



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL ARRANQUE DE
UN MOTOR DE 3000HP A 13.8KV MEDIANTE LA HERRAMIENTA ATPDRAW**

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

AUTORES: Darwin Fabián Trejo Rodríguez
Cristóbal Colón Cevallos Moreira

TUTOR: Ing. Otto Washington Astudillo Astudillo, MEL.

Guayaquil – Ecuador
2025

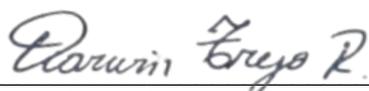
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Darwin Fabián Trejo Rodríguez con documento de identificación N° 0924882897 y Cristóbal Colón Cevallos Moreira con documento de identificación N° 1312253097 manifestamos que:

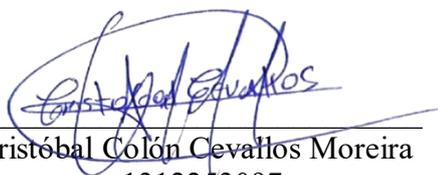
Somos los autores y responsables del presente trabajo y autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 31 enero de 2025

Atentamente;



Darwin Fabián Trejo Rodríguez
0924882897



Cristóbal Colón Cevallos Moreira
1312253097

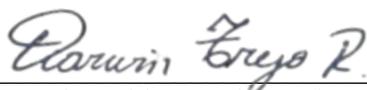
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Darwin Fabián Trejo Rodríguez con número de identificación N° 0924882897 y Cristóbal Colón Cevallos Moreira con número de identificación N° 1312253097, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos los autores del Proyecto Técnico: **“SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL ARRANQUE DE UN MOTOR DE 3000HP A 13.8KV MEDIANTE LA HERRAMIENTA ATPDRAW”**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de INGENIERO EN ELECTRICIDAD, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

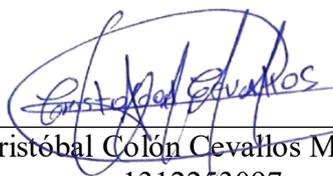
En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en el formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana,

Guayaquil, 31 enero de 2025

Atentamente;



Darwin Fabián Trejo Rodríguez
0924882897



Cristóbal Colón Cevallos Moreira
1312253097

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Otto Washington Astudillo Astudillo con documento de identificación N° 0102054871 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi autoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL ARRANQUE DE UN MOTOR DE 3000HP A 13.8KV MEDIANTE LA HERRAMIENTA ATPDRAW”, realizado por Darwin Fabián Trejo Rodríguez con número de identificación N° 0924882897 y Cristóbal Colón Cevallos Moreira con número de identificación N° 1312253097, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil. 31 enero de 2025

Atentamente;



Ing. Otto Washington Astudillo Astudillo, MEL.
0102054871

DEDICATORIA

A mi Madre Janeth, por su amor incondicional y su apoyo en cada desafío que tomo en mi vida, la razón por la que me levanto todos los días a trabajar para poder darle la vida que se merece. A mi Padre en paz descansa, José Trejo, por haberme inculcado desde siempre el valor del trabajo, la dedicación y el esfuerzo, y donde quiera que se encuentre el estaría orgulloso de que su último hijo es el primer ingeniero de la familia. A mi abuela Esther, por ser mi pilar emocional, por su cariño infinito y sus palabras de aliento que me han ayudado en los momentos difíciles por los que he atravesado, y que junto a su bendición sé que lograré completar cualquier desafío que me proponga. A mis hermanos, por estar siempre pendiente de que tome las decisiones correctas para no perjudicar mi futuro. A mis compañeros de la carrera por haber compartido conmigo grandes momentos que serán recordados en el tiempo.

Darwin Fabián Trejo Rodríguez

A mis padres a mis hijos, y hermanos que siempre me brindaron su apoyo y confianza incondicional, sin ellos no habría logrado este propósito en mi vida. Ellos son mi mayor fortaleza. A mis profesores, por su dedicación de compartir sus conocimientos de la ingeniería. Cada clase fue un escalón que me permitió llegar hasta aquí este momento. A mis amigos por estar siempre presentes en los momentos difíciles. Este logro es el resultado de la combinación del esfuerzos, sacrificios y sueños anhelados. A todos ustedes muchas gracias.

Cristóbal Colón Cevallos Moreira

AGRADECIMIENTO

A nuestro Padre celestial por haberme dado salud, fuerza y sabiduría para llegar a este momento. A mis padres por haberme enseñado el verdadero significado de esfuerzo y dedicación que hicieron posible que este día llegara. A mi familia por estar siempre presente en todos los aspectos de mi vida. Al Ing. Otto Astudillo, por haberme tenido la paciencia necesaria para la elaboración de este trabajo. A mis compañeros de la carrera por su ayuda constante a lo largo de esta etapa. A mi fiel y mejor amigo Jeiko, por haberme acompañado todas las noches, desde el inicio de la carrera hasta este momento. A toda mi familia en general, muchas gracias por siempre estar ahí para mí.

Darwin Fabián Trejo Rodríguez

Quiero expresar mi agradecimiento a Dios y mis padres, quienes siempre han sido mi pilar fundamental. Su amor, paciencia y sacrificios me han dado la fuerza necesaria para llegar hasta este momento. Gracias por confiar en mí, por su apoyo y por estar siempre conmigo, sin importar las dificultades. A mis profesores y directores de tesis, quienes con su conocimiento, guía y sabiduría me ayudaron a superar cada desafío que se presentó a lo largo de este proceso. Gracias por su dedicación, por compartir su experiencia y por inspirarme a dar lo mejor de mí. A mis amigos, que compartieron este camino, por su comprensión y apoyo constante en los momentos más difíciles. A todos aquellos que, de alguna forma, contribuyeron a mi crecimiento profesional y personal. Este logro es el resultado de la colaboración, el esfuerzo y la dedicación de muchas personas.

Cristóbal Colón Cevallos Moreira

ÍNDICE

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
CAPITULO I.....	1
1.1. TITULO	1
1.2. INTRODUCCIÓN	1
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.5. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.6. BENEFICIARIOS DE LA PROPUESTA.....	3
1.7. OBJETIVOS	4
1.7.1. Objetivo General.....	4
1.7.2. Objetivos Específicos.....	4

1.8.	METODOLOGÍA Y MEDIOS.....	4
	CAPITULO II	5
2.1.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
2.1.1.	Motores de Inducción.....	5
2.1.2.	Motores de Corriente Continua (DC).....	6
2.1.3.	Motores de Corriente Alterna (AC)	7
2.1.4.	Motores Síncronos.....	7
2.1.5.	Motores Asíncronos	8
2.2.	MOTORES DE MEDIA TENSIÓN	9
2.2.1.	Modelo Dinámico de un motor de inducción	9
2.2.2.	Momento de inercia en motores de inducción.....	11
2.2.3.	Ejes del Estator, directo y en cuadratura de un motor de inducción.....	12
2.2.4.	Ejes del Rotor, 1 directo y 2 en cuadratura de un motor de inducción.....	13
2.2.5.	Cargas Mecánicas	13
2.2.6.	Partes de un motor	14
2.3.	ARRANQUE DE MOTORES DE MEDIA TENSIÓN	16
2.3.1.	Arranque Directo en Línea (DOL - Direct on Line)	16
2.3.2.	Arrancador Suave	17
2.3.3.	Arranque Estrella-Triangulo.....	18
2.3.4.	Arranque con Variador de Frecuencia	19

2.3.5.	Arranque con Resistencias en Serie.....	20
2.3.6.	Arranque con autotransformador	21
2.4.	RESISTENCIAS DE POTENCIA	21
2.4.1.	Tipos de Resistencias.....	22
2.4.2.	Especialidades	22
2.5.	PROTECCIONES	23
2.5.1.	Protección Contra Sobrecorrientes	24
2.5.2.	Tipos de Sobrecorrientes	24
2.6.	TURBOGENERADORES	25
2.6.1.	Turbinas	25
2.6.2.	Generadores Eléctricos	28
2.6.3.	Partes del Generador	28
2.6.4.	Tipos de rotores.....	29
2.6.5.	Curva de Capacidad de Generadores Trifásicos	30
2.6.6.	Tipos de Potencia Eléctrica.....	31
2.7.	SOFTWARE ATPDRAW	31
2.7.1.	Funcionalidades de ATPDraw	32
2.8.	SOFTWARE PYTHON.....	32
CAPITULO III.....		34
3.1.	DESARROLLO DEL FUNCIONAMIENTO.....	34

3.1.1.	Descripción general.....	34
3.2.	DATOS GENERALES DEL MOTOR.....	34
3.2.1.	Comportamiento del motor trifásico en la red de distribución.	34
3.2.2.	Datos de la calculadora Induction Motor Data.....	36
3.2.3.	Datos para el modelado del motor.	37
3.2.4.	Modelado para el alimentador trifásico.	39
3.3.	ARRANQUE CON RESISTENCIAS ROTÓRICAS.	40
3.3.1.	Bloque de operación del motor con resistencias rotóricas.	40
3.3.2.	Voltaje trifásico pico.	41
3.3.3.	Corriente trifásica pico en el estator.	42
3.3.4.	Corriente trifásica pico de arranque en el estator.	43
3.3.5.	Corriente trifásica pico de vacío en el estator.	43
3.3.6.	Corriente trifásica pico con carga en el estator.....	44
3.3.7.	Corriente trifásica pico en el rotor.	44
3.3.8.	Corriente trifásica pico de arranque en el rotor.	45
3.3.9.	Corriente trifásica pico de vacío en el rotor.	46
3.3.10.	Corriente trifásica pico con carga en el rotor.	46
3.3.11.	Torques del motor. Inducido(r), inercia(a), rozamiento(c), carga(f).....	47
3.3.12.	Velocidad del motor en rad/s. (rotóricas).....	47
3.3.13.	Potencia activa(rojo) y reactiva(verde) por fase.	48

3.4.	ARRANQUE CON RESISTENCIAS ESTATÓRICAS.....	49
3.4.1.	Bloque de operación del motor con resistencias estáticas.	49
3.4.2.	Resistencia del estator.	50
3.4.3.	Voltaje en alimentador(r) y en los terminales del motor(v). (estáticas).....	51
3.4.4.	Corriente por fase pico en el estator. (estáticas).....	51
3.4.5.	Torques del motor. Inducido(r), inercia(a), rozamiento(v), carga(c).....	52
3.4.6.	Velocidad del motor en rad/s. (estáticas)	53
3.4.7.	Potencia activa(rojo) y reactiva(verde) por fase. (estáticas)	53
3.5.	ARRANQUE A VOLTAJE NOMINAL.	55
3.5.1.	Bloques de operación del motor con rotor en cortocircuito.	55
3.5.2.	Corriente por fase pico en el estator. (cc).....	56
3.5.3.	Torques del motor. Inducido(r), Inercia(v), carga(a), rozamiento(c). (cc).....	57
3.5.4.	Velocidad del rotor en rad/s. (cc).....	58
3.5.5.	Potencia activa(rojo) y reactiva(verde) por fase. (cc)	58
3.6.	DATOS GENERALES DE LOS TURBOGENERADORES.....	59
3.6.1.	Cálculos para la Curva de Capacidad Máxima del Generador de 15MVA.....	60
3.6.2.	Cálculos para la Curva de Capacidad Máxima del Generador de 20MVA.....	61
3.6.3.	Cálculos para la Curva de Capacidad Máxima del Generador de 54MVA.....	62
3.6.4.	Fuerza electromotriz nominal del generador con carga 0.8fp.....	63
3.6.5.	Potencia activa máxima entregada una carga de 0.8fp en pu.....	63

3.6.6.	Potencia reactiva máxima entregada a una carga de 0.8fp en pu.	63
3.6.7.	Fuerza electromotriz nominal del generador con carga de 0.88fp.	64
3.6.8.	Potencia activa máxima entregada a una carga de 0.88fp en pu.	64
3.6.9.	Potencia reactiva máxima entregada a una carga de 0.88fp en pu.	64
3.6.10.	Fuerza electromotriz nominal inducido con carga de 0.31fp.....	65
3.6.11.	Potencia activa máxima entregada a una carga de 0.31fp en pu.	65
3.6.12.	Potencia reactiva máxima entregada a una carga de 0.31fp en pu.	65
3.7.	CURVA DE CAPACIDAD DE GENERADOR TRIFÁSICO SÍNCRONO.....	66
3.7.1.	Potencias máximas entregadas por el generador.	67
3.8.	COMPENSACIÓN ACTIVA DE LOS TURBOGENERADORES.....	68
3.8.1.	Turbogeneradores de 15MVA, 20MVA, 54MVA.	68
3.9.	COMPENSACIÓN REACTIVA DE LOS TURBOGENERADORES.	69
3.9.1.	Turbogenerador de 15MVA.	69
3.9.2.	Turbogenerador de 20MVA.	71
3.9.3.	Turbogenerador de 54MVA.	74
CAPITULO IV		79
4.1.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	79
4.1.1.	Arranque con resistencias rotoricas.	79
4.1.2.	Arranque con resistencias estáticas.	79
4.1.3.	Arranque a voltaje nominal con rotor en cortocircuito.....	79

4.1.4. Compensación activa y reactiva de los 3 turbogeneradores.	80
CONCLUSIONES	81
RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Motor de inducción.....	5
Figura 2. Funcionamiento de un motor de inducción.....	6
Figura 3. Tipos de motores de corriente continua.....	6
Figura 4. Diseño estructural de una maquina síncrona.	7
Figura 5. Motor eléctrico asíncrono.....	8
Figura 6. Partes de un motor de inducción con rotor jaula de ardilla.	8
Figura 7. Motor de media tensión.....	9
Figura 8. Montaje de un rotor.	14
Figura 9. Partes de un motor eléctrico de inducción.....	15
Figura 10. Diagrama de fuerza de arranque directo de un motor.....	17
Figura 11. Diagrama de fuerza de arrancador suave.....	18
Figura 12. Diagrama de fuerza de un arranque estrella-delta.....	19
Figura 13. Diagrama de fuerza con variador de frecuencia	20
Figura 14. Diagrama de fuerza con resistencias en serie.	20
Figura 15. Diagrama de fuerza de un autotransformador.....	21
Figura 16. Resistencia de media tensión.	21
Figura 17. Tipos de resistencias.	22
Figura 18. Turbina de acción.	26
Figura 19. Turbina de reacción.....	26

Figura 20. Turbina de condensación.	27
Figura 21. Turbina de contrapresión.....	27
Figura 22. Componentes de un generador eléctrico.....	28
Figura 23. Curva de capacidad de un generador eléctrico.	30
Figura 24. Triangulo de potencias eléctricas.	31
Figura 25. Software ATPDraw.	32
Figura 26. Software Python.	33
Figura 27. Resultados obtenidos de Induction Motor Data.	36
Figura 28. Datos de conexión del motor.	37
Figura 29. Datos del flujo magnético.	37
Figura 30. Impedancias del estator.....	38
Figura 31. Impedancias del rotor.....	38
Figura 32. Datos del alimentador trifásico.	39
Figura 33. Modelado del motor con resistencias rotoricas.	40
Figura 34. Voltaje trifásico pico.....	41
Figura 35. Corriente trifásica pico en el estator.	42
Figura 36. Corriente trifásica pico de arranque en el estator.....	43
Figura 37. Corriente trifásica pico de vacío en el estator.....	43
Figura 38. Corriente trifásica pico con carga en el estator.	44
Figura 39. Corriente trifásica pico en el rotor.....	44

Figura 40. Corriente trifásica pico de arranque en el rotor.	45
Figura 41. Corriente trifásica pico de vacío en el rotor.	46
Figura 42. Corriente trifásica pico con carga en el rotor.....	46
Figura 43. Torques del motor.	47
Figura 44. Velocidad del motor.....	47
Figura 45. Potencia activa y reactiva por fase.....	48
Figura 46. Modelado del motor con resistencias estatóricas.....	49
Figura 47. Curva del comportamiento de las resistencias estatóricas.	50
Figura 48. voltajes en el alimentador y en el estator.	51
Figura 49. Corriente por fase pico en el estator.	51
Figura 50. Torques del motor.	52
Figura 51. Velocidad del motor.....	53
Figura 52. Potencia activa y reactiva por fase.....	53
Figura 53. Modelado del motor a voltaje nominal con rotor en cortocircuito.	55
Figura 54. Corriente por fase en el estator. (cc).....	56
Figura 55. Corriente trifásica pico en el rotor. (cc).....	56
Figura 56. Torques del motor. (cc)	57
Figura 57. Velocidad del motor. (cc).....	58
Figura 58. Potencia activa y reactiva por fase. (cc).....	58
Figura 59. Curva de Capacidad Máxima de Generador Trifásico Síncrono de 0.8fp.	66

Figura 60. Potencias máximas entregadas a una carga de 0.88fp en atraso.....	67
Figura 61. Potencias máximas entregadas a una carga de 0.8fp en atraso.	67
Figura 62. Potencias maximas entregadas a una carga de 0.22fp en atraso.....	68
Figura 63. Curva de Capacidad del Generar de 15MVA con 0.22fp del motor.....	71
Figura 64. Curva de Capacidad del Generador de 20MVA con 0.22fp del motor.....	74
Figura 65. Curva de Capacidad del Generador de 54MVA con 0.22fp del motor.....	78
Figura 66. Curva de Capacidad de los Generadores con fp de arranque del motor.	80

RESUMEN

El presente trabajo busca identificar el método más eficiente para el arranque de motores de media tensión con rotor bobinado con un suministro eléctrico de 13.8kV utilizando el software de simulación ATPDraw. Las corrientes transitorias que se producen durante el arranque de motores son muy nocivas para la estabilidad y calidad del suministro de energía eléctrica, por lo que constantemente se desarrollan alternativas para reducir notablemente este fenómeno.

Con la herramienta ATPDraw se modeló el comportamiento dinámico del motor en sus distintos escenarios de estudio para determinar cuál mejora la reducción significativa de las corrientes transitorias. Los resultados conseguidos, permitieron identificar el método más óptimo para la etapa de arranque reduciendo los efectos negativos que estas producen.

El estudio demostró la correcta y optima aplicación de elementos para la reducción de las corrientes transitorias, lo que reduce la intervención técnica por perturbaciones en el sistema eléctrico. En conclusión, este trabajo aporta con fundamentos sólidos en el desarrollo de alternativas para el arranque de motores de media tensión con rotor bobinado utilizado para procesos industriales.

ABSTRACT

The present work seeks to identify the most efficient method for starting medium voltage wound rotor motors with a 13.8kV power supply using the ATPDraw simulation software. The transient currents that occur during motor starting are very harmful to the stability and quality of the electrical energy supply, which is why alternatives are constantly being developed to significantly reduce this phenomenon.

With the ATPDraw tool, the dynamic behavior of the motor was modeled in its different study scenarios to determine which one improves the significant reduction of transient currents. The results achieved allowed us to identify the most optimal method for the start-up stage, reducing the negative effects that they produce.

The study demonstrated the correct and optimal application of elements for the reduction of transient currents, which reduces technical intervention due to disturbances in the electrical system. In conclusion, this work provides solid foundations for the development of alternatives for starting medium voltage motors with wound rotors used for industrial processes.

CAPITULO I

1.1. TITULO

Simulación de alternativas para el arranque de un motor de 3000HP a 13.8kV mediante la herramienta ATPDraw.

1.2. INTRODUCCIÓN

En la industria moderna, continúa siendo es un verdadero desafío lograr la estabilidad de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia, ya que es un punto muy crítico para el funcionamiento de las redes de transmisión, especialmente para sectores industriales, donde es necesario el completo equilibrio de los valores de tensión y flujo de carga. El estudio de alternativas para la estabilidad de los sistemas es de gran importancia, ya que nos permiten desarrollar varios métodos que facilitan la adaptación a las necesidades que estas demandan para su operación. Por esta razón, durante el arranque de motores de media tensión, donde las corrientes tienden a elevarse varias veces la corriente nominal, producen alteraciones que afectan tanto al motor como a todo el sistema de distribución.

Constantemente, se desarrollan alternativas para mitigar los efectos negativos que generan los arranques de motores de alta potencia, cuyo objetivo principal es preservar la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico. La reducción de las corrientes de arranque es crucial, ya que nos permiten optimizar los procesos, manteniendo la continuidad y calidad del suministro eléctrico. Para el estudio de alternativas de arranque, es necesario utilizar herramientas de simulación que nos permitan el ingreso de datos necesarios para diseñar modelos dinámicos y acceder a un cálculo eficaz de las variables que se encuentran bajo análisis. Para esto, ATPDraw es la herramienta idónea para estudiar el comportamiento de magnitudes eléctricas. Nos facilitará la ejecución de simulaciones completas, abarcando todos los componentes que conforman el sistema de potencia; estos nos proporcionarán resultados concretos y confiables que al final podrán ser utilizado a nivel industrial.

El objetivo de este trabajo es determinar cuál es el método de arranque más eficaz para el motor, que permita conservar la estabilidad y reducir pérdidas de energía, obteniendo los parámetros óptimos de operación que contribuyan a la reducción de las corrientes transitorias y su viabilidad para evitar las caídas de voltaje, orientando a nuestro sistema a mejorar la respuesta dinámica mediante el arranque, minimizando los efectos negativos que estos pueden producir.

Las medidas de protección deben ajustarse en conjunto con los sistemas de arranque, debido a que están modelados y adaptados a que accionen cuando los componentes que participan se ven presentados bajo condiciones anormales, alterando los equipos, lo que puede causar la interrupción completa de la red, provocando afectaciones económicas y productivas del cual forman parte. Si bien estos fenómenos eléctricos, solo se producen durante pequeños instantes de tiempo, a largo plazo, generan complicaciones tanto en el propio motor, líneas y equipos conectados a la red.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En un ingenio azucarero, se cuenta con un motor de 3000HP a 13.8KV de voltaje nominal, que será utilizado para una picadora de caña, este motor cuenta con un sistema de arranque mediante resistencias líquidas rotóricas, que le permitirán al motor arrancar con un voltaje inferior al nominal para reducir la corriente de arranque, una vez que el rotor haya tomado velocidad se liberan las escobillas del rotor y el estator es energizado con el voltaje nominal, conservando el giro del rotor y aumentando su velocidad, completando el proceso de arranque.

La misión detrás de este motor es durante el escenario de rotor bobinado no disponible, ya sea por no disponer de las escobillas, incorrecto funcionamiento de la bomba de solución u otros motivos que impidan el arranque original del motor. Cuando este es arrancado como un motor tradicional, como jaula de ardilla, nos genera una corriente de arranque de 8 a 9 veces la corriente nominal, produciendo inconvenientes en la línea, las protecciones, y la estabilidad del sistema, por lo que se estudiarán métodos alternativos para reducir el impacto de este arranque.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El arranque de motores de media tensión perjudican a la red debido a las corrientes transitorias, por lo que el desarrollo de alternativas para el arranque nos garantiza:

- La extensión de la vida útil del motor, ya que al no exceder de corrientes elevadas las bobinas conservan sus propiedades inductivas por más tiempo.
- La protección de las líneas de distribución, ya que al no exceder su corriente permitida reducen las intervenciones de mantenimiento, que al final se convierten en costos operativos muy relativos para la planta.

- La eficiencia energética, ya que minimizamos el desperdicio de energía causado por el efecto joule, en consecuencia, reduciendo los costos de operación.
- Los falsos disparos de las protecciones, que resultan en la interrupción total del sistema, lo que conlleva a pérdidas económicas considerables.

1.5. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El presente trabajo se delimita al estudio de 3 alternativas para el arranque de un motor de 3000HP a 13.8KV de unca picadora de caña, y reducir los efectos negativos en las redes de distribución. El desarrollo de este trabajo se enfoca en encontrar la adaptación de resistencias rotoricas y estáticas para reducir las corrientes transitorias, y el procedimiento para el arranque en paralelo con un generador para evitar las caídas de tensión.

Este motor reemplaza a uno de menor capacidad que durante su arranque, generaba transitorios de hasta 600A y provocaba la caída de tensión en la red de 69kV.

El estudio no comprenderá aspectos financieros, productivos o ambientales, única y exclusivamente tiene enfoque en un sustento técnico.

1.6. BENEFICIARIOS DE LA PROPUESTA

Los beneficiarios del presente trabajo son:

- Los autores, porque consolidar su conocimiento como profesionales, desarrollando alternativas para la reducción de corrientes transitorias.
- Las empresas proveedoras del servicio de energía en la red de 13.8kV, por medio de esta aplicación. mejora la demanda de corriente durante el arranque de motores de gran potencia. Esto permite conservar la estabilidad y confiabilidad del sistema, minimizando el impacto negativo en la red y brindando mayor seguridad a los todos los equipos conectados, lo que garantiza la continuidad y calidad del servicio.
- Los técnicos de campo, ya que refuerzan su conocimientos y habilidades para optimizar los procedimientos de arranque en motores de media tensión.

1.7. OBJETIVOS

1.7.1. Objetivo General

Simular alternativas para el arranque de un motor de 3000HP a 13.8kV mediante la herramienta ATPDraw para minimizar los efectos negativos de las caídas de tensión y sobrecorrientes durante el arranque.

1.7.2. Objetivos Específicos

- Simular un sistema de arranque mediante resistencias líquidas rotóricas para disminuir las corrientes transitorias del motor.
- Simular un sistema de arranque con resistencias estáticas para reducir el pico de corriente al arrancar.
- Simular un sistema de arranque a voltaje nominal con rotor en cortocircuito, mediante la compensación activa y reactiva de un turbogenerador para controlar las caídas de tensión.
- Aprender el uso de la herramienta ATPDraw mediante la simulación de circuitos que nos proporcionaran los mecanismos de operación, control y protección del motor.

1.8. METODOLOGÍA Y MEDIOS

A través de la investigación de campo, se recopilarán los datos necesarios para la adaptación del simulador que nos proporcionará las gráficas del comportamiento de nuestro motor. Para las simulaciones, debemos expresar de manera algebraica el comportamiento de las magnitudes que se encuentran dentro del sistema de arranque, los que incluyen capacidad de resistencias, torques en sus diferentes escenarios. Las simulaciones en ATPDraw nos permitirán diseñar el modelo dinámico necesario para el modelo de arranque por resistencias rotóricas, estáticas y a voltaje nominal. La metodología aplicada en este trabajo, responde únicamente a los objetivos específicos planteados.

CAPITULO II

2.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este capítulo, se establecen las directrices para el estudio de determinados métodos de arranque de motores de media tensión. El constante desarrollo de alternativas para el arranque de motores, es esencial en la industria, ya que permiten a los ingenieros optimizar las herramientas a disposición y desarrollar soluciones rápidas a los problemas del sector eléctrico.

2.1.1. Motores de Inducción

Un motor eléctrico es una maquina ampliamente empleado en los sectores residencial, comercial e industrial, diseñado para convertir energía eléctrica en energía mecánica. Esta transformación permite accionar equipos rotativos como ventiladores, automóviles, bombas de agua y molinos, así como otras máquinas que requieren un movimiento giratorio eficiente. Los motores eléctricos se clasifican principalmente en motores de corriente alterna y corriente continua, en cuya selección se deben considerar elementos como la clase de carga, la velocidad requerida, la fuente de alimentación y los métodos de control aplicables. [1]

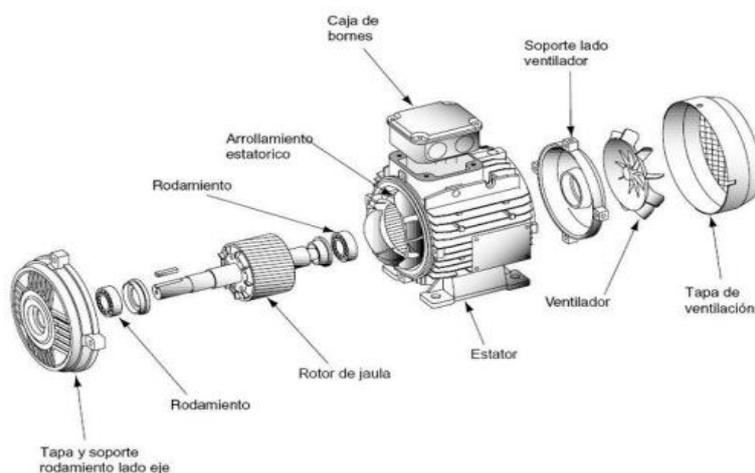


Figura 1. Motor de inducción.
Fuente: Garrido, 2022.

En base a la ilustración de la figura 1, los motores de inducción operan mediante bucles cerrados de conductores montados en una armadura rotativa, los cuales generan el par necesario a partir de las corrientes inducidas por las variaciones del campo magnético producidas por las bobinas del estator, un componente fijo.

Cuando la corriente en el estator aumenta en una dirección específica, el voltaje inducido en los conductores impulsa una corriente que genera un par rotativo en sentido horario. Sin embargo, este tipo de motor en su configuración básica no posee par de arranque, por lo que requiere la implementación de técnicas que introduzcan asimetrías en los campos magnéticos para iniciar el movimiento.

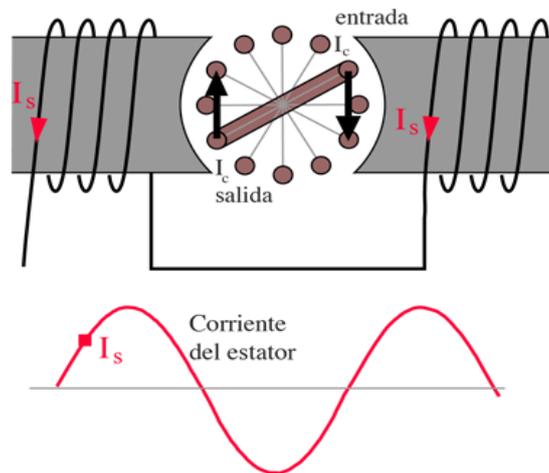


Figura 2. Funcionamiento de un motor de inducción.
Fuente: Pastrana, 2024.

2.1.2. Motores de Corriente Continua (DC)

Un motor de corriente continua es una máquina eléctrica que transforma la energía eléctrica continua (DC) en trabajo mecánico. Este tipo de motor cuenta con un rotor bobinado y utiliza imanes en su estator, operando mediante principios de magnetismo que aprovechan las fuerzas magnéticas opuestas entre los polos para generar trabajo. Existen diversas categorías de motores de corriente continua, como los de autoexcitación, imanes permanentes, compuestos e independientes, cada uno adaptado a diferentes aplicaciones. Su uso es común en procesos de automatización donde se requiere un control preciso de la velocidad [2].

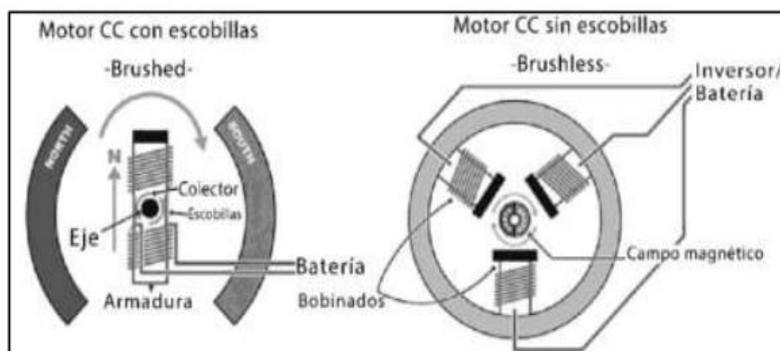


Figura 3. Tipos de motores de corriente continua.
Fuente: Quisnia, 2023.

2.1.3. Motores de Corriente Alterna (AC)

Un motor de corriente alterna es una máquina eléctrica que transforma la corriente alterna (AC) en trabajo mecánico. Este proceso se lleva a cabo mediante la aplicación de un voltaje en las bobinas situadas en el estator, lo que genera un campo magnético que permite al rotor girar y producir energía mecánica. Este tipo de motor se utiliza principalmente en aplicaciones que demandan una considerable fuerza mecánica, como en molinos y compresores [3].

2.1.4. Motores Síncronos

Los motores síncronos convierten energía eléctrica en energía mecánica rotacional, funcionando a una velocidad constante determinada por la frecuencia local de la red y el diseño propio de la máquina. A diferencia de los motores asíncronos, requieren procedimientos especiales para el arranque, salvo que cuenten con un sistema automático. Además, cuando operan sobreexcitados, consumen potencia reactiva y mejoran el factor de potencia. [4]

Este tipo de máquina es reversible, pudiendo actuar como generador de corriente alterna o como motor. Se compone de dos devanados: un inductor, ubicado en el rotor y alimentado por corriente continua, y otro inducido, formado por un arrollamiento trifásico en el estator, generalmente hecho de material ferromagnético. El rotor puede tener polos salientes o lisos, según el diseño. [5]

En su funcionamiento, al alimentar el estator con corriente alterna, se genera un campo magnético giratorio. Si el rotor está detenido y se le suministra corriente continua, se crea un campo magnético fijo en él. Cuando el rotor alcanza la velocidad síncrona, los polos inversos tanto del estator como del rotor se atraen, lo que permite que el rotor gire a la misma velocidad que el campo. [4]

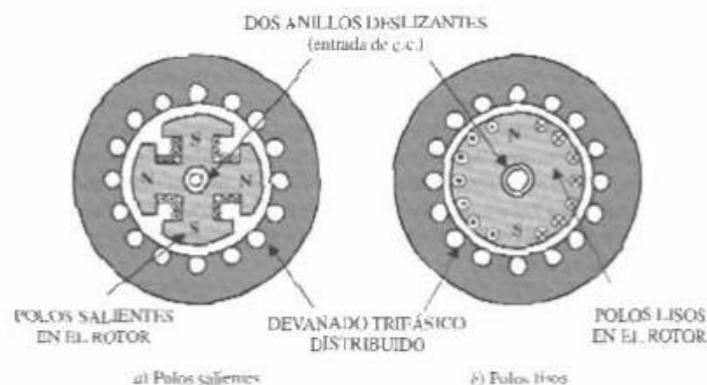


Figura 4. Diseño estructural de una máquina síncrona.
Fuente: Mollisaca, 2020.

2.1.5. Motores Asíncronos

Los motores de inducción son impulsados por corriente alterna, ya sea monofásica o trifásica. Los motores de inducción monofásicos tienen dos fases en el bobinado del estator para facilitar el autoarranque y se usan comúnmente en aplicaciones domésticas como aspiradoras y lavadoras. Por otro lado, los motores de inducción trifásicos suelen estar fabricados con una base de aluminio y se emplean en aplicaciones de propósito general con potencias inferiores a 55 kW. [6]

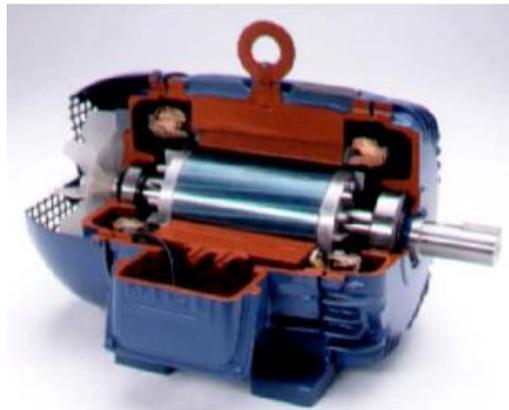


Figura 5. Motor eléctrico asíncrono.
Fuente: Potencia electromecánica, 2013.

Las máquinas asíncronas, conocidas como motores de inducción, no tienen polos salientes en sus circuitos magnéticos, operan a través de la relación de los campos magnéticos producidos por corriente eléctrica alterna. Parte de la estructura de los motores, es conservar un espacio milimétrico entre el rotor y el estator. El rotor de jaula de ardilla, característico de los motores de inducción, está compuesto por barras y anillos extremos para motores de baja capacidad, y de latón o cobre para motores de alta potencia. [7]

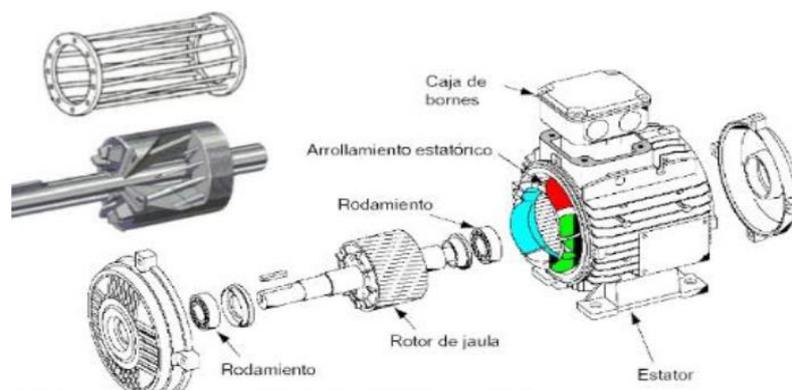


Figura 6. Partes de un motor de inducción con rotor jaula de ardilla.
Fuente: Cando & Murillo, 2023.

2.2. MOTORES DE MEDIA TENSIÓN

Un motor de media tensión es un tipo de motor eléctrico diseñado para operar a voltajes comprendidos entre 4,000 y 22,000 voltios. A pesar de la aparente simplicidad en su fabricación, ensamblaje y pruebas, el proceso es complejo y ha sido objeto de estudio por varias décadas. [8]

En el contexto industrial, se llevan a cabo pruebas de aceptación en fábrica para garantizar al usuario final que el proveedor cumple con los requisitos contractuales establecidos. Estas pruebas son responsabilidad del proveedor, quien debe registrar los resultados y elaborar un informe final para el comprador. La tensión nominal de un motor, expresada en voltios (V), indica el voltaje de entrada para el cual el motor está diseñado, y debe coincidir con el de la máquina que se pretende accionar. [9]



**Figura 7. Motor de media tensión.
Fuente: WEG, 2024.**

2.2.1. Modelo Dinámico de un motor de inducción

El modelo dinámico de un motor de inducción, explica su comportamiento a través de expresiones algebraicas que demuestran cómo cambian sus variables con el tiempo. [10] Para formular estas ecuaciones en un motor asíncrono, se han asumido ciertas condiciones: el motor debe tener un entrehierro uniforme, un devanado polifásico simétrico tanto en el estator como en el rotor, y el rotor al ser bobinado, se debe cortocircuitar las bobinas.

Además, se han simplificado algunos aspectos: se desestiman las corrientes en el hierro, como las de histéresis y Foucault; no se considera el efecto cinematográfico en los conductores; se supone que los flujos magnetizantes, responsables de la fuerza electromotriz y el par, provienen solo de la componente de inducción en el entrehierro, mientras que los armónicos remanentes generan flujos de difusión. Además, se mantienen constantes la inductancia de difusión y la inductancia magnetizantes [11].

Ecuación del Voltaje (Estator)

$$V_s = R_s I_s + j\omega_s L_s I_s + V_{se} \quad [1]$$

Ecuación de Corriente (Estator)

$$I_s = \frac{V_s - V_{se}}{R_s + j\omega_s L_s} \quad [2]$$

Ecuación del Voltaje (Rotor)

$$V_r = R_r I_r + j\omega_r L_r I_r + V_{re} \quad [3]$$

Ecuación de Corriente (Rotor)

$$I_r = \frac{V_r - V_{re}}{R_r + j\omega_r L_r} \quad [4]$$

Ecuación de Potencia Electromagnética (Torque)

$$P_e = \frac{3}{2} * \frac{V_s^2 * \sin^2(\theta)}{R_s + j\omega_s L_s} * \frac{1}{R_s + j\omega_s L_s} \quad [5]$$

Ecuación de Movimiento (Torque del Rotor)

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

[6]

Ecuación Dinámica del Rotor (Torque/Velocidad)

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

[7]

2.2.2. Momento de inercia en motores de inducción.

La inercia del motor se refiere a la resistencia del rotor a cambiar su estado de movimiento durante la rotación. Está determinado por factores como la masa, el tamaño, la estructura y el estado de rotación del rotor. Generalmente, se expresa en términos de momento de inercia, con la unidad $\text{kg}\cdot\text{m}^2$. [12] Para reducir la inercia del motor, se pueden emplear varias estrategias. Una opción es el diseño liviano, utilizando materiales de alta resistencia y optimizando la estructura del motor. Otra estrategia es el uso de dispositivos reductores que disminuyen la carga efectiva del motor, reduciendo así su inercia. Además, se pueden implementar algoritmos de control avanzados, como el control predictivo o adaptativo, que compensan la inercia y mejoran la respuesta y precisión del sistema de control [13].

La relación de inercia se define como la relación entre la inercia de la carga que debe ser movida y la inercia del motor.

Fórmula para calcular la relación de inercia.

$$J_{ratio} = \frac{J_L}{J_M}$$

[8]

- J_L = inercia de la carga que el motor debe mover
- J_M = inercia del motor

La inercia del motor es proporcionada por el fabricante, mientras que la inercia de la carga comprende todos los componentes que el motor tiene que mover, tales como los mecanismos de transmisión (por ejemplo, banda y polea, actuadores, accionamiento de tornillo, engranajes), la carga misma y los acoplamientos. [12]

La inercia de la carga total se calcula como:

$$J_L = J_D + J_E + J_C \quad [9]$$

Donde:

J_D = inercia del mecanismo de transmisión

J_E = inercia de la masa externa que debe moverse

J_C = inercia del acoplamiento

Al agregar un reductor al sistema descrito, se produce una disminución de la inercia, lo cual se refleja en el motor como el cuadrado de la relación de reducción [13].

$$J_L = \frac{(J_D + J_E + J_C)}{i^2} \quad [10]$$

i : relación de transmisión (o de reducción)

No obstante, es importante incluir en la fórmula la inercia del reductor, que se denota como J_G .

$$J_L = \frac{(J_D + J_E + J_C)}{i^2} + J_G \quad [11]$$

2.2.3. Ejes del Estator, directo y en cuadratura de un motor de inducción.

Eje directo: En el eje directo, la dirección del flujo principal actúa de manera simultánea con el campo magnético del rotor. El corriente representado por este eje, es la encargada de generar el flujo magnético en el motor, es decir, la corriente del eje directo está asociado directamente con el campo magnético producido en el motor. [14]

Eje en cuadratura: El eje en cuadratura es perpendicular al eje directo y equivale al elemento de la corriente que origina el torque en el motor. Muy diferente al eje directo, la corriente del eje en cuadratura no aporta al flujo magnético, sino que asume la función de producir la fuerza electromotriz que provoca el movimiento giratorio del rotor. [14]

La utilización de los ejes directo y en cuadratura, facilitan el control más preciso de las maquinas eléctricas en aplicaciones de control de velocidad, ya que se separan los componentes que permiten el flujo de corriente y el torque del motor. [14]

La aplicación del modelo de referencia directo–cuadratura, ha innovado el control de las máquinas de corriente alterna al acceder a la separación de los elementos como el torque y el flujo magnético. Esta expresión simplificada, permite el análisis algebraico como el modelo de sistemas de control, exclusivamente en motores de inducción síncronos. [14]

2.2.4. Ejes del Rotor, 1 directo y 2 en cuadratura de un motor de inducción.

Eje 1 directo: El eje directo está en línea con el flujo magnético primario generado por el estator. El elemento de corriente del eje directo, es el encargado de producir el campo magnético dentro del rotor. No aporta directamente al torque, aunque es esencial para establecer el flujo requerido en el rotor. [15]

Eje 2 en cuadratura: Este eje es ortogonal al eje directo y transfiere la generación de torque. El elemento de la corriente en el eje 2 en cuadratura interviene junto con el campo magnético generado en el eje 1 directo, lo que conlleva a la generación de torque electromagnético que provoca movimiento en el rotor. [15]

2.2.5. Cargas Mecánicas

Las cargas mecánicas pueden clasificarse según su variación en el tiempo o en función de la distancia. A continuación, se describen tres tipos comunes:

- **Cargas lineales crecientes:** Las cargas lineales crecientes se caracterizan por un aumento constante en la carga con respecto al tiempo o la distancia recorrida. En términos matemáticos, estas cargas pueden expresarse como una función lineal de la forma $F = kx$, donde k es una constante y x es la variable independiente (por ejemplo, el tiempo o la distancia). Este tipo de carga es común en sistemas donde el esfuerzo aplicado crece de forma uniforme a medida que aumenta la velocidad o la aceleración. [16]
- **Cargas lineales decrecientes:** Las cargas lineales decrecientes son aquellas en las que la carga disminuye proporcionalmente con el tiempo o la distancia. Se representan mediante una función lineal decreciente, como $F = -kx$, donde el signo negativo indica una reducción de la carga.

Este tipo de carga es común en sistemas que requieren desaceleración, frenado o cuando el motor experimenta una carga que se reduce a medida que se detiene o disminuye la velocidad. [17]

- **Cargas cuadráticas:** Las cargas cuadráticas se comportan de manera no lineal, aumentando o disminuyendo con el cuadrado de la velocidad o de otra variable relevante. Matemáticamente, se expresan como $F = kx^2$, donde k es una constante y x representa la variable de interés, como la velocidad. Estas cargas son comunes en sistemas donde la resistencia al movimiento aumenta de manera exponencial, lo cual es típico en situaciones que involucran fuerzas aerodinámicas o hidráulicas. [17]

2.2.6. Partes de un motor

- **Rotor:** Es el componente móvil del motor, es el responsable de que a través de la inducción electromagnética genere el movimiento mecánico deseado. Su núcleo está fabricado con un acero que permite el flujo magnético fácilmente para disipar la corriente que se induce en el rotor. [18]

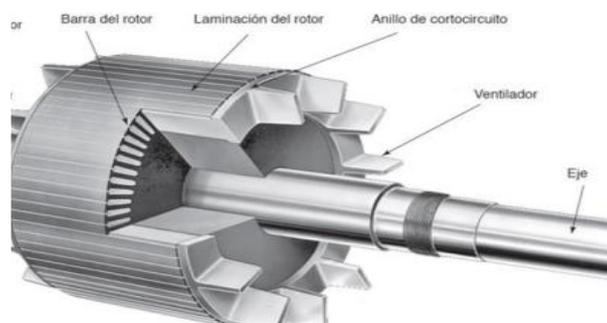


Figura 8. Montaje de un rotor.
Fuente: Garrido, 2022.

- **Estator:** Es el elemento estático del motor, está compuesto por las bobinas de cobre, que, mediante la inyección de corriente eléctrica, generará el campo magnético necesario para hacer girar el rotor que producirá el trabajo mecánico. [19]
- **Escobillas:** Es el elemento que permite el contacto eléctrico entre el rotor y el estator. Fabricado con carbón o grafito, es un material resistente a la temperatura y facilita la inyección de corriente al rotor. [20]

- **Carcasa:** Es el recubrimiento externo del motor que protege a sus elementos internos, su estructura puede cambiar según el tipo de diseño, algunos incluyen ventilación. Se suele colocar la carcasa a tierra para disipar las corrientes parasitas que se generan cuando el motor está en funcionamiento. [21]
- **Conmutador:** Es el elemento del motor que permite el cambio del sentido de la corriente entre el estator y el rotor. En el motor, cambia la dirección del campo magnético en el rotor, mientras que en un generador funciona como conductor para la inyección de corriente a la excitatriz. [22]
- **Ventilador:** Es el elemento del motor encargado de la refrigeración de este, ya que al realizar su trabajo aumenta su temperatura debido a la corriente que utiliza el motor para funcionar. En motores de baja potencia viene instalado un ventilador de plástico para su ventilación, mientras que para motores de alta potencia se debe modificar e instalar el ventilador con un motor externo. [23]
- **Rodamientos:** Estos componentes mecánicos aseguran que el rotor permanezca centrado, permitiendo su rotación al ser expuesto a un campo magnético. En condiciones de humedad, los rodamientos con recubrimiento de goma son los más adecuados, mientras que, en entornos de altas temperaturas, los recubrimientos metálicos son la mejor opción. [24]
- **Eje:** Este componente actúa como el soporte del núcleo del rotor, albergando el núcleo de acero que será expuesto al campo magnético generado por el estator. Su fabricación suele realizarse con acero de alta resistencia térmica, dado que la mayoría de los motores operan a velocidades que superan las 1600 RPM. [25]

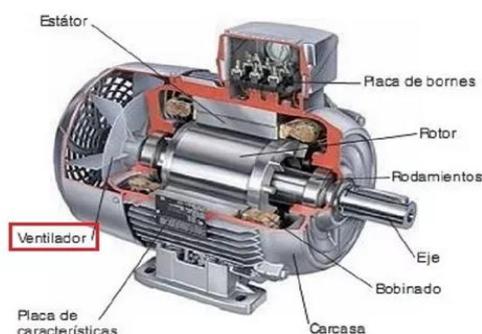


Figura 9. Partes de un motor eléctrico de inducción.
Fuente: Roldan, 2024.

2.3. ARRANQUE DE MOTORES DE MEDIA TENSIÓN

Un arrancador de media tensión es un equipo eléctrico que facilita un arranque controlado y seguro de motores que operan en rangos de voltaje medio, sustancialmente entre 2,300 y 15,000 voltios. Su propósito principal es asegurar una transición progresiva desde el estado de reposo hasta la velocidad de operación, resguardando tanto el motor como la integridad del sistema eléctrico. El arranque de motores de media tensión, típicamente entre 1 kV y 15 kV, presenta desafíos técnicos debido a las elevadas corrientes iniciales y la posible inestabilidad en la red eléctrica. [26]

Estos motores son empleados en sistemas industriales donde las cargas mecánicas suelen ser significativas, y por ello, es fundamental emplear métodos de arranque que reduzcan el impacto en el sistema eléctrico y permitan un funcionamiento eficiente [27].

2.3.1. Arranque Directo en Línea (DOL - Direct on Line)

Este método es el arranque madre de los arranques directos y es utilizado exclusivamente a motores de baja potencia, aunque también puede ser utilizado en motores de mayor capacidad si están conectados a un suministro eléctrico independiente, lo que asegura que las corrientes transitorias de arranque no afecten a los sistemas aledaños. Consiste en conectar el motor directamente a su tensión nominal de placa. (V_{INL}).

En este tipo de arranque, al igual que en los métodos de tensión reducida que se abordarán posteriormente, la corriente del rotor reducida al estator (I'_{2a}) es considerablemente mayor en comparación con la corriente en vacío (I_0), lo que permite despreciar esta última. Así, se concluye que la corriente de arranque (I_a) que circula por el estator es prácticamente equivalente a la corriente del rotor reducida al estator [28].

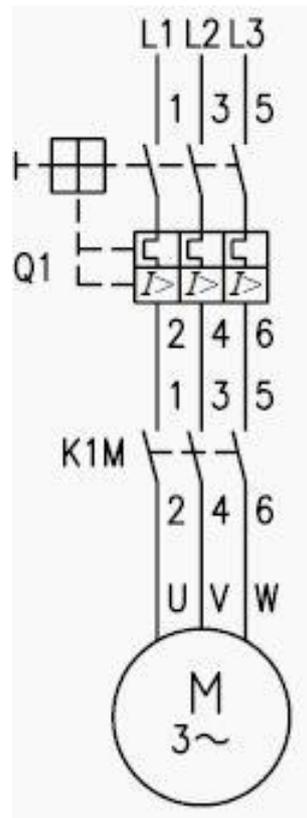


Figura 10. Diagrama de fuerza de arranque directo de un motor.
Fuente: Cominsa, 2024.

2.3.2. Arrancador Suave

Es equipo de control eléctrico permiten aumentar de manera proporcional la velocidad de un motor, partiendo de su momento de reposo hasta alcanzar su velocidad nominal necesaria para su funcionamiento. Este aparato desempeña una función crucial al controlar progresivamente la corriente, lo que asegura que el motor se encienda de forma correcta. De esta manera, se logra un arranque progresivo y eficiente, evitando impactos bruscos que podrían perjudicar su rendimiento [29].

Mediante la inyección progresiva del voltaje nominal, el motor parte del reposo hasta su velocidad nominal. Este método de arranque, es ideal para motores en el que la carga ingresa momentos después del arranque, permitiendo que la corriente nominal aumente proporcionalmente al voltaje aplicado al motor.

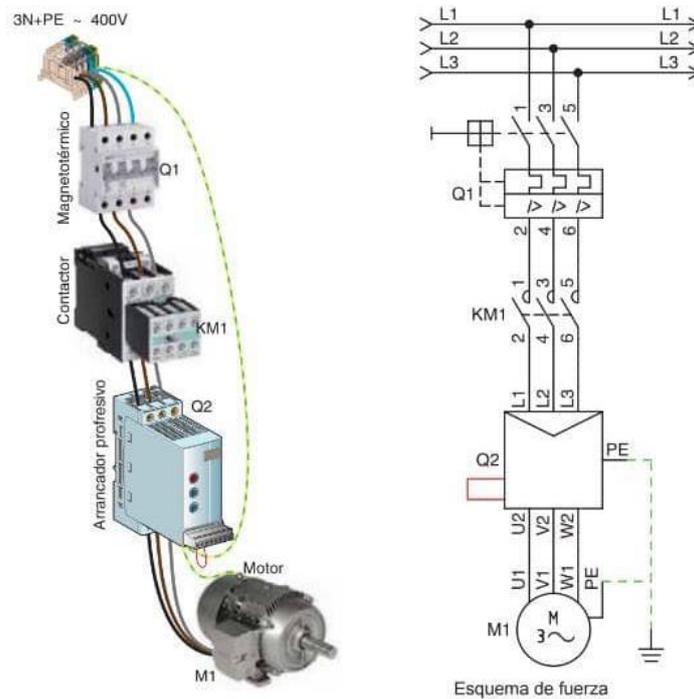


Figura 11. Diagrama de fuerza de arrancador suave.
Fuente: Reyes, 2024.

2.3.3. Arranque Estrella-Triángulo

El arranque estrella-triángulo es un método que utiliza una tensión reducida y se puede ser aplicado únicamente cuando el motor se encuentra conectado a un sistema eléctrico, cuyo voltaje de línea coincide con la tensión nominal del motor [30]. Esto significa que, para que el motor trabaje a su voltaje nominal, debe estar configurado en conexión triángulo, lo que se expresa como:

$$(V_{1L} = V_{1N}) \rightarrow \text{Conexión triángulo para que: } (V_1 = V_{1N})$$

[12]

En este enfoque, el motor se inicia inicialmente en configuración estrella. Una vez que el motor alcanza una velocidad adecuada, se realiza la conmutación de las conexiones para cambiar a la configuración triángulo, permitiendo así que funcione a su tensión nominal [30].

Este método de arranque es ideal para motores que funcionando al 57.7%(estrella), puedan inducir el torque suficiente para mover la carga mecánica conectada. Comúnmente, es utilizado en industrial donde cuenta únicamente con un servicio constante de energía eléctrica, por lo que se ven forzados a optar por estos procedimientos para no producir inestabilidad a la red eléctrica.

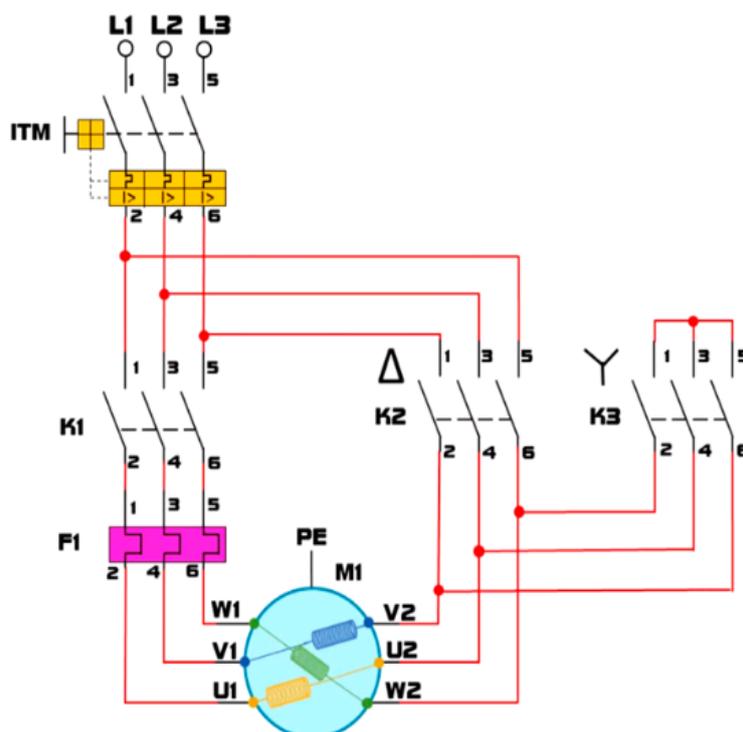


Figura 12. Diagrama de fuerza de un arranque estrella-delta.
Fuente: Electrotec, 2023.

2.3.4. Arranque con Variador de Frecuencia

Un variador de frecuencia es un equipo eléctrico – electrónico, que permite el arranque controlado de motores eléctricos mediante la regulación de la frecuencia y el voltaje de salida. Su funcionamiento consiste en la rectificación de corriente alterna (CA) a corriente continua (CC), lo que reduce la oscilación de la onda y permite un control más preciso.

Posteriormente, esta corriente continua es transformada nuevamente a corriente alterna a través de un inversor, manteniendo el control sobre las magnitudes eléctricas [31]. Este proceso permite al variador ajustar tanto la frecuencia como el voltaje en función de las necesidades específicas de la aplicación del motor, lo que resulta en una operación más eficiente y adaptativa. Los variadores de frecuencia son especialmente útiles en aplicaciones industriales, ya que no solo optimizan el rendimiento del motor, sino que también aportan a la disminución del consumo de energía y a la extensión de la vida útil del equipo, al minimizar los picos de corriente durante el arranque y operación. [32]

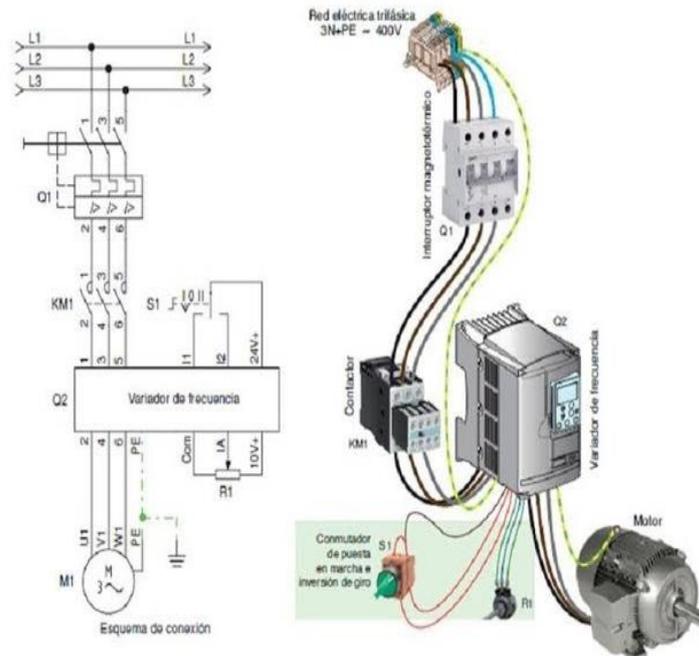


Figura 13. Diagrama de fuerza con variador de frecuencia
Fuente: Reyes, 2024.

2.3.5. Arranque con Resistencias en Serie

Un arranque con resistencias en serie permite arrancar el motor con un torque y corriente reducida, las resistencias reducen el voltaje de entrada al motor, disipando la energía en forma de calor, lo que permite obtener un voltaje menor al nominal. Este método lo podemos adecuar según las condiciones que necesitemos para el arranque. La magnitud de la resistencia debe considerarse sobre el nivel de voltaje que será aplicado sobre ellas. [33]

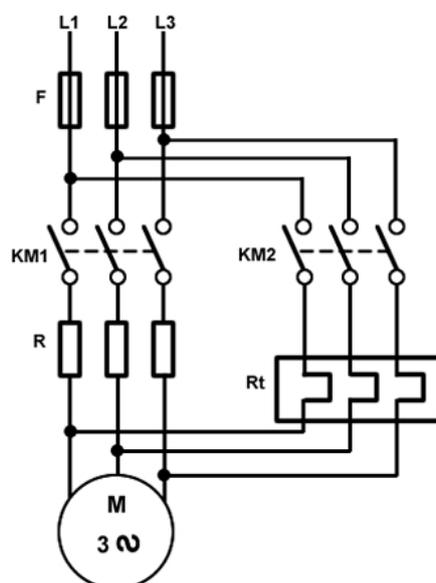


Figura 14. Diagrama de fuerza con resistencias en serie.
Fuente: Electricaplicada, 2018.

2.3.6. Arranque con autotransformador

Este método de arranque utiliza una tensión reducida para iniciar el motor. Durante el proceso, un autotransformador proporciona al motor una tensión inferior a su tensión nominal, denominada V_1 , motorL. Una vez que el motor comienza a girar, se cambia la alimentación a su tensión nominal V_{1NL} [33].

Al iniciar el motor, la tensión de línea suministrada por el autotransformador es menor que la tensión nominal. Esto resulta en que la tensión de fase del motor sea inferior a la tensión nominal. Durante el arranque, el autotransformador demanda una corriente de línea baja, mientras que el motor consume una corriente de línea alta. [34].

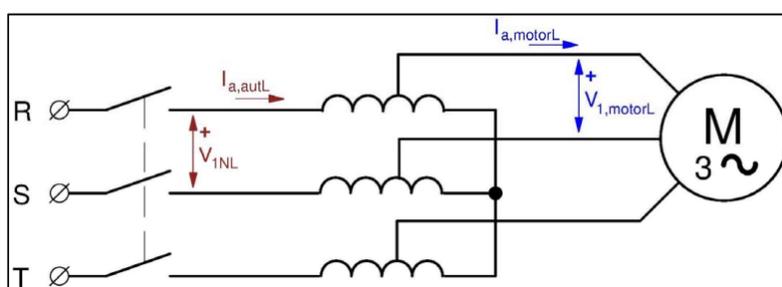


Figura 15. Diagrama de fuerza de un autotransformador.
Fuente: Pozueta, 2017.

2.4. RESISTENCIAS DE POTENCIA

Las resistencias de potencia son componentes diseñados específicamente para soportar y disipar grandes cantidades de energía eléctrica en forma de calor. Su diseño busca optimizar la disipación de potencia mientras se mantiene, en la medida de lo posible, un tamaño compacto. Estas resistencias se emplean en aplicaciones donde se requieren altos niveles de disipación térmica sin comprometer la eficiencia del sistema [35].



Figura 16. Resistencia de media tensión.
Fuente: Comind Chile, 2015.

2.4.1. Tipos de Resistencias

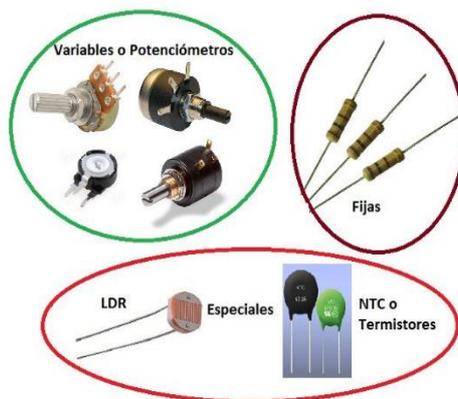


Figura 17. Tipos de resistencias.
Fuente: Cárdenas, 2024.

Las resistencias de potencia se pueden clasificar en bobinadas o fijas, con diversas opciones de montaje que se adaptan a diferentes necesidades operativas. Las resistencias bobinadas incluyen opciones como montaje en chasis, montaje en superficie y montaje de orificio pasante, cada una optimizada para aplicaciones específicas que requieren un control eficiente de la disipación térmica y estabilidad mecánica. Por su parte, las resistencias fijas abarcan resistencias de carbón y resistencias de película metálica, que ofrecen una alta precisión y confiabilidad en su resistencia durante un amplio rango de condiciones operativas [36].

Estas resistencias de potencia son fundamentales en diversas aplicaciones industriales que requieren una gestión eficaz de la energía, tales como el frenado de motores eléctricos, la puesta a tierra de sistemas eléctricos para seguridad y eficiencia, el filtrado de armónicos en sistemas de energía eléctrica, los bancos de carga y descarga de condensadores utilizados en la estabilización de circuitos, y en la tracción ferroviaria, donde son esenciales para la operación eficiente de los sistemas de locomoción [36].

2.4.2. Especialidades

Las especificaciones de las resistencias de potencia son determinantes clave para su rendimiento y durabilidad en aplicaciones de alta potencia. Entre los aspectos más relevantes se encuentran el material de la resistencia, el estilo de montaje y el tipo de cable empleado (Cárdenas, 2024).

[37]

- **Material de Construcción:** Los materiales utilizados en la fabricación de resistencias de potencia son fundamentales para garantizar la eficiencia en la disipación de calor y la resistencia a las condiciones operativas. Los materiales más comunes incluyen cerámica, película de carbono, aleaciones metálicas, óxido metálico, película metálica y diferentes tipos de cableado, como película fina o película gruesa.
- **Estilo de montaje:** El estilo de montaje influye directamente en la disipación térmica y la estabilidad operativa.
- **Tipos de Cableado:** La elección del tipo de cable es esencial para asegurar la correcta conducción de la corriente y la eficiencia térmica de la resistencia. [37]

Los cables utilizados en resistencias de potencia incluyen:

- Ala de gaviota
- Axiales
- Tipo J
- Terminales de tornillo
- Radiales
- De lengüeta

También existen resistencias sin cables para aplicaciones específicas que requieren una mayor simplicidad.

2.5. PROTECCIONES

Las protecciones eléctricas constituyen elementos fundamentales en los sistemas eléctricos, diseñados para salvar los componentes conectados a la red. Su propósito principal radica en desconectar el circuito asociado, reduciendo los daños derivados de fenómenos como sobrevoltajes o sobrecorrientes. Entre los dispositivos más utilizados se destacan los fusibles, disyuntores, interruptores automáticos y relés, entre otros. La incorporación de tecnologías avanzadas permite configurar parámetros específicos que garantizan un desempeño eficiente de estos sistemas. Un ejemplo significativo es el arranque de motores eléctricos, donde se genera una corriente elevada durante un breve intervalo. En tales casos, los sistemas están programados para evitar la desconexión del circuito a pesar de la alta corriente, asegurando la continuidad del proceso.

Estas estrategias contribuyen al funcionamiento eficiente de los sistemas eléctricos, minimizando interrupciones en las operaciones productivas asociadas. [38].

2.5.1. Protección Contra Sobrecorrientes

La protección contra sobrecorrientes es un sistema diseñado para prevenir daños en los equipos eléctricos causados por corrientes que exceden los límites establecidos para su operación. Estas sobrecorrientes pueden originarse por cortocircuitos, sobrecargas o fallas a tierra [21].

Algunos dispositivos utilizados para esta protección son:

- **Fusibles:** Se funden y abren el circuito en caso de sobrecorriente, pero deben ser reemplazados después de cada incidente [39].
- **Disyuntores:** Permiten restablecer el circuito después de ser disparados y cuentan con un tiempo de respuesta que disminuye conforme aumenta la corriente [39].
- **Interruptores en caja moldeada (MCCB):** Son empleados en instalaciones de alta potencia, interrumpiendo el flujo de corriente para proteger contra sobrecargas y cortocircuitos. [39]
- **Relés de sobrecarga:** Se utilizan para proteger motores y sus circuitos derivados del calor excesivo causado por sobrecorrientes. [39]

2.5.2. Tipos de Sobrecorrientes

- **Sobrecarga:** Este fenómeno sucede cuando un circuito trabaja por sobre su corriente nominal por periodos de tiempo muy largos. Esto puede resultar en el sobrecalentamiento de los componentes eléctricos, lo que compromete su integridad y funcionamiento. [40]
- **Cortocircuito:** Se produce cuando dos conductores entran en contacto directo, lo que genera una corriente extremadamente alta. Esta situación puede causar daños significativos al sistema eléctrico y a los dispositivos conectados. [40]
- **Falla a Tierra:** Sucede cuando un conductor con energía está haciendo contacto con un elemento conectado a tierra, creando una corriente de falla que puede ser peligrosa. Esta falla genera un riesgo inminente para la seguridad de las personas, así como para la integridad del equipo [40].

La regulación de los dispositivos de protección contra sobrecorrientes se fundamenta en normas establecidas por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE y Comisión Electrotécnica Internacional IEC. [41]

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

[13]

2.6. TURBOGENERADORES

Un turbogenerador es un conjunto de dos máquinas, constituidas por una turbina y un generador eléctrico, que conjuntamente desarrollan un mecanismo a gran escala para la generación de electricidad mediante la conversión de la energía cinética de un fluido como agua, vapor o viento. Este tipo de tecnología se encuentra activa a nivel mundial, representado por empresas de electricidad, plantas de cogeneración que utilizan el residuo de su materia prima como fuente de energía secundaria, etc. En la mayoría de procesos industriales, es agua y el vapor residual resultan ser recursos importantes que son aprovechados para la generación de energía eléctrica, promoviendo el desarrollo energético, eficiencia y sostenibilidad. Para efectos de este trabajo, serán consideradas solamente turbinas de vapor.

2.6.1. Turbinas

Los tipos de turbinas de vapor más comunes en los procesos industriales son:

Turbina de acción: Estas turbinas funcionan bajo el principio de que el vapor de alta presión es acelerado a través de boquillas, transformando su energía térmica y cinética. El vapor con gran velocidad, impulsa las paletas del rotor, obteniendo el movimiento. Esta turbina se caracteriza por que las paletas del rotor solo se impulsan directamente con el vapor y pueden ser utilizadas en procesos de bajas presiones.

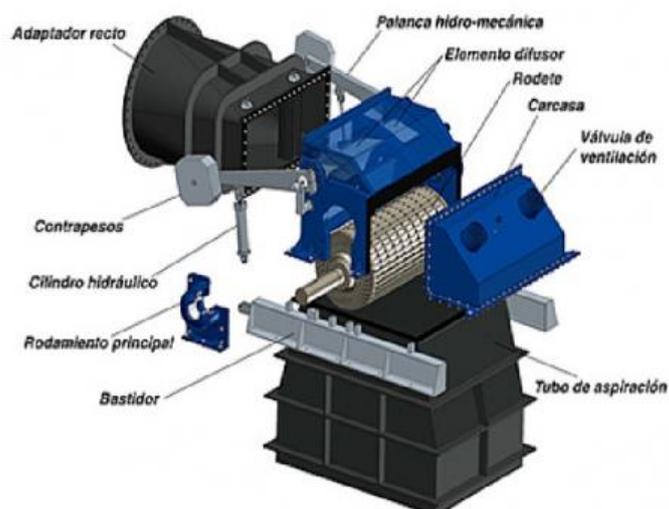


Figura 18. Turbina de acción.
Fuente: CEUPE, 2022.

Turbina de reacción: Estas turbinas, el vapor se extiende tanto en las boquillas como en las aletas móviles. La extensión del vapor dentro de las aletas, produce una fuerza de reacción que impulsa el rotor. Se puede utilizar el cambio de velocidad o presión del vapor. Se caracteriza por ser de un diseño complejo y preciso por el sistema de las aletas, además de ser el adecuado para procesos donde se trabajen con altas presiones.



Figura 19. Turbina de reacción.
Fuente: CEUPE, 2022.

Turbina de condensación: Estas turbinas poseen un diseño que maximiza la extracción de la energía térmica del vapor. Luego de atravesar por la turbina, se reduce la temperatura del vapor dentro de un condensador, convirtiéndolo en estado líquido a baja presión, esto permite obtener una mejor caída de la presión a través de la turbina. Se caracteriza por que los condensadores facilitan la recuperación de agua para volver a utilizarse en el proceso.



Figura 20. Turbina de condensación.
Fuente: ETR Internacional, 2015.

Turbina de contrapresión: Estas turbinas descargan el vapor a una presión mayor a la atmosférica después de pasar por la turbina. Este vapor no es condensado, por lo que es utilizado dentro del mismo proceso como calefactor o dentro del mismo proceso. Se caracteriza porque su residuo puede volver a utilizarse, volviéndolo un ciclo auto eficiente.



Figura 21. Turbina de contrapresión.
Fuente: DTEC, 2018.

2.6.2. Generadores Eléctricos

Un generador eléctrico es una máquina eléctrica diseñada para generar una diferencia de potencial entre dos terminales, a través la transformación de trabajo mecánico en electricidad. Este proceso de conversión se logra a través de la intervención de un campo electromagnético con un grupo de conductores ubicados en el devanado de armadura, conocido también como estator. [42]

Cuando ocurre un movimiento referente entre los conductores y el campo magnético, se induce una fuerza electromotriz (FEM), que genera una corriente eléctrica. Esta corriente es generalmente alterna, y por lo general la mayoría de estas máquinas generan corriente alterna tipo trifásica. [43]

Los generadores se dividen en dos tipos principales: primarios y secundarios, según su aplicación dentro de los sistemas eléctricos [43].

2.6.3. Partes del Generador

Los componentes esenciales de un generador eléctrico incluyen el estator, el rotor, gobernador y colectores. Estos elementos trabajan en conjunto para transformar la energía mecánica en energía eléctrica, asegurando su funcionamiento adecuado y eficiente. Cada parte cumple una función específica para mantener la operación continua y garantizar el rendimiento del generador bajo diversas condiciones de carga y demanda [44].

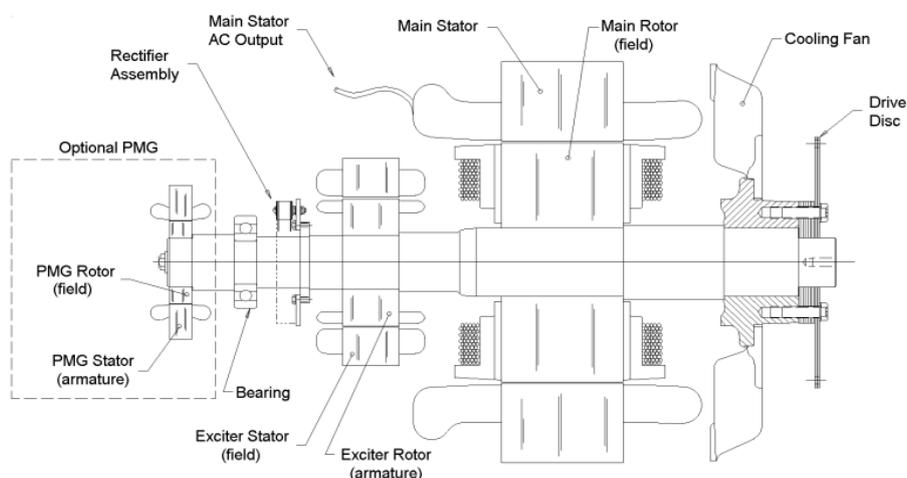


Figura 22. Componentes de un generador eléctrico.
Fuente: Marathon Electric, 2003.

- **Estator:** El estator, elemento fijo del generador eléctrico, contiene el devanado de la armadura dispuesto generalmente en núcleos de acero laminado para maximizar la eficiencia del flujo magnético y minimizar las pérdidas por corrientes parásitas. En generadores trifásicos, incluye tres devanados conectados en configuración estrella, lo que facilita la operación en redes eléctricas. Según la máquina, el estator tiene diferentes funciones: en corriente continua, aloja el circuito magnético del campo; en corriente alterna, interactúa con el campo rotante para generar par motor. Sus principales partes incluyen una configuración en estrella, una configuración en triángulo y los componentes mecánicos que garantizan la estructura y funcionamiento del equipo [45].
- **Rotor:** El rotor es el elemento móvil del generador, acoplado al motor que lo impulsa. Está compuesto por un conjunto de imanes o bobinas de campo, cuya función principal es generar un campo magnético giratorio. Este campo interactúa con las bobinas del estator, induciendo una corriente eléctrica [46].

2.6.4. Tipos de rotores

- **Rotor de imán permanente:** Utiliza imanes permanentes para producir el campo magnético.
- **Rotor de electroimán:** Genera el campo magnético mediante el flujo de una corriente eléctrica [46].
- **Gobernador:** Un gobernador de un generador eléctrico es un dispositivo clave que regula la velocidad y potencia del generador, garantizando un funcionamiento eficiente. Existen principalmente dos tipos: mecánica y electrónico. El gobernador monitorea continuamente la velocidad del rotor y ajusta el suministro de combustible según las variaciones de carga para mantener el equilibrio entre el par mecánico y eléctrico [47].
- **Colectores:** Los colectores de un generador eléctrico, o anillos colectores, son componentes esenciales que permiten la transferencia continua de electricidad entre el rotor y el estator. Fabricados generalmente de cobre, trabajan con escobillas de carbono para mantener el contacto durante la rotación. Sin ellos, el movimiento del rotor podría interrumpir la generación de electricidad, lo que los hace cruciales para el rendimiento eficiente del generador [48].

2.6.5. Curva de Capacidad de Generadores Trifásicos

La curva de capacidad es una herramienta indispensable para determinar la carga máxima que un alternador trifásico puede soportar bajo un factor de potencia específico. En situaciones donde la carga presenta un factor de potencia bajo y en atraso (inductivo), se requiere una excitación adicional, lo que incrementa el riesgo de sobrecalentamiento del rotor y daños térmicos potenciales. Por otro lado, una carga con factor de potencia en adelanto (capacitivo) puede inducir inestabilidad en el sistema. Si el factor de potencia en adelanto se aproxima a cero, puede ocurrir autoexcitación, resultando en un aumento del voltaje y un posible desplazamiento de polos. Por estas razones, es fundamental que el alternador opere dentro de los límites establecidos por el área demarcada en la curva de capacidad para garantizar su integridad y funcionamiento seguro [49].

Para interpretar la curva de capacidad, se debe conocer el factor de potencia operativa del generador. A partir de este valor, se trazan líneas radiales hasta la intersección con el área demarcada en la curva. En esta intersección, los valores de potencia activa (kW) pueden leerse directamente del eje vertical, mientras que los valores de potencia reactiva (kVAR) se obtienen del eje horizontal, ambos expresados en unidades por unidad (pu). Para calcular la potencia aparente (kVA) en pu, se debe seguir la trayectoria circunferencial desde el punto de intersección, utilizando los semicírculos guía hasta alcanzar el eje horizontal correspondiente. Este procedimiento permite una evaluación precisa de las condiciones de operación del generador, asegurando su funcionamiento dentro de los parámetros seguros y optimizando su rendimiento en diversas condiciones de carga [50].

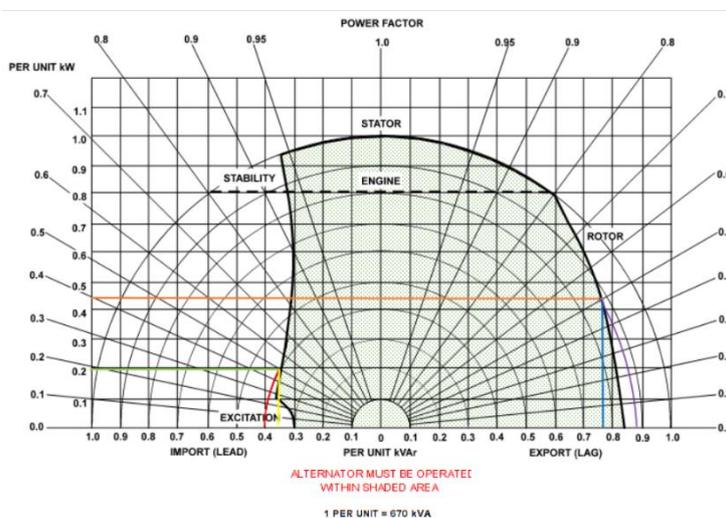


Figura 23. Curva de capacidad de un generador eléctrico.
Fuente: Generator Technologies, 2020.

2.6.6. Tipos de Potencia Eléctrica

- **Potencia Activa:** La potencia activa se expresa en vatios (W) y representa la energía eléctrica realmente empleada por un dispositivo o sistema dentro de una red eléctrica para llevar a cabo un trabajo útil. En términos prácticos, corresponde a la energía que acciona motores, produce iluminación o permite el funcionamiento de aparatos eléctricos [51].
- **Potencia Reactiva:** La potencia reactiva (Q) se mide en voltio-amperio-reactivo (VAR) y representa la energía eléctrica que circula entre los conductores de fase y el conductor neutro en una red trifásica, sin realizar trabajo mecánico. Esta potencia es generada principalmente por cargas inductivas y capacitivas, y aunque es esencial para el funcionamiento de estas cargas, no contribuye directamente a la realización de tareas [52].
- **Potencia Aparente:** La potencia aparente se mide en voltios-amperios (VA) y representa la potencia eléctrica total disponible en una red, sin importar si se utiliza efectivamente para realizar trabajo. Esta potencia se compone de potencia activa y potencia reactiva, y se puede entender como potencia aparente [53].

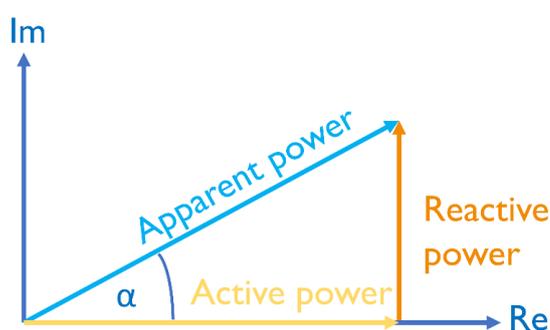


Figura 24. Triangulo de potencias eléctricas.
Fuentes: Espino, 2023.

2.7. SOFTWARE ATPDRAW

ATPDraw es un software de simulación gráfico utilizado para modelar y simular sistemas de potencia, que enfatiza su aplicación en el análisis de fenómenos eléctricos como sobrevoltajes y picos de corriente. Este programa simplifica el diseño al ofrecer una interfaz dinámica que minimiza la intervención de programación manual [54].

2.7.1. Funcionalidades de ATPDraw

- **Modelado de Circuitos:** Permite crear visualmente conexiones eléctricas. Los usuarios pueden seleccionar diversos componentes, como resistencias, motores, transformadores y demás componentes eléctricos, para integrarlos en un esquema de red.
- **Simulación de Transitorios:** Después de modelar el circuito, se pueden realizar simulaciones para observar cómo responde el sistema ante transitorios.
- **Visualización de Resultados:** Al finalizar la simulación, ATPDraw proporciona herramientas para analizar variables como voltaje y corriente, entre otras [54].

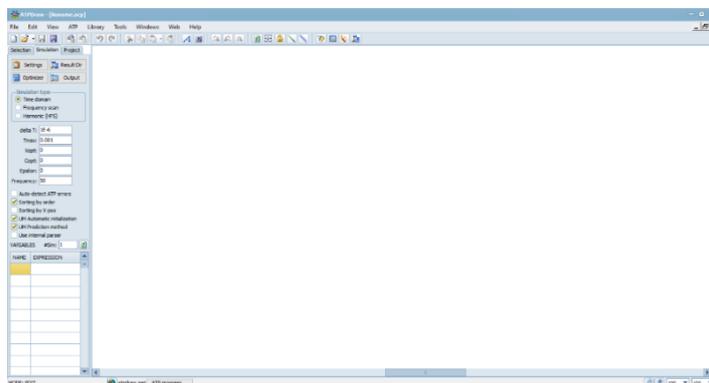


Figura 25. Software ATPDraw.
Fuente: ATPDraw.

2.8. SOFTWARE PYTHON

Python es un software de programación de alto nivel, sencillo y versátil, ideal para el desarrollo de páginas web, videojuegos, análisis de datos, automatismos informáticos, inteligencia artificial, ente otros. Gracias a su extensa línea de librerías, es ideal para el diseño de graficas en dos dimensiones con calidad visual. Tiene la capacidad de manipular grandes volúmenes de datos, personalizar estilos visuales y compartir gráficos interactivos. Este programa tiene un amplio uso en el desarrollo de tecnologías actuales que facilitan el avance de la ciencia informática compitiendo con las mayores empresas de programación a nivel internacional.

```

class UclvRedSDN( Topo ):
    "Topologia de red SDN."
    def __init__( self ):
        "Creando una topologia personalizada."
        # Inicializando la topologia
        Topo.__init__( self )
        # Creando host y switch
        h1 = self.addHost( 'h1' )
        h2 = self.addHost( 'h2' )
        h3 = self.addHost( 'h3' )
        s1 = self.addSwitch( 's1', cls=OVSKernelSwitch )
s2 = self.addSwitch( 's2', cls=OVSKernelSwitch )
s3 = self.addSwitch( 's3', cls=OVSKernelSwitch )
        # Creando los enlaces entre los nodos
        self.addLink( h1, s1 )
        self.addLink( s1, s2 )
        self.addLink( h2, s2 )
        self.addLink( s2, s3 )
        self.addLink( s3, h3 )

topos = { 'tradicional': ( lambda:
UclvRedTradicional() ), 'sdn': ( lambda: UclvRedSDN() ) }

```

**Figura 26. Software Python.
Fuente: Python.**

CAPITULO III

3.1. DESARROLLO DEL FUNCIONAMIENTO

En este capítulo se analizan tres métodos de arranque para motores de media tensión, realizando los cálculos y simulaciones necesarias para evaluar su desempeño. Con base en los resultados, se determina el método más eficiente considerando criterios técnicos y operativos. Además, se selecciona un turbogenerador adecuado para garantizar un arranque óptimo del sistema.

3.1.1. Descripción general

El proyecto consiste arrancar un motor de 3000HP a 13.8kV configurado en estrella, a través de 3 métodos diferentes. Estos arranques serán mediante resistencias rotóricas., resistencias estáticas., a voltaje nominal con rotor en cortocircuito. Para la demostración de estos arranques vamos a considerar un servicio eléctrico constante de 13.8kV y también la utilización de turbogeneradores para la compensación activa y reactiva durante el arranque de los motores. La aplicación de estas formas de arranque nos demostrará cual es el más eficiente a la hora de reducir la corriente y el tiempo de arranque para garantizar la estabilidad del servicio eléctrico de 13.8kV, además de identificar cuál de los 3 turbogeneradores logra tolerar la potencia de arranque del motor.

3.2. DATOS GENERALES DEL MOTOR.

El motor de inducción trifásico de 3000HP, 4 polos, con velocidad de 1800rpm, frecuencia de operación de 60Hz, en conexión estrella, rotor bobinado, de anillos rozantes y reóstato, operando a 13.8kV nominal. Es utilizado en un ingenio azucarero como picadora de caña. Se conecta el voltaje nominal tanto al rotor como al estator, con 1.9kV y 13.8kV respectivamente. Inicialmente se inyecta voltaje en el rotor para su arranque, que permite mediante una corriente en el rotor reducir el torque de arranque, ganando velocidad para, posteriormente, conectarse en cortocircuito y entrar en funcionamiento con el estator a voltaje nominal.

3.2.1. Comportamiento del motor trifásico en la red de distribución.

Se detallan las propiedades mecánicas y eléctricas del motor en funcionamiento.

Datos
Motor de 3000HP
 $V_L = 13800V$
 $I_L = 111.3A$
 4 Polos
 60 Hz

Torque inducido de arranque:

$$T_{ind.arr} = 38257 \text{ N.m} \quad [14]$$

Torque nominal:

$$T_{nom} = 11947 \text{ N.m} \quad [15]$$

Torque de rozamiento propio del eje del rotor sobre los rodamientos:

$$T_{roz} = 5\%t. nom = 597.35 \text{ N.m} \quad [16]$$

Momento de inercia (masa del motor):

$$J_m = 100.08 \text{ Kg.m}^2 \quad [17]$$

Velocidad nominal del motor:

$$n. nom. rotor = 1789 \text{ rpm} = 187,34 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad [18]$$

Velocidad de campo del motor en una frecuencia de 60Hz:

$$nB = \frac{60 * 60}{pp} = \frac{3600}{2} = 1800 \text{ rpm} \quad [19]$$

Deslizamiento nominal:

$$S_{nom} = \frac{1800 - 1789}{1800} = 0.01 \quad [20]$$

Rendimiento:

$$R_{end.nom} = 95\% = 0.95$$

$$fp_{nom} = 0.88 \quad [21]$$

Relación de corriente de rotor bloqueado sobre la corriente nominal:

$$\frac{I_{rb}}{I_{nom}} = 6$$

[22]

3.2.2. Datos de la calculadora Induction Motor Data.

$$\begin{aligned} S_{nom} &= 0.01 \\ \text{Rend. nom} &= 0.95 \\ fp. \text{ nom} &= 0.88 \\ L_m &= 0.509187 \text{ H} \\ L_1 = L_2 &= 0.015606 \text{ H} \\ R_d &= 2.40225 \text{ ohm} \\ R_1 &= 0.446340 \text{ ohm} \end{aligned}$$

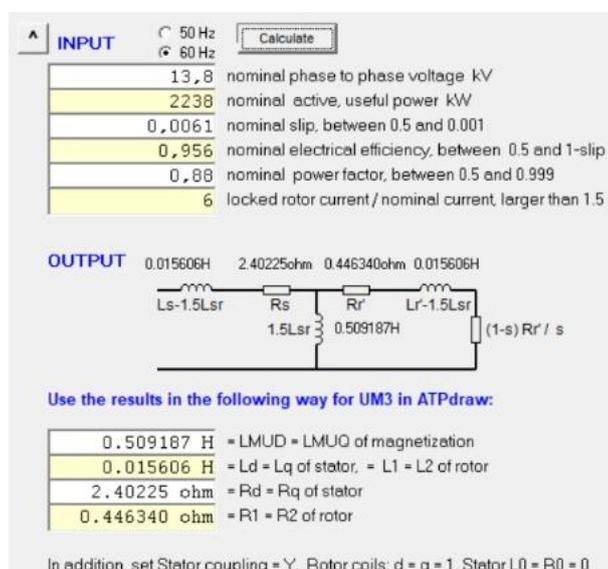


Figura 27. Resultados obtenidos de Induction Motor Data.

Fuente: Induction Motor Data

Se utilizó la calculadora Induction Motor Data para obtener las variables del campo magnético y flujo magnético tanto del estator como del rotor, lo que permitirá simular el comportamiento dinámico del motor con valores reales.

Ejes dentro del estudio

$L_d = L_q \rightarrow$ Eje directo y en cuadratura: inductancia de magnetización del núcleo.

$R_d = r_q \rightarrow$ Estator: resistencia del devanado por fase.

$R_1 = R_2 \rightarrow$ Rotor: resistencia del rotor en eje 1 y 2.

$LM \rightarrow$ Núcleo: inductancia de magnetización.

3.2.3. Datos para el modelado del motor.

Universal machine: UM_4

Attributes

General Magnet Stator Rotor Init

Stator coupling: Y

Pole pairs: 2

Frequency: 60

Tolerance: 0.0188

NODE	PHASE	NAME
Stator	ABC	X0011
M_NODE	1	XX0005
Rotor	ABC	X0001
Neut	1	

Order: 0 Label: UM4

Comment:

Output

TQOUT: 0 • 1 • 2 • 3

OMOUT: 0 • 1 • 2 • 3

THOUT:

CURR:

Machine #: 1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 28. Datos de conexión del motor.

Fuente: ATPDraw.

Para la configuración de las propiedades eléctricas del motor en la herramienta ATPDraw, dentro de la sección Atributos, configuramos la conexión del motor en estrella, la frecuencia de operación a 60Hz y la cantidad de pares de polos que posee.

Universal machine: UM_4

Attributes

General Magnet Stator Rotor Init

LMUD: 0.509187

LMUQ: 0.509187

Saturation:

• none

○ d

○ q

○ both

○ symm

NODE	PHASE	NAME
Stator	ABC	X0011
M_NODE	1	XX0005
Rotor	ABC	X0001
Neut	1	

Order: 0 Label: UM4

Comment:

Output

TQOUT: 0 • 1 • 2 • 3

OMOUT: 0 • 1 • 2 • 3

THOUT:

CURR:

Machine #: 1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 29. Datos del flujo magnético.

Fuente: ATPDraw.

De la información obtenida de la calculadora Induction Motor Data, configuramos la inductancia de magnetización del motor, tanto en el eje directo como en el eje de cuadratura.

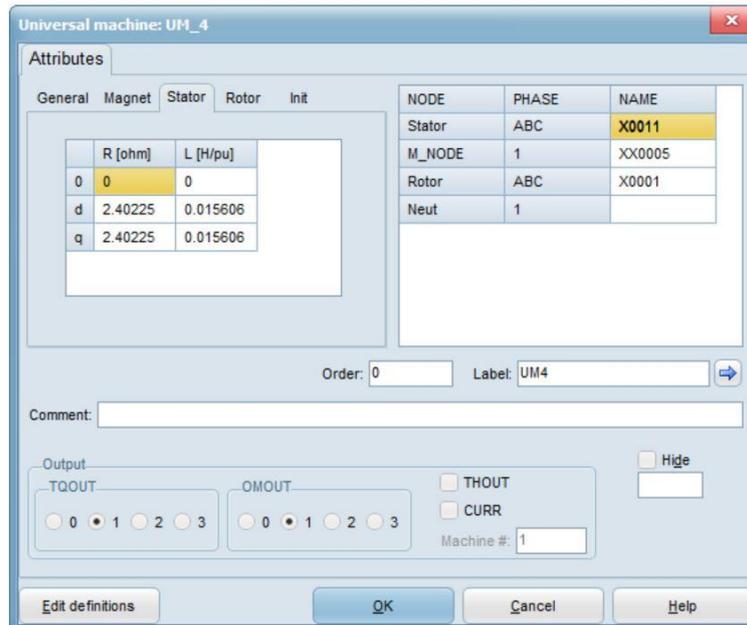


Figura 30. Impedancias del estator.

Fuente: ATPDraw.

De la información obtenida de la calculadora Induction Motor Data, configuramos las impedancias del estator tanto en el eje directo como en el eje de cuadratura.

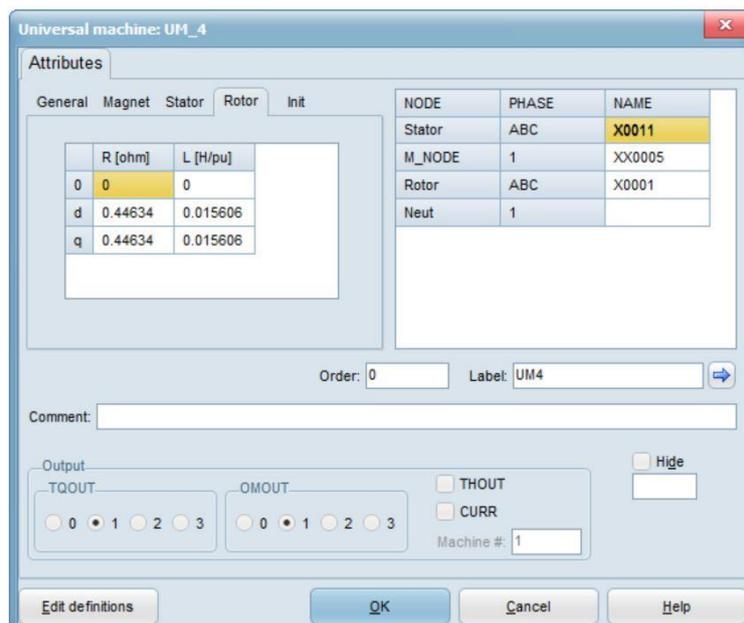


Figura 31. Impedancias del rotor.

Fuente: ATPDraw.

De la información obtenida de la calculadora Induction Motor Data, configuramos las impedancias del rotor tanto en el eje directo como en el eje de cuadratura.

3.2.4. Modelado para el alimentador trifásico.

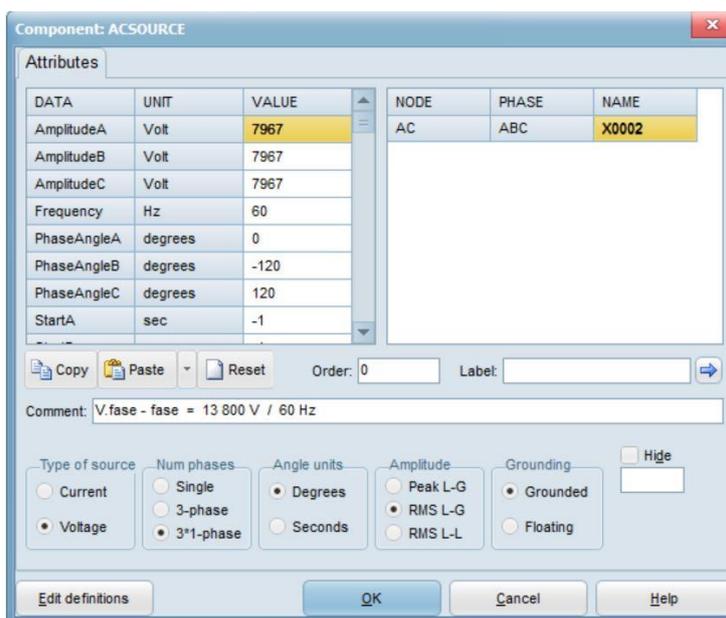


Figura 32. Datos del alimentador trifásico.
Fuente: ATPDraw.

Como parte de la simulación de arranque del motor, se debe configurar el alimentador trifásico, con un voltaje de fase a neutro de 7967V, y un voltaje de fase a fase de 13.800V; cada línea con un desfase de 120° operando a una frecuencia de 60Hz.

3.3. ARRANQUE CON RESISTENCIAS ROTORICAS.

A continuación, se detalla el comportamiento del motor con el uso de resistencias rotoricas.

3.3.1. Bloque de operación del motor con resistencias rotóricas.

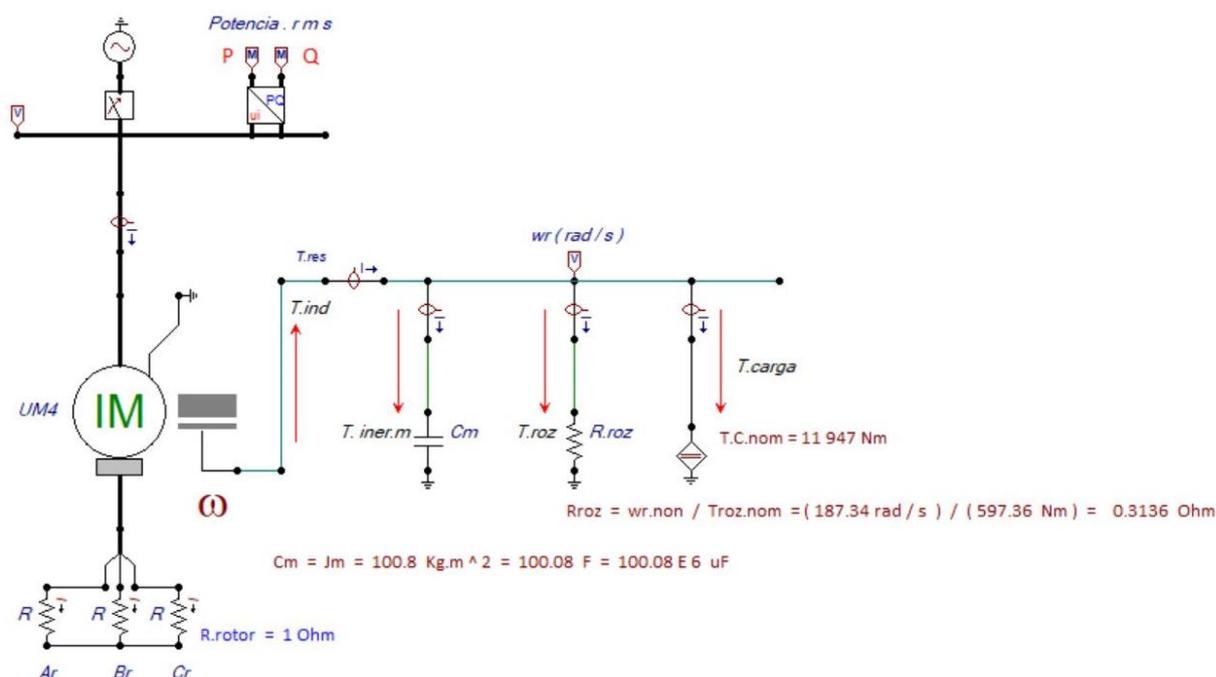


Figura 33. Modelado del motor con resistencias rotoricas.

Fuente: ATPDraw.

El diagrama muestra un motor de inducción trifásico en su conexión estrella, rotor bobinado con resistencias, conectado a voltaje nominal de 13.8kV.

En el esquema, se representa el motor con su par inducido, la inercia del rotor, las pérdidas producidas por la fricción, su bloque de resistencias rotoricas, alimentador trifásico, seccionador de media tensión, voltímetro para medir el voltaje del alimentador, vatímetro para medir la potencia activa consumida, y un varímetro para medir la potencia reactiva consumida; se consideró un valor de 1 ohm para las resistencias rotoricas y un tiempo de 3 segundos para el ingreso de la carga.

Voltaje trifásico senoidal pico: 11266 V

Voltaje trifásico rms: 7967 V

Voltaje trifásico de fase-fase rms: 13800 V

3.3.2. Voltaje trifásico pico.

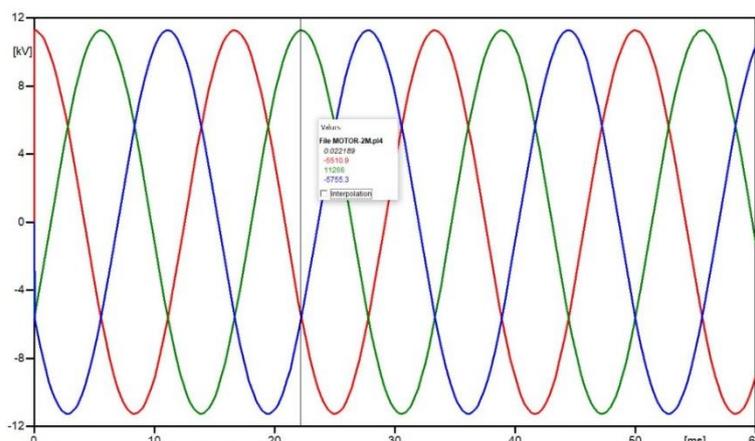


Figura 34. Voltaje trifásico pico.

Fuente: ATPDraw.

Onda Sinusoidal: Cada una de las fases A, B, C tiene forma de una onda sinusoidal, que representa a un sistema trifásico de voltaje alterno. Las ondas están desfasadas 120° entre sí, así se caracteriza como un sistema balanceado.

Amplitud: La amplitud máxima de las ondas de voltaje nos indica que el pico de cada fase es de 11226V. Para obtener el valor RMS de fase a neutro, que es el que nos arrojan los equipos de medición normalmente, realizamos la siguiente operación.

$$V_{rms} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}} = \frac{11226}{\sqrt{2}} = 7967 \text{ V}$$

[23]

Para obtener el valor RMS de fase a fase, realizamos la siguiente operación:

$$V_{3\phi.rms} = V_{rms} * \sqrt{3} = 7967 * \sqrt{3} = 13800 \text{ V}$$

[24]

El torque que genera el motor traducido en magnitudes eléctricas es análogo a la corriente eléctrica, por lo que existe una relación directa entre el torque y la corriente.

$$1 \text{ N.m} = 1 \text{ Amperio}$$

[25]

La velocidad del rotor traducido en magnitudes eléctricas es análoga a la tensión eléctrica, por lo que existe una relación directa entre velocidad y voltaje.

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

[27]

La inercia que posee el rotor traducido en magnitudes eléctricas es análoga a la reactancia capacitiva, por lo que existe una relación directa entre inercia y capacitancia.

$$1 \text{ Kg.m}^2 = 1 \text{ Faradio}$$

[28]

3.3.3. Corriente trifásica pico en el estator.

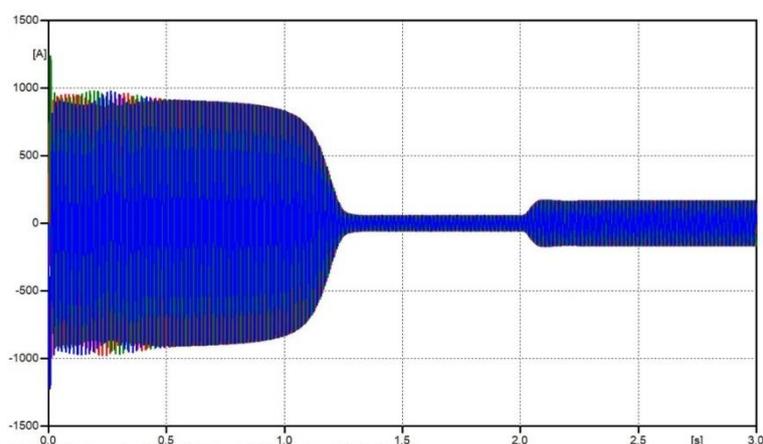


Figura 35. Corriente trifásica pico en el estator.
Fuente: ATPDraw.

Las corrientes trifásicas del motor muestran su comportamiento durante sus 3 etapas. Durante el arranque, desde el inicio hasta 0.5 segundos, las corrientes tienen una amplitud oscilante y se mantienen altas debido a los transitorios inherentes al flujo magnético del rotor hasta 1.2 segundos. Al entrar a su operación en vacío, la corriente disminuye significativamente ya que solo necesita energía para vencer el deslizamiento mínimo del motor. Cuando ingresa la carga a los 2 segundos, la corriente se incrementa proporcionalmente hasta estabilizarse y conseguir su punto de operación normal. Las corrientes trifásicas se caracterizan por tener la misma amplitud, frecuencia y desfase de 120°.

3.3.4. Corriente trifásica pico de arranque en el estator.

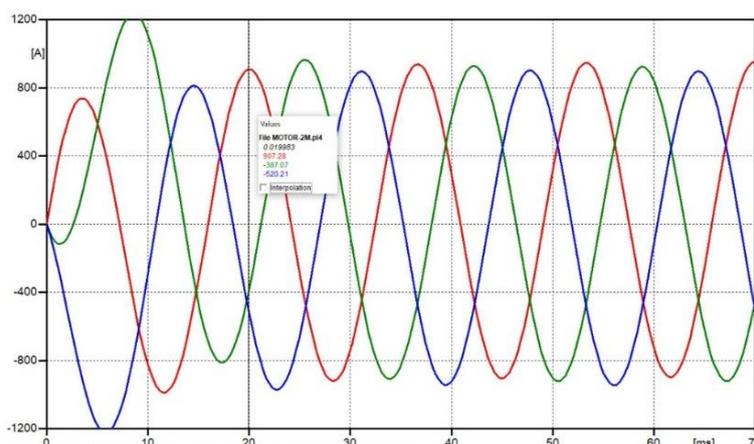


Figura 36. Corriente trifásica pico de arranque en el estator.
Fuente: ATPDraw.

Durante el arranque en 0.5 segundos, la amplitud y frecuencia oscila levemente debido a los efectos transitorios del arranque del motor. La corriente alcanza una amplitud máxima de 907A, para conseguir la aceleración del motor desde su momento de inercia. Estas variaciones se producen por la interacción entre el motor y el flujo magnético. Tras este inicio, la corriente se mantiene en un nivel elevado y constante, indicando que el motor aun demanda de energía para alcanzar su velocidad nominal.

3.3.5. Corriente trifásica pico de vacío en el estator.

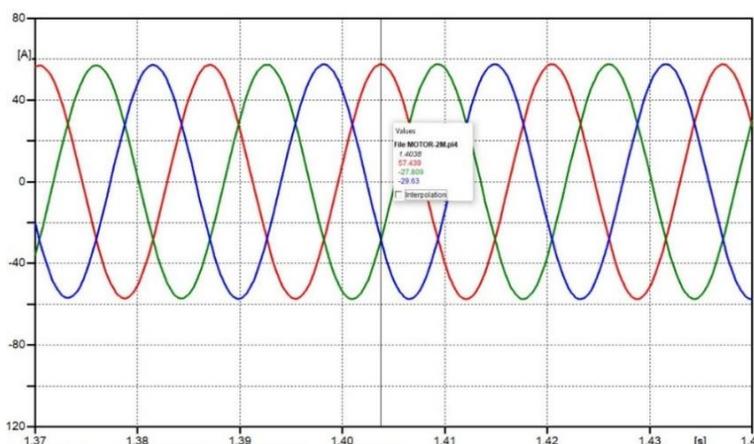


Figura 37. Corriente trifásica pico de vacío en el estator.
Fuente: ATPDraw.

A los 1.2 segundos, el motor ingresa a su operación en vacío, donde la corriente disminuye rústicamente y estabilizándose con una amplitud máxima de 57A. Esto nos indica que el motor ya alcanzo su velocidad nominal y solo demanda de la energía para vencer las perdidas mecánicas propias del motor.

3.3.6. Corriente trifásica pico con carga en el estator.

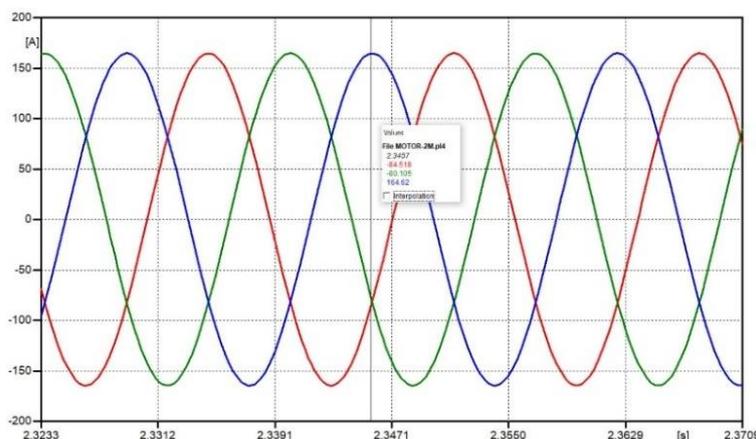


Figura 38. Corriente trifásica pico con carga en el estator.
Fuente: ATPDraw.

Al momento de ingresar la carga a los 2 segundos, la corriente alcanza una amplitud máxima de 164A, para entregar el torque que necesita la carga mecánica. Las corrientes se estabilizan en amplitud y frecuencia, conservando su balance de 120° entre fases.

3.3.7. Corriente trifásica pico en el rotor.

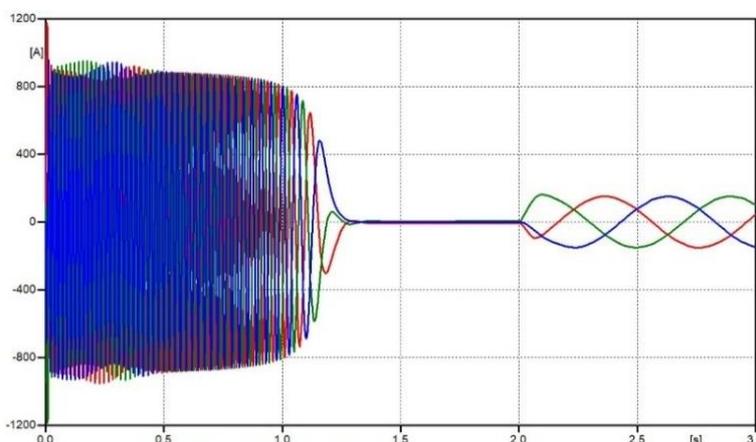


Figura 39. Corriente trifásica pico en el rotor.
Fuente: ATPDraw.

Durante el arranque, la amplitud de la corriente en el rotor es elevada ya que el deslizamiento es cercano a 1. La frecuencia inicialmente se aproxima a la del estator y disminuye contantemente a medida que el rotor acelera. La demanda de elevada energía, indica la necesidad de un torque adecuado para superar la inercia del motor.

Al alcanzar su velocidad nominal, la corriente del rotor disminuye significativamente, ya que el deslizamiento es prácticamente 0. En esta etapa, la frecuencia también es igual a 0, indicando que el rotor se ha sincronizado con el campo magnético del estator. La magnitud de la corriente refleja solamente las pérdidas inherentes a la mecánica del motor. Al ingresar la carga, hay una desaceleración mínima, lo que nos indica que el deslizamiento se incrementó, provocando un incremento considerable de la corriente hasta alcanzar su nominal. La frecuencia se mantiene baja ya que ha alcanzado su velocidad nominal de trabajo.

3.3.8. Corriente trifásica pico de arranque en el rotor.

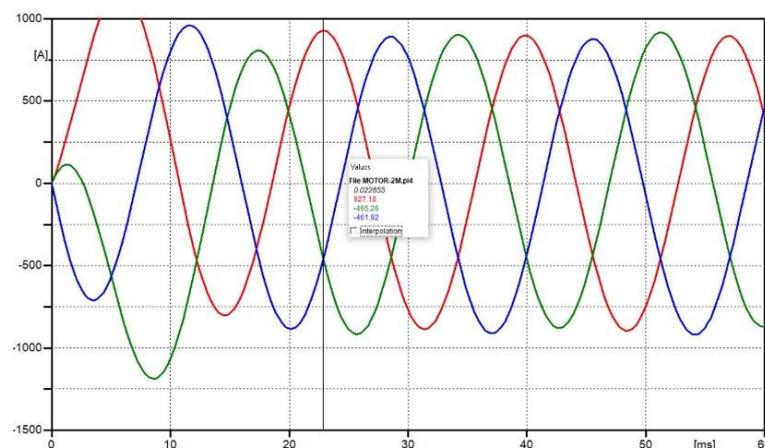


Figura 40. Corriente trifásica pico de arranque en el rotor.

Fuente: ATPDraw.

El comportamiento de las ondas durante el arranque, presentan variaciones debido a los transitorios producido por el flujo magnético, y con una corriente máxima de 927A. Inicialmente la frecuencia se aproxima a la del estator, disminuyendo constantemente a medida que el rotor se sincroniza con el campo magnético del estator. Conservan una amplitud elevada con una frecuencia constante y el desfase de 120° respecto una de otra.

3.3.9. Corriente trifásica pico de vacío en el rotor.

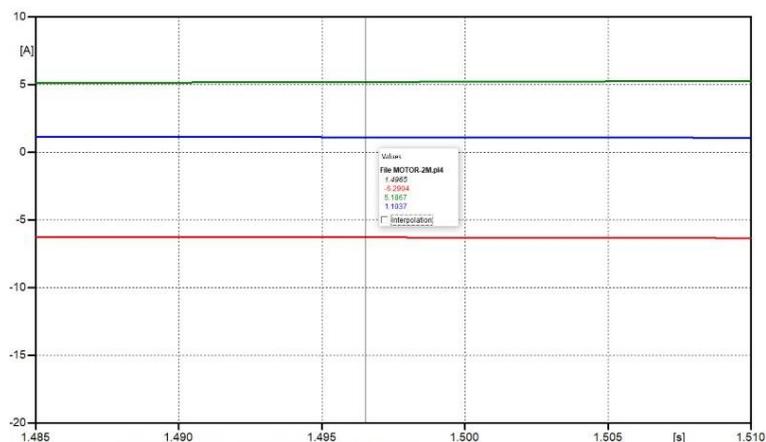


Figura 41. Corriente trifásica pico de vacío en el rotor.
Fuente: ATPDraw.

Cuando el motor se encuentra trabajando en vacío, el rotor se acerca a la velocidad síncrona, lo que minimiza la frecuencia del deslizamiento. Con estas condiciones, la corriente en el rotor se reduce drásticamente a mínimo de 5A y una frecuencia igual 0Hz, considerando un deslizamiento prácticamente nulo. Esto significa que el rotor está sincronizado con el campo del estator sin generar un torque elevado.

3.3.10. Corriente trifásica pico con carga en el rotor.

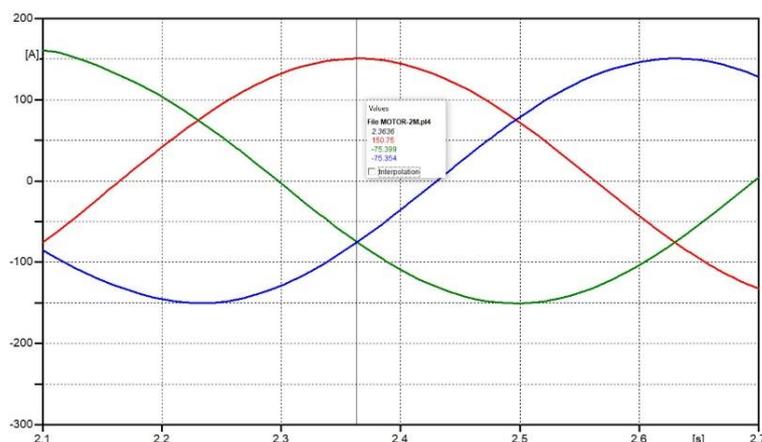


Figura 42. Corriente trifásica pico con carga en el rotor.
Fuente: ATPDraw.

Cuando ingresa la carga del motor, hay una mínima desaceleración del rotor, lo que momentáneamente aumenta el deslizamiento. La corriente aumenta de forma inmediata, para aportar con el torque equivalente a la carga mecánica, alcanzando un máximo de 150.75A y con una frecuencia menor a 2Hz. Las ondas conservan sus propiedades de un sistema trifásico donde la amplitud y frecuencia se mantienen constantes.

3.3.11. Torques del motor. Inducido(r), inercia(a), rozamiento(c), carga(f).

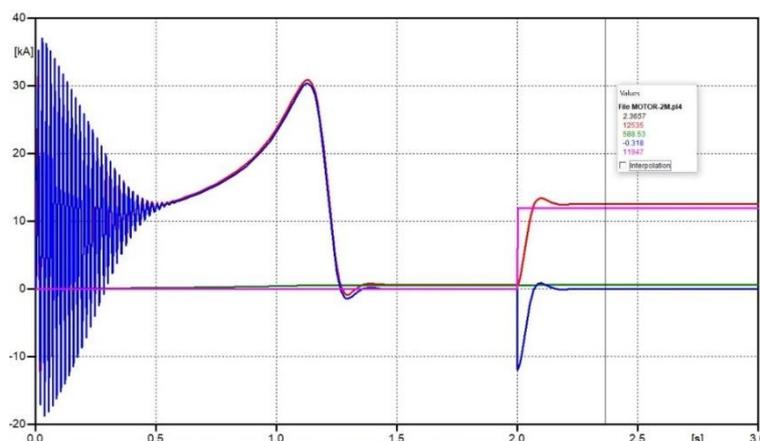


Figura 43. Torques del motor.

Fuente: ATPDraw.

En el momento del arranque, el motor presenta un torque inducido transitorio variables de 38kN en el primer segundo de arranque y se mantiene creciente hasta alcanzar un máximo de 31kN en 1.2 segundos al alcanzar su velocidad nominal. Desciende rápidamente al entrar a su etapa en vacío, alcanzando un torque constante máximo de 1kN. Cuando ingresa la carga, el torque alcanza un máximo de 13kN hasta que comienza a estabilizarse. El torque de inercia iguala al torque inducido durante el arranque y durante su etapa en vacío. Cuando ingresa la carga, el torque de inercia no muestra mayor afectación en su magnitud. El torque de rozamiento se mantiene mínimo y constante durante sus tres escenarios.

Los motores de media tensión, suelen producir un torque igual o menor a su torque nominal porque se lo puede arrancar a plena carga sin causar mayor efecto en su estructura.

3.3.12. Velocidad del motor en rad/s. (rotóricas)

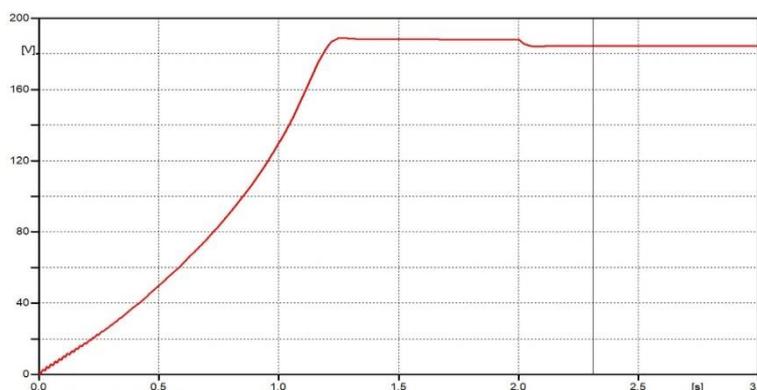


Figura 44. Velocidad del motor.

Fuente: ATPDraw.

En el momento que el motor se encuentra en reposo, su velocidad es nula. Luego que conecta el voltaje nominal, se empieza a acelerar hasta alcanzar su velocidad nominal de 187 rad/s en 1.2 segundos. Al ingresar la carga, hay una variación mínima de la velocidad hasta que comienza a estabilizarse.

3.3.13. Potencia activa(rojo) y reactiva(verde) por fase.

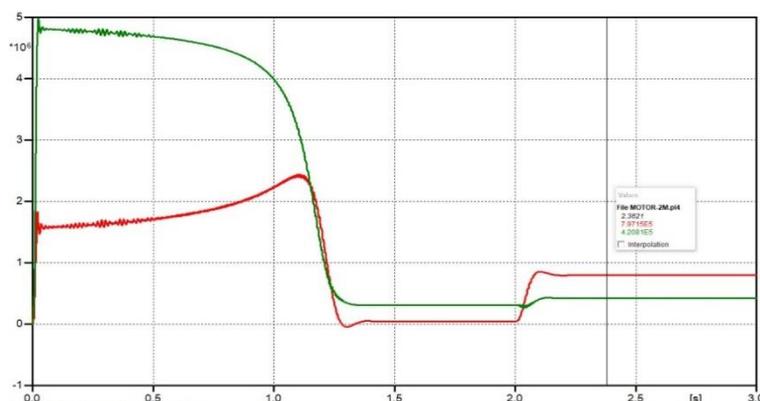


Figura 45. Potencia activa y reactiva por fase.

Fuente: ATPDraw.

La potencia reactiva durante el arranque alcanza un máximo de 4.75MVAR, que dentro del sistema trifásico este se multiplica por un factor de 3, dándonos una potencia reactiva trifásica de 14.25MVAR. Cuando sale de su etapa transitoria de arranque y empieza su operación en vacío, la potencia reactiva trifásica es de 1.2MVAR. Cuando ingresa la carga, la potencia reactiva es de 1.26MVAR y la potencia activa de 2.37MW, siendo esta mayor a la reactiva, nos indica un factor de potencia de 0.87, resultando en una buena eficiencia del motor.

3.4. ARRANQUE CON RESISTENCIAS ESTATÓRICAS.

A continuación, se detalla el comportamiento del motor con el uso de resistencias estatóricas.

3.4.1. Bloque de operación del motor con resistencias estatóricas.

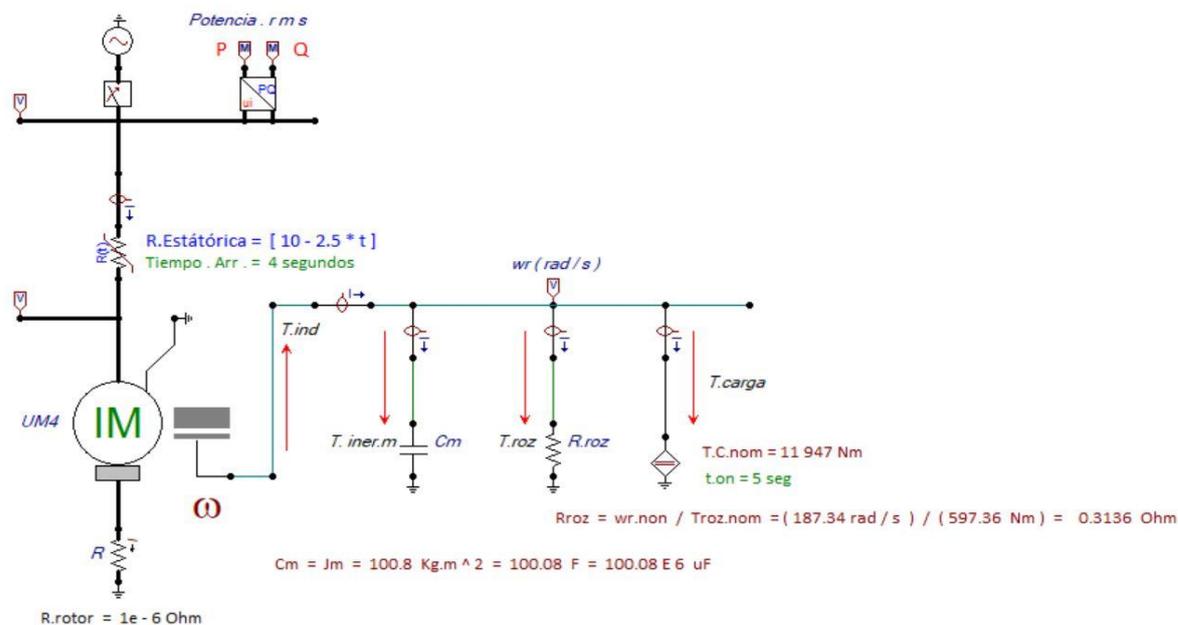


Figura 46. Modelado del motor con resistencias estatóricas.

Fuente: ATPDraw.

El diagrama muestra un motor de inducción trifásico en su conexión estrella, con resistencias estatóricas y rotor bobinado en cortocircuito, conectado a voltaje nominal de 13.8kV.

En el esquema, se representa el motor con su par inducido, la inercia del rotor, las pérdidas producidas por la fricción, rotor en cortocircuito, resistencias estatóricas, alimentador trifásico, seccionador de media tensión, voltímetro para medir el voltaje en las barras del alimentador y en las borneras del motor, vatímetro para medir la potencia activa consumida, y un varímetro para medir la potencia reactiva consumida, se consideró un valor de 10 ohm para las resistencias estatóricas y un tiempo de 5 segundos para el ingreso de la carga.

3.4.2. Resistencia del estator.

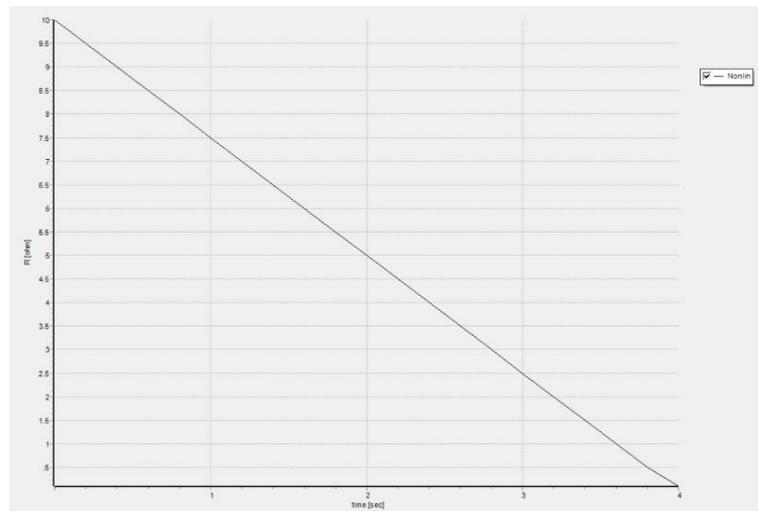


Figura 47. Curva del comportamiento de las resistencias estáticas.
Fuente: ATPDraw.

El comportamiento de la resistencia estática es linealmente decreciente, empieza con su valor nominal de 10 ohmios y disminuye uniformemente hasta llegar a 0 durante 4 segundos. El tiempo de reducción de la resistencia puede variar según las condiciones que necesitemos con relación a la carga.

De manera algebraica, podemos determinar el comportamiento de la resistencia con la siguiente ecuación:

$$R(t) = 10 - 2.5t$$

[29]

Donde t es el tiempo en segundos. Por cada segundo transcurrido, la resistencia se reduce en 2.5 ohm, permitiendo la disminución progresiva de la resistencia. Este comportamiento lineal, garantiza el cambio gradual de la resistencia y control del voltaje.

3.4.3. Voltaje en alimentador(r) y en los terminales del motor(v). (estatóricas)

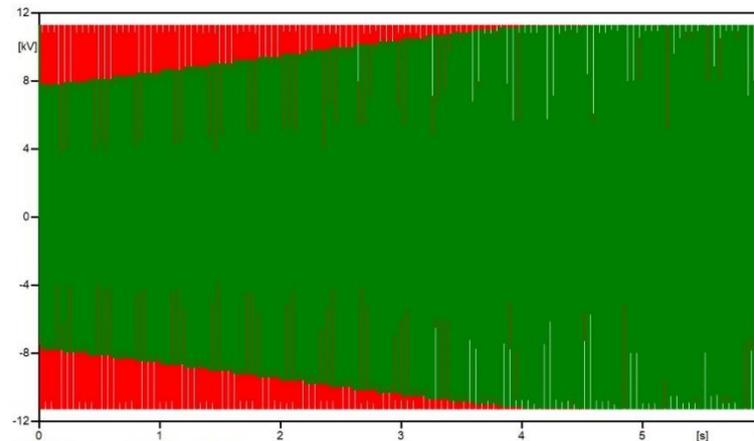


Figura 48. voltajes en el alimentador y en el estator.
Fuente: ATPDraw.

Al conectar en serie a las bobinas del motor una resistencia de 10ohm, y aplicando un voltaje de 13.8kV, obtenemos una tensión reducida de 7900V en los terminales del motor. EL voltaje aumenta progresivamente, a medida que el valor de las resistencias disminuye, alcanzando eventualmente su voltaje y velocidad nominal.

3.4.4. Corriente por fase pico en el estator. (estatóricas)

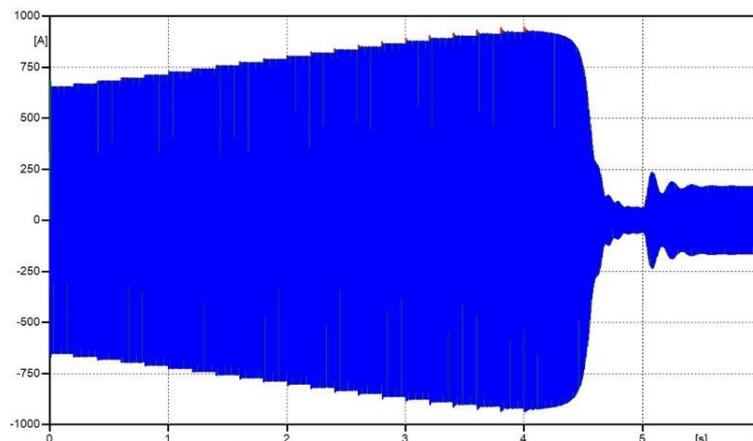


Figura 49. Corriente por fase pico en el estator.
Fuente: ATPDraw.

En la etapa de arranque, el motor inicia con una corriente reducida de 580A, indicando un arranque controlado por las resistencias en serie conectadas al motor. A medida que el motor acelera, se aproxima a su velocidad nominal, la corriente aumenta hasta alcanzar un máximo de 907A, lo que indica que el motor está ejerciendo un sobreesfuerzo para vencer la inercia del mismo.

Al alcanzar su velocidad nominal y entrar a su operación en vacío, la corriente se reduce inmediatamente hasta consumir la energía necesaria para vencer las pérdidas mecánicas propias del motor. Cuando ingresa la carga, la velocidad se reduce y la corriente se eleva momentáneamente hasta que ambas se acoplan y se estabilizan.

3.4.5. Torques del motor. Inducido(r), inercia(a), rozamiento(v), carga(c).

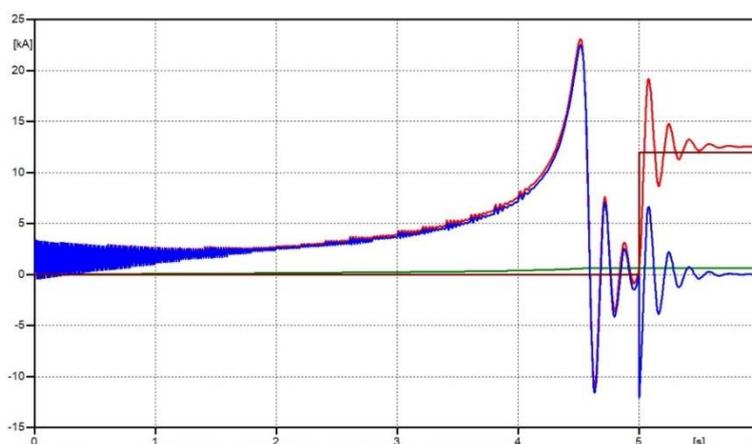


Figura 50. Torques del motor.
Fuente: ATPDraw.

En el momento del arranque, el motor presenta un torque inducido transitorio variables de 3.8kN en el primer segundo de arranque y se mantiene creciente hasta alcanzar un máximo de 23kN a los 4.5 segundos al alcanzar su velocidad nominal. Desciende rápidamente al entrar a su etapa en vacío, alcanzando un máximo de 7.2kN. Cuando ingresa la carga, el torque alcanza un máximo de 19kN hasta que comienza a estabilizarse. El torque de inercia iguala al torque inducido durante el arranque, y al alcanzar su velocidad nominal iguala al torque inducido cuando entra a su etapa de operación en vacío. Cuando ingresa la carga, el torque de inercia alcanza un máximo de 7.2kN debido a que el deslizamiento es cercano 0 y varia momentáneamente hasta estabilizarse. El torque de rozamiento se mantiene mínimo y constante durante sus tres escenarios. Para esta demostración hemos considerado una carga de tipo constante.

3.4.6. Velocidad del motor en rad/s. (estáticas)

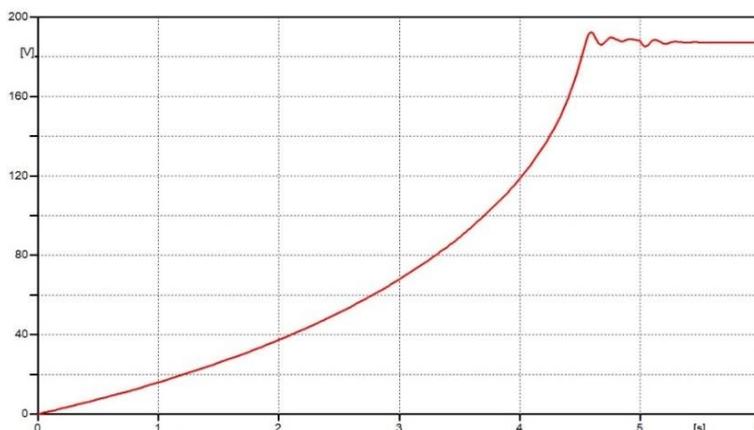


Figura 51. Velocidad del motor.
Fuente: ATPDraw.

En el momento que el motor se encuentra en reposo su velocidad es nula. Luego que se conecta el voltaje nominal, se empieza a acelerar hasta alcanzar su velocidad nominal de 187 rad/s a los 4.5 segundos. Se presenta una variación durante su etapa de vacío debido al roce mecánico entre el rotor y los rodamientos. Cuando ingresa la carga también se registra una variación momentánea en lo que la velocidad se adapta al comportamiento de la misma.

3.4.7. Potencia activa(rojo) y reactiva(verde) por fase. (estáticas)

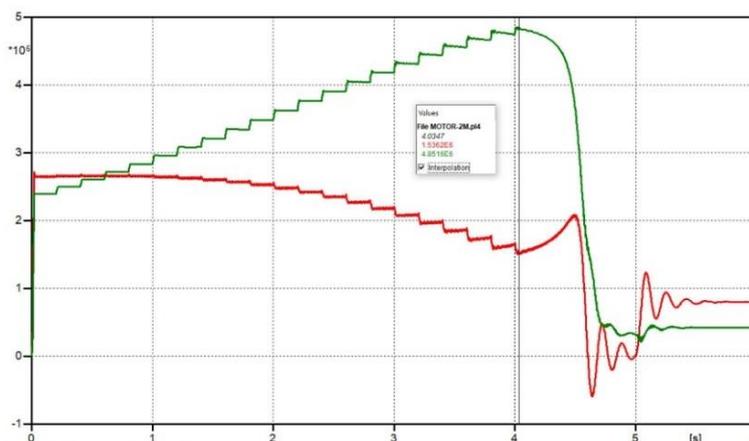


Figura 52. Potencia activa y reactiva por fase.
Fuente: ATPDraw.

En el momento del arranque, durante un instante de tiempo, la potencia activa supera a la reactiva, pero posteriormente la potencia reactiva se vuelve la predominante durante toda la etapa de arranque, registrando una potencia reactiva máxima de 4.75MVAR y una potencia activa máxima de 1.6MW.

Estos valores son equivalentes a las potencias por fase, es decir, que, si queremos determinar la potencia trifásica, tendríamos que multiplicar estos valores por un factor constante igual a 3, resultando en una potencia reactiva trifásica de 14.25MVAR y una potencia activa trifásica de 4.8MW, resultando en un factor de potencia de 0.32, considerado como ineficiente.

Cuando ingresa a su fase de operación en vacío, la potencia reactiva se mantiene sobre la potencia activa hasta entrar a su fase con carga. Cuando esta ingresa, la potencia activa supera la reactiva resultando en un factor de potencia de 0.87, indicando una alta eficiencia de la energía del motor.

3.5. ARRANQUE A VOLTAJE NOMINAL.

A continuación, se detalla el comportamiento del motor a voltaje nominal con rotor en cortocircuito.

3.5.1. Bloques de operación del motor con rotor en cortocircuito.

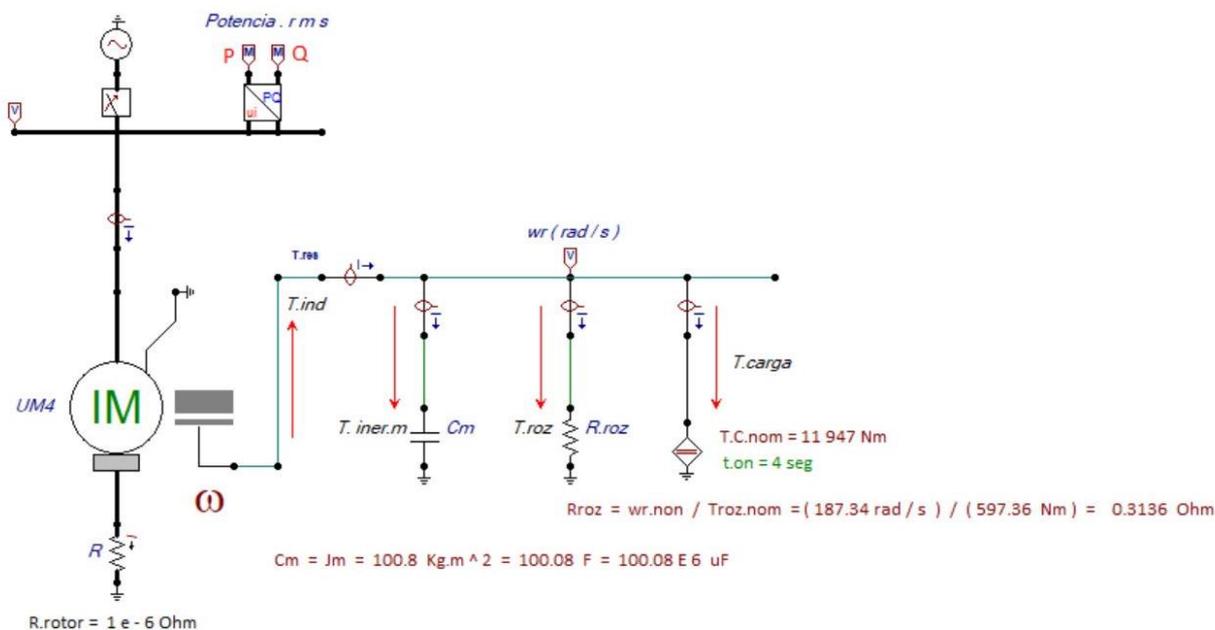


Figura 53. Modelado del motor a voltaje nominal con rotor en cortocircuito.
Fuente: ATPDraw.

El diagrama muestra un motor de inducción trifásico en su conexión estrella, rotor bobinado en cortocircuito, conectado a voltaje nominal de 13.8kV.

En el esquema, se representa el motor con su par inducido, la inercia del rotor, las pérdidas producidas por la fricción, rotor bobinado en cortocircuito, alimentador trifásico, seccionador de media tensión, voltímetro para medir el voltaje en el motor, vatímetro para medir la potencia activa consumida, y un varímetro para medir la potencia reactiva consumida. Se consideró un valor de $1\text{e}-6 \text{ ohm}$ para el rotor en cortocircuito, y un tiempo de 4 segundos para el ingreso de la carga.

3.5.2. Corriente por fase pico en el estator. (cc)

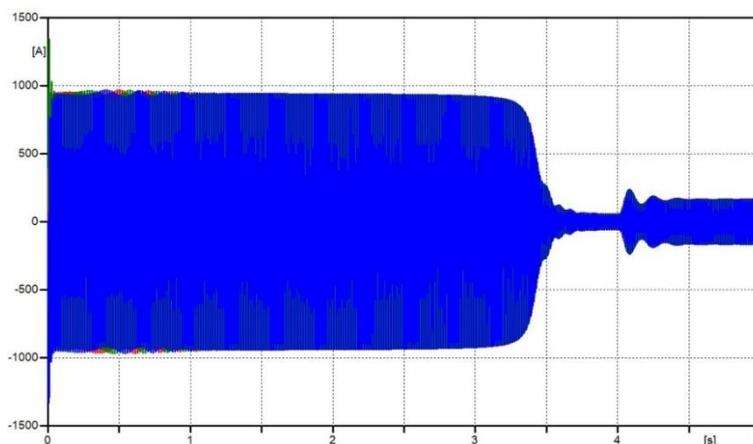


Figura 54. Corriente por fase en el estator. (cc)

Fuente: ATPDraw.

Para su etapa de arranque, el motor requiere de 3.5 segundos y una corriente de 907A constante. Esta corriente se mantiene constante, ya corresponde a la energía necesaria para vencer la inercia del rotor hasta alcanzar su velocidad nominal. Cuando este lo alcanza, el motor entra a su etapa de operación en vacío y la corriente se reduce hasta 57.43A eventualmente. Al ingresar la carga, disminuye momentáneamente la velocidad por que lo se eleva la corriente hasta que esta vuelva a alcanzar su nominal y se estabiliza junto con la carga.

Corriente trifásica pico en el rotor. (cc)

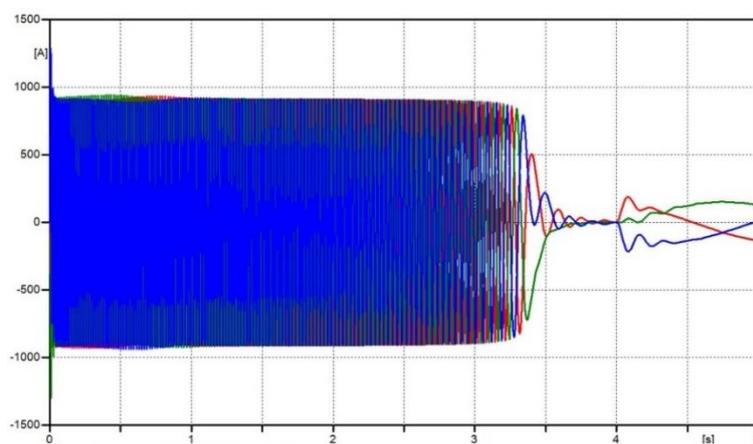


Figura 55. Corriente trifásica pico en el rotor. (cc)

Fuente: ATPDraw.

Durante toda su etapa de arranque, la corriente alcanza una corriente máxima de 900A, y una frecuencia aproximada a la del estator que va disminuyendo hasta completar esta etapa. Cuando entra a su etapa de operación en vacío, la corriente disminuye y alcanza un máximo de 10A acompañada de una frecuencia menor a 10Hz.

Al momento que ingresa la carga, la corriente alcanza un máximo de 150A con una frecuencia menor a 1Hz, indicando que el rotor se está sincronizando con el campo magnético del estator.

3.5.3. Torques del motor. Inducido(r), Inercia(v), carga(a), rozamiento(c). (cc)

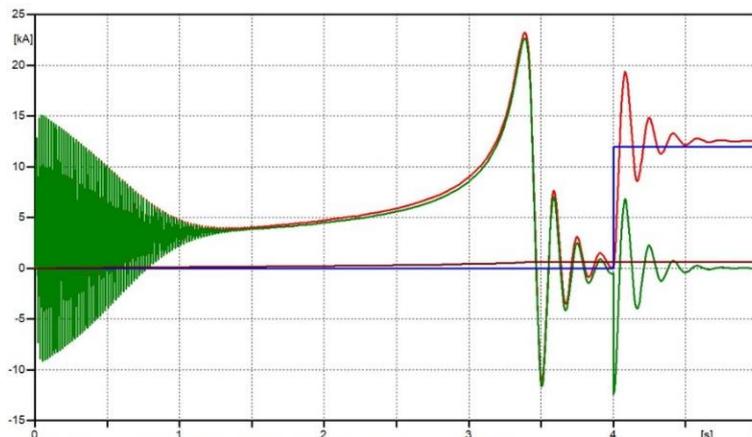


Figura 56. Torques del motor. (cc)

Fuente: ATPDraw.

En el momento del arranque, el motor presenta un torque inducido transitorio de 15kN durante el primer segundo de arranque, y de manera creciente alcanza un máximo de 23kN a su velocidad nominal a los 3.5 segundos, donde comienza a descender hasta entrar a su etapa en vacío alcanzando un máximo de 7kN. Cuando ingresa la carga, el torque alcanza un máximo de 19kN hasta que se estabiliza con la carga. El torque de inercia es igual al torque inducido durante el arranque, y cuando alcanza su velocidad nominal, iguala al torque inducido cuando entra a su etapa de operación en vacío. Cuando entra la carga, el torque de inercia alcanza un máximo de 7.2kN ya que el deslizamiento es cercano a 0 y varia momentáneamente hasta estabilizarse. El torque de rozamiento es mínimo en las 3 fases de funcionamiento. Para este caso de estudio, consideramos a la carga como constante.

3.5.4. Velocidad del rotor en rad/s. (cc)

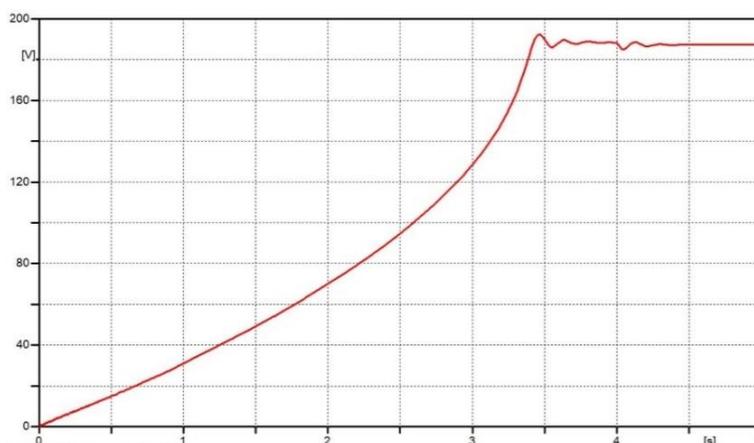


Figura 57. Velocidad del motor. (cc)

Fuente: ATPDraw.

En el momento que el motor se encuentra en reposo su velocidad es nula. Luego que se conecta el voltaje nominal, se empieza a acelerar hasta alcanzar su velocidad nominal de 187 rad/s a los 3.5 segundos. Se presenta una variación durante su etapa de vacío debido al roce mecánico entre el rotor y los rodamientos. Cuando ingresa la carga también se registra una variación momentánea en lo que la velocidad se adapta al comportamiento de la misma.

3.5.5. Potencia activa(rojo) y reactiva(verde) por fase. (cc)

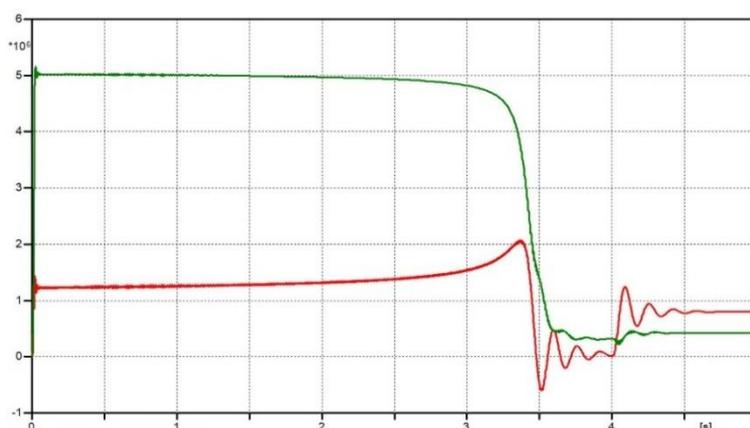


Figura 58. Potencia activa y reactiva por fase. (cc)

Fuente: ATPDraw.

La potencia reactiva durante el arranque alcanza un máximo de 5MVAR y una potencia activa de 1.15MW, que dentro del sistema trifásico este se multiplica por un factor de 3, dándonos una potencia reactiva trifásica de 15MVAR y una potencia activa de 3.45MW. Cuando sale de su etapa transitoria de arranque y empieza su operación en vacío, la potencia reactiva trifásica es de 1.3MVAR y una potencia activa trifásica de 1.2MW.

Cuando ingresa la carga, la potencia reactiva trifásica es de 1.26MVAR y la potencia activa trifásica de 2.37MW, siendo esta mayor a la reactiva, nos indica un factor de potencia de 0.87 que equivale a una buena eficiencia del motor.

3.6. DATOS GENERALES DE LOS TURBOGENERADORES.

Para este proyecto, se utilizarán 3 turbogeneradores de capacidades diferentes. El propósito, es determinar cuál de estos puede proporcionar la potencia necesaria para el arranque del motor. Los turbogeneradores funcionan con turbinas a vapor, por lo que debido a sus distintas capacidades funcionan con presiones diferentes.

- Un turbogenerador de 15MVA, con voltaje de salida de 13.8kV, en conexión estrella de 4 polos, con un motor primario de 13.5MW, impulsado por una presión de vapor de 220PSI, requiere 3.78T/h de bagazo para su funcionamiento.
- Un turbogenerador de 20MVA, con voltaje de salida de 13.8kV, en conexión estrella de 4 polos, con un motor primario de 18MW, impulsado por una presión de vapor de 200PSI, requiere 4.52T/h de bagazo para su funcionamiento.
- Un turbogenerador de 54MVA, con voltaje de salida de 13.8kV en conexión estrella, 4 polos, con un motor primario de 38.88MW impulsado por una presión de vapor de 900PSI, requiere 9.16T/h de bagazo para su funcionamiento. Todos los generadores se encuentran operando con un factor de potencia de 0.8.

3.6.1. Cálculos para la Curva de Capacidad Máxima del Generador de 15MVA.

En esta sección se realizan los cálculos para elaborar la curva de capacidad del generador.

$$\begin{aligned}
 & \text{Datos} \\
 & \text{Generador de 15MVA} \\
 & V_L = 13800 \text{ V} \\
 & V_f = 7969 \text{ V} = 1pu \\
 & I_L = 627.6 \text{ A} \\
 & I_f = 362.3 \text{ A} = 1pu \\
 & nB = 1800 \text{ rpm} \\
 & 4 \text{ Polos} \\
 & 60 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Corriente de armadura en cortocircuito.

$$I_{armadura_{cc}} = 627.6A \quad [30]$$

Corriente de campo en cortocircuito.

$$I_{campo_{cc}} = 78.44A \quad [31]$$

Corriente de campo a vacío.

$$I_{campo_{vacío}} = 48.12A \quad [32]$$

Reactancia sincrónica saturada.

$$\begin{aligned}
 X_{ss} &= \frac{I_{campo_{cc}}}{I_{campo_{vacío}}} \\
 X_{ss} &= \frac{78.44}{48.12} \\
 X_{ss} &= 1.63j \text{ pu}
 \end{aligned} \quad [33]$$

Resistencia de cortocircuito.

$$\begin{aligned}
 R_{cc} &= \frac{1}{X_{ss}} \\
 R_{cc} &= \frac{1}{1.63} \\
 R_{cc} &= 0.6134 \text{ pu}
 \end{aligned} \quad [34]$$

3.6.2. Cálculos para la Curva de Capacidad Máxima del Generador de 20MVA.

En esta sección se realizan los cálculos para elaborar la curva de capacidad del generador.

$$\begin{aligned}
 & \text{Datos} \\
 & \text{Generador de 20MVA} \\
 & V_L = 13800 \text{ V} \\
 & V_f = 7969 \text{ V} = 1pu \\
 & I_L = 836.7 \text{ A} \\
 & I_f = 483 \text{ A} = 1pu \\
 & nB = 1800 \text{ rpm} \\
 & \quad 4 \text{ Polos} \\
 & \quad 60 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Corriente de armadura en cortocircuito.

$$I_{armadura_{cc}} = 836.7A \quad [35]$$

Corriente de campo en cortocircuito.

$$I_{campo_{cc}} = 104.58A \quad [36]$$

Corriente de campo a vacío.

$$I_{campo_{vacío}} = 64.15A \quad [37]$$

Reactancia sincrónica saturada.

$$\begin{aligned}
 X_{ss} &= \frac{I_{campo_{cc}}}{I_{campo_{vacío}}} \\
 X_{ss} &= \frac{104.58}{64.15} \\
 X_{ss} &= 1.63j \text{ pu}
 \end{aligned} \quad [38]$$

Resistencia de cortocircuito.

$$\begin{aligned}
 R_{cc} &= \frac{1}{X_{ss}} \\
 R_{cc} &= \frac{1}{1.63} \\
 R_{cc} &= 0.6134 \text{ pu}
 \end{aligned} \quad [39]$$

3.6.3. Cálculos para la Curva de Capacidad Máxima del Generador de 54MVA.

En esta sección se realizan los cálculos para elaborar la curva de capacidad del generador.

$$\begin{aligned}
 & \text{Datos} \\
 & \text{Generador de 54MVA} \\
 & V_L = 13800 \text{ V} \\
 & V_f = 7969 \text{ V} = 1pu \\
 & I_L = 2259 \text{ A} \\
 & I_f = 1304.2 \text{ A} = 1pu \\
 & nB = 1800 \text{ rpm} \\
 & 4 \text{ Polos} \\
 & 60 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Corriente de armadura en cortocircuito.

$$I_{armadura_{cc}} = 2259A \quad [40]$$

Corriente de campo en cortocircuito.

$$I_{campo_{cc}} = 282.4A \quad [41]$$

Corriente de campo a vacío.

$$I_{campo_{vacío}} = 172.5A \quad [42]$$

Reactancia sincrónica saturada.

$$\begin{aligned}
 X_{ss} &= \frac{I_{campo_{cc}}}{I_{campo_{vacío}}} \\
 X_{ss} &= \frac{282.4}{172.5} \\
 X_{ss} &= 1.63j \text{ pu}
 \end{aligned} \quad [43]$$

Resistencia de cortocircuito.

$$\begin{aligned}
 R_{cc} &= \frac{1}{X_{ss}} \\
 R_{cc} &= \frac{1}{1.63} \\
 R_{cc} &= 0.6134 \text{ pu}
 \end{aligned} \quad [44]$$

3.6.4. Fuerza electromotriz nominal del generador con carga 0.8fp.

$$fem = V_f + (X_{SS} * I_f)$$

$$V_f = 1 \angle 0^\circ = 1 + 0j \text{ pu}$$

$$I_f = 1 \angle -36.86^\circ \text{ pu}$$

$$X_{SS} = 1.63 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$(X_{SS} * I_f) = (1.63 \angle 90^\circ) * (1 \angle -36.86^\circ)$$

$$(X_{SS} * I_f) = 1.63 \angle 53.14^\circ = 0.97 + 1.3j \text{ pu}$$

$$fem = V_f + (X_{SS} * I_f)$$

$$fem = (1 + 0j) + (0.97 + 1.3j)$$

$$fem = 1.97 + 1.3j = 2.36 \angle 33.42^\circ \text{ pu}$$

[45]

$$r_2 = \frac{fem \cdot V_f}{X_{SS}}$$

$$r_2 = \frac{2.36 \cdot 1}{1.63}$$

$$r_2 = 1.45 \text{ pu}$$

[46]

3.6.5. Potencia activa máxima entregada una carga de 0.8fp en pu.

$$P_{max} = r_2 * \text{sen}(d)$$

$$P_{max} = 1.45 * \text{sen}(33.42^\circ)$$

$$P_{max} = 0.79 \text{ pu}$$

[47]

