

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**“LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE POTENCIA Y EL
ANÁLISIS GRÁFICO DE LOS LÍMITES DE OPERACIÓN DEL
GENERADOR SÍNCRONO”**

TESIS PRESENTADA POR:

BR. Cabrera Paredes, Jimi Franco

BR. Castillo Meléndez, Giraldo

**Para optar al título profesional de
Ingeniero Electricista**

ASESOR: Ing. Mario Gonzales Vargas

CUSCO - PERÚ

2019

AGRADECIMIENTO

A todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica, por habernos formado en conocimiento, carácter, rectitud, responsabilidad y amistad, por inspirarnos en ser mejores cada día y cada día inspirar a otros a serlo.

Al Ing. Mario Gonzales Vargas, como docente y asesor de nuestra tesis, quien, con su confianza y paciencia, logro en nosotros la exigencia de poder terminar lo que habíamos empezado.

Al Ing. M.Sc. Vladimiro Canal Bravo, quien desde las aulas siempre fue inspