRESENTACIÓN DE LA LÍNEA 10 KM ATP DRAW.....	48
FIGURA 36 DATOS DE LA LÍNEA 25 KM.....	49
FIGURA 37 REPRESENTACIÓN DE LA LÍNEA 25 KM ATP DRAW.....	49
FIGURA 38 IMPEDANCIA DE LA LÍNEA.	50
FIGURA 39 CURVA DEL RECONECTADOR.	51
FIGURA 40 CONFIGURACION DEL RECONECTADOR.....	52
FIGURA 41 CARGAS CONCENTRADAS.	54
FIGURA 42 DIAGRAMA FINAL.....	56
FIGURA 43 ARRANQUE DE MOTORES CON DISPARO.....	57
FIGURA 44 CURVA C1 DEL RECONECTADOR DISPARANDO.....	58
FIGURA 45 DIAGRAMA FINAL ARRANCANDO 4 MOTORES.....	59
FIGURA 46 ARRANQUE DE MOTORES SIN DISPARO.	60
FIGURA 47 CURVA C1 DEL RECONECTADOR SIN DISPARO.	61
FIGURA 47 CAÍDA DE TENSIÓN EN LA LÍNEA	61

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 TABLA DE DATOS ELÉCTRICOS DE MOTORES..... 37

RESUMEN

Este estudio aborda el análisis de las corrientes transitorias generadas durante el arranque de motores trifásicos en la red de media tensión (13,8 kV) en el alimentador Cerro Pelado utilizando la herramienta de simulación ATP Draw. Las corrientes transitorias pueden producir perturbaciones significativas en la estabilidad y operación del sistema eléctrico, por lo que su estudio es esencial para garantizar un suministro eléctrico confiable y seguro.

A través de la simulación ATP Draw, se modelaron diferentes escenarios de arranque de motores trifásicos para evaluar el impacto de estas corrientes transitorias en la red. Los resultados obtenidos permitieron identificar los niveles de corriente pico y su duración, así como los posibles efectos sobre los componentes del sistema.

El análisis reveló la importancia de implementar medidas de mitigación adecuadas, como coordinación de protecciones y dispositivos de arranque suave para reducir los efectos adversos de las corrientes transitorias en la red. Por lo tanto, este estudio constituye una base sólida para desarrollar estrategias que mejoren la confiabilidad y la eficiencia operativa de la red de media tensión en el alimentador Cerro Pelado.

ABSTRACT

This study deals with the analysis of transient currents generated during the starting of three-phase motors in the medium voltage network (13.8 kV) in the Cerro Pelado feeder using the ATP Draw simulation tool. Transient currents can produce significant disturbances in the stability and operation of the electrical system, so their study is essential to guarantee a reliable and safe electrical supply.

Through ATP Draw simulation, different three-phase motor starting scenarios were modeled to evaluate the impact of these transient currents on the network. The results obtained allowed the identification of peak current levels and their duration, as well as the possible effects on the system components.

The analysis revealed the importance of implementing adequate mitigation measures, such as coordination of protections and soft-start devices to reduce the adverse effects of transient currents on the network. Therefore, this study provides a solid basis for developing strategies to improve the reliability and operational efficiency of the medium voltage network in the Cerro Pelado feeder.

ACRÓNIMOS

- kV: Kilovoltios
- ATP : Alternative Transient Program.
- MVA: Megavoltio amperio.
- DC: Corriente directa o continua.
- AC: Corriente alterna.
- AWG: Calibre de alambre estadounidense.
- CNEL EP: Empresa Eléctrica Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad.
- R: Resistencia.
- P: Potencia aparente
- I: Corriente nominal del circuito
- V: Voltaje nominal del circuito
- kVA: Kilovoltios amperios
- T: Torque.
- DOL: Directo en línea.
- u: Caída de tensión

- VFD: Variable Frequency Drive.
- IEC: International Electrotechnical Commission.
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Hz: Hercios.
- kW: Kilovatios
- A: Amperios.
- Nm: Newton metro.
- Troz: Torque de rozamiento.
- Rend.nom: Rendimiento nominal.
- rpm: Revoluciones por minuto.
- f: Frecuencia.
- kg: kilogramo.
- km: Kilómetros.
- Ω : Ohmio

CAPITULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

La confiabilidad y estabilidad de las líneas eléctricas son cuestiones críticas para el funcionamiento de cualquier sistema eléctrico. Esto es especialmente cierto para las redes de media tensión, como la red de 13,8 kV, que presta servicio a muchos clientes industriales y comerciales. Por lo tanto, arrancar un motor trifásico sigue siendo uno de los desafíos más difíciles, ya que las corrientes transitorias pueden exceder varias veces la corriente nominal del motor. Aunque estas corrientes son temporales, pueden provocar perturbaciones no sólo en el motor, sino también en todo el sistema de distribución, provocando fluctuaciones de tensión y activación involuntaria de dispositivos de protección. Además, un estudio de la revista *Electronics* analiza la estabilidad transitoria de voltaje en sistemas de energía y cómo la integración de nuevas fuentes de energía requiere una planificación cuidadosa para evitar perturbaciones que afecten la confiabilidad y estabilidad del sistema[1].

Para comprender mejor estos fenómenos, es importante utilizar simuladores capaces de analizar flujos transitorios en condiciones controladas. De esta forma, ATP Draw se ha convertido en una herramienta ideal para estudiar las transiciones electromagnéticas en sistemas eléctricos. ATP Draw ha demostrado ser una herramienta esencial para la simulación y el análisis de transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia, proporcionando resultados precisos y fiables tanto para aplicaciones educativas como industriales[2].

La capacidad de solucionar problemas es especialmente útil en redes de media tensión donde el margen de error es limitado y cualquier fallo puede tener graves consecuencias.

Mitigar los efectos negativos de las sobrecorrientes transitorias se basa no sólo en un buen modelado y análisis, sino también en la correcta selección y coordinación de estos dispositivos. El desafío de mitigar los efectos negativos de las sobrecorrientes transitorias en redes de media tensión requiere no solo un modelado y análisis precisos, sino también la correcta selección y coordinación de dispositivos de protección. La optimización de las operaciones de los relés de sobrecorriente es crucial para evitar fallas graves, ya que una coordinación inadecuada puede resultar en interrupciones del servicio y daños a los equipos[3]. Entonces, si bien su función

principal es reducir la corriente de arranque, también protegen otros elementos críticos del sistema, como disyuntores y fusibles, evitando su descarga prematura y asegurando la continuidad del servicio eléctrico.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde la subestación de distribución (69 kV – 13.8 kV) Puerto Inca se da servicio de electricidad a las zonas comprendidas entre San Carlos, Puerto Inca, Churute, Taura, Caimito, etc. Atraves de tres alimentadoras troncales aéreas de 5 MVA cada una, denominadas Villa nueva 1, Cerro Pelado y Balanquier. La alimentadora Cerro Pelado lleva ya aproximadamente 2 años presentando problemas de desconexión e interrupción de servicio, debido al disparo del disyuntor de medio vano.

El mencionado alimentador (Cerro Pelado) de servicio a una zona formada por recintos o comunidades rurales, industrias agroindustriales, bananeras, camaroneras, entre otras. El alimentador dispone de dos disyuntores para protección contra sobre corriente, el primero ubicado en la cabecera de la línea y el segundo es un interruptor de medio vano. Desde un tiempo atrás se viene generando interrupciones del servicio por disparos del disyuntor de medio vano, sin lograr hasta la fecha detectar con precisión las razones de los mencionados disparos, de las investigaciones de campo se conocen que han ocurrido entre 1 y 2 cortes por semana de forma aleatoria, incrementando de esta forma la incertidumbre de las razones del porqué de la apertura del disyuntor de medio vano. Además de tratarse de un disyuntor que opera únicamente con control local, cada vez que ocurre el disparo, requiere la asistencia de personal técnico al lugar por la correspondiente maniobra de reseteo y restablecimiento del interruptor.

Siempre que ocurre la apertura del mencionado interruptor, pierden el servicio de electricidad algunos recintos y varias camaroneras. Comúnmente el restablecimiento del sistema demanda no menos de 60 minutos.

En el anexo se presentara el diagrama unifilar completo.

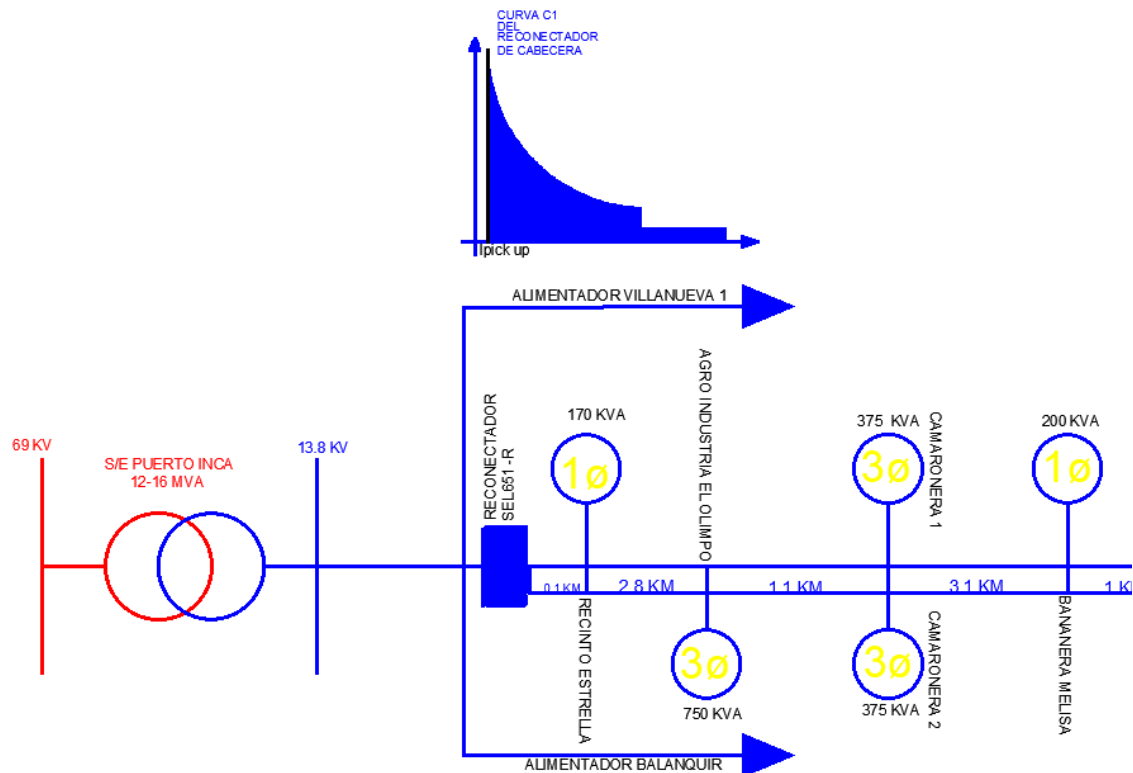


Figura 1 Diagrama Unifilar

Fuente: AutoCad

1.3 JUSTIFICACIÓN

Un buen servicio de electricidad demanda cumplir con un mínimo de requisitos tales como:

Voltajes de magnitudes nominales

Frecuencia constante

Mínimo nivel de armónicos

Servicio permanente

Entre otros

De acuerdo con el problema presentado por el alimentador Cerro Pelado la energía que este

ofrece no cumple con las condiciones de un servicio de electricidad, debido a las interrupciones que viene presentando desde aproximadamente 2 años atrás.

De las primeras investigaciones de campo realizada sobre la operación de alimentador mencionado, se plantea algunas posibles causas para su falta de garantía, respecto a mantener un servicio de electricidad permanente, posibles sobre cargas y o picos de corrientes alta mente significativas generadas durante el arranque de motores trifásicos, considerando el sistema de bombeo de agua como una carga pesada dentro de las instalaciones del sector camaronero.

1.4 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

La presente investigación se delimita al análisis de las corrientes transitorias que se generan durante el arranque de motores trifásicos en la red de medio voltaje de 13.8 kV en el alimentador Cerro Pelado. Este estudio se centra en evaluar el impacto de dichas corrientes en los dispositivos de protección instalados, utilizando la herramienta de simulación ATP Draw. La investigación no abarcará otros aspectos operativos del sistema eléctrico ni considerará motores que operen en diferentes niveles de tensión o de menor capacidad. El enfoque está dirigido exclusivamente a los motores trifásicos de alta potencia conectados a esta red específica, con el objetivo de determinar cómo estas corrientes transitorias afectan la estabilidad y seguridad del alimentador, y de proponer mejoras que optimicen la confiabilidad del sistema.

1.5 BENEFICIARIOS DE LA PROPUESTA

Los beneficiarios de esta propuesta incluyen a las industrias agroindustriales y empresas conectadas al alimentador Cerro Pelado, que experimentarán un suministro eléctrico más estable y confiable. Esto resultará en una mayor eficiencia operativa y menos interrupciones en sus procesos. Asimismo, la empresa de distribución eléctrica se beneficiará al mejorar el rendimiento de la red, reduciendo el riesgo de fallos y sobrecargas, lo que permitirá una gestión más eficiente de la red de 13.8 kV. La comunidad local, como consumidora final de la energía, también se verá beneficiada por un suministro eléctrico más seguro y de mayor calidad, lo que tendrá un impacto positivo en la calidad de vida y el crecimiento económico de la zona. Por otro lado, los ingenieros y técnicos involucrados en la operación y mantenimiento de la red eléctrica obtendrán nuevas habilidades y conocimientos a través del

uso de herramientas como ATP Draw, mejorando su capacidad para gestionar y mitigar los efectos de las corrientes transitorias. Finalmente, el medio ambiente se beneficiará indirectamente, ya que al optimizar la red y reducir las corrientes transitorias, se disminuyen las pérdidas energéticas, contribuyendo a una operación más sostenible y eficiente desde el punto de vista ambiental.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo General

Estudiar el comportamiento de la alimentadora de (13.8 kV) Cerro Pelado, ante el arranque de motores trifásicos energizados desde la misma, para analizar su impacto en la estabilidad del sistema y proponer medidas de control.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Realizar el levantamiento eléctrico del alimentador Cerro Pelado, recopilando datos de campo para optimizarlos mediante la herramienta ATP Draw.
- Modelar la red de distribución Cerro Pelado utilizando la herramienta ATP Draw, para analizar las corrientes transitorias causadas por los arranques de motores.
- Proponer soluciones efectivas para asegurar la continuidad del servicio eléctrico proporcionado por el alimentador Cerro Pelado, mediante el análisis minucioso de los problemas recurrentes y la implementación de medidas apropiadas.

1.6.3 Metodología y Medios

La metodología utilizada en este trabajo de investigación se ajustará estrictamente a los objetivos específicos planteados.

A continuación, se describe cada uno de ellos, junto con una serie de procedimientos que se deben seguir para alcanzar los objetivos planteados.

Mediante investigación de campo se realizará el correspondiente levantamiento técnico referente a la línea aérea de distribución, disyuntores, carga eléctrica instalada en el sector residencial, demanda del sector agroindustrial y demanda del sector camaronero.

Para realizar las distintas simulaciones en Atp Draw, es necesario modelar matemáticamente el comportamiento de las partes, elementos y equipos que forman el sistema de distribución Cerro Pelado, esto es, modelado de la línea, carga residencial, carga agroindustrial y carga del sector camaronero. La carga eléctrica más significativa en el sector camaronero es la dada por los motores trifásicos, utilizados para el sistema de bombeo de agua.

Para reconocer e identificar las posibles causas del corte de servicio de la alimentadora, y establecer posibles soluciones, es necesario realizar un análisis de los resultados de las simulaciones efectuadas en Atp Draw.

CAPITULO II

2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El arranque de motores trifásicos en redes de medio voltaje es un proceso crítico debido a las corrientes transitorias que se generan. Estas corrientes pueden tener impactos significativos en la estabilidad y la calidad del suministro eléctrico. Entender el comportamiento de estas corrientes y su interacción con la red de 13.8 kV es esencial para mitigar posibles perturbaciones y asegurar un funcionamiento eficiente.

2.1.1 Redes de distribución de energía eléctrica.

La red de distribución eléctrica es la red básica que suministra energía desde subestaciones de media tensión (13,8 kV) a usuarios finales como hogares, comercios y empresas. Estas redes cuentan con diversos componentes críticos como líneas de distribución, transformadores y sistemas de protección y control. En promedio, alrededor de dos tercios del presupuesto total asignado a sistemas energéticos se gastan en infraestructura de distribución. Estas importantes inversiones se justifican por la necesidad de mantener un suministro energético estable y seguro que satisfaga las necesidades de los diferentes usuarios. Estos elementos críticos de la red trabajan juntos para restaurar el servicio y minimizar los cortes, asegurando un flujo confiable de energía. Las redes de distribución de energía eléctrica son responsables de la transferencia de electricidad desde las subestaciones de medio voltaje hasta los usuarios finales. Estas redes incluyen componentes como líneas de distribución, transformadores y sistemas de protección. Aproximadamente el 65% al 70% de la inversión en sistemas de potencia se dedica a la infraestructura de distribución, destacando su importancia para garantizar un suministro continuo y confiable de energía[4].

Dentro de lo que comprende Redes de Distribución podemos encontrar tres alternativas:

Redes de distribución en Anillo

Redes de distribución de tipo Malla

Redes de distribución en forma Radial

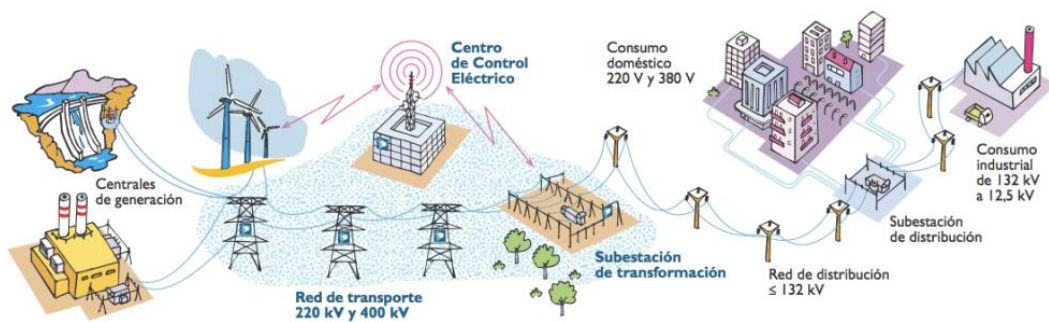


Figura 2 Redes de distribución de energía eléctrica

Fuente: REE.

2.1.1.1 Redes eléctricas con topología en anillo:

Los sistemas de distribución de 13.8 kV configurados en anillo han sido diseñados para proporcionar una conexión redundante mediante dos alimentadores distintos para cada línea de distribución. Este diseño permite que la electricidad circule en un circuito cerrado que empieza y termina en las barras de la subestación. En estos sistemas hay un punto que se denomina punto de mínima tensión, y se produce en la sección de la línea con mayor caída de tensión. Este punto puede ser considerado el «centro de gravedad» de la red, es importante en el diseño y análisis de la red.

Ventajas

Sistema muy confiable

Menos fluctuaciones de voltaje en las ubicaciones de los terminales

Mejora de la continuidad del suministro eléctrico.

Desventajas

Alto costo inicial

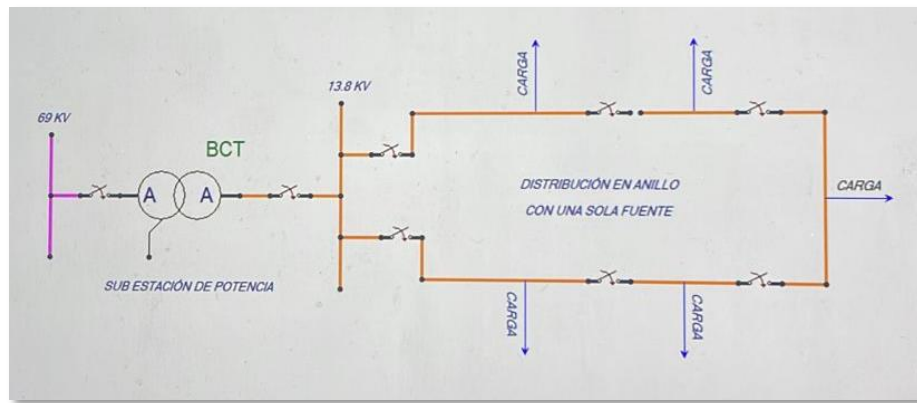


Figura 3 Red eléctrica en forma de anillo.

Fuente: ATP Draw

2.1.1.2 Redes eléctricas con topología mallada:

Un sistema de distribución en red o red de distribución en red es una disposición en la que los puntos de suministro y los consumidores se cruzan y se forman entre sí. Este tipo de topología tiene importantes ventajas, especialmente en términos de manejo de carga y regulación de voltaje. Uno de los aspectos más notables de las redes es su capacidad para aumentar la confiabilidad del sistema.

Al ofrecer múltiples rutas de distribución alternativas, estas redes permiten que la energía fluya desde otras rutas disponibles, minimizando las interrupciones del servicio incluso si falla uno de sus segmentos. Esta redundancia no sólo aumenta la confiabilidad del suministro de energía, sino que también contribuye a una mejor regulación del voltaje en todo el sistema, lo que resulta en un suministro de energía más estable y eficiente. Por lo tanto, las topologías de red son particularmente ventajosas en áreas con alta demanda de energía, donde es importante un suministro ininterrumpido y de alta calidad.

Las redes de malla inalámbricas se destacan por su capacidad de autoorganización y autoconfiguración dinámica, lo que permite una mayor resiliencia en entornos adversos, evitando un punto único de fallo. Esta estructura es ideal para expandir la cobertura y mejorar la robustez en áreas rurales sin necesidad de grandes inversiones[5].

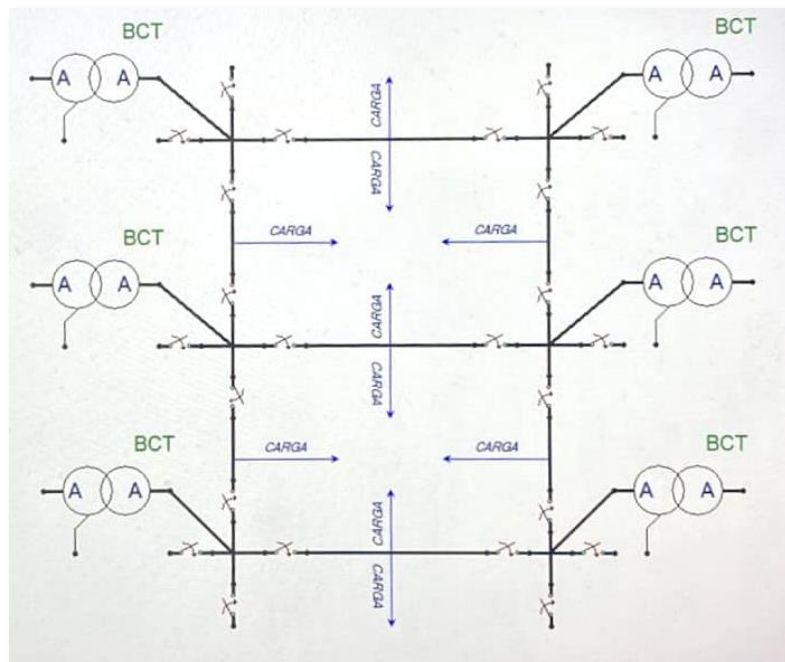


Figura 4 Red eléctrica con topología mallada
Fuente: ATP Draw.

2.1.1.3 Redes eléctricas con topología radial:

Los sistemas de alimentación radial distribuyen energía desde la subestación principal a múltiples líneas de distribución que se extienden como ramas de árboles. En esta disposición, cada punto de carga recibe energía de una única fuente, lo que hace que su diseño y funcionamiento sea muy sencillo. Sin embargo, esta estrategia tiene algunos inconvenientes, especialmente en términos de confiabilidad y costo.

Los sistemas de distribución radial son los más comunes debido a su simplicidad y facilidad de diseño. Sin embargo, estos sistemas dependen de una única ruta para el suministro de energía a cada carga, lo que implica que cualquier fallo en la red puede causar una interrupción en el suministro de energía para los clientes conectados a esa línea. Además, la expansión de la red radial para satisfacer el aumento de la demanda puede provocar problemas en la regulación del voltaje y mayores caídas de voltaje en las áreas más alejadas de la fuente de alimentación[6].

Una de las principales características de este tipo de redes es que crece en zonas donde la demanda aumenta, por lo que los tamaños de los conductores se ajustan constantemente para satisfacer cargas crecientes. Esta expansión puede provocar una regulación de alto voltaje, que se manifiesta en mayores caídas de voltaje cuando la carga está más alejada de la red.

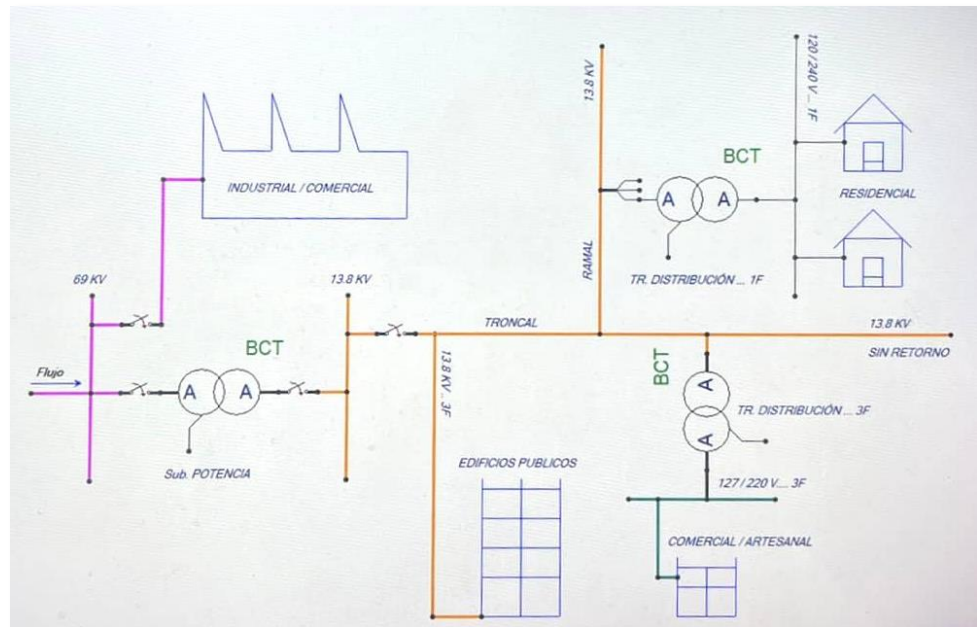


Figura 5 Redes eléctricas con topologías radiales.

Fuente: ATP Draw

2.1.2 Motores de inducción.

Los motores eléctricos son equipos importantes para diversas aplicaciones industriales, comerciales y residenciales. Su función principal es convertir la energía eléctrica en energía mecánica para que máquinas, equipos y vehículos puedan moverse de manera eficiente y controlada. Existen diferentes tipos de motores eléctricos como los de corriente continua (DC) y de corriente alterna (AC), cada uno diseñado para satisfacer necesidades específicas según su aplicación. El desarrollo y mejora continua de los motores eléctricos es la base de la modernización industrial y permite la automatización y optimización de procesos en diversos campos. Varios factores influirán en la selección del motor correcto, incluido el tipo de carga, la velocidad requerida, la eficiencia energética y las condiciones de funcionamiento, por lo que es importante que los ingenieros y técnicos comprendan bien estos dispositivos. Los motores eléctricos son fundamentales en numerosas aplicaciones debido a su capacidad para transformar energía eléctrica en energía mecánica. La elección del motor adecuado es crucial, ya que depende de varios factores como el tipo de carga, la velocidad y la eficiencia requerida. El continuo desarrollo y refinamiento de los motores

eléctricos ha sido clave en la evolución de la industria, permitiendo no solo la automatización, sino también la mejora de procesos en diversos sectores[7].

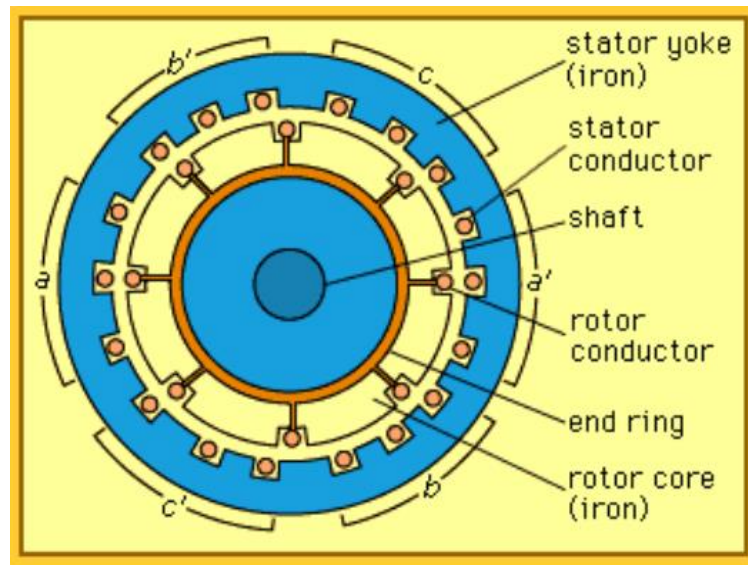


Figura 6 Motor de induccion

Fuente: Encyclopedia Britannica, Inc (1999).

2.1.2.1 Motores de corriente continua (DC)

Un motor de corriente continua (DC) es un dispositivo que utiliza corriente continua para convertir energía eléctrica en energía mecánica. Su control preciso de la velocidad y el par los hace particularmente atractivos para aplicaciones de precisión como la robótica y la automatización. Funcionan interactuando con el campo magnético producido por un imán o bobina y la corriente eléctrica que fluye a través del rotor. Esta interacción hace que el rotor gire. Existen diferentes tipos de motores de DC, incluidos motores de imanes permanentes, motores de excitación independiente, motores en serie y motores compuestos, cada uno de los cuales está diseñado para satisfacer diferentes necesidades industriales y comerciales.

2.1.2.2 Motores de corriente alterna (AC)

Un motor de corriente alterna es un dispositivo eléctrico que convierte la energía eléctrica de corriente alterna en energía mecánica como resultado de la interacción de campos magnéticos. Estos motores funcionan mediante un campo magnético giratorio creado por una corriente alterna en el estator, que induce un campo magnético en el rotor.

Este proceso crea una fuerza que hace que el rotor genere un movimiento de rotación, lo que permite que el motor impulse la máquina o el equipo. Los motores de CA se utilizan ampliamente en aplicaciones industriales y comerciales debido a su confiabilidad, eficiencia y bajos costos de mantenimiento. Se pueden dividir en motores síncronos y motores no síncronos, cada uno con características y aplicaciones específicas para adaptarse a diferentes necesidades operativas.

2.1.2.3 Partes de un motor.

- **Estator:** Es la parte fija del motor, normalmente formada por un conjunto de imanes permanentes o electroimanes. Su función es proporcionar el campo magnético necesario para el funcionamiento del motor.
- **Rotor:** También llamado armadura, es la parte móvil del motor que gira en el campo magnético creado por el estator. Consiste en una serie de bobinas o devanados que interactúan con un campo magnético para producir un movimiento de rotación al recibir una corriente eléctrica.
- **Conmutador:** Es un interruptor giratorio ubicado en el rotor. Su trabajo es cambiar la dirección de la corriente en la bobina del rotor para mantener la rotación continua del motor. Consta de placas de cobre que se alternan con el rotor mediante escobillas.
- **Escobillas:** Son piezas de carbón o grafito que entran en contacto con el conmutador. Su función es proporcionar una conexión eléctrica continua entre el rotor y una fuente de energía externa para que la corriente pueda fluir a través del rotor.
- **Eje:** Es la parte cilíndrica que se extiende desde el rotor y transmite el movimiento de rotación a las partes externas del motor. El eje está montado sobre cojinetes para que pueda girar suavemente.
- **Rodamientos:** Son los elementos que soportan el eje y le permiten girar sin fricción importante. Están diseñados para reducir el desgaste y el calor generado durante el arranque del motor.
- **Carcasa:** Es la carcasa exterior del motor y protege sus partes internas. También proporciona soporte estructural y puede incluir ventilación para disipar el calor generado

durante la operación.

- **Ventilador:** Algunos motores, especialmente los utilizados en aplicaciones de muy alta potencia, incorporan ventiladores para proporcionar una mejor disipación del calor y mantener la temperatura de funcionamiento dentro de un rango seguro.

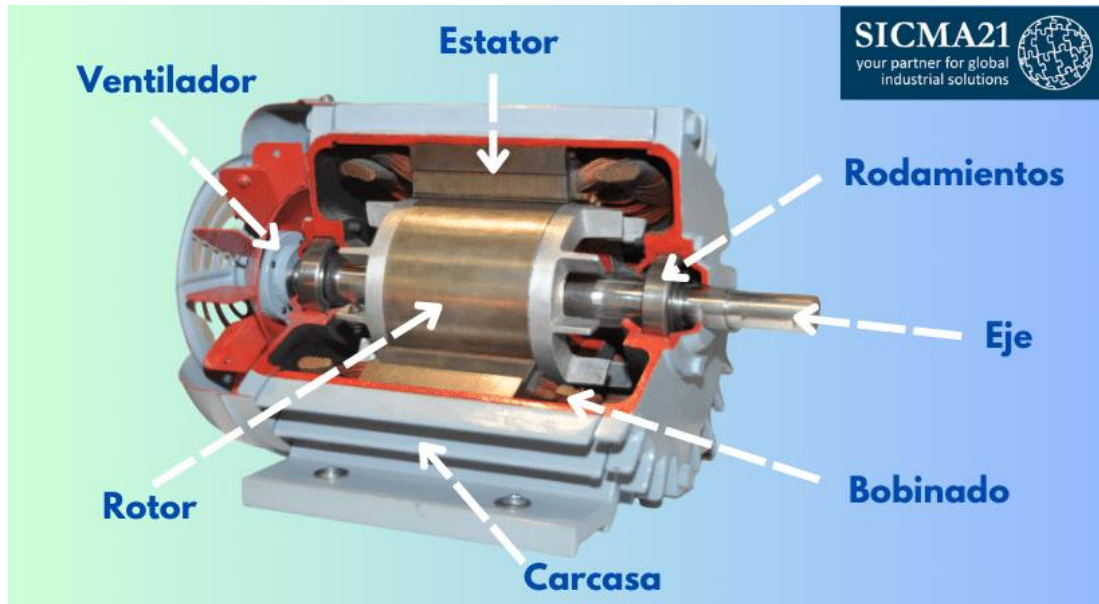


Figura 7 Partes de un motor

Fuente: SICMA21

2.1.2.4 Modelo dinámico de un motor de inducción.

Un modelo dinámico de un motor de inducción describe su comportamiento con ecuaciones que muestran cómo cambian las variables del motor con el tiempo.

Ecuación del Estator (Ecuación de Voltaje)

$$V_s = R_s I_s + j\omega_s L_s I_s + V_{se}$$

[1]

Ecuación de la Corriente del Estator

$$I_s = \frac{V_s - V_{se}}{R_s + j\omega_s L_s}$$

[2]

Ecuación del Rotor (Ecuación de Voltaje)

$$V_r = R_r I_r + j\omega_r L_r I_r + V_{re}$$

[3]

Ecuación de la Corriente del Rotor

$$I_r = \frac{V_r - V_{re}}{R_r + j\omega_r L_r}$$

[4]

Ecuación de la Potencia Electromagnética (Torque)

$$P_e = \frac{3}{2} * \frac{V_s^2 * \sin^2(\theta)}{R_s + j\omega_s L_s} * \frac{1}{R_s + j\omega_s L_s}$$

[5]

Ecuación de Movimiento (Torque de Rotor)

$$T_m = \frac{P_e}{\omega_r}$$

[6]

Ecuación de la Dinámica del Rotor (Relación entre Torque y Velocidad)

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_m - T_{load}}{J}$$

[7]

2.1.2.5 Ejes del Estator d, q de un motor de inducción.

El modelo de ejes pesados es una presentación numérica utilizada para simplificar el análisis de máquinas eléctricas como los motores de inducción, transformando las variables de un sistema trifásico en un sistema de referencia de dos ejes ortogonales.

Eje d (directo): En el contexto del estator, el eje d se alinea con el campo magnético del rotor en la dirección de flujo directo. Este eje es un componente de la corriente que produce

el flujo magnético en la máquina, en otras palabras, la corriente del eje d está directamente relacionada con la generación del campo magnético en la máquina.

Eje Q (en cuadratura): el eje Q es ortogonal al eje d y se refiere a la componente de la corriente que produce el torque en el motor. A diferencia del eje d, la corriente en el eje q no contribuye al flujo magnético, sino que se encarga de generar la fuerza electromotriz que impulsa el movimiento rotatorio del rotor.

El uso de los ejes d y q permite un mejor y más preciso control sobre la máquina eléctrica, especialmente en aplicaciones de control vectorial, debido a que desacoplan los componentes de corriente responsables del flujo y del torque.

El uso del modelo de referencia d-q ha revolucionado el control de máquinas de corriente alterna al permitir la separación de las componentes de flujo y torque. Esta representación simplificada facilita tanto el análisis matemático como el diseño de sistemas de control, especialmente en motores de inducción y sincrónicos[8].



Figura 8 Estator de un motor
Fuente: diariomotor.

2.1.2.6 Eje del Rotor 1, 2 de un motor de inducción.

El análisis de los motores de inducción en el dominio del tiempo se simplifica utilizando el modelo dq (directo y en cuadratura). Estos ejes son referencias perpendiculares que giran a la misma velocidad que el campo magnético del estator. En el contexto del rotor:

Eje 1 (Eje directo): Este eje está alineado con el flujo magnético primario producido por el estator. El componente de corriente en el eje d (I_d) es responsable de generar el campo magnético dentro del rotor. No contribuye directamente al par, pero es esencial para

establecer el flujo necesario en el rotor.

Eje 2 (Eje de cuadratura): Este eje es perpendicular al eje d y transmite la generación de par. El componente de corriente en el eje q (I_q) interactúa junto con el campo magnético generado en el eje d, lo que lleva a la producción de par electromagnético que impulsa el rotor.

El eje d (eje directo) está alineado con el campo magnético del rotor, mientras que el eje q (eje de cuadratura) es perpendicular al eje d. La corriente del eje d es la principal responsable de generar el flujo magnético en el motor, mientras que la corriente del eje q está asociada a la producción de par[9].



Figura 9 Rotor de un motor
Fuente: electricidad y automatismo.

2.1.3 Arrancadores de Motores de inducción Trifásicos.

Los arrancadores de motores trifásicos son un componente importante para el arranque controlado de estos motores. Su objetivo principal es limitar la corriente de arranque y reducir las pérdidas en los componentes eléctricos y mecánicos del motor.

2.1.3.1 Arrancador Directo en Línea (DOL - Directo En Línea).

Los arrancadores de línea directa (DOL) son uno de los métodos más simples y comunes para arrancar motores de inducción trifásicos. En este sistema, cuando se acciona el motor de arranque, el motor se conecta directamente a la fuente de alimentación total. Esta conexión directa proporciona al motor plena tensión de red desde el principio, lo que le permite alcanzar la velocidad nominal rápidamente.

Características principales:

Simplicidad: Los arrancadores DOL son muy simples en diseño e implementación, lo que

los hace económicos y fáciles de mantener.

Corriente de arranque: Dado que el voltaje total se aplica instantáneamente, el motor tendrá una corriente de arranque grande, generalmente entre seis y ocho veces la corriente de carga completa.

Efecto sobre la red: Corrientes de arranque tan elevadas pueden provocar fluctuaciones en la red y provocar tensiones importantes en el motor y sus componentes mecánicos.

Los arrancadores DOL son adecuados para aplicaciones donde los requisitos de corriente de arranque no son críticos y la simplicidad y el costo son factores clave.

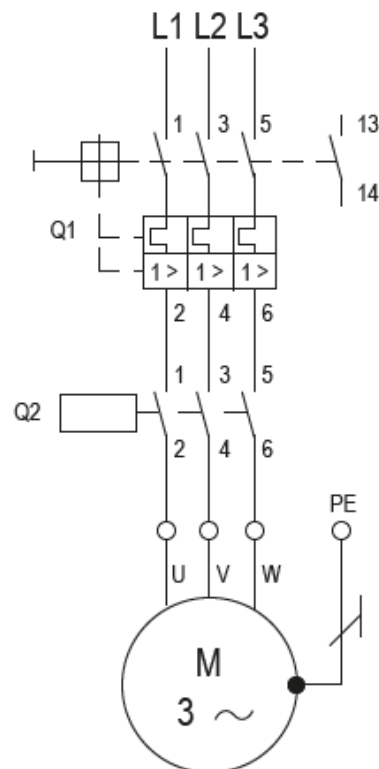


Figura 10 Diagrama de fuerza de arranque directo de un motor

Fuente: el 12 (2018).

2.1.3.2 Arrancador Estrella-Triángulo.

El método de arranque estrella-triángulo se utiliza para reducir la corriente al arrancar un motor de CA para funcionamiento giratorio. Durante el encendido, el motor se conecta en la posición de estrella (Y), lo que reduce el voltaje a aproximadamente un tercio del voltaje total. Esto reduce significativamente el arranque y la carga sobre el motor y la parrilla.

Predicado Después de un cierto tiempo, la conexión cambia a una conexión Δ donde se aplica voltaje completo, lo que permite que el motor alcance su velocidad nominal.

Características principales:

Corriente de arranque reducida: La conexión en estrella también reduce la tensión del motor, lo que a su vez significa que su corriente de arranque es de aprox. $1/3$ menor que con lanzamiento directo.

Transición a un triángulo: Después de un cierto tiempo, la forma del triángulo cambia para que el motor funcione dentro de los límites máximos permitidos.

Aplicación: Es adecuado para motores que requieren un arranque suave y quieren reducir los efectos secundarios de la red y del propio motor.

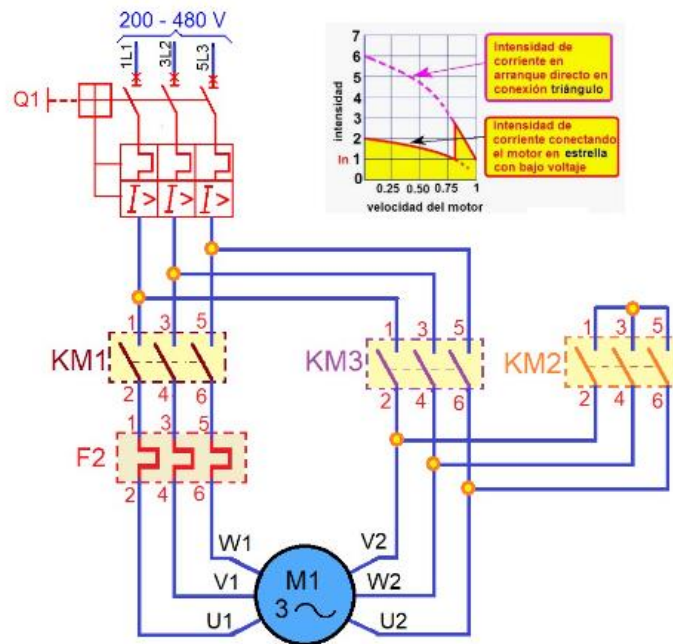


Figura 11 Diagrama de fuerza de un arranque estrella delta
Fuente: mavink (2014).

2.1.3.3 Arrancador con Autotransformador.

Un arrancador por autotransformador es un dispositivo que se utiliza para arrancar un motor de inducción trifásico de forma controlada. Funciona aplicando un voltaje reducido al motor durante el arranque, lo que ayuda a limitar la corriente de arranque. Un autotransformador ajusta el voltaje del motor comenzando con un voltaje más bajo y aumentándolo gradualmente hasta que alcanza el voltaje de línea completo después de un cierto tiempo. Esto proporciona un arranque más suave y reduce el impacto en la parrilla y el motor. Hughes

y Edward dicen, Un arrancador con autotransformador reduce la tensión aplicada al motor durante el arranque mediante un autotransformador, limitando la corriente de arranque y facilitando un inicio más suave. Una vez que el motor alcanza una velocidad determinada, el autotransformador cambia la conexión para suministrar la tensión completa, permitiendo una operación normal[10].

Características principales:

Corriente de arranque reducida: este voltaje inicial reducido limita la corriente de arranque, que puede ser hasta dos o tres veces la corriente nominal del motor, mientras que el arranque directo a menudo produce hasta seis u ocho veces el valor actual.

Transición suave: Después del arranque, el autotransformador cambia la conexión a una que proporcione pleno voltaje para que el motor pueda seguir funcionando y las revoluciones aumenten gradualmente.

Aplicación: Es adecuado para motores muy grandes o donde hay un impacto mínimo en la red, incluida la reducción de la carga en el motor durante el arranque.

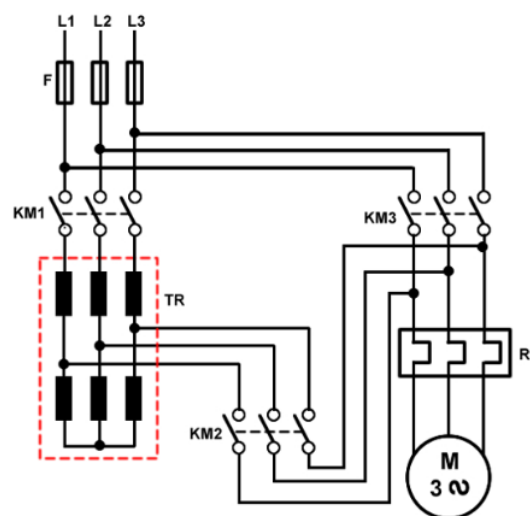


Figura 12 Diagrama de un arrancador con Autotransformador

Fuente: Formación para la Industria 4.0.

2.1.3.4 Arrancador Suave.

Un arrancador suave es considerado como un dispositivo que se utiliza para iniciar motores trifásicos de inducción de forma controlada, permitiendo iniciar la máquina con corriente reducida. A diferencia del arrancador directo en línea que aplica toda la tensión instantáneamente, el arrancador suave aplica una tensión progresivamente creciente al

motor. De esta manera se disminuye la corriente de arranque y se reduce el par inicial y el estrés en el motor y su red eléctrica.

Principales Características:

Control Gradual: Modifica el voltaje de inicio por medio de tiristores u otros equipos electrónicos de potencia, lo que permite un arranque suave sin picos circulantes energéticamente.

Protección del Motor: Reduce la abrasión mecánica del motor aumentando su vida útil.

Versatilidad: Se puede programar para regulares diferentes tiempos de aceleración y desaceleración, adecuados para varias aplicaciones industriales. Este tipo de iniciador resulta ser especialmente conveniente donde es fundamental la protección del equipo conectado al motor y las grandes variaciones en el sistema eléctrico deben ser evitadas. Según Chapman y Stephen, El arrancador suave utiliza dispositivos electrónicos para aplicar un incremento gradual de voltaje al motor, lo que reduce la corriente de arranque y el par motor de manera controlada. Este método protege tanto el motor como la red eléctrica, al evitar picos bruscos de corriente y torsión [11].

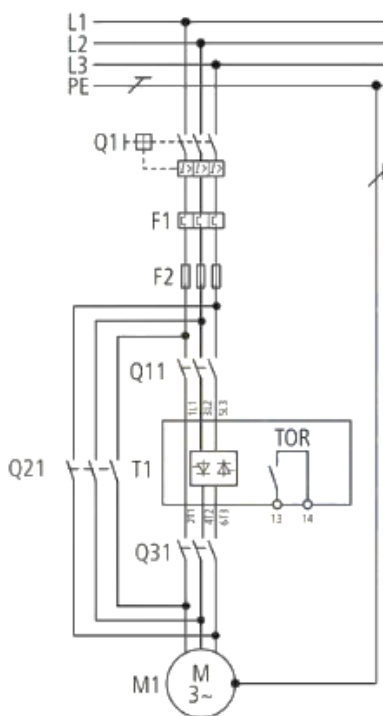


Figura 13 Diagrama de fuerza de un arrancador suave

Fuente: Arrancador Suave Circuito1 (2019).

2.1.3.5 Arrancador con Variador de Frecuencia (VFD - Variable Frequency Drive).

Un variador de frecuencia (VFD) es un dispositivo avanzado que controla con precisión la bomba de arranque durante el proceso de arranque de un motor de inducción trifásico. El VFD regula la frecuencia y el voltaje de la fuente de alimentación del motor, proporcionando un arranque fácil y un control continuo de la velocidad durante la operación. Este control se logra convirtiendo la red eléctrica de CA a CC y luego convirtiéndola nuevamente a CA a la frecuencia deseada.

Características principales:

Control de velocidad: Los VFD permiten variar la velocidad según los requisitos de carga, mejorando la eficiencia energética.

Arranque suave: reduce la corriente de arranque y la tensión mecánica en el motor al reducir la frecuencia y el voltaje de arranque.

Protección del motor: El VSD protege contra condiciones anormales como sobrecarga, sobrecalentamiento o bajo voltaje prolongado, extendiendo así la vida útil.

Este tipo de arrancador es ideal para aplicaciones que requieren un control preciso de la velocidad y el par, especialmente en sistemas donde la eficiencia energética es fundamental. Fitzgerald, A. E., Kingsley, Charles, & Umans, Stephen D, citan que el uso de un variador de frecuencia permite un control preciso del motor mediante la modulación de la frecuencia y la tensión aplicadas. Esto no solo mejora la eficiencia energética, sino que también proporciona un arranque suave y reduce significativamente la corriente de arranque[11].

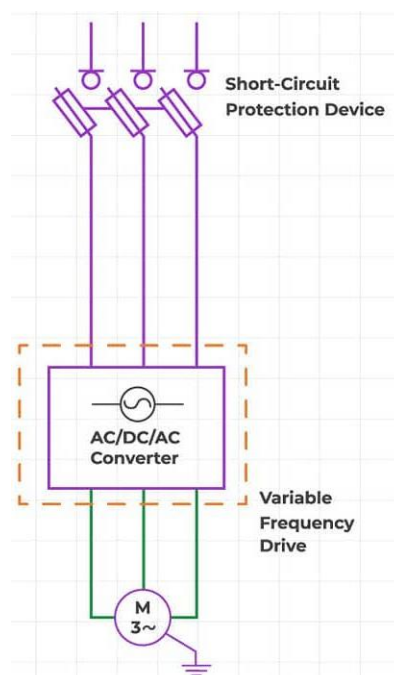


Figura 14 Diagrama de un Arrancador con Variador de Frecuencia

Fuente: Inelinc (2021).

2.1.3.6 Arrancador Resistencia Serie.

Los arrancadores de resistencia en serie son un método utilizado para reducir la corriente de arranque de motores eléctricos asíncronos trifásicos. Este tipo de arrancador tiene una resistencia en serie con el devanado del estator al inicio del arrancador. La presencia de estas resistencias limita el voltaje aplicado al motor, reduciendo así la corriente de arranque y el par de arranque. A medida que aumenta la velocidad del motor, estas resistencias se apagan gradualmente, permitiendo que el potencial disponible aumente gradualmente hasta alcanzar un voltaje normal.

Ventajas típicas:

La corriente de arranque se reduce significativamente. La alimentación principal está menos cargada que la línea directa.

Desventajas típicas:

La energía disipada en estas resistencias genera calor y por tanto es menos eficiente, requiriendo un sistema de refrigeración adecuado. Generalmente no es más eficiente que otras tecnologías de arranque avanzadas, como arrancadores suaves o convertidores de frecuencia. El argumento de Chapman, Stephen J es que el arrancador resistencia serie reduce la corriente de arranque de los motores de inducción trifásicos al insertar resistencias en serie con las bobinas del estator. Estas resistencias se cortocircuitan progresivamente a medida que el motor alcanza su velocidad nominal, permitiendo un arranque más suave[11].

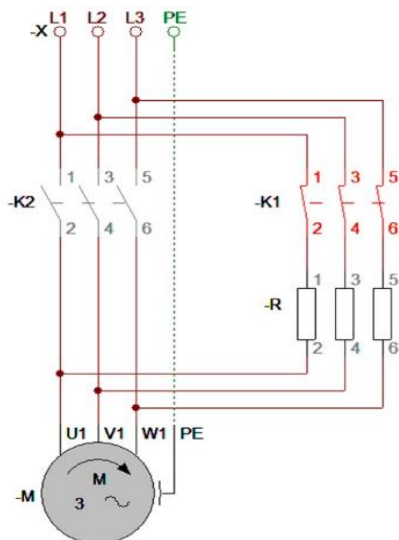


Figura 15 Diagrama de fuerza de un arrancador Resistencia Serie
Fuente: Instrumentación y control (2022).

2.1.4 Protección contra sobrecorriente por sobrecorriente.

La protección contra sobrecorriente es un sistema básico de ingeniería eléctrica diseñado para detectar corrientes que exceden un nivel seguro y desconectar automáticamente las partes afectadas del sistema. Esto evita daños graves al equipo y reduce el riesgo de incendio y corte de energía. principios básicos

Si la corriente excede un valor predeterminado debido a condiciones como sobrecarga, cortocircuito o falla a tierra, se activan dispositivos de protección como relés de sobrecarga y fusibles para interrumpir la corriente. Estos dispositivos están programados para responder de forma rápida y eficiente, minimizando posibles daños.

Tipo de sobrecorriente

Sobrecarga: Esto ocurre cuando un circuito se opera más allá de su capacidad durante períodos prolongados de tiempo, lo que puede causar que los componentes se sobrecalienten.

Cortocircuito: Ocurre cuando dos conductores están en contacto directo entre sí, provocando una corriente muy grande.

Falla a tierra: Persiste cuando un conductor de corriente toca un elemento puesto a tierra y provoca una corriente de falla.

Son aplicadas en las líneas de distribución para que proteja las líneas y los transformadores asegurándose de que solo las áreas afectadas estén desconectadas, como también en motores para que eviten el sobrecalentamiento de los devanados del motor debido a una corriente excesiva.

Según C. L. Wadhwa, la protección contra sobrecorriente es una parte fundamental del diseño de sistemas de energía eléctrica. Este libro cubre los conceptos esenciales y las prácticas para la protección de sistemas, incluyendo el uso de relés de sobrecorriente y la implementación de estrategias de protección adecuadas para prevenir daños y asegurar la confiabilidad del sistema[12].

La ecuación con la que se guían las normas IEC e IEEE viene siendo la siguiente:

$$ts = D * \left(\frac{A}{\left(\left(\frac{I_{rms}}{I_s} \right)^{Q-1} \right) + B} \right)$$

[8]

2.1.4.1 Curvas de tiempo de operación.

Dentro de las protecciones de sobrecorriente encontramos curvas de configurar que vienen siendo Normalmente Inversa, Medianamente Inversa, Extremadamente Inversa, estas curvas describen la relación entre la magnitud de la sobrecorriente y el tiempo que tarda el relé en operar para interrumpir el circuito según las normas IEC e IEEE.

- **Normalmente inversa.**

La curva normalmente inversa indica que el tiempo de operación del relé disminuye a medida que se incrementa la magnitud de la sobrecorriente, pero de manera moderada. Este tipo es utilizado frecuentemente en protecciones que necesitan una buena discriminación en redes de distribución, de tal modo que los relés más cercanos a la avería son los únicos que operan.

- **Medianamente inversa.**

En este caso el tiempo que tarda el relé en actuar disminuye con mayor rapidez respecto a la curva normalmente inversa cuando aumenta la magnitud de la sobrecorriente. Usado en aplicaciones donde se necesita una respuesta con mayor rapidez respecto a grandes corrientes, como por ejemplo en protección de transformadores.

- **Extrema Inversa.**

Estas curvas se caracterizan por una fuerte disminución en la duración del ciclo de trabajo a medida que aumenta la corriente. Se utiliza principalmente para proteger motores, como generadores y transformadores, que pueden restablecer fácilmente la corriente, pero necesitan intervenir en un momento determinado en caso de cortocircuito.

2.1.5 Líneas de distribución.

El sistema eléctrico depende en gran medida de las líneas de distribución, ya que son las

principales responsables de entregar la energía a los consumidores en su forma final a través de subestaciones. Estas líneas son esenciales para el suministro eficiente de electricidad a zonas residenciales, empresas e industrias. Está diseñado y opera para garantizar una distribución confiable y eficiente de electricidad mientras minimiza las pérdidas y mantiene una red de suministro estable.

En la práctica, las líneas de distribución se colocan en la red y pueden adoptar diferentes formas según la topología del área de servicio o los requisitos del cliente. El objetivo de estas redes es controlar el flujo de energía de un punto a otro de forma fluida y constante durante el proceso de optimización, ahorrando así los recursos utilizados. La planificación de la línea incluye consideraciones de capacidad de carga, distancia desde las subestaciones y medidas de seguridad implementadas para estas instalaciones.

Un aspecto crítico en la gestión de las líneas de distribución es el mantenimiento y la supervisión periódica de las instalaciones. Esto implica la inspección periódica de los componentes, la detección temprana de problemas y la adopción de medidas correctivas para evitar averías. Además, la tecnología de supervisión y control facilita una gestión más eficiente y una respuesta más rápida ante cualquier incidencia que pueda afectar a la calidad del suministro eléctrico.

En esencia, las líneas de distribución sirven de puente entre la generación de electricidad y su uso final, por lo que desempeñan un papel importante en el funcionamiento de los sistemas eléctricos y en la vida cotidiana de las personas.

Las líneas de distribución son responsables de entregar la energía eléctrica desde las subestaciones hasta los consumidores finales. Estas líneas deben diseñarse para manejar el flujo de energía de manera eficiente, asegurando un suministro estable y fiable. La configuración de las redes de distribución puede variar, pero su objetivo común es minimizar las pérdidas de energía y mantener la calidad del suministro eléctrico[13].

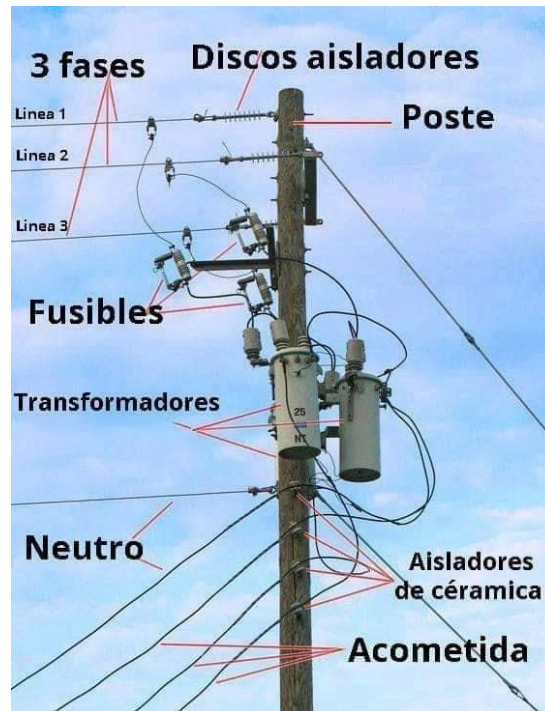


Figura 16 Líneas de distribución

Fuente: Sector electricidad (2021).

2.1.5.1 Postes para líneas de distribución.

En las líneas de distribución eléctrica, los postes son elementos fundamentales que sostienen los conductores de energía en el aire y permiten la transferencia de electricidad desde las subestaciones hasta los usuarios finales. A continuación, se muestran algunos de los postes más comunes:

Poste de Concreto:

- Uso: Baja, media y alta tensión.
- Altura: 9-20 metros.
- Ventaja: Duradero y resistente al fuego.

Poste de Acero:

- Uso: Media y alta tensión.
- Altura: 12-30 metros.

- Ventaja: Alta resistencia y durabilidad.

Poste de Fibra de Vidrio:

- Uso: Baja y media tensión.
- Ventaja: Ligero y resistente a la corrosión, ideal para zonas costeras.

Los postes en las líneas de distribución eléctrica son componentes fundamentales que sostienen los conductores a una altura segura sobre el suelo. Los postes pueden ser de madera, concreto o acero. Los postes de madera, aunque más económicos, requieren tratamiento para resistir la intemperie. Los postes de concreto y acero ofrecen mayor durabilidad y son más adecuados para aplicaciones de alta tensión, aunque su costo es mayor.

La elección del material depende de factores como la tensión del sistema, las condiciones ambientales y el costo[14].



Figura 17 Poste metálico
Fuente: Mecano (2024).

2.1.5.2 Tensores para cables.

En las líneas de distribución eléctrica, los tensores son componentes utilizados para mantener y ajustar la tensión de los conductores a lo largo de la línea.

Función: Evitan que se caigan demasiado los cables o se rocen con otros objetos pues mantienen la tensión adecuada.

Compensan fuerzas que generan el peso de los conductores, el viento y las variaciones térmicas.

Ubicación de los tensores: Por lo general se instalan en los puntos estratégicos a lo largo de la línea, y más compuestos en tramos largos o donde hay una variación significativa del terreno.

Se ubican generalmente en un extremo de un tramo de línea o dentro de una intersección, donde es necesario asegurar que los conductores mantengan su tensión.

Los tensores son elementos cruciales en las líneas de distribución, utilizados para mantener la tensión adecuada en los conductores a lo largo de grandes tramos. Estos dispositivos están diseñados para soportar las fuerzas mecánicas que se generan en los cables debido a la gravedad, el viento, y otras cargas. Los tensores deben ser instalados correctamente para garantizar que los conductores permanezcan a la altura adecuada y eviten el contacto con árboles, estructuras u otros objetos que puedan causar cortocircuitos o interrupciones en el servicio[15].



Figura 18 Tensores para cables.
Fuente: CCBM (2022).

2.1.5.3 Conductores de aluminio (13.8 kV).

En las líneas de distribución eléctrica, los conductores son los cables encargados de

transportar la electricidad desde las subestaciones hasta los usuarios finales.

Materiales: Principalmente aluminio o cobre, a veces reforzados con acero (ACSR).

Tipos: Pueden ser sólidos (un solo hilo) o trenzados (varios hilos), dependiendo de la necesidad de flexibilidad y resistencia.

Función: Soportan la corriente eléctrica sin sobrecalentarse y mantienen una caída de tensión mínima.

Fijación: Se sostienen en los postes mediante aisladores, que los mantienen separados y evitan cortocircuitos.

Los conductores son materiales que permiten el paso de la corriente eléctrica con una resistencia mínima. Se caracterizan por su alta conductividad eléctrica, que es una medida de la facilidad con la que los electrones pueden moverse a través de un material[16].



Figura 19 Conductores de aluminio.

Fuente: zmscable.

2.1.5.4 Aisladores de porcelana.

En el caso de la distribución de la electricidad, los aisladores son importantes en las líneas para prevenir el contacto eléctrico entre los conductores y los postes o estructuras, asegurando así la seguridad y el rendimiento óptimo del sistema.

Aisladores de Porcelana: Resistentes a la intemperie y al desgaste, se usan en líneas de baja y media tensión.

Aisladores de Vidrio: Ofrecen alta resistencia y visibilidad, adecuados para baja, media y

alta tensión.

Aisladores de Polímero: Ligeros y resistentes a la contaminación, ideales para media y alta tensión.

Aisladores de Suspensión: Sostienen los conductores en suspensión y permiten flexibilidad, usados en media y alta tensión.

Aisladores de Acoplamiento: Conectan secciones de conductores manteniendo la separación, aplicados en alta tensión.



Figura 20 Aisladores de porcelana.

Fuente: Corpelima (2020)

2.1.6 Programas utilizados para el diseño de la propuesta

2.1.6.1 Software ATP Draw:

ATP Draw es un programa informático de diseño gráfico que sirve para modelar y simular sistemas eléctricos de potencia, especialmente para el estudio de fenómenos transitorios, tales como sobretensiones, picos de corriente y otras respuestas rápidas que ocurren en las redes eléctricas. ATP Draw simplifica el proceso de modelado al proporcionar una interfaz intuitiva que reduce la necesidad de codificación manual[17].

¿Qué Puedes Hacer con ATP Draw?

Modelado de Circuitos:

ATP Draw permite producir conexiones eléctricas visualmente. Puedes elegir diferentes elementos como resistencias, inductancias, capacitancias, transformadores, líneas de transmisión, y componentes no lineales como interruptores y semiconductores, y conectarlos en un esquema de red.

Simulación de Transitorios:

Una vez modelado, puedes hacer simulaciones para ver cuál sería la respuesta del sistema a transitorios.

Visualización de Resultados:

Al concluir la simulación, ATP Draw ofrece recursos para observar voltaje, corriente y otra serie de variables así.

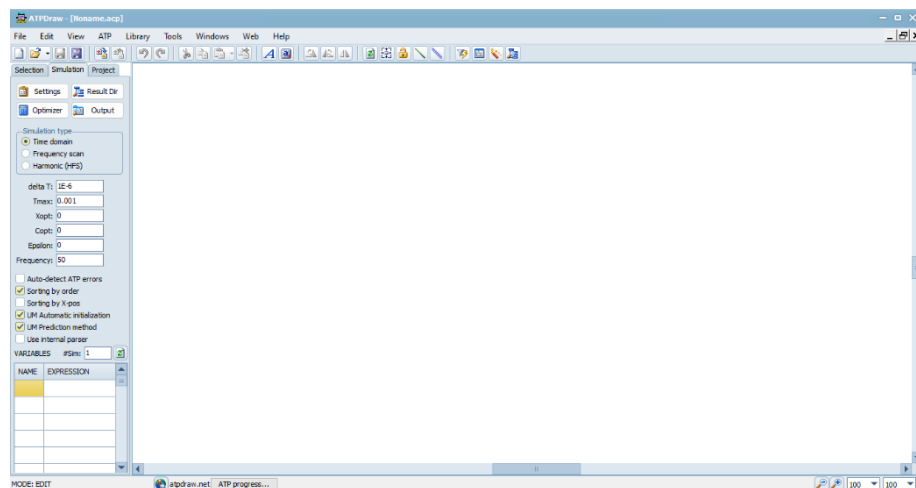


Figura 21 Software ATP Draw

Fuente: ATP Draw.

2.1.6.2 Software de calculadora Induction Motor Data:

El programa comúnmente denominado Induction Motor Data es una utilidad empleada en los ámbitos de la ingeniería eléctrica para la disección y administración de datos de ciertos motores de inducción, que se utilizan con mucha frecuencia en industrias y empresas. Este software fue desarrollado para ayudar a los ingenieros y otros técnicos a calcular aspectos clave de los motores de inducción, como la potencia nominal, el factor de rendimiento, la corriente de arranque, el par y la velocidad, entre otros.

Funcionalidades Principales:

- **Cálculo de Parámetros:** El software facilita el cálculo de parámetros esenciales del motor basado en sus especificaciones técnicas, como la potencia nominal, factor de potencia, corriente y voltaje.
- **Análisis de Rendimiento:** Proporciona herramientas para analizar el rendimiento del motor bajo diferentes condiciones de operación, ayudando a determinar la eficiencia y la capacidad de carga del motor.
- **Simulación de Arranque:** Permite simular el comportamiento del motor durante el arranque, lo cual es crucial para evaluar las corrientes transitorias y su impacto en la red eléctrica.
- **Diagnóstico de Fallos:** Algunas versiones avanzadas del software pueden incluir funciones para el diagnóstico de fallos comunes en motores de inducción, ayudando a predecir problemas antes de que ocurran.
- **Generación de Reportes:** Ofrece la capacidad de generar reportes detallados que pueden ser utilizados para documentación técnica, análisis comparativos, o presentación de resultados a otros ingenieros o gerente

☒ 50 Hz
 ☐ 60 Hz

1,00	nominal phase to phase voltage kV
10,00	nominal active, useful power kW
0,02	nominal slip, between 0.5 and 0.001
0,90	nominal electrical efficiency, between 0.5 and 1-slip
0,80	nominal power factor, between 0.5 and 0.999
5,00	locked rotor current / nominal current, larger than 1.5

OUTPUT

Use the results in the following way for UM3 in ATPdraw:

	= LMUD = LMUQ of magnetization
	= Ld = Lq of stator, = L1 = L2 of rotor
	= Rd = Rq of stator
	= R1 = R2 of rotor

In addition, set Stator coupling = Y, Rotor coils: d = q = 1, Stator L0 = R0 = 0

Figura 22 Software Induction Motor Data
Fuente: Induction Motor Data

CAPITULO III

3.1 DESARROLLO DEL FUNCIONAMIENTO

3.1.1 Modelado De Partes:

Este modelo describe un sistema eléctrico que integra un motor trifásico de 250 kW configurado en estrella-delta, conectado a través de líneas de transmisión y protegido por un reconectador trifásico. El motor arranca en estrella para limitar la corriente inicial y luego cambia a delta para operar a plena carga. Las líneas de transmisión se modelan para evaluar las caídas de tensión y las pérdidas, mientras que el reconectador garantiza la protección del sistema. Se incluyen cargas concentradas, representando equipos industriales, para analizar el impacto de los transitorios eléctricos durante el arranque del motor y la estabilidad del sistema.

3.1.1.1 Motor estrella delta.

El motor de inducción trifásico de 250 kW y 4 polos, operando a 440 V, es utilizado en una camaronera para aplicaciones críticas como el bombeo y la ventilación. Este motor emplea una conexión estrella-delta para reducir la corriente de arranque. Inicialmente, se conecta en estrella, lo que permite que cada fase reciba 254 V, disminuyendo significativamente la corriente de arranque y reduciendo el impacto en la red eléctrica. Una vez que el motor alcanza su velocidad nominal, la conexión cambia a delta, permitiendo que opere a 440 V y entregue toda su potencia de 250 kW. Esta configuración ofrece ventajas como la reducción del estrés en el motor y la mejora de la eficiencia operacional. Es esencial un mantenimiento regular de los contactores y la protección contra la corrosión debido al ambiente marino de la camaronera.

3.1.1.1.1 Comportamiento de un motor trifásico en las redes de distribución.

Datos
Motor de 250 kw
254 V EN ESTRELLA
IL = 230 A
440 V EN DELTA
IL = 398 A
4 POLOS

$$60 \text{ Hz}$$

Torque inducido de arranque:

$$T_{ind. arr} = 1500 Nm$$

[9]

Torque nominal:

$$T_{nom} = 1340 Nm = P_{eje \dots w rotor} \cdot \eta_{rotor}$$

[10]

Torque de rozamiento el rozamiento propio del eje del rotor sobre los rodamientos que el eje va a tener

$$T_{roz} = 3.6\% \cdot T_{nom} = 48 Nm$$

[11]

Momento de inercia de la maquina se refiere a la masa del motor

$$J_m = 5.53 Kg \cdot m^2$$

[12]

Velocidad nominal del rotor

$$n_{nom. rotor} = 1782 \text{ rpm} = 186.61 \frac{rad}{s}$$

[13]

Velocidad del campo del motor a una frecuencia de 60 Hz a 4 polos

$$n_B = \frac{60 \cdot 60}{pp} = \frac{3600}{2} = 1800 \text{ rpm}$$

[14]

Deslizamiento nominal

$$S_{nom} = \frac{1800 - 1782}{1800} = 0.01$$

[15]

Rendimiento

$$Rend. nom = 96\% = 0.96$$

$$fp. nom = 0.86$$

[16]

Relación de corriente de rotor bloqueado sobre la corriente nominal

$$\frac{I_{rb}}{I_{nom}} = 7$$

[17]

3.1.1.1.2 Tabla de datos:

La tabla presenta una variedad de datos eléctricos correspondientes a motores trifásicos de baja tensión (400V) operando a una frecuencia de 50 Hz.

Potencia		Carcasa	Par nominal Tn (Nm)	Corriente con rotor trabado I _b /I _n		Par de arranque T _a /T _n	Par máximo T _m /T _n	Inercia J con rotor trabado (kgm²)	Tiempo máx.		Peso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	RPM	460 V								Corriente nominal In (A)
									(s)					% de la potencia nominal								
				Caliente	Frío									Rendimiento			Factor de potencia					
HP	KW			Letra	I _a /I _n									50	75	100	50	75	100			
VIII polos																						
1	0,75	182/4T	8,03	M	6,0	3,0	3,5	0,0168	22	48	43,0	50,0	875	74,0	77,0	78,5	0,32	0,42	0,52	2,30		
1,5	1,1	182/4T	12,3	J	5,5	2,5	2,6	0,0243	17	37	50,3	50,0	860	80,0	82,5	82,5	0,43	0,54	0,62	2,70		
2	1,5	213/5T	16,0	M	7,6	2,4	2,9	0,0753	39	86	67,5	52,0	875	82,5	84,0	85,5	0,45	0,55	0,65	3,39		
3	2,2	213/5T	24,2	K	6,8	2,3	2,8	0,0888	44	97	80,0	52,0	870	84,0	85,5	85,5	0,50	0,63	0,71	4,55		
5	3,7	254/6T	39,9	H	5,3	1,9	2,5	0,1436	44	97	117	54,0	880	85,5	87,5	87,5	0,49	0,62	0,70	7,58		
7,5	5,5	254/6T	59,9	G	5,3	2,0	2,5	0,1867	33	73	129	54,0	880	85,5	87,5	87,5	0,50	0,63	0,71	11,1		
10	7,5	284/6T	79,8	G	5,6	2,0	2,4	0,3034	32	70	169	54,0	880	89,5	90,2	90,2	0,61	0,72	0,78	13,4		
15	11	284/6T	120	G	5,5	2,0	2,3	0,3448	25	55	189	54,0	880	90,2	91,0	90,2	0,62	0,73	0,79	19,4		
20	15	324/6T	160	G	5,0	1,9	2,2	0,3947	27	59	205	56,0	880	89,5	91,0	91,0	0,54	0,66	0,73	28,3		
25	18,5	324/6T	200	G	5,2	2,0	2,3	0,5023	23	51	231	56,0	880	89,5	91,0	91,0	0,51	0,64	0,71	35,9		
30	22	364/5T	239	G	6,2	1,7	2,4	0,9884	20	44	364	60,0	880	92,4	92,4	92,4	0,63	0,74	0,80	37,0		
40	30	364/5T	319	H	6,7	1,7	2,3	1,22	18	40	397	60,0	880	92,4	93,0	92,4	0,66	0,76	0,81	50,3		
50	37	404/5T	399	H	6,8	1,7	2,6	1,46	15	33	459	60,0	880	93,0	93,0	93,0	0,68	0,78	0,83	60,0		
60	45	404/5T	479	H	6,5	1,8	2,7	1,69	13	29	504	60,0	880	93,0	93,0	93,0	0,68	0,78	0,83	73,0		
75	55	444/5T	592	G	6,0	1,8	2,1	3,10	18	40	655	63,0	890	93,0	93,6	93,6	0,64	0,74	0,79	93,0		
100	75	444/5T	789	G	6,0	1,9	2,2	3,68	15	33	725	63,0	890	93,6	94,1	94,1	0,63	0,74	0,79	127		
125	90	445/7T	987	G	6,0	1,8	2,1	4,37	17	37	856	63,0	890	94,5	94,5	94,5	0,64	0,74	0,79	151		
150	110	445/7T	1184	G	6,0	1,9	2,1	5,29	15	33	926	63,0	890	94,5	94,5	94,5	0,64	0,74	0,79	185		
200	150	586/7T	1570	G	6,3	1,4	2,1	14,8	40	88	1512	75,0	895	95,0	95,4	95,4	0,65	0,75	0,80	247		
250	185	586/7T	1962	G	6,2	1,4	2,1	16,6	40	88	1655	75,0	895	95,4	95,8	95,8	0,66	0,76	0,81	299		
300	220	586/7T	2354	H	6,7	1,5	2,2	19,0	40	88	1830	75,0	895	95,4	95,8	95,8	0,66	0,77	0,81	356		
350	260	586/7T	2747	G	6,4	1,6	2,3	20,4	34	75	1954	75,0	895	95,4	95,8	95,8	0,64	0,75	0,80	426		
400	300	588/9T	3139	H	6,7	1,5	2,4	22,6	25	55	2200	75,0	895	95,0	95,6	95,7	0,62	0,73	0,79	498		
450	330	588/9T	3532	G	6,6	1,6	2,3	26,0	27	59	2395	75,0	895	95,2	95,7	95,8	0,65	0,75	0,81	534		

Tabla 1 Tabla de datos eléctricos de motores
Fuente: WE

Estos datos se encuentran organizados según la potencia de los motores, expresada tanto en kilovatios (kW) como en caballos de fuerza (HP), y cubren motores de 2, 4 y 6 polos. Se detallan aspectos fundamentales como la corriente nominal, el par de arranque, el par máximo, el momento de inercia, entre otros.

Descripción de los elementos:

Potencia (kW/HP): Se refiere a la capacidad del motor, medida en kilovatios y caballos de fuerza.

Carcasa: Indica el tipo y tamaño de la carcasa del motor, por ejemplo, 315/M/G o 450/L/K.

Corriente de rotor bloqueado (I/I_n): Muestra la corriente que circula en el motor cuando el rotor está bloqueado, expresada como un múltiplo de la corriente nominal.

Par de arranque (T_n/T_n): Indica la relación entre el par generado en el arranque y el par nominal del motor.

Par máximo (T_m/T_n): Refleja el par máximo que puede alcanzar el motor en relación con su par nominal.

Momento de inercia (J): Representa la inercia rotacional del motor en $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, un factor importante para la aceleración del rotor.

Tiempo máximo de rotor bloqueado: Indica el tiempo máximo, en segundos, que el rotor puede permanecer bloqueado antes de causar daños al motor, bajo condiciones de temperatura "Caliente" o "Frío".

Masa aproximada (kg): Estima el peso del motor en kilogramos.

Nivel de presión sonora (dBA): Mide el ruido generado por el motor en decibelios.

rpm: Define la velocidad de rotación del motor en revoluciones por minuto.

Eficiencia (%): Muestra la eficiencia del motor en diferentes niveles de carga (50%, 75%, 100%).

Factor de potencia: Indica la proporción entre la potencia activa y la potencia aparente en distintos niveles de carga.

Corriente nominal (In A): Es la corriente que el motor consume a plena carga y tensión nominal, expresada en amperios.

Motores de 4 Polos: Funcionan a una velocidad intermedia (1485-1499 rpm) y sus potencias van desde 250 kW hasta 1100 kW, con corrientes nominales.

3.1.1.1.2 Calculadora Induction motor data.

$$\begin{aligned}
 f &= 60 \text{ hz} \\
 V_{\text{fase.fase}} &= 0.440 \text{ kV} \\
 P_{\text{eje}} &= 250 \text{ kw} \\
 S_{\text{nom}} &= 0.01 \\
 R_{\text{end.nom}} &= 0.96 \\
 f_{\text{p.nom}} &= 0.86 \\
 \frac{I_{\text{rb}}}{I_{\text{nom}}} &= 7 \\
 LM &= 0.003916 \text{ H} \\
 L1 = L2 &= 0.000119 \text{ H} \\
 R1 &= 0.016662 \text{ ohm} \\
 R2 &= 0.006788 \text{ ohm}
 \end{aligned}$$

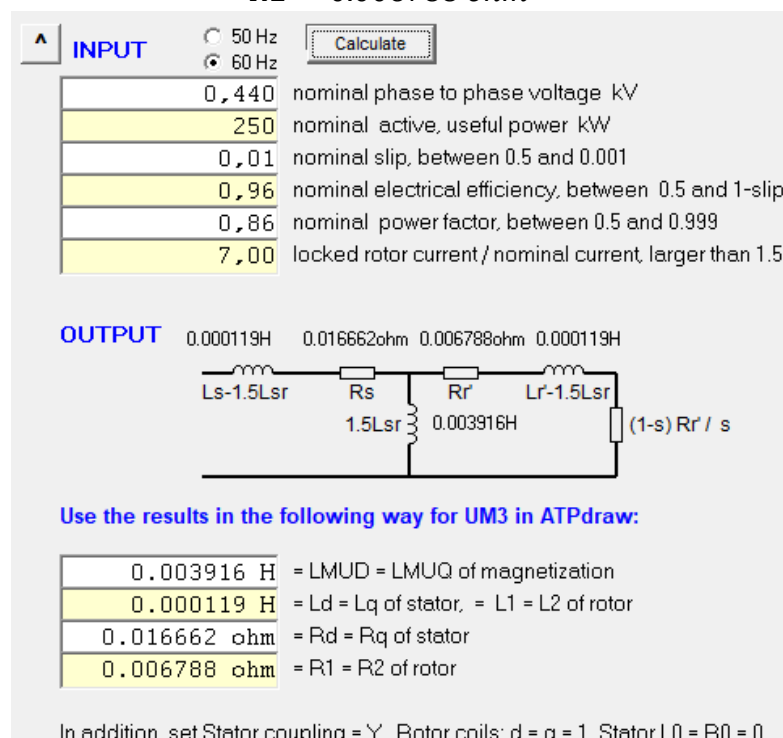


Figura 23 Resultados tomados de induction motor data
Fuente: Induction motor data

Ejes de análisis

$L_d=L_q$ inductancia de magnetización del núcleo en eje directo y eje de cuadratura

$R_d=r_q$ resistencia por fase del devanado estatórico

$R_1=R_2$ Resistencia del rotor en eje 1 y eje 2

L_M = inductancia de magnetización del núcleo

Una vez obtenido los parámetros del motor utilizaremos el software ATP Draw para realizar las pruebas pertinentes del motor en estrella delta.

3.1.1.1.2 Bloques de operación de un motor

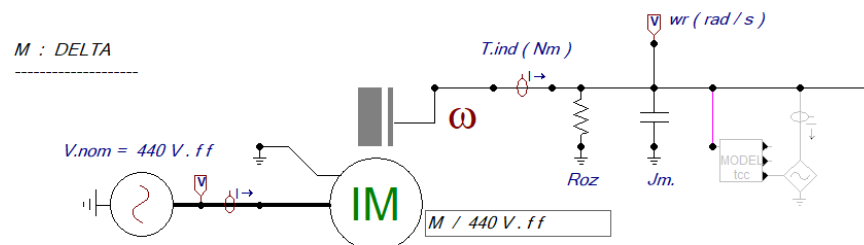


Figura 24 Modelado del motor.

Fuente: ATP Draw

El diagrama muestra un motor de inducción trifásico en configuración delta, funcionando a una tensión nominal de 440 V.

En el esquema, se representa el motor junto con su par inducido, las pérdidas debidas a la fricción y la inercia del rotor.

Además, se incluye un bloque que simula la dinámica del sistema, tomando en cuenta la velocidad angular del rotor en radianes por segundo

Voltaje de fase senoidal de pico= 359.25 V

Voltaje de fase rms= 254 V

Voltaje de fase-fase rms= 440 v arranque directo en triangulo

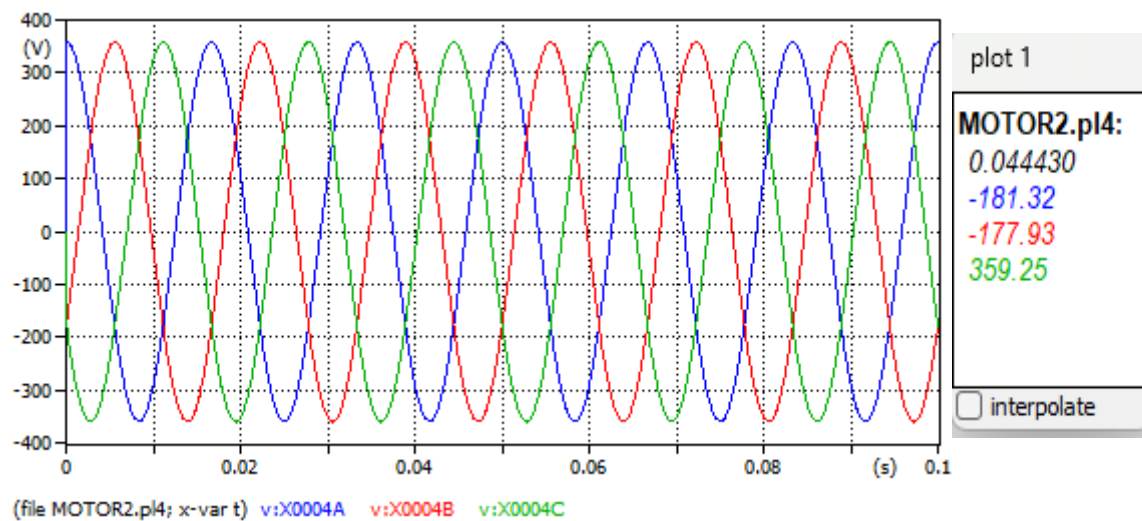


Figura 25 Voltaje trifásico de pico.
Fuente: ATP Draw

Formas de onda sinusoidales:

Todas las formas de onda de fase A, B y C tienen una forma de onda sinusoidal, lo cual es típico de un sistema trifásico de voltaje alterno.

Las ondas entre sí están desfasadas a 120 grados uno del otro, lo cual es típico de una fase trifásica.

Amplitud:

La amplitud máxima de las ondas de voltaje es 359.25V. Esto indica que el voltaje pico de cada fase es de 359.25V. Si queremos tomar el valor eficaz rms, que es el valor que comúnmente medimos en los sistemas eléctricos, tenemos

$$V_{rms\ fase.N} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}} = \frac{359.25V}{\sqrt{2}} = 254V$$

[18]

Para obtener el valor rms de fase a fase multiplicamos el valor rms de fase a neutro por la raíz cuadrada de 3.

$$V_{rms fase. fase} = V_{rms fase. N} * \sqrt{3} = 254V * \sqrt{3} = 440 V$$

[19]

Torque que se genera en el motor es análogo a la corriente, por ende, la analogía entre las variables y parámetros físicos y eléctricos el torque inducido en Nm.

$$1Nm = 1 Amperio$$

[20]

Velocidad en radianes sobre segundos es análogo al voltaje

$$1 \frac{rad}{s} = 1 Voltio$$

[21]

La inercia en $Kg.m^2$ es análogo al faradio

$$1Kg.m^2 = 1 faradio$$

[22]

Corriente de arranque a voltaje nominal en delta motor a vacío.

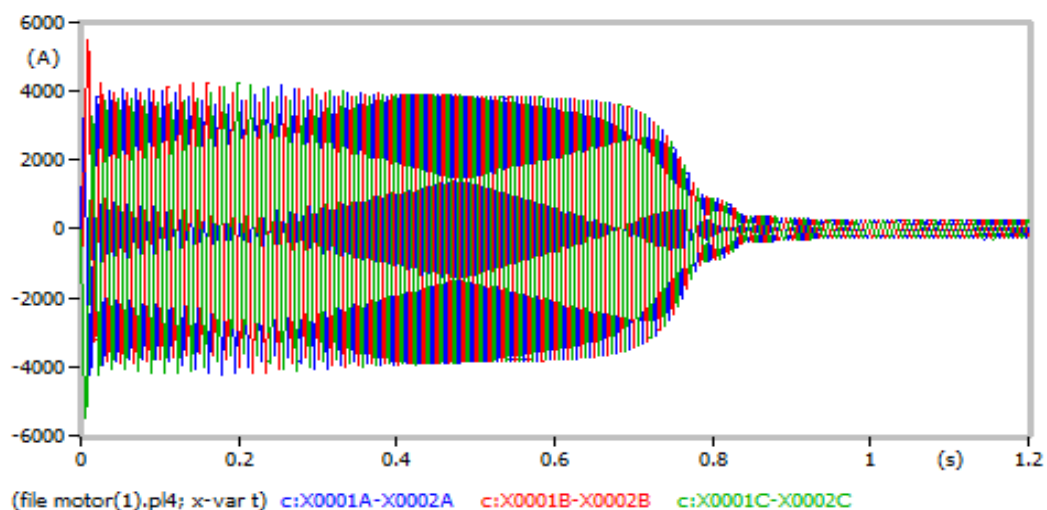


Figura 26 Corrientes trifásico de pico.

Fuente: ATP Draw

Al inicio, se registra un pico elevado de corriente, alcanzando alrededor de ± 5000 A. Este

fenómeno es común durante el arranque de motores, especialmente cuando se conectan en delta a su voltaje nominal. En esta configuración, el motor recibe el voltaje completo en cada fase, lo que resulta en una corriente de arranque considerablemente alta.

Después del pico inicial, la corriente comienza a experimentar oscilaciones con una gran amplitud. Estas oscilaciones son características durante el arranque de motores, debido a la interacción entre el flujo magnético del motor y la inercia mecánica. Se observa que estas oscilaciones van disminuyendo gradualmente hasta que la corriente se estabiliza, indicando que el motor se está ajustando a las condiciones de arranque y eventualmente alcanza un estado de operación estable.

Dado que el motor no tiene carga mecánica conectada, la corriente se reduce notablemente después de las oscilaciones iniciales. El motor requiere muy poca corriente para mantenerse en operación sin carga, lo que resulta en una corriente final muy baja.

La corriente se estabiliza entre 0.8 y 1.0 segundos, lo que indica que el motor ha alcanzado su velocidad nominal, y las corrientes de arranque han disminuido a niveles nominales de operación en vacío.

Torque inducido a voltaje nominal en delta con carga nominal:

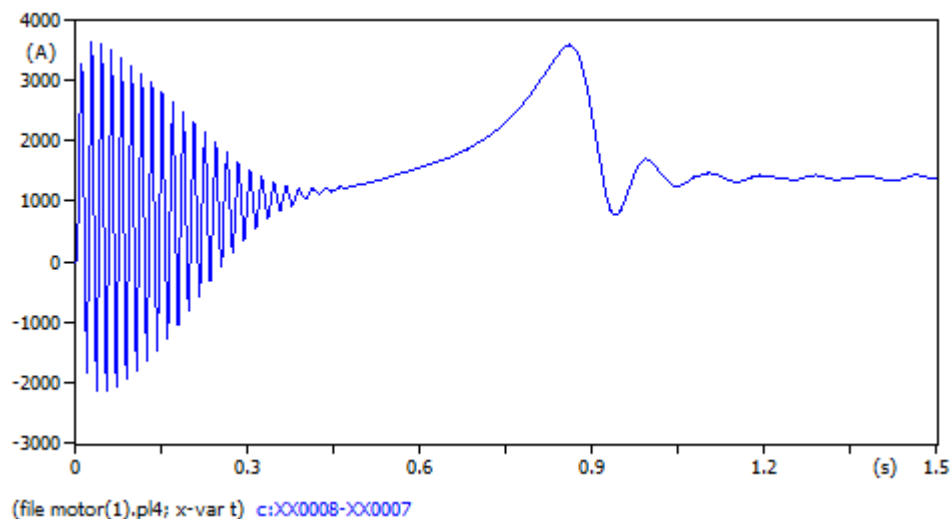


Figura 27 Torque inducido.

Fuente: ATP Draw

Todo motor tiene un torque transitorio, punzante y luego avanza hasta lograr un torque máximo esto me sirve para ver la capacidad de sobre carga de un motor igual a 3511 Nm a

voltaje nominal en esas condiciones, luego el torque empieza a caer y logra estabilizarse en un valor de 1380 Nm lo que demanda el sistema.

Torque de carga cuadrático (azul), Torque inducido (rojo) con carga nominal:

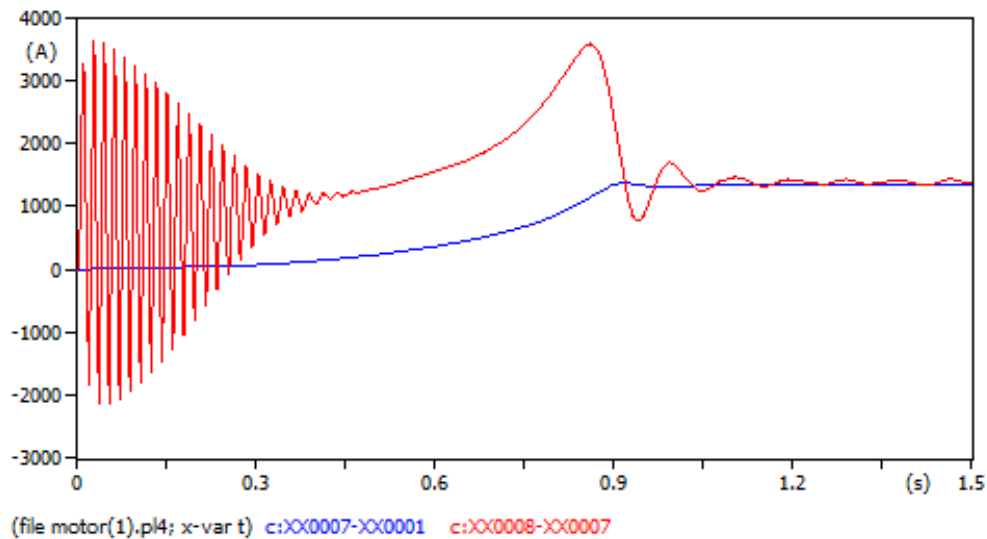


Figura 28 Torque de carga y Torque inducido.

Fuente: ATP Draw

Es recomendable para esta carga arrancar el motor en delta voltaje nominal un torque 0, a medida que la carga va subiendo el torque de igual manera debe ir lo más pegado al torque de carga, el espacio que hay entre las dos curvas va a mejorar al momento que se coloca un paso de voltaje haciendo el arranque del motor en estrella y la curva del torque inducido se va a pegar más al torque de carga se logra menos área de desperdicio entre las dos curvas, luego de un segundo estas dos curvas logran estabilizarse pequeñas vibraciones mecánicas propias del motor hacen que no sean linealmente perfectas.

Velocidad del rotor en rad/seg con carga nominal:

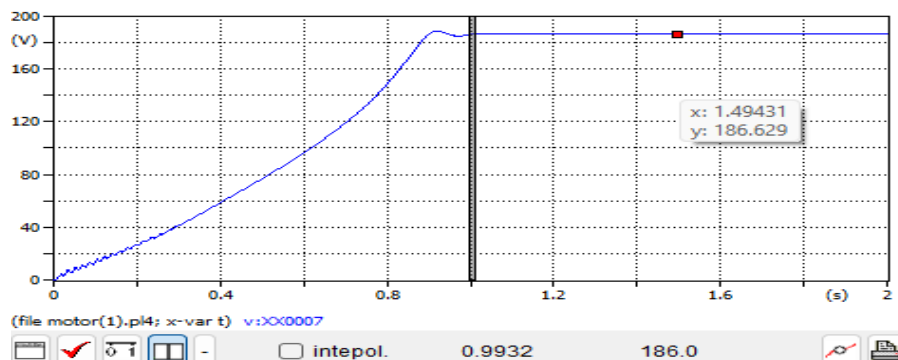


Figura 29 Velocidad del motor.

Fuente: ATP Draw

La velocidad del rotor es de 186 rad/seg el tiempo de un segundo corresponde a la aceleración del motor para alcanzar su estabilidad, este tiempo de aceleración depende de la inercia del motor vencer en más o menos esta inercia es función del voltaje aplicado.

Corriente de línea con un arrancador estrella delta:

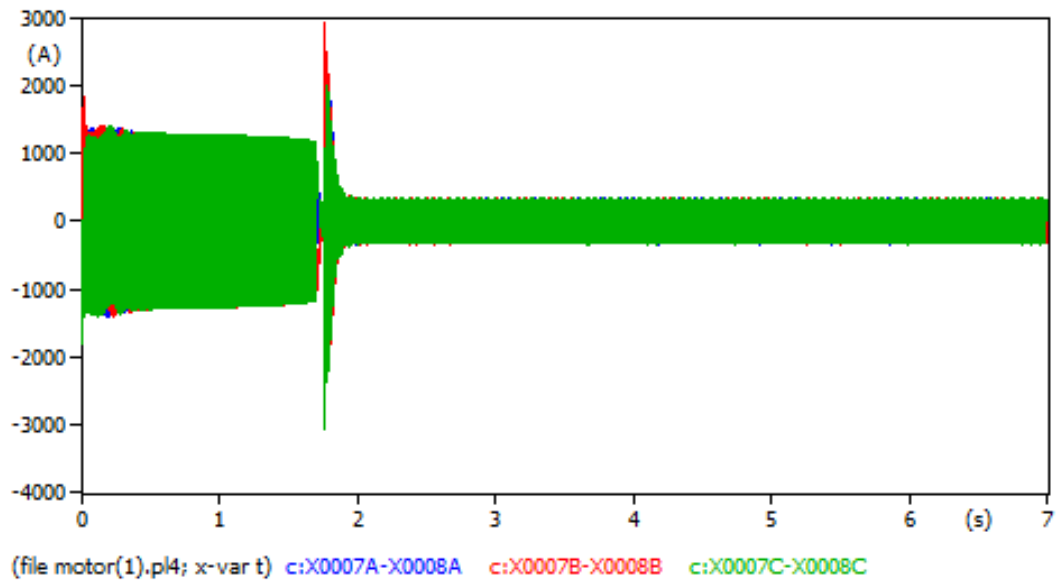


Figura 30 Corrientes estrella delta.

Fuente: ATP Draw

Corriente de línea en el cambio de estrella a delta:

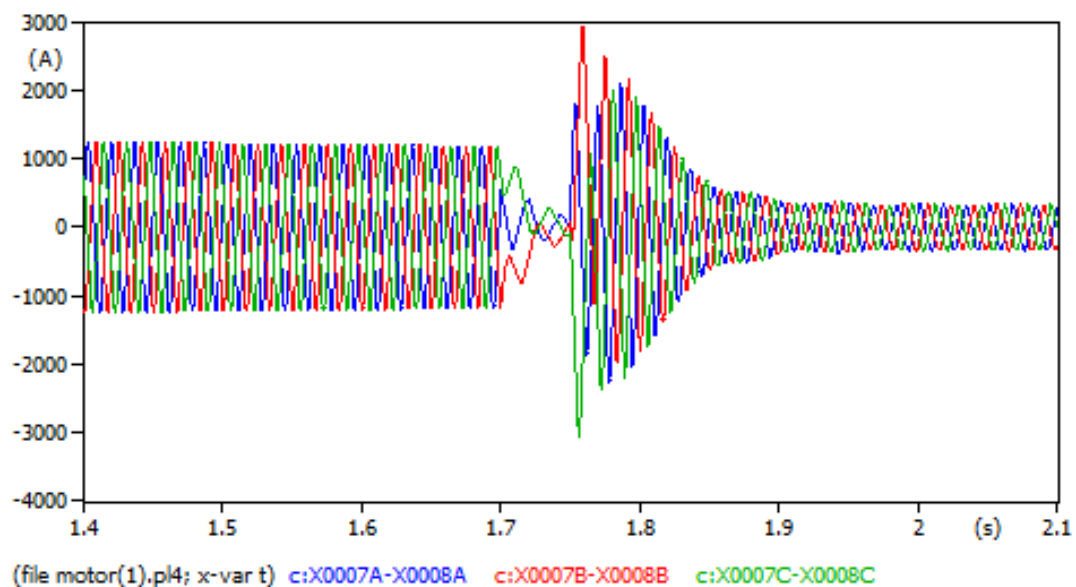


Figura 31 Corrientes estrella delta más cerca.

Fuente: ATP Draw

En el momento de la transición de la estrella a delta tenemos una generación de pico de corriente y luego rápidamente la corriente decrece hasta estabilizarse de acuerdo con la carga con la cual está trabajando.

Torque inducido(rojo), torque de carga(azul) durante el estrella-delta:

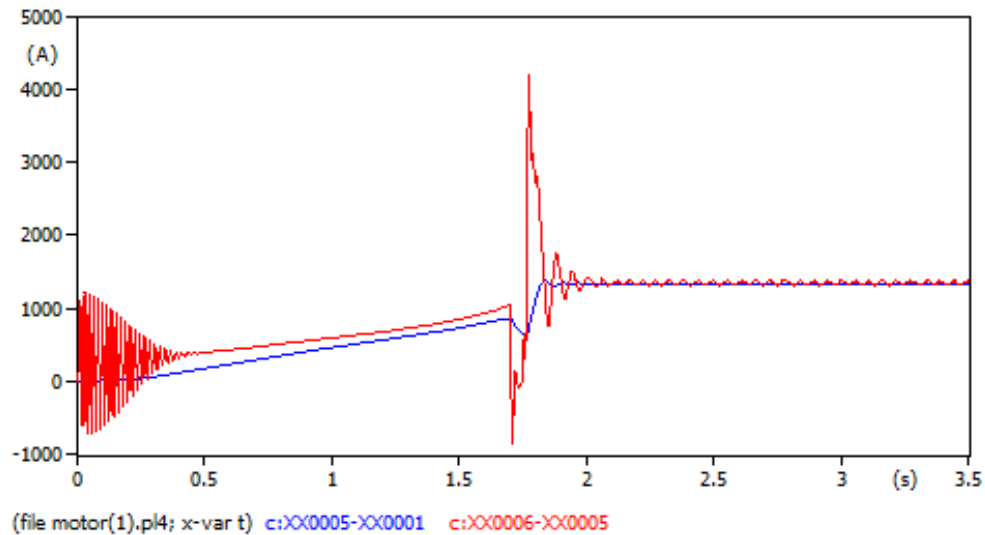


Figura 32 Torque delta estrella.

Fuente: ATP Draw

Como la carga es cuadrática dependiente de la velocidad en el caso de las bombas a medida que el motor se va acelerando la carga también va a ir creciendo proporcionalmente a la velocidad de forma cuadrática esto hace que se acople bastante bien la estrella por lo que el área entre las dos curvas el desperdicio de energía es menor en cuanto al área de las curvas del arranque en voltaje nominal 440V en delta como se detalla en la figura antes mencionada, lógicamente cuando arranca en estrella a 254 V el torque inducido de arranque nominal.

$$T_{ind.arr} = (K_{pu})^2 \cdot T_{ind.arranq(nom)}$$

[23]

$$(K_{pu})^2 = V_{aplicado} / V_{nominal} = 254V / 440V = 0.577$$

[24]

$$K_{pu} = (0.577)^2 = 0.3329$$

[25]

$$T_{ind.arr.estrella} = K_{pu}^2 * T_{ind.arranq(nom)} = 0.3329 * 1340 Nm = 446 Nm$$

[26]

Velocidad del rotor durante el arranque estrella-delta:

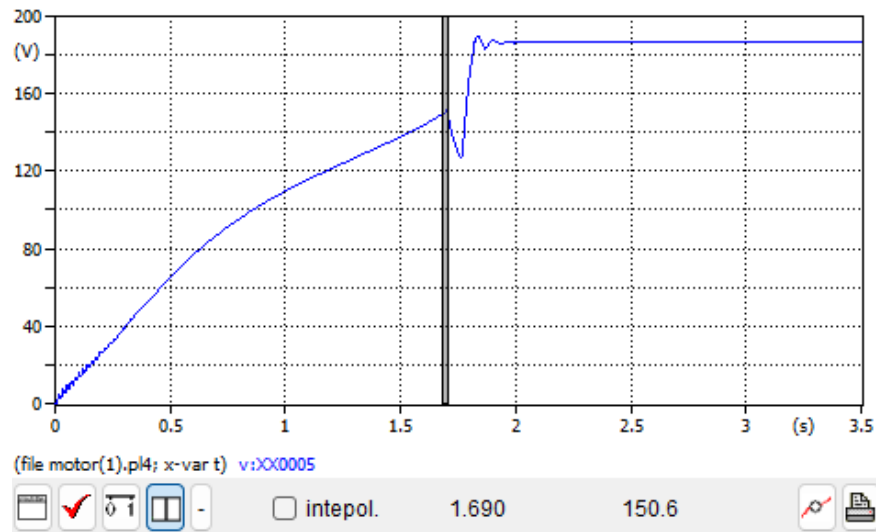


Figura 33 Velocidad delta estrella.
Fuente: ATP Draw

Arranca el motor desde cero empieza a acelerar hasta hacer la transición de la estrella a delta.

$$w_{rotor.nom} = 186.61 \frac{rad}{s}$$

[27]

$$w_{rotor.estr.delt} = 150.6 \frac{rad}{s}$$

[28]

$$\%w_{rotor.estr.delt} = 150.6 \frac{rad}{seg} / 186.61 \frac{rad}{seg} * 100 = 76.05\%$$

[29]

Como recomendación para un buen funcionamiento del motor en el momento de la transición de la estrella a delta con un 70% hasta un 90% de la velocidad nominal.

3.1.1.1.2 Líneas de distribución (13.8 kV)

El arranque de motores trifásicos, especialmente en configuración estrella-delta, puede causar serios problemas en las líneas de distribución, especialmente en el alimentador Cerro Pelado.

La causa principal de este problema son los altos transitorios de corriente al cambiar entre conexiones en estrella y en triángulo.

Durante un arranque en estrella, la corriente de arranque se reduce aproximadamente un tercio de la corriente nominal, lo que inicialmente reduce el impacto en la red.

Sin embargo, al cambiar a una configuración delta, la corriente aumenta repentinamente, quizás siete veces la corriente nominal del motor. Este aumento de corriente puede provocar importantes caídas de tensión en las líneas de distribución, afectando a la calidad del suministro eléctrico y provocando fluctuaciones que pueden afectar al resto de equipos conectados a la red.

El reinicio frecuente de los motores en estas condiciones puede sobrecargar el sistema, acelerar el envejecimiento de los componentes de la red y aumentar la posibilidad de fallas o desconexiones inesperadas. Además, estas fluctuaciones pueden provocar el disparo repentino del relé de protección, afectando la continuidad del servicio eléctrico.

Si consideramos que los 10 motores de 250 kW, existentes en las zonas camaroneras conectadas al mismo alimentador, arrancan simultáneamente, la demanda transitoria en la línea de 13.8 kV puede ser extremadamente alta, este escenario generaría un pico de corriente considerable, que podría superar significativamente la capacidad de la línea, causando caídas de tensión abruptas y transitorias en la red.

Datos para el modelado de la línea 10 km:

Figura 34 Datos de la línea 10 km.

Fuente: ATP Draw

Línea de 10 km del alimentador Cerro Pelado

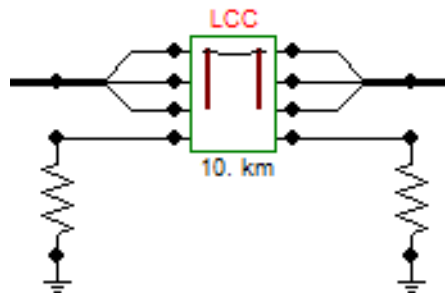


Figura 35 Representación de la línea 10 km ATP Draw.

Fuente: ATP Draw

El diagrama muestra un motor de inducción trifásico en configuración delta, funcionando a una tensión nominal de 440 V.

En el esquema, se representa el motor junto con su par inducido, las pérdidas debidas a la fricción y la inercia del rotor.

Además, se incluye un bloque que simula la dinámica del sistema, tomando en cuenta la velocidad angular del rotor en radianes por segundo.

La imagen muestra la configuración de una línea aérea mediante una herramienta de simulación.

Se ha seleccionado una línea aérea de cuatro fases, con opciones como el efecto pelicular, tierra segmentada y la matriz de transformación real activadas. Los datos básicos incluyen la resistividad del suelo (100 ohm·m), la frecuencia inicial (60 Hz) y la longitud de la línea (10 km).

Datos para el modelado de la línea 25 km:

Figura 36 Datos de la línea 25 km.

Fuente: ATP Draw

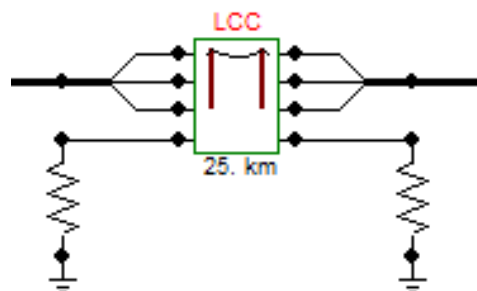


Figura 37 Representación de la línea 25 km ATP Draw.

Fuente: ATP Draw

Impedancia de la línea:

The screenshot shows the 'Section Properties' dialog box for a line section. The 'Section ID' is '14633_MTA'. The 'Phase' section has checkboxes for A, B, and C, all of which are checked. The 'Zone' is set to 'UNDEFINED'. The 'Environment' is set to 'Unknown'. The 'By Phase configuration' section shows 'Type' as 'By Phase configuration', 'Number' as '14633_MTA', 'Status' as 'Connected', and 'Length' as '0,3691 km'. The 'Equivalent Impedances' section has two radio buttons: 'Phase Impedances' (unselected) and 'Sequence Impedances' (selected). Below these, there are two columns of data: 'R + jX Ω/km ' and 'G + jB $\mu\text{S}/\text{km}$ '. The 'Positive Sequence' row shows '0,4387 + j0,5169' and '0 + j3,798'. The 'Zero Sequence' row shows '0,8638 + j1,504' and '0 + j1,909'. A 'Failures...' button is located in the top right corner. The 'Devices' section on the left has 'Add' and 'Remove' buttons and a tree view showing 'Nodes', 'By Phase configuration', 'Equivalent Impedances', 'Ampacity', and 'Harmonic Model'.

Figura 38 Impedancia de la línea.

Fuente: ATP Draw

La impedancia de la línea juega un papel crucial en la respuesta del sistema eléctrico ante la demanda transitoria generada por el arranque simultáneo de los motores, la impedancia de la línea de 13.8 kV determina cómo se distribuyen las caídas de tensión y cómo se comporta la corriente durante estos transitorios.

Cuando los 10 motores de 250 kW arrancan al mismo tiempo, la corriente que circula por la línea se incrementa notablemente.

La magnitud de la caída de tensión en la línea es proporcional a la corriente y a la impedancia total de la línea, según la ley de Ohm ($V = IZ$). Si la impedancia es elevada, incluso un aumento moderado en la corriente puede resultar en caídas de tensión significativas.

Esto no solo afecta a los motores en cuestión, sino también a otros consumidores que dependen de la misma línea.

Por lo tanto, para minimizar estos efectos adversos, es esencial tener en cuenta la impedancia de la línea al diseñar o ajustar la configuración del sistema, especialmente cuando se sabe

que se enfrentará a demandas transitorias elevadas, como es el caso del arranque simultáneo de varios motores de gran potencia.

3.1.1.1.2 Reconectador trifásico:

El reconectador SEL-651R es un dispositivo de protección utilizado ampliamente en sistemas de distribución eléctrica, como los de CNEL Milagro, para mejorar la confiabilidad del suministro eléctrico al permitir la desconexión y reconexión automática de segmentos de la red en caso de fallas temporales

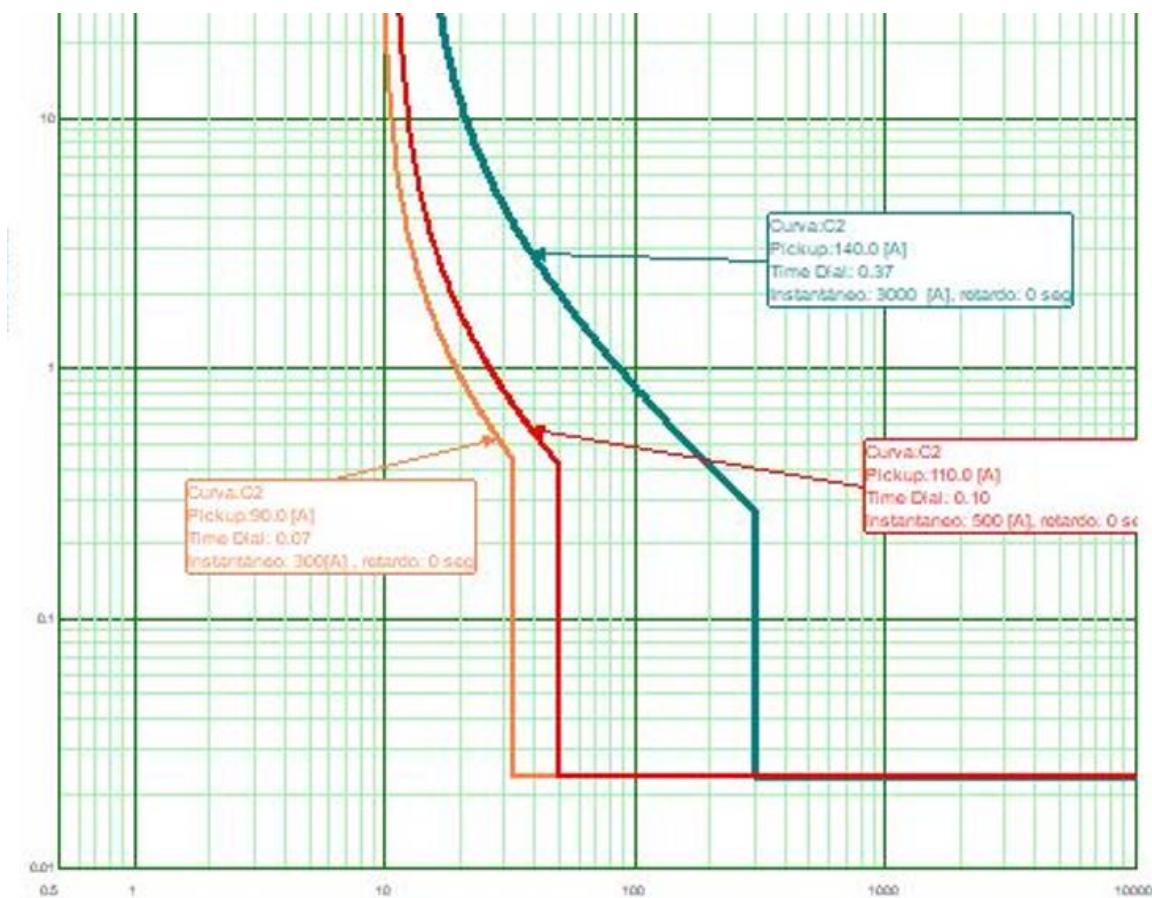


Figura 39 Curva del reconectador.
Fuente: Cyndist.

Se presentan tres curvas diferentes, cada una correspondiente a un dispositivo de protección distinto. Estas curvas muestran la relación entre la corriente de falla y el tiempo de operación del dispositivo.

La gráfica facilita la comparación del rendimiento de los dispositivos bajo distintas condiciones de falla.

Medio Vano RECONECTADOR SEL651-R

Fases:

Pickup: 250 A

Curva: C1

Td:0,05

Instantáneo:800, DELAY: 0 seg

Tierra:

Pickup:110 A

Curva:C2

Td:0,1

Instantáneo: 500, DELAY: 0 seg

Short-Circuit IEC 60909 Box					
Node - MTS_S_320					
	LLL	LG	LL	LLG	LLL Idc
Initial	4,957654	6,185612	4,293482	5,945666	3,196555
Peak	12,240553	15,271937	10,601551	14,681154	
Steady State	4,957256	6,184925	4,293482	5,945666	
Breaking	4,957256				
		0,00			
	R (ohm)		X (ohm)		
Z1	0,1771		1,7590		
Z2	0,1771		1,7590		
Z0	0,0724		0,7114		

Figura 40 Configuración del reconectador.
Fuente: Cymdist.

Configuración del Reconectador:

Pickup: 250 A

El ajuste de "pickup" en 250 A significa que el reconectador está configurado para iniciar el proceso de protección cuando la corriente que pasa a través de él excede los 250 amperios. Este valor está determinado para proteger adecuadamente la línea sin causar desconexiones innecesarias bajo condiciones normales de carga.

Curva C1

La "Curva C1" se refiere a una de las curvas de tiempo-corriente que determina cómo reacciona el reconectador ante sobre corrientes.

La Curva C1 es comúnmente utilizada en aplicaciones de distribución, ya que ofrece un equilibrio entre la protección rápida ante sobrecargas severas y la capacidad de permitir que las corrientes temporales más bajas persistan sin provocar una desconexión inmediata.

Td: 0,05

Td (Time Dial) de 0,05 es un ajuste que define el retardo en la operación del reconectador. Un valor bajo como 0,05 indica que el reconectador actuará rápidamente, reduciendo el tiempo que transcurre entre la detección de una sobre corriente y la acción correctiva, ideal para minimizar los daños durante fallas.

Instantáneo: 800 A, DELAY: 0 seg

La configuración de la función "Instantánea" en 800 A indica que, si la corriente supera este valor, el reconectador actuará inmediatamente sin ningún retardo. Con un DELAY configurado en 0 segundos, se garantiza que cualquier corriente superior a 800 A, posiblemente indicando una falla severa, provocará una desconexión instantánea para proteger la integridad de la red y los equipos conectados.

Aplicación en CNEL Milagro:

En el contexto de CNEL Milagro, esta configuración del reconectador SEL-651R es adecuada para proteger líneas de distribución de media tensión donde la variabilidad de las cargas y la presencia de grandes consumidores, como motores industriales, pueden generar

condiciones de sobre corriente transitorias.

La rápida respuesta del reconectador ayuda a mitigar el impacto de fallas momentáneas, evitando interrupciones prolongadas y mejorando la continuidad del servicio.

Además, la capacidad del reconectador para reconectar automáticamente la línea después de una falla temporal (como un cortocircuito inducido por factores ambientales) contribuye a mantener la estabilidad del sistema, reduciendo la necesidad de intervención manual y minimizando el tiempo de inactividad. La configuración detallada asegura que el dispositivo sea sensible a fallas serias, mientras permite que fluctuaciones menores se disipen sin causar interrupciones innecesarias.

3.1.1.1.2 Cargas concentradas.

Las cargas concentradas en sistemas eléctricos se refieren a aquellas cargas que se agrupan en un solo punto o en una ubicación geográfica limitada dentro de la red eléctrica. Estas cargas suelen ser grandes consumidores de energía, como motores industriales, instalaciones de producción, plantas de bombeo, o cualquier otro equipo que demande una cantidad significativa de energía en un solo punto de la red.

Las cargas concentradas presentan desafíos significativos en la planificación y operación de sistemas eléctricos, pero con un diseño adecuado y una gestión estratégica, es posible minimizar sus impactos negativos y asegurar un suministro eléctrico confiable y de alta calidad.

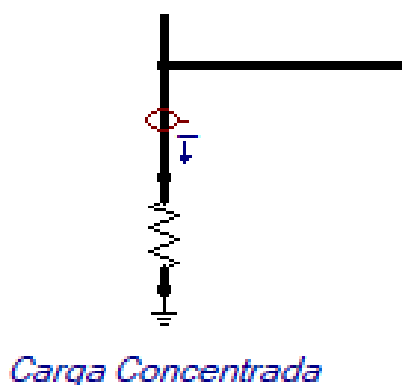


Figura 41 Cargas concentradas.
Fuente: ATP Draw

CAPITULO IV

4.1 ANALISIS Y RESULTADOS:

El arranque estrella-delta, aunque comúnmente utilizado para reducir la corriente de arranque de motores, no es completamente efectivo en este contexto debido al gran número de motores involucrados y la potencia de cada uno.

La simultaneidad en el arranque de múltiples motores exacerba los efectos transitorios, aumentando las posibilidades de disparos en el sistema de protección.

La simulación realizada con la herramienta ATP Draw proporcionó un análisis detallado del comportamiento dinámico de la red durante los arranques de motores, permitiendo identificar con precisión los momentos críticos en los que las corrientes transitorias alcanzan niveles que activan las protecciones.

Esta herramienta se demostró esencial para evaluar el desempeño de la red y las protecciones bajo diversas condiciones de operación.

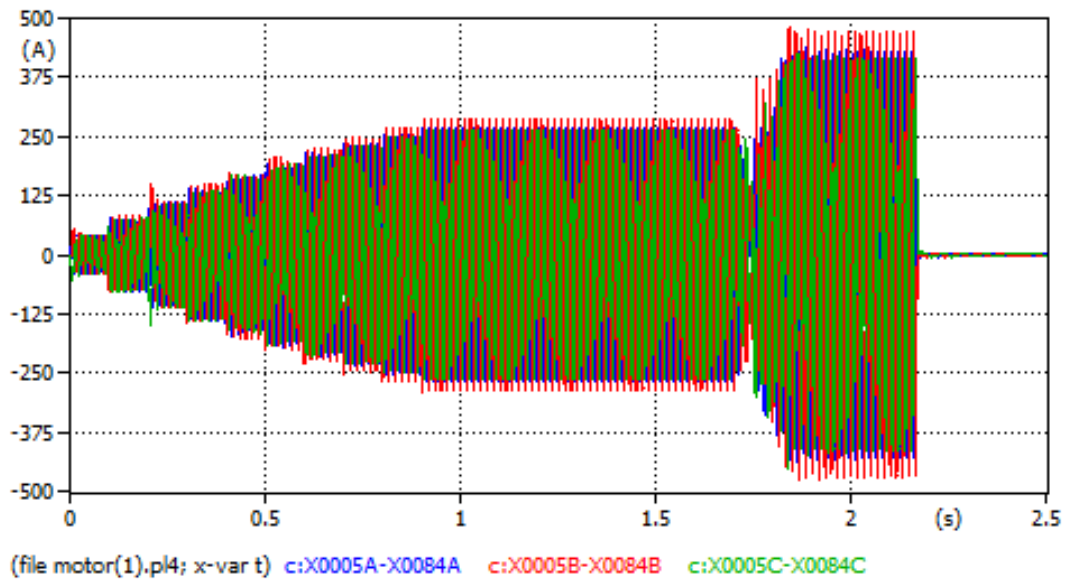


Figura 43 Arranque de motores con disparo.
Fuente: ATP Draw.

4.2 Arranque de motores con disparo

El estudio ha demostrado que el arranque simultáneo de varios motores trifásicos de gran potencia en la red de medio voltaje de 13.8 kV en el alimentador Cerro Pelado genera corrientes transitorias significativas que pueden alcanzar valores que exceden las capacidades de los dispositivos de protección existentes.

En particular, se observó que cuando 10 motores arrancan al mismo tiempo, las corrientes transitorias superan los 250 A, lo que provoca la actuación del reconector SEL-651R configurado para proteger la red en medio vano, generando una desconexión automática.

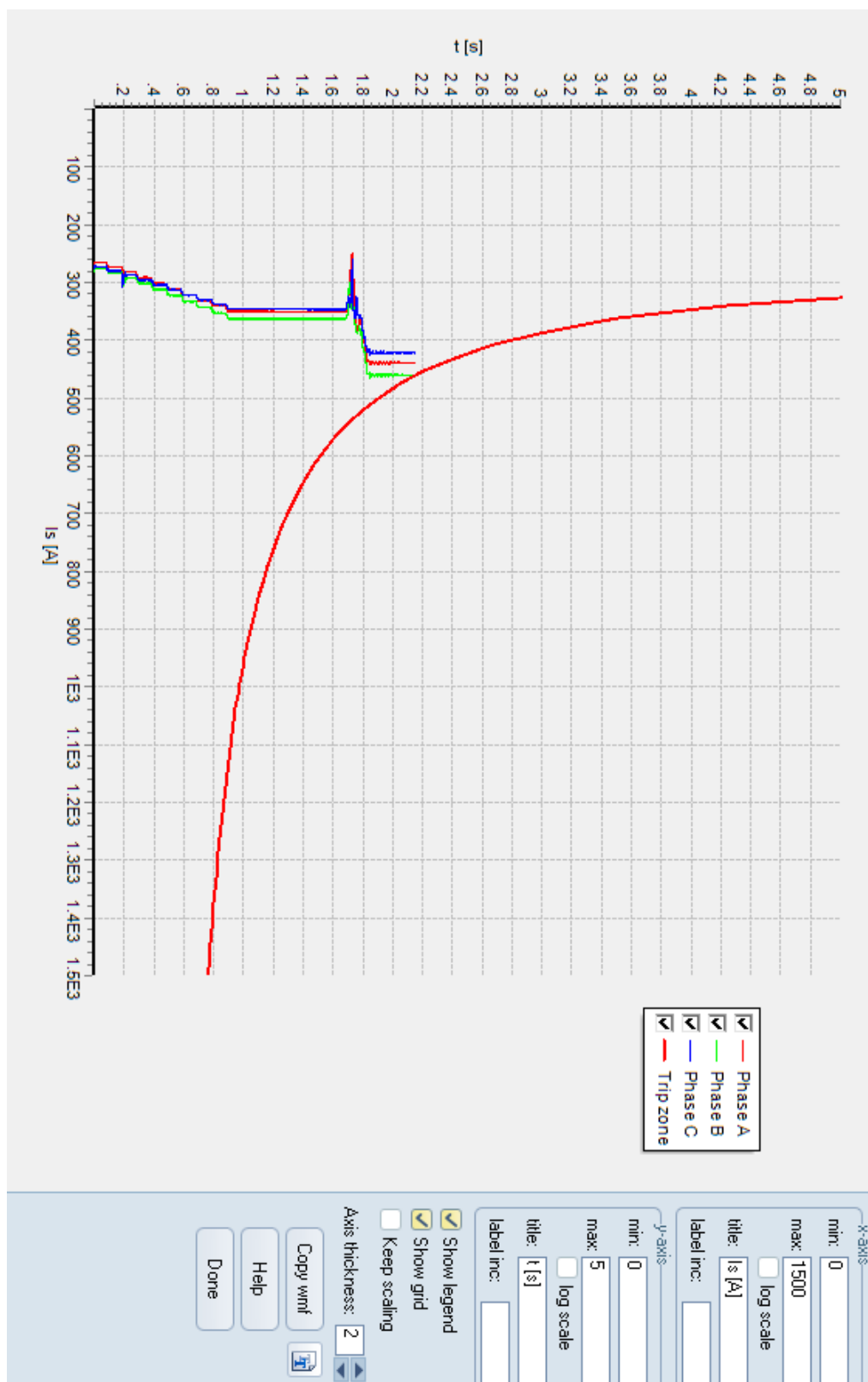


Figura 44 Curva C1 del reconectador disparando.
Fuente: ATP Draw.

4.2.1 Curva C1 del reconectador disparando.

La gráfica sirve para determinar qué tan rápido responderá un sistema de protección ante una falla eléctrica, lo cual es fundamental para evitar daños en equipos y personas.

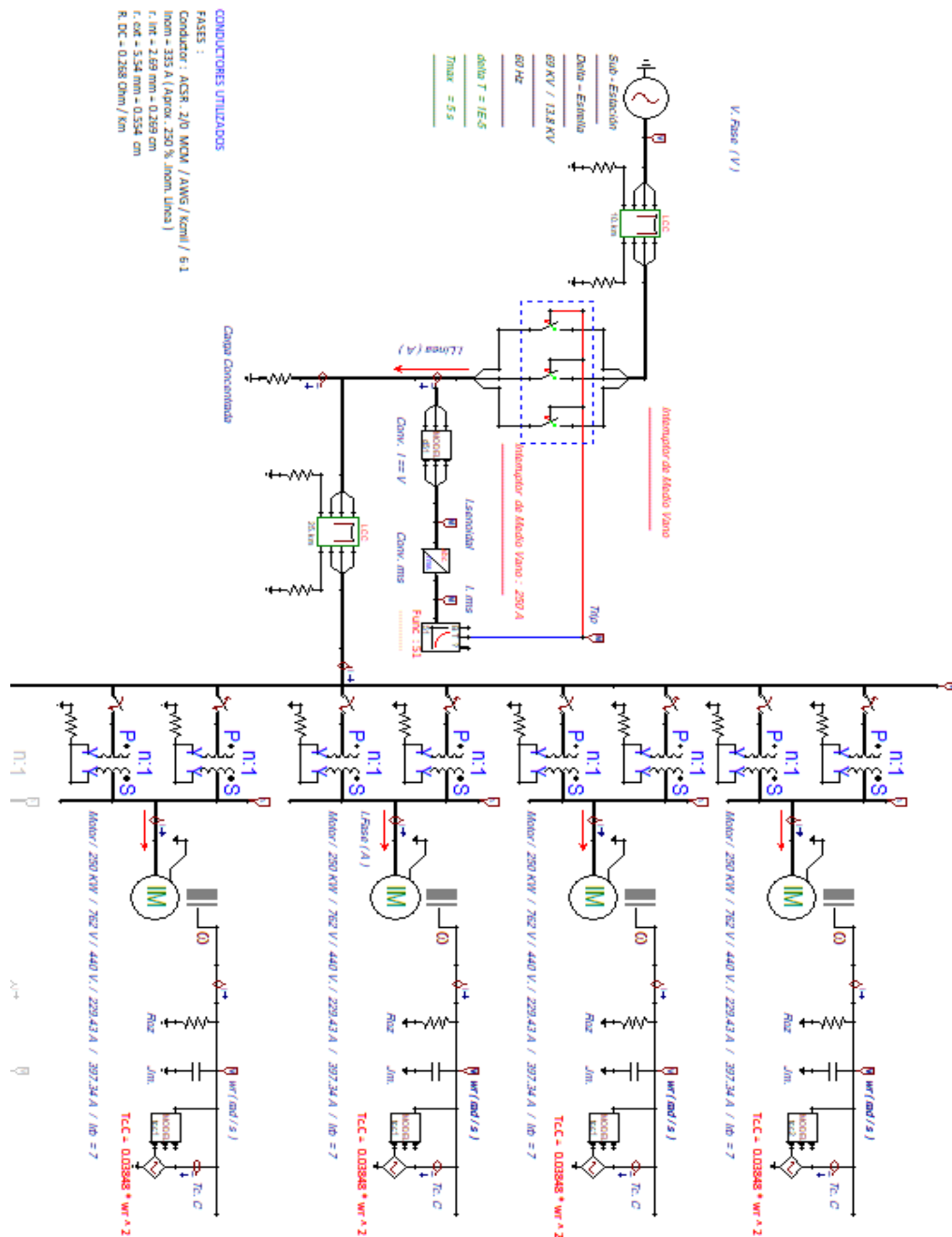


Figura 45 Diagrama final arrancando 4 motores.

Fuente: ATP Draw.

4.3 Diagrama final arrancando 4 motores.

El presente grafico se centra en un esquema unifilar simplificado de una subestación eléctrica su red de distribución con su respectiva protección, las cargas, representadas por equipos eléctricos como motores.