3.6.6. Potencia reactiva máxima entregada a una carga de 0.8fp en pu.

$$Q_{max} = r_2 * \text{cos}(d) - R_{cc}$$

$$Q_{max} = 1.45 * \text{cos}(33.42^\circ) - 0.61$$

$$Q_{max} = 0.6 \text{ pu}$$

[48]

3.6.7. Fuerza electromotriz nominal del generador con carga de 0.88fp.

$$fem = V_f + (X_{SS} * I_f)$$

$$V_f = 1 \angle 0^\circ = 1 + 0j \text{ pu}$$

$$I_f = 1 \angle -28.35^\circ \text{ pu}$$

$$X_{SS} = 1.63 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$(X_{SS} * I_f) = (1.63 \angle 90^\circ) * (1 \angle -28.35^\circ)$$

$$(X_{SS} * I_f) = 1.63 \angle 61.65^\circ = 0.77 + 1.43j \text{ pu}$$

$$fem = V_f + (X_{SS} * I_f)$$

$$fem = (1 + 0j) + (0.77 + 1.43j)$$

$$fem = 1.77 + 1.43j \text{ pu}$$

$$fem = 2.27 \angle 38.93^\circ \text{ pu}$$

[49]

$$r_2 = \frac{fem \cdot V_f}{X_{SS}}$$

$$r_2 = 1.45 \text{ pu (Para FP. nom. Generador = 0.8 Atraso)}$$

[50]

3.6.8. Potencia activa máxima entregada a una carga de 0.88fp en pu.

$$P_{max} = r_1 * \text{sen}(90 - \text{°Fp})$$

$$P_{max} = 1 * \text{sen}(61.65^\circ)$$

$$P_{max} = 0.88 \text{ pu}$$

[51]

3.6.9. Potencia reactiva máxima entregada a una carga de 0.88fp en pu.

$$Q_{max} = r_1 * \text{cos}(90 - \text{°Fp})$$

$$Q_{max} = 1 * \text{cos}(61.65^\circ)$$

$$Q_{max} = 0.47 \text{ pu}$$

[52]

3.6.10. Fuerza electromotriz nominal inducido con carga de 0.31fp

$$fem = V_f + (X_{SS} * I_f)$$

$$V_f = 1 \angle 0^\circ = 1 + 0j \text{ pu}$$

$$I_f = 1 \angle -77.29^\circ \text{ pu}$$

$$X_{SS} = 1.63 \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$(X_{SS} * I_f) = (1.63 \angle 90^\circ) * (1 \angle -77.29^\circ)$$

$$(X_{SS} * I_f) = 1.63 \angle 12.71^\circ = 1.59 + 0.35j \text{ pu}$$

$$fem = V_f + (X_{SS} * I_f)$$

$$fem = (1 + 0j) + (1.59 + 0.35j)$$

$$fem = 2.59 + 0.35j \text{ pu}$$

$$fem = 2.61 \angle 7.69^\circ \text{ pu}$$

[53]

$$r_2 = \frac{fem \cdot V_f}{X_{SS}}$$

$$r_2 = 1.45 \text{ pu (Para FP. nom. Generador = 0.8 Atraso)}$$

[54]

3.6.11. Potencia activa máxima entregada a una carga de 0.31fp en pu.

$$P_{max} = r_2 * \text{sen}(d)$$

$$P_{max} = 1.45 * \text{sen}(7.69^\circ)$$

$$P_{max} = 0.19 \text{ pu}$$

[55]

3.6.12. Potencia reactiva máxima entregada a una carga de 0.31fp en pu.

$$Q_{max} = r_2 * \text{cos}(d) - R_{cc}$$

$$Q_{max} = 1.45 * \text{cos}(7.69^\circ) - 0.61$$

$$Q_{max} = 0.82 \text{ pu}$$

[56]

3.7. CURVA DE CAPACIDAD DE GENERADOR TRIFÁSICO SÍNCRONO.

Durante el desarrollo de los cálculos para realizar las curvas de capacidad de los turbogeneradores, se obtuvieron como resultados que las magnitudes de las variables son iguales en los 3 casos, por lo que consideró una sola curva de capacidad para demostrar el comportamiento de las potencias activa y reactiva del motor durante su etapa de arranque.

Limite motor primario = 0.9pu / $X_{ss} = 1.63j$ / $R_{cc} = 0.6134$ / $r_2 = 1.45$ / $\Theta.fem = 33.40^\circ$

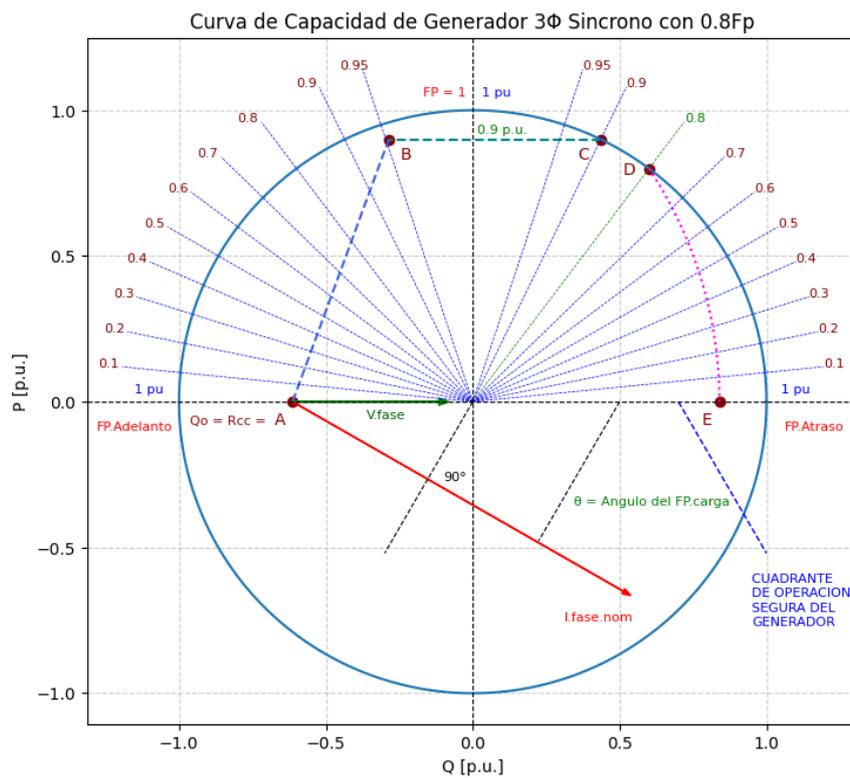


Figura 59. Curva de Capacidad Máxima de Generador Trifásico Sincrono de 0.8fp.
Fuente: Los autores.

3.7.1. Potencias máximas entregadas por el generador.

A través de la curva de capacidad máxima de los generadores, se posicionan gráficamente los factores de potencia nominal del generador, nominal de operación del motor y de arranque.

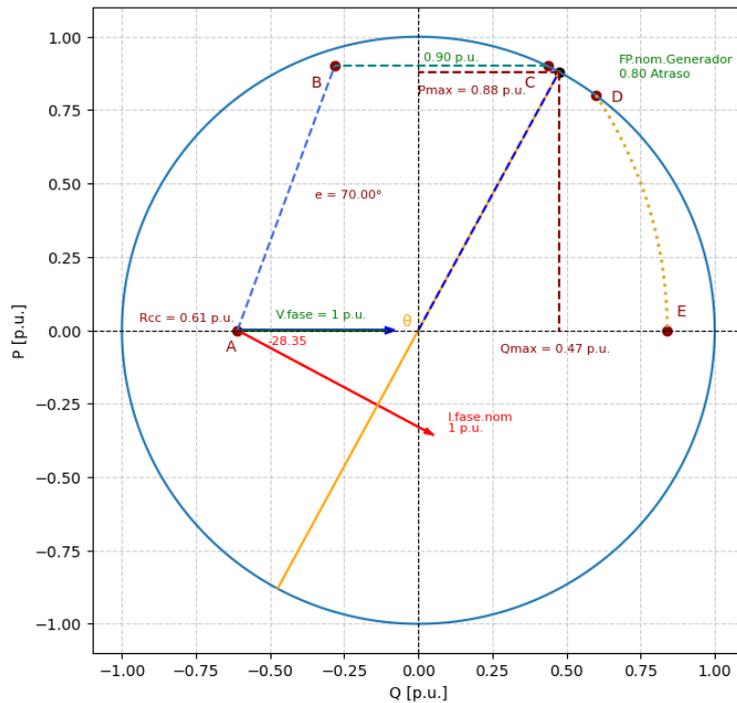


Figura 60. Potencias máximas entregadas a una carga de 0.88fp en atraso.
Fuente: Los autores.

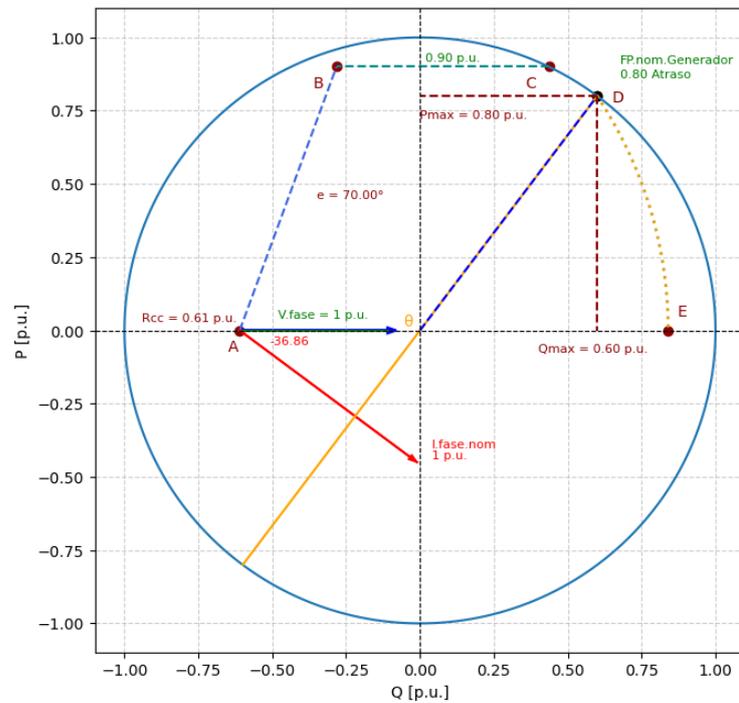
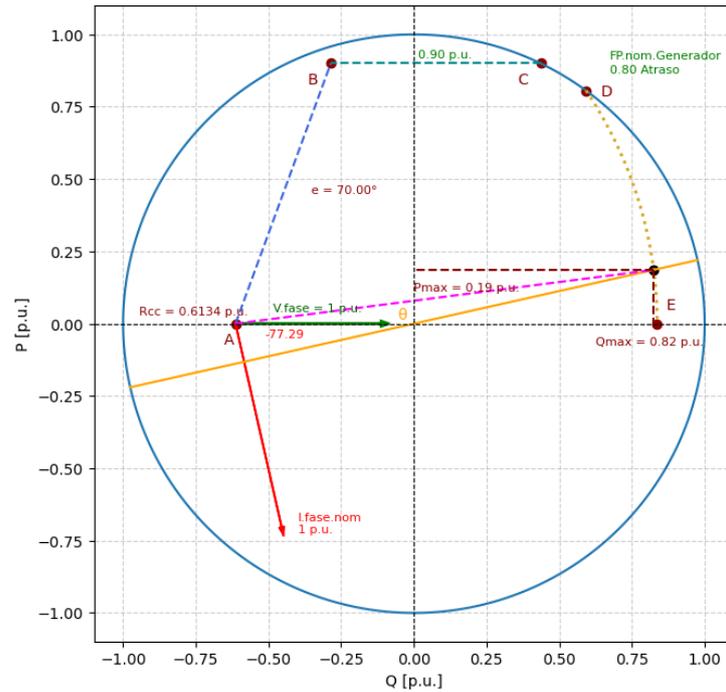


Figura 61. Potencias máximas entregadas a una carga de 0.8fp en atraso.
Fuente: Los autores.



**Figura 62. Potencias máximas entregadas a una carga de 0.22fp en atraso.
Fuente: ATPDraw.**

3.8. COMPENSACIÓN ACTIVA DE LOS TURBOGENERADORES.

La potencia activa que puede entregar un turbogenerador depende de factores tanto eléctricos como mecánicos. Considerando que las turbinas comparten características, a través de la potencia máxima que necesitamos para el arranque, la turbina debe garantizar un determinado torque el eje del generador. Por lo tanto:

3.8.1. Turbogeneradores de 15MVA, 20MVA, 54MVA.

$$P_{arr} = 6MW$$

4 Polos

60Hz

$$1800rpm = 188.5rad/s$$

[57]

Torque aplicado al generador.

$$T_{apli.} = \frac{P_{eje}}{W_{rotor}} = \frac{6MW}{188.5rad/s} = 31830.24N.m$$

[58]

Desde la parte mecánica, las turbinas deben proporcionar a los 3 generadores con velocidad nominal de 188.5 rad/s, un torque en el eje de 31830.24 Nm para garantizar la entrega de potencia activa al motor durante el arranque.

3.9. COMPENSACIÓN REACTIVA DE LOS TURBOGENERADORES.

Para la compensación de potencia reactiva a un sistema eléctrico, es necesario contar con determinados ajustes de operación del generador, para ello, vamos a considerar el uso de la corriente de campo del generador para controlar la entrega de potencia reactiva durante el arranque del motor.

3.9.1. Turbogenerador de 15MVA.

Corriente de fase nominal.

$$I_{fase.nom} = \frac{P_{eje}}{\sqrt{3} * V_L}$$

$$I_{fase.nom} = \frac{15MVA}{(\sqrt{3}) * (13.800)}$$

$$I_{fase.nom} = 627.55A$$

$$I_{fase.nom} = I_{base}$$

$$I_{base} = 1 pu$$

[59]

Potencia aparente de arranque.

$$S_{arranque} = \sqrt{(P_{arranque})^2 + (Q_{arranque})^2}$$

$$S_{arranque} = \sqrt{(3.45MW)^2 + (15MVAR)^2}$$

$$S_{arranque} = 15.39MVA$$

$$\varphi_{fp} = \tan^{-1}\left(\frac{15}{3.45}\right)$$

$$\varphi_{fp} = 77.29^\circ$$

[60]

Para la compensación de la potencia reactiva se consideró utilizar la reacción de inducido para determinar que la fem requerida en el arranque se encuentre dentro de los límites del generador, sin embargo, durante la realización de los cálculos, ya la potencia aparente nos indica que esta se encuentra por sobre la potencia nominal del generador, por lo que se detienen los cálculos de este procedimiento y se opta por considerar a este equipo como no apto para ser utilizado en este proceso.

Si establecemos la hipótesis de que la corriente de campo del generador se encuentra al máximo, y aun así se utiliza este generador para realizar el arranque, debemos demostrar gráficamente que se encuentra fuera de los límites de operación segura del generador, para ello, vamos a evaluar su comportamiento tomando las potencias de arranque constantes en sus valores pu expresados de la siguiente manera:

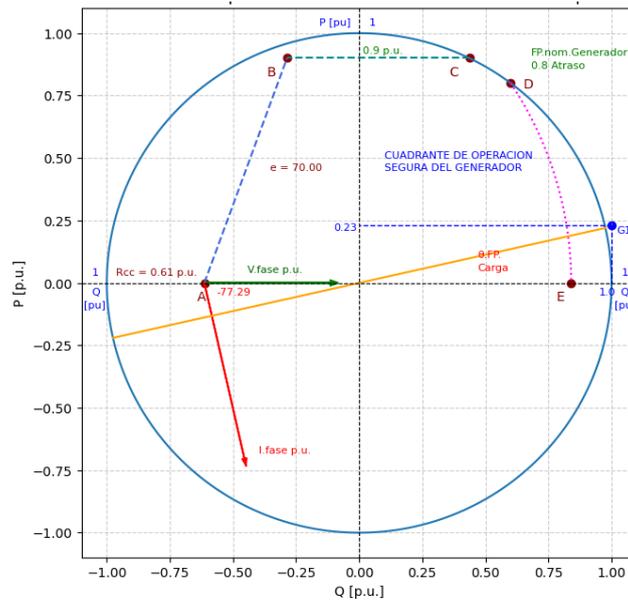
$$P_{3\phi} = 3.45MW // P_{3\phi} pu = \frac{3.45}{15} \approx 0.23 pu \quad [61]$$

$$Q_{3\phi} = 15MVAR // Q_{3\phi} pu = \frac{15}{15} \approx 1 pu \quad [62]$$

$$fp = \cos[\tan^{-1}(\frac{1}{0.23})] \approx 0.22 pu \approx 77.29^\circ \quad [63]$$

Los valores en por unida obtenidos del procedimiento anterior, nos dan como resultado 0.23pu y 1 pu para potencia activa y reactiva respectivamente.

Considerando que en la figura 35, las potencias máximas entregadas por el turbogenerador a una carga de 0.22fp son de 0.19pu y 0.82pu para potencia activa y reactiva respectivamente, la potencia de este turbogenerador queda fuera del límite de demanda máxima, por lo que se descarta el uso de este generador para realizar el arranque del motor.



**Figura 63. Curva de Capacidad del Generador de 15MVA con 0.22fp del motor.
Fuente: Los autores.**

3.9.2. Turbogenerador de 20MVA.

Corriente de fase nominal.

$$I_{fase.nom} = \frac{p_{eje}}{\sqrt{3} * V_L}$$

$$I_{fase.nom} = \frac{20MVA}{(\sqrt{3}) * (13.800)}$$

$$I_{fase.nom} = 836.74A$$

$$I_{fase.nom} = I_{base}$$

$$I_{base} = 1 pu$$

[64]

Potencia aparente de arranque.

$$S_{arranque} = \sqrt{(P_{arranque})^2 + (Q_{arranque})^2}$$

$$S_{arranque} = \sqrt{(3.45MW)^2 + (15MVAR)^2}$$

$$S_{arranque} = 15.39MVA$$

$$\varphi_{fp} = \tan^{-1}\left(\frac{15}{3.45}\right)$$

$$\varphi_{fp} = 77.29^\circ$$

[65]

Corriente de fase de arranque.

$$I_{fase.arr.} = \frac{S_{arranque}}{\sqrt{3} * V_L}$$

$$I_{fase.arr.} = \frac{15.39MVA}{\sqrt{3} * 13800}$$

$$I_{fase.arr.} = 643.87A$$

$$I_{fase.arr.pu} = \frac{I_{real}}{I_{base}}$$

$$I_{fase.arr.pu} = \frac{643.87A}{836.74A}$$

$$I_{fase.arr.pu} = 0.76pu$$

$$FP_{arranque} = \cos(77.29^\circ)$$

$$FP_{arranque} = 0.22 \text{ Atraso}$$

$$I_{fase.arr.pu} = 0.76 \angle -77.29^\circ pu$$

[66]

Fem arranque sin reacción de inducido.

$$fem = (1 \angle 0^\circ) + (1.63 \angle 90^\circ) * (0.76 \angle -77.29^\circ)$$

$$fem = (1 \angle 0^\circ) + (1.23 \angle 12.71^\circ)$$

$$fem = (1 + 0j) + (1.19 + 0.27j)$$

$$fem = 2.19 + 0.27j$$

$$fem = 2.20 \angle 7.02^\circ pu$$

[67]

FEM nominal sin reacción de inducido.

$$fem_{nom} = Vf + (X_{ss} * If)$$

$$fem_{nom} = (1 \angle 0^\circ) + (1.63 \angle 90^\circ) * (1 \angle -36.86^\circ)$$

$$fem_{nom} = 2.36 \angle 33.42^\circ pu$$

[68]

Fem máxima del generador en pu.

$$fem_{max.gen.pu} = \frac{V_{L.max}}{V_{L.nom}}$$

[69]

$$fem_{max.gen.pu} = \frac{25000}{13800}$$

$$fem_{max.gen.pu} = 1.81 pu$$
[70]

Estimación de la Reacción de Inducido.

$$fem_{reacc.ind} \approx [fem_{nom.sin.reaccion} - fem_{max.gen}] * I_{carga}$$

$$fem_{reacc.ind} \approx [2.36 - 1.81] * 0.76$$

$$fem_{reacc.ind} \approx 0.418 pu$$
[71]

FEM real requerida en el arranque.

$$fem_{real.req.arr} = [fem_{arr.sin.reacc.induc.} - fem_{reacc.ind.}]$$

$$fem_{real.req.arr} = 2.20 - 0.418$$

$$fem_{real.req.arr} = 1.78 pu$$
[72]

$$I_{real.req.arr} = \frac{fem_{real.req.arr} * I_{max.campo}}{fem_{max.campo}}$$

$$I_{real.req.arr} = \frac{1.78 * 12.47}{1.81}$$

$$I_{campo.req.arr} = 12.26 pu$$
[73]

En el momento del arranque, en el generador se debe asegurar que la fem real generada sea 1.78pu de un máximo de 1.81pu, y con ello una corriente de campo de 12.26pu de un máximo de 12.47pu. Esto garantiza que el generador puede entregada la potencia reactiva necesaria para el arranque del motor.

Considerando que el generador mediante su corriente de campo puede entregar de la potencia reactiva necesaria para el arranque del motor, también debemos demostrar gráficamente que la potencia de arranque del motor se encuentre dentro de los parámetros seguros de operación del generador, para ello, vamos a evaluar su comportamiento tomando las potencias de arranque constantes en sus valores pu expresados de la siguiente manera:

$$P_{3\phi} = 3.45MW // P_{3\phi} pu = \frac{3.45}{20} \approx 0.17 pu$$
[74]

$$Q_{3\phi} = 15\text{MVAR} // Q_{3\phi} \text{ pu} = \frac{15}{20} \approx 0.75 \text{ pu} \quad [75]$$

$$fp = \cos\left[\tan^{-1}\left(\frac{0.75}{0.17}\right)\right] \approx 0.22 \text{ pu} \approx 77.29^\circ \quad [76]$$

Los valores en por unida obtenidos del procedimiento anterior, nos dan como resultado 0.17pu y 0.75pu para potencia activa y reactiva respectivamente. Considerando que en la figura 35, las potencias máximas entregadas por el turbogenerador a una carga de 0.22fp son de 0.19pu y 0.82pu respectivamente, la potencia de arranque se encuentra dentro de los límites de operación segura de este turbogenerador por lo que sí es adecuado para realizar el arranque.

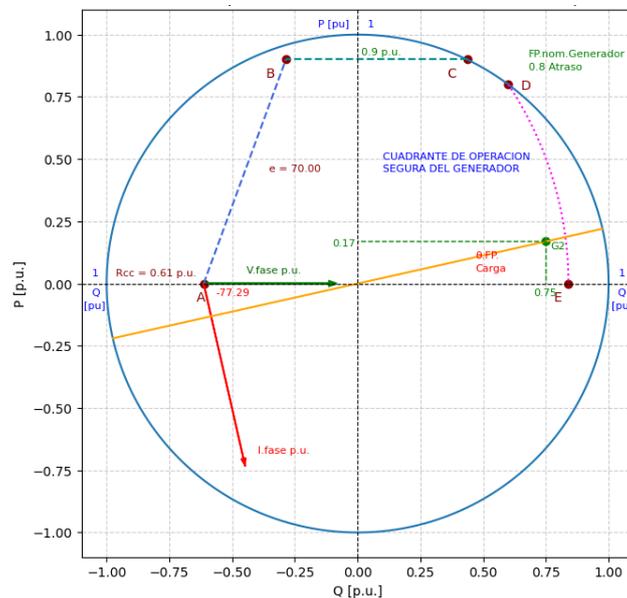


Figura 64. Curva de Capacidad del Generador de 20MVA con 0.22fp del motor.
Fuente: ATPDraw.

3.9.3. Turbogenerador de 54MVA.

Corriente de fase nominal.

$$I_{fase.nom} = \frac{p_{eje}}{\sqrt{3} * V_L}$$

$$I_{fase.nom} = \frac{54\text{MVA}}{(\sqrt{3}) * (13.800)}$$

$$I_{fase.nom} = 2259\text{A}$$

$$I_{fase.nom} = I_{base}$$

$$I_{base} = 1 \text{ pu}$$

[77]

Potencia aparente de arranque.

$$S_{arranque} = \sqrt{(P_{arranque})^2 + (Q_{arranque})^2}$$

$$S_{arranque} = \sqrt{(3.45 \text{ MW})^2 + (15 \text{ MVAR})^2}$$

$$S_{arranque} = 15.39 \text{ MVA}$$

$$\varphi_{fp} = \tan^{-1}\left(\frac{15}{3.45}\right)$$

$$\varphi_{fp} = 77.29^\circ$$

[78]

Corriente de fase de arranque.

$$I_{fase.arr.} = \frac{S_{arranque}}{\sqrt{3} * V_L}$$

$$I_{fase.arr.} = \frac{15.39 \text{ MVA}}{\sqrt{3} * 13800}$$

$$I_{fase.arr.} = 643.87 \text{ A}$$

$$I_{fase.arr.pu} = \frac{I_{real}}{I_{base}}$$

$$I_{fase.arr.pu} = \frac{643.87 \text{ A}}{2259 \text{ A}}$$

$$I_{fase.arr.pu} = 0.28 \text{ pu}$$

$$FP_{arranque} = \cos(77.29^\circ)$$

$$FP_{arranque} = 0.22 \text{ Atraso}$$

$$I_{fase.arr.pu} = 0.28 \angle -77.29^\circ \text{ pu}$$

[79]

Fem sin reacción de inducido.

$$fem = (1 \angle 0^\circ) + (1.63 \angle 90^\circ) * (0.28 \angle -77.29^\circ)$$

$$fem = (1 \angle 0^\circ) + (0.45 \angle 12.71^\circ)$$

$$fem = (1 + 0j) + (0.43 + 0.099j)$$

$$fem = 1.43 + 0.099j$$

$$fem = 1.43 \angle 3.96^\circ pu \quad [80]$$

FEM nominal sin reacción de inducido.

$$fem_{nom} = Vf + (X_{ss} * If)$$

$$fem_{nom} = (1 \angle 0^\circ) + (1.63 \angle 90^\circ) * (1 \angle -36.86^\circ)$$

$$fem_{nom} = 2.36 \angle 33.42^\circ pu \quad [81]$$

Fem máxima del generador en pu.

$$fem_{max.gen.pu} = \frac{V_{L.max}}{V_L}$$

$$fem_{max.gen.pu} = \frac{25000}{13800}$$

$$fem_{max.gen.pu} = 1.81 pu \quad [82]$$

Estimación de la Reacción de Inducido.

$$fem_{reacc.ind} \approx [fem_{nom.sin.reaccion} - fem_{max.gen}] * I_{carga}$$

$$fem_{reacc.ind} \approx [2.36 - 1.81] * 0.28$$

$$fem_{reacc.ind} \approx 0.15 pu \quad [83]$$

FEM real requerida en el arranque.

$$fem_{real.req.arr} = [fem_{arr.sin.reacc.induc.} - fem_{reacc.induc.}]$$

$$fem_{real.req.arr} = 1.43 - 0.15$$

$$fem_{real.req.arr} = 1.28 pu \quad [84]$$

$$I_{real.req.arr} = \frac{fem_{real.req.arr} * I_{max.campo}}{fem_{max.campo}}$$

$$I_{real.req.arr} = \frac{1.28 * 5.79}{1.81}$$

$$I_{real.req.arr} = 4.09 pu \quad [85]$$

En el momento del arranque, en el generador se debe asegurar que la fem real generada sea 1.28pu de un máximo de 1.81pu, y con ello una corriente de campo de 4.09 de un máximo de 5.79pu. Esto garantiza que el generador puede entregar la potencia reactiva necesaria para el arranque del motor.