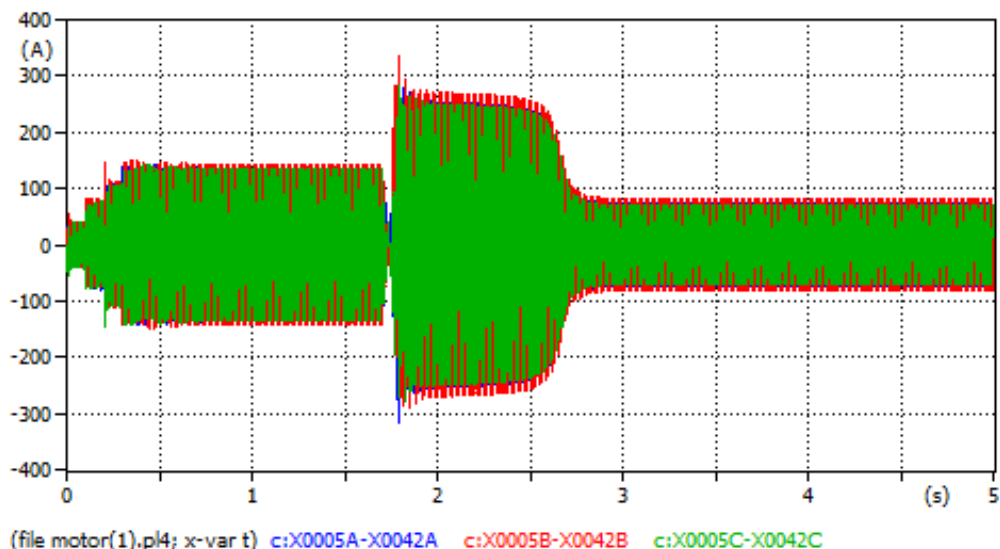


Figura 46 Arranque de motores sin disparo.
Fuente: ATP Draw.

4.3.1 Arranque de motores sin disparo.

El análisis de la gráfica ofrece una comprensión clara del comportamiento de las corrientes en un motor trifásico durante su fase de arranque en una red de medio voltaje. El hecho de que el reconectador no se dispare, a pesar de los altos picos de corriente, resalta la importancia de un diseño y ajuste minuciosos en los sistemas de protección. Este tipo de estudio es fundamental para asegurar la fiabilidad y estabilidad de la red eléctrica, especialmente en entornos industriales donde los motores de gran potencia son habituales y su funcionamiento continuo es crucial para mantener la producción y otros procesos en marcha. A largo plazo, el conocimiento de estos fenómenos transitorios y su impacto en la red permite mejorar tanto el diseño de la infraestructura como los procedimientos operativos, garantizando que los motores puedan arrancar de manera efectiva sin provocar interrupciones en el suministro eléctrico.

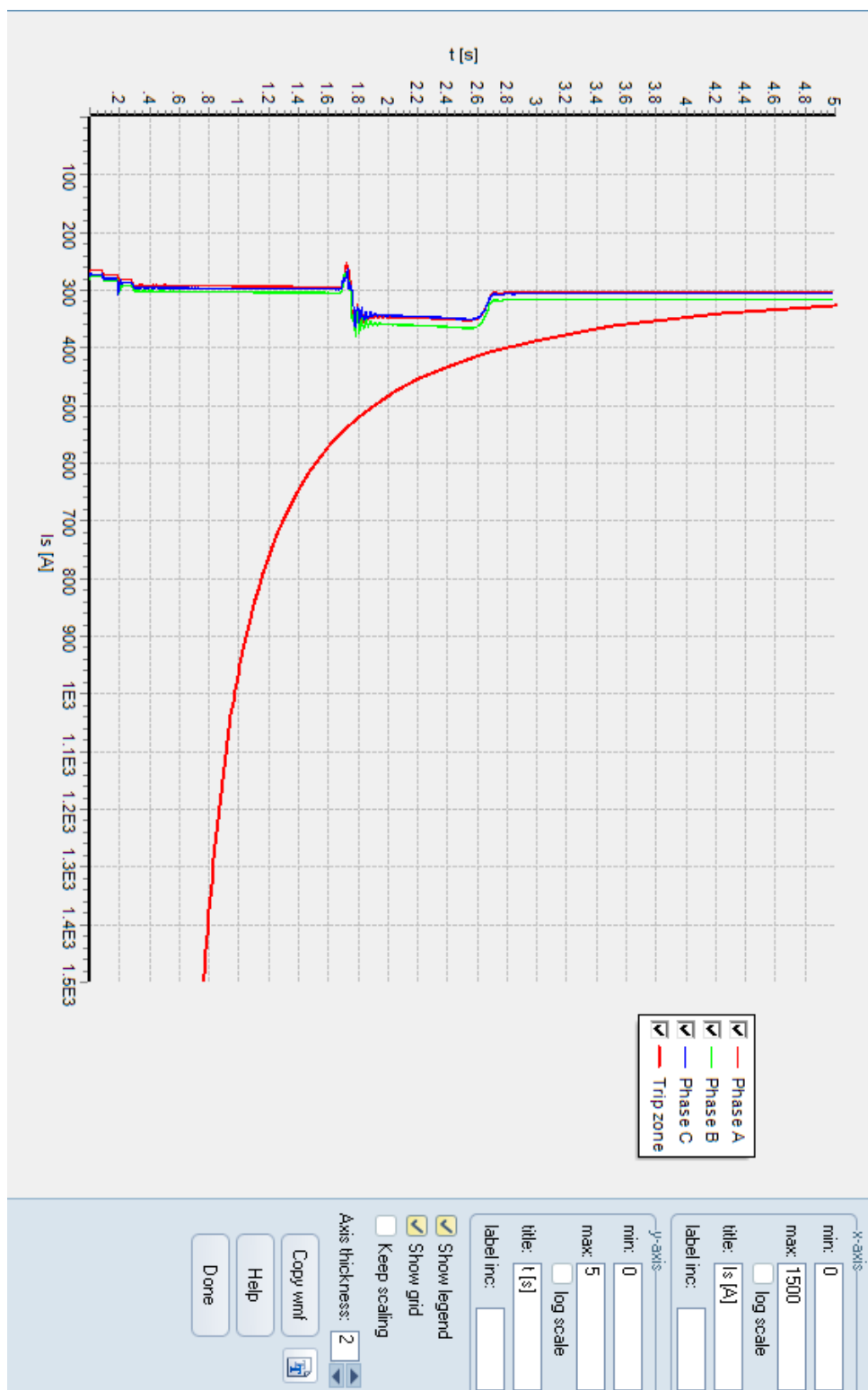


Figura 47 Curva C1 del reconectador sin disparo.
Fuente: ATP Draw.

4.3.2 Curva C1 del reconectador sin disparo.

La gráfica permite concluir que un reconectador configurado con una curva de disparo C1 es capaz de manejar eficazmente las corrientes transitorias sin causar desconexiones innecesarias, lo que asegura la continuidad del servicio eléctrico. Esta capacidad es crucial en redes que suministran energía a cargas críticas o industriales, donde la estabilidad del suministro es fundamental. El aumento momentáneo de la corriente en la fase C fue correctamente gestionado por la curva C1, demostrando que el sistema de protección está bien ajustado para permitir estos eventos sin comprometer la seguridad ni la operatividad de la red. La habilidad para manejar transitorios y mantener la estabilidad sin intervención subraya la importancia de un diseño y configuración óptimos de los sistemas de protección en redes de distribución eléctrica.

4.4 Caída de tensión en la línea.

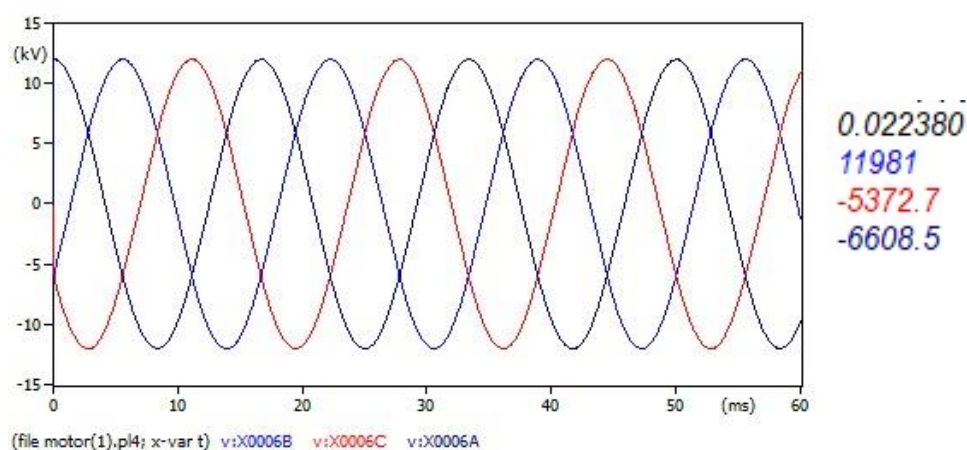


Figura 48 Caída de tensión en la línea.
Fuente: ATP Draw.

La gráfica muestra las tensiones de línea para las tres fases durante el arranque de motores trifásicos en la red de distribución del alimentador Cerro Pelado.

Se observa una caída de voltaje inicial significativa, con valores que descienden aproximadamente hasta 12 kV, este comportamiento evidencia el impacto de las corrientes transitorias generadas durante el arranque, reflejando la necesidad de considerar medidas de mitigación para mantener la estabilidad y calidad del voltaje en la red.

CONCLUSIONES

- El levantamiento eléctrico del alimentador Cerro Pelado nos facilitó para comprender el estado actual de la red. Al recopilar datos precisos de campo, se obtiene una representación detallada del comportamiento del alimentador bajo diferentes condiciones de operación. Esta información es esencial para modelar el sistema en ATP Draw, lo que permite simular escenarios de fallas, analizar transitorios eléctricos y optimizar el rendimiento del alimentador. La correcta interpretación y optimización de estos datos facilitará la toma de decisiones informadas para mejorar la confiabilidad y eficiencia del sistema de distribución eléctrica.
- La modelación de la red de Cerro Pelado en ATP Draw permitió analizar las corrientes transitorias durante el arranque de motores trifásicos, identificando su impacto en la estabilidad del sistema. Aunque el reconectador SEL-651R maneja efectivamente estas corrientes, permitiendo arranques simultáneos de hasta cuatro motores sin superar los 250 A, se observó una caída de tensión en la línea. Sin embargo, cuando arrancan más de cinco motores simultáneamente, el reconectador dispara, protegiendo la red, pero afectando el rendimiento y la calidad de energía de las cargas conectadas.
- La implementación de encendidos paulatinos controlados para los motores, tanto dentro de las camaroneras como también la coordinación de que cada camaronera encienda en un tiempo diferente y no coincidan más de cuatro motores en el encendido. Esta medida aborda los desafíos relacionados con las corrientes transitorias y las sobrecargas, optimizando la gestión de la carga y reduciendo el riesgo de interrupciones.

RECOMENDACIONES

- Para abordar las corrientes transitorias y el impacto en la red de 13.8 kV, se recomienda implementar arrancadores suaves en los motores trifásicos de las industrias agroindustriales conectadas al alimentador Cerro Pelado. Los arrancadores suaves proporcionan un arranque gradual, reduciendo las corrientes transitorias que se generan cuando los motores inician su funcionamiento. Esta reducción en las corrientes transitorias disminuye la carga sobre la red eléctrica, evitando caídas de tensión y posibles sobrecargas en el alimentador. Además, el uso de arrancadores suaves contribuye a la prolongación de la vida útil de los motores y a la reducción del desgaste mecánico, mejorando la estabilidad operativa general del sistema.
- Asimismo, es recomendable llevar a cabo estudios exhaustivos para planificar la expansión y actualización de la infraestructura eléctrica en la región. Estos estudios deben considerar la creación del nuevo alimentador, así como la modernización de los sistemas de protección existentes. La actualización de la infraestructura es crucial para manejar de manera eficiente el crecimiento de la demanda y la incorporación de nuevas industrias. Asegurar una infraestructura adecuada y moderna es fundamental para garantizar que la red eléctrica pueda soportar el aumento en la demanda sin comprometer la calidad y estabilidad del suministro eléctrico. Este enfoque proactivo no solo previene problemas futuros, sino que también facilita una adaptación más eficiente a los cambios y desafíos que puedan surgir.
- Finalmente, se sugiere el establecimiento de un sistema avanzado de monitoreo y automatización para gestionar la carga conectada tanto al alimentador Cerro Pelado como al nuevo alimentador propuesto. Este sistema debería estar diseñado para ofrecer una visión en tiempo real del estado de la carga y para ajustar dinámicamente la distribución de la carga entre los alimentadores. La capacidad de equilibrar la carga de manera efectiva no solo optimiza el uso de la infraestructura existente, sino que también mejora la estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico. Un sistema automatizado de este tipo permitirá una respuesta rápida a variaciones en la demanda, minimizando las fluctuaciones de tensión y mejorando la calidad del suministro eléctrico.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] F. Li et al., “Enhancing System Reliability and Transient Voltage Stability through Optimized Power Sources and Network Planning,” *Electronics* (Switzerland), vol. 12, no. 14, Jul. 2023, doi: 10.3390/electronics12143190.
- [2] J. A. Martinez-Velasco, “Introduction to Transients Analysis of Power Systems with ATP,” *Transient Analysis of Power Systems*, pp. 1–9, Feb. 2020, doi: 10.1002/9781119480549.CH1.
- [3] M. Rojnić, R. Prenc, H. Bulat, and D. Franković, “A Comprehensive Assessment of Fundamental Overcurrent Relay Operation Optimization Function and Its Constraints,” Feb. 01, 2022, MDPI. doi: 10.3390/en15041271.
- [4] S. Kureel and S. Khan, “Economic Analysis of Distribution Network with PV System,” in *Proceedings - 2022 4th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking, ICAC3N 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 2092–2099. doi: 10.1109/ICAC3N56670.2022.10074424.
- [5] 2017 International Workshop on Electromagnetics Applications and Student Innovation Competition. IEEE, 2017.
- [6] T. A. Short, *Electric power distribution handbook*. CRC Press, 2004.
- [7] “Principles of Electric Machines and Power Electronics سوم ویرایش (PowerEn.ir)”.
- [8] “Modern Power Electronics and AC Drives - Bimal K. Bose”.
- [9] “ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS.”
- [10] “Electric_Motors_and_Drives_Fundamentals”.
- [11] “ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS.”
- [12] “Electrical Power Systems C L WADHWA New Academic Science.”

[Online]. Available: www.EngineeringBooksPdf.com

[13] B. M. Weedy, | B J Cory, N. Jenkins, | J B Ekanayake, and | G Strbac, “Electric Power Systems.” [Online]. Available: www.wiley.com/go/weedy_electric

[14] D. P. Kothari and I. J. Nagrath, Modern power system analysis. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2009.

[15] “Power-System-I-TEXT-BOOK-2”.

[16] “fundamentos-de-circuitos-elc3a9ctricos-3edi-sadiku”.

[17] “Electromagnetic Transients Program (EMTP).”

ANEXO

Figura de Anexo 1 Primera parte del diagrama unifilar

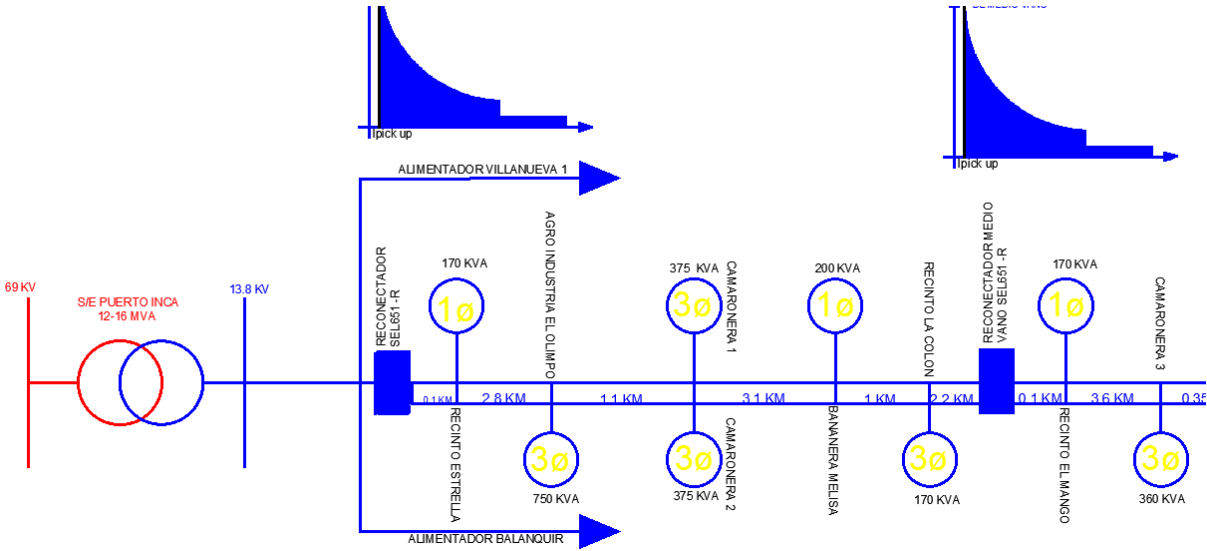


Figura de Anexo 2 Segunda parte del diagrama unifilar

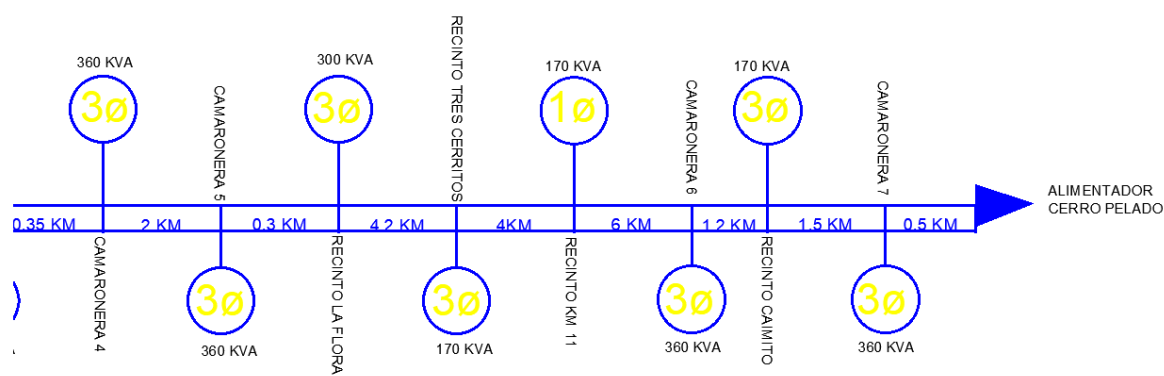


Figura de Anexo 3 Curva de protección C1 del reconector