Considerando que el generador mediante su corriente de campo puede entregar de la potencia reactiva necesaria para el arranque del motor, también debemos demostrar gráficamente que la potencia de arranque del motor se encuentre dentro de los parámetros seguros de operación del generador, para ello, vamos a evaluar su comportamiento tomando las potencias de arranque constantes en sus valores pu expresados de la siguiente manera:

$$P_{3\phi} = 3.45MW // P_{3\phi} pu = \frac{3.45}{54} \approx 0.06 pu \quad [86]$$

$$Q_{3\phi} = 15MVAR // Q_{3\phi} pu = \frac{15}{54} \approx 0.27 pu \quad [87]$$

$$fp = \cos[\tan^{-1}(\frac{0.27}{0.06})] \approx 0.22 pu \approx 77.29^\circ \quad [88]$$

Los valores en por unida obtenidos del procedimiento anterior, nos dan como resultado 0.06pu y 0.27pu para potencia activa y reactiva respectivamente. Considerando que en la figura 35, las potencias máximas entregadas por el turbogenerador a una carga de 0.22fp son de 0.19pu y 0.82pu para potencia activa y reactiva respectivamente, la potencia de este turbogenerador es considerado ideal para la compensación de energía necesaria para el arranque del motor.

CAPITULO IV

4.1. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados que demuestran de estos tres métodos, el más eficiente para el arranque de motores de media tensión y el proceso correcto para la selección de un turbogenerador como fuente confiable de energía.

4.1.1. Arranque con resistencias rotoricas.

El arranque con resistencias rotoricas utilizado normalmente para reducir la corriente de arranque en motores, resultó no ser efectivo para la reducción de corriente, sino más bien, para la reducción del tiempo de arranque. En motores de media tensión, cuya masa es considerablemente grande, la inercia de la maquina afecta directamente al proceso de arranque. Al incrementar la resistencia del rotor, se mejora el deslizamiento inicial y se alcanza un torque más elevado con una baja velocidad, lo que acelera la etapa de arranque hacia su operación nominal.

4.1.2. Arranque con resistencias estatóricas.

El arranque con resistencias estatóricas, también utilizado para reducir la corriente de arranque en motores, para este caso, a pesar de si reducir la corriente, el tiempo de arranque se extendió demasiado, ya que para los motores de media tensión se requiere un torque muy grande para vencer la inercia del mismo. Esto conlleva al recalentamiento de las bobinas disminuyendo la vida útil del motor, incluso hasta desestabilizar la red eléctrica por la variabilidad de las magnitudes eléctricas.

4.1.3. Arranque a voltaje nominal con rotor en cortocircuito.

El arranque a voltaje nominal de esta clase de motores radica en que estamos realizando el mismo procedimiento para arrancar un motor jaula de ardilla, lo que resulta en una corriente de arranque elevada, y por las características de masa e inercia del motor, se prolongaría el tiempo de arranque aumentando el riesgo de sobrecalentamiento en el estator. Además de percibir por esos momentos las altas magnitudes de corriente y potencia reactiva que pueden perjudicar la estabilidad de la red y los demás equipos conectados a la red.

Este método de arranque puede ser considerado alternativo, solamente en el caso de no disponer de las propiedades de arranque del rotor, y un sistema adicional de energía para compensar las caídas de tensión en el sistema eléctrico.

4.1.4. Compensación activa y reactiva de los 3 turbogeneradores.

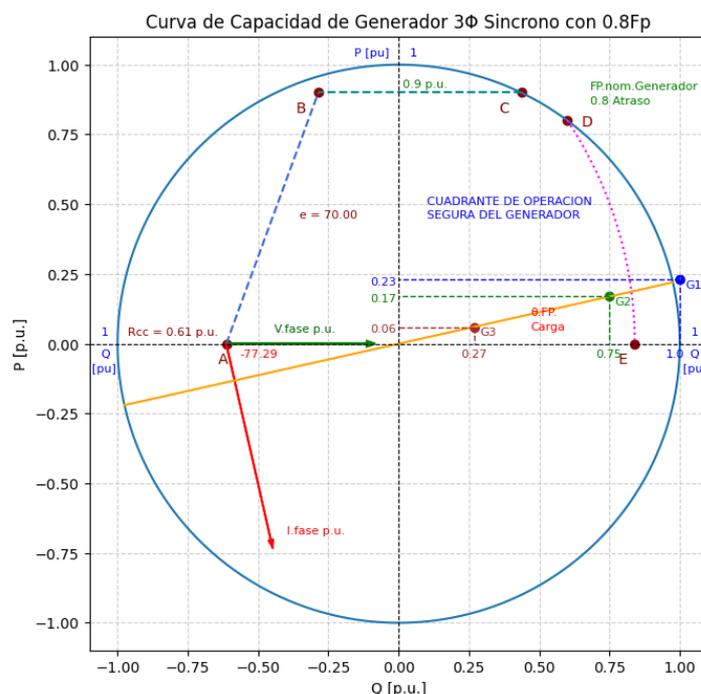


Figura 66. Curva de Capacidad de los Generadores con fp de arranque del motor.
Fuente: ATPDraw.

Las potencias del motor vistas desde el turbogenerador #2 y #3, dentro de los 3 casos, nos demuestran que la compensación activa y reactiva de estos, permiten realizar el arranque, sin embargo, para los casos B y C, hay que considerar plantear un mecanismo de control programado para evitar que los efectos negativos, como los armónicos, provocados por el arranque extendido del motor, afecten a todo el sistema y equipos conectados a esta red eléctrica suministrada.

Las potencias del motor vistas desde el turbogenerador #1, dentro de los casos B y C está completamente fuera de consideración, ya que se encuentran fuera del cuadrante de operación segura del generador, que, con un tiempo de arranque extenso, elevamos el riesgo de sobrecalentamiento en las bobinas del generador. Para el caso A, aunque las potencias quedan fuera de la curva de capacidad, el tiempo de arranque es mínimo, por lo que según las condiciones técnicas del generador este puede ser aplicado, considerando las precauciones del caso.

CONCLUSIONES

- El modelado del motor en sus tres formas y los datos técnicos recopilados, nos permitieron analizar el comportamiento real de sus magnitudes durante las etapas de operación, lo que facilitó la determinación del método más óptimo para el arranque, garantizando la prolongación de la vida útil del motor, la eficiencia de la energía y la estabilidad de la red de 13.8kV. El uso de resistencias para reducir las corrientes de arranque de los motores no siempre resulta ser eficientes, ya que algunos requieren de corrientes considerablemente altas para vencer su inercia y tener una aceleración rápida, y al no contar con ello, resulta en pérdidas significativas de energía provocadas por el efecto joule.
- El diseño de la curva de capacidad de los generadores, nos permitieron analizar la interacción entre la potencia del generador con el consumo de energía del motor durante el arranque, considerando las pérdidas mecánicas y los transitorios producidos por el mismo. Al momento de seleccionar un generador, se deben considerar un dimensionamiento que no comprometa la estabilidad ni la calidad del servicio eléctrico.
- El software ATPDraw resultó ser la herramienta ideal para modelar y simular el comportamiento dinámico del motor desde sus distintos métodos de arranque. Su interfaz interactiva, facilitó la rápida interpretación de tendencias, picos o transitorios obtenidos por los distintos métodos aplicados.
- El software Python demostró ser una herramienta muy útil para el diseño de las curvas de capacidad de los generadores, gracias a sus bibliotecas interactivas que facilitaron los cálculos y la demostración gráfica de resultados, obtuvimos resultados precisos del comportamiento de las magnitudes del motor con respecto a las del generador con altos niveles de detalle en cada una de las variables aplicadas.

RECOMENDACIONES

- Para este tipo de motor de uso industrial, se recomienda este tipo de arranque por resistencias rotoricas ya que permite procedimiento eficiente y mejorando los picos de corriente al sistema de la red eléctrica producido por el equipo, considerando que esto no permite oscilaciones fluctuantes al suministro eléctrico. Este método permite reducir los costos elevados, generados por los picos de corriente de estos motores. Al realizar el trabajo, estos elementos, por su dureza, se puede colocar cualquier tipo de carga robusta.
- Se debe establecer un protocolo de mantenimiento frecuente. Es vital para un perfecto funcionamiento debido a los altos valores agregados a este equipo y al proceso al que pertenece. Este equipo de gran porte, requiere de fabricación especial, por lo que la intervención, operación y mantenimiento se debe realizar por personal técnico especializado que garantice el correcto funcionamiento del equipo.
- En la elección del generador, se debe conocer la demanda específica de energía del sistema, esto incluye la potencia activa y reactiva de las cargas que el generador debe soportar. Este debe ser capaz de mejorar la carga nominal además de los picos de demanda de energía. Es de vital importancia si la carga tiene variaciones rápidas o frecuencias transitorias cuando arrancan los motores de gran capacidad, ya que debe ser capaz de trabajar sin afectar su calidad de suministro de energía que dañen el sistema. Para compensar el arranque de este tipo de motores, asegurarse que la capacidad de arranque este correctamente dimensionado entre 20-25% sobre su capacidad nominal, para evitar caída de voltaje o daños en los equipos de potencia y control.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. N. Pacheco y K. D. Santos, «Análisis tecnológico de motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla,» *Dominio de las Ciencias*, vol. 5, pp. 291-303, 2020.
- [2] A. J. Pascual, «Comparativa entre motores brushed y brushless,» 2019. [En línea]. Available: <https://openaccess.uoc.edu/handle/10609/89945>.
- [3] M. S. Macías y J. M. Mendoza, «Generación de una práctica de mantenimiento preventivo y correctivo de motores de corriente alterna (AC) en un entorno de realidad virtual,» 2023. [En línea]. Available: <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/20795>.
- [4] A. Monjo, «Motor Síncrono,» 2020. [En línea]. Available: <https://n9.cl/6j5vi>.
- [5] J. C. Mollisaca, «Mantenimiento Y Reparación de Motores Eléctricos Síncronos,» 2020. [En línea]. Available: https://www.lareferencia.info/vufind/Record/ES_9840ee33aa77759102a0686dc5ca3364.
- [6] I. Velázquez, «Análisis y simulación del control vectorial de motores asíncronos,» 2020. [En línea]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/41413>.
- [7] T. E. Cando y J. D. Murillo, «Análisis del comportamiento de un motor asíncrono (Bachelor's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)),» 2023. [En línea]. Available: <https://repositorio.utc.edu.ec/>.
- [8] C. A. Bordones y S. E. Ordoñez, «Análisis de selección de protecciones y sistema de puesta a tierra para sala eléctrica de media tensión en Planta Coemín,» 2023. [En línea]. Available: <https://repositorioacademico.uda.cl/bitstream/handle/20.500.12740/16777/bib%2029883.pdf?sequence=1>.
- [9] M. Pérez, J. Ramos, R. C. Silvério y D. Barrios, «Desarrollo de aplicacione en el software Scilab para el analisis de armonicos en sistemas industriales.,» pp. 24-34, 2022.
- [10] L. R. O. Lucero, «Estimacion del par de carga en motores de induccion basado en su modelo matematico y orientado a la deteccion de fallos en cajas de engranajes.,» 2021. [En línea]. Available: dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20314/1/UPS-CT009149.pdf.

- [11] A. Ferrandis, «Desarrollo de un modelo dinámico del motor de inducción y su control implementado en Simulink (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València),» 2020. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/158596>.
- [12] J. C. R. S. R. Leon, «Modelado y control de un motor de corriente continua con carga inercial variable.,» *Ingeniería y Desarrollo*, 2019.
- [13] B. I. Vega, «Estrategias y modos de control de convertidores para la regulación de frecuencia en sistemas de potencia sin inercia,» 2021. [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181886>.
- [14] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives - Bimal K. Bose*..
- [15] E. M. FUNDAMENTALS., *ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS*.
- [16] G. U. Pelayo y D. O. Trejo, *Procesos de mecanizado convencional*, Aula Magna Proyecto clave McGraw Hill., 2023.
- [17] M. Fernández, «Propagación no lineal de pulsos cortos en medios con gradientes de presión,» 2021. [En línea]. Available: <https://gredos.usal.es/handle/10366/150740>.
- [18] M. Garrido, «Diagnóstico de fallos en motores de inducción mediante la monitorización de diversas variables de funcionamiento y la aplicación de técnicas de aprendizaje automático,» 2022. [En línea]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/55708>.
- [19] E. R. Velasco, F. J. V. Piña, J. A. R. Malanche y C. H. S. Zárate, «Detección de Fallas de Cortocircuito en Motores de Inducción Trifásicos (Short-Circuit Fault Detection in Three Phase Induction Motors),» *Pistas Educativas*, vol. 44, nº 143, 2022.
- [20] J. López, *Módulo 3. Fundamentos de electricidad*, vol. 2.ª edición, Ediciones Paraninfo, SA, 2024.
- [21] J. M. García de Quevedo, «Protecciones eléctricas de motor de media tensión,» 2024. [En línea]. Available: <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/86769>.
- [22] D. Borrego, «Los Motores de la Movilidad Eléctrica,» 2021. [En línea]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/48752>.
- [23] J. Roldán, *Motores de corriente continua*, Ediciones Paraninfo, SA., 2024.
- [24] A. J. C. Tambaco, P. L. O. Caicedo, C. E. Á. Vélez y A. A. Gonzales, «Eficiencia de motores eléctricos en maquinaria industrial,» *Dominio de las Ciencias*, vol. 10, nº 2, pp. 113-131, 2024.

- [25] J. L. V. & R. W. D. (. Rivera, «Evaluación de la calidad de la energía eléctrica en la empresa Planet Motor's SAC,» 2020. [En línea]. Available: <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/6793>.
- [26] J. P. Tonato, «Manual de operación y mantenimiento eléctrico del generador síncrono de una unidad de generación de la Central Hidroeléctrica Paute Sopladora (Bachelor's thesis),» 2020. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18457>.
- [27] M. I. Agüero, «Modelamiento EMT del sistema eléctrico chileno: proyecto grid booster en base a baterías,» 2024. [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/202095>.
- [28] K. A. Pastrana, «Análisis comparativo de dos sistemas de arranque directo de un motor de inducción trifásico con rotor jaula de ardilla,» 2024. [En línea]. Available: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/11193>.
- [29] D. A. Aldaz y K. F. Quinte, «Sistema de monitoreo y control remoto de una bomba sumergible para el llenado de un reservorio en un sector camaronero de Santa Priscila. ESPOL. FIEC.,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/60557>.
- [30] J. Ayuque, «Módulos de arranque de motores trifásicos,» 2021. [En línea]. Available: <https://repositorio.une.edu.pe/entities/publication/500c5139-9af7-4d42-b69f-8d973339116d>.
- [31] A. H. Nomberto, « Variador de frecuencia: Una revisión de literatura,» 2024. [En línea]. Available: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/147159>.
- [32] L. G. G. Reyes, L. A. T. Guajardo y P. V. C. Gutiérrez, «Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales,» *Multidisciplinas de la Ingeniería*, vol. 11, n° 18, pp. 01-13, 2024.
- [33] J. D. Perez, «Estudio de estrategias para mejorar la eficiencia energética de un motor de inducción trifásico,» 2024. [En línea]. Available: <http://51.143.95.221/handle/TecNM/8551>.
- [34] M. R. Pozueta, Arranque de motores asíncronos, vol. 48, España: Univ. Cantab. Dep. Ing. Eléctrica Y Energética, 2017.

- [35] J. D. Sánchez, «Dependencia de la respuesta eléctrica de dispersiones de PSS+ NCNTs aplicadas a memorias resistivas,» 2023. [En línea]. Available: <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/6468>.
- [36] M. Moles, «Estudio del comportamiento térmico y refrigeración de un motor asíncrono (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya),» 2023. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/401118>.
- [37] T. Cardenas, «Diseño de un bastidor de isaje para reducir costos en montaje de salas electricas del proyecto WASTE 1 en Antamina.,» 2024. [En línea]. Available: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/11733>.
- [38] C. A. Vazquez y Z. I. Valderrama, «Diseño eléctrico en media tensión para un conjunto habitacional de 245 departamentos en el suroeste de la CDMX,» 2020. [En línea]. Available: https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/31503/TESIS%20FINAL_unlocked.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [39] K. A. Nielsen, «Diseño de un sistema puesta a tierra para subestacion GERMANIA (10/24MVA) evaluando los voltajes de toque y paso (Bachelor's thesis),» 2024. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28524>.
- [40] C. J. Flores y L. R. Marca, «Análisis de respuesta de los relés de sobrecorriente en régimen permanente (Bachelor's thesis),» 2022. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22589>.
- [41] D. S. Ticse, «Análisis del sistema de protección para la optimización de la calidad de suministro del alimentador A4703-Tarma,» 2020. [En línea]. Available: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8693>.
- [42] M. E. Alfaro, «Configuración de una máquina elíptica para generar energía eléctrica de uso domiciliario,» 2023. [En línea]. Available: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/9892>.
- [43] J. G. Pérez, Montaje y mantenimiento de máquinas eléctricas rotativas, ELEE0109. IC Editorial, 2023.
- [44] J. Cuesta, «Curvas características de tensión e intensidad de un generador eléctrico de 17kw diseñado para realizar faltas eléctricas (Doctoral dissertation, Industriales),» 2021. [En línea]. Available: <https://oa.upm.es/68643/>.

- [45] J. A. A. Salas, F. J. V. Pina, M. A. G. Garcia, R. A. Salas, J. A. M. Alba y A. R. Cobos, «Desarrollo de un banco de pruebas para el diagnóstico de fallas en el estator de un generador síncrono de imanes permanentes (Development of a diagnosis test rig of stator failures in a permanent magnet synchronous generator),» 2023. [En línea]. Available: <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/3429>.
- [46] J. F. Estrada, «Diseño de investigación para la implementación de un sistema de protección remoto de acceso para un sitio de telefonía móvil integrado en el grupo electrógeno (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala),» 2021. [En línea]. Available: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/19640/>.
- [47] C. E. Rojas, «Diseño en Matlab de un generador distribuido para suministrar energía eléctrica a una red de distribución,» 2022. [En línea]. Available: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/21657>.
- [48] M. Á. Matamoros, «Análisis y aplicación del control de velocidad y posición del motor en corriente continua aplicando Matlab,» 2024. [En línea]. Available: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/11195>.
- [49] R. A. Muñoz, «Determinación de posibles fallas en los estatores de las unidades de generación eléctrica de la central térmica Independencia-Pisco,» 2019. [En línea]. Available: <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/fd51b9c6-4758-4446-b926-ce434d60a6a2>.
- [50] Generator Technologies, «AGN 004 – Curva de Capabilidad,» 2020. [En línea]. Available: https://www.stamford-avk.com/sites/stamfordavk/files/AGNs/Spanish-AGNs/AGN004_E_ES.pdf.
- [51] C. E. Espino, «Diseño de investigación para la construcción del prototipo de un generador eléctrico a base de energía mecánica elástica como alternativa de fuente renovable (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala),» 2023. [En línea]. Available: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/19014/1/Carlos%20Enrique%20Espino%20Turuy.pdf>.
- [52] Y. K. Ramos, «Lineamientos de diseño de un compensador trifásico de energía reactiva basado en la lógica binaria para el grifo Primax–Santa Anita-Lima,» 2021. [En línea]. Available: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7207>.

- [53] J. R. Cardenas y Y. O. argas, «Estudio y diseño de módulo de transmisión autónoma de lectura de contadores de energía eléctrica integrado a IoT,» 2019. [En línea]. Available: <http://184.72.242.52/handle/20.500.12962/1401>.
- [54] S. E. Chong y A. M. Sánchez, «Estudio de las corrientes transitorias causadas por el arranque de motores trifásicos en la red de medio voltaje (13.8 KV), Cerro Pelado mediante la herramienta ATP DRAW (Bachelor's thesis),» 2024. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28530>.

ANEXOS

Código Python para graficar la curva de capacidad de generadores síncronos.

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Función para convertir un fasor a forma rectangular
def fasor_to_rectangular(amplitud, angulo_grados):
    angulo_rad = np.radians(angulo_grados)
    real = amplitud * np.cos(angulo_rad)
    imaginario = amplitud * np.sin(angulo_rad)
    return real, imaginario

# Solicitar las variables al usuario para los fasores
Vf_amplitud = float(input("Ingresa la amplitud de Vf (en p.u.): "))
Vf_angulo = float(input("Ingresa el ángulo de Vf (en grados): "))
Xss_amplitud = float(input("Ingresa la amplitud de Xss (en p.u.): "))
Xss_angulo = float(input("Ingresa el ángulo de Xss (en grados): "))
If_amplitud = float(input("Ingresa la amplitud de If (en p.u.): "))
If_angulo = float(input("Ingresa el ángulo de If (en grados): "))

# Convertir los fasores a forma rectangular
Vf_real, Vf_imaginario = fasor_to_rectangular(Vf_amplitud, Vf_angulo)
Xss_real, Xss_imaginario = fasor_to_rectangular(Xss_amplitud, Xss_angulo)
If_real, If_imaginario = fasor_to_rectangular(If_amplitud, If_angulo)

# Calcular la FEM (fem = Vf + (Xss * If))
fem_real = Vf_real + Xss_real * If_real - Xss_imaginario * If_imaginario
fem_imaginario = Vf_imaginario + Xss_real * If_imaginario + Xss_imaginario * If_real

# Calcular r2 (r2 = (fem * Vf) / Xss)
fem_amplitud = np.sqrt(fem_real**2 + fem_imaginario**2) # Módulo de fem
r2 = (fem_amplitud * Vf_amplitud) / Xss_amplitud

# Calcular el ángulo de la FEM
angulo_fem = np.degrees(np.arctan2(fem_imaginario, fem_real))

# Solicitar los valores restantes
r1 = float(input("Ingresa el valor r1 (en p.u.): "))
rcc = float(input("Ingresa el valor de Rcc (en p.u.): "))
posicion_lmp = float(input(f"Ingresa el valor del Límite Motor Primario (≤ {r1} p.u.): "))
angulo_carga_grados = float(input("Ingresa el ángulo de carga (en grados): "))
angulo_estabilidad_grados = float(input("Ingresa el Ángulo de Estabilidad (en grados): "))

```

```
# Validar la posición de la recta límite motor primario
if posicion_lmp > r1 or posicion_lmp < 0:
    print(f"La posición de la recta debe estar en el rango [0, {r1}] p.u. Por favor, intenta nuevamente.")
else:
    # Convertir los ángulos a radianes
    angulo_carga = np.radians(angulo_carga_grados)
    angulo_estabilidad = np.radians(angulo_estabilidad_grados)

    # Generar los puntos de la circunferencia "r1"
    theta = np.linspace(0, 2 * np.pi, 500)
    x = r1 * np.cos(theta)
    y = r1 * np.sin(theta)
```

```
# Tomar el primer punto de intersección como D (si existe)
punto_D = intersection_points[0] if intersection_points else None
```

```
# Calcular el punto E (intersección de r2 con el eje X)
punto_E = (rcc_x + r2, 0)
```

```
# Calcular la longitud de la recta "Límite Motor Primario" que no sobresalga de la circunferencia r1
limite_motor_x1 = -np.sqrt(r1**2 - posicion_lmp**2)
limite_motor_x2 = np.sqrt(r1**2 - posicion_lmp**2)
```

```
# Calcular el punto C (intersección de la recta "Límite Motor Primario" con la circunferencia r1)
x_C = np.sqrt(r1**2 - posicion_lmp**2)
punto_C = (x_C, posicion_lmp)
```

```
# Calcular el punto de intersección de la recta "Ángulo de Estabilidad" con la recta "Límite Motor Primario"
t = posicion_lmp / np.sin(angulo_estabilidad)
x_interseccion = rcc_x + t * np.cos(angulo_estabilidad)
punto_interseccion = (x_interseccion, posicion_lmp)
```

```
# Calcular el punto B (intersección entre "Ángulo de Estabilidad" y "Límite Motor Primario")
punto_B = punto_interseccion
```

```
# Calcular Pmax y Qmax
Pmax = r2 * np.sin(angulo_carga)
Qmax = r2 * np.cos(angulo_carga) - rcc
```

```
# Configurar los ejes
plt.axhline(0, color='black', linewidth=0.8, linestyle='--') # Eje X
plt.axvline(0, color='black', linewidth=0.8, linestyle='--') # Eje Y
plt.gca().set_aspect('equal', adjustable='box')
```

```
# Configurar el gráfico
plt.title("Curva de Capacidad de Generador 30 Sincrono con 0.8Fp")
plt.xlabel("Q [p.u.]")
plt.ylabel("P [p.u.]")
plt.legend(loc='upper left', bbox_to_anchor=(2, 2))
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
```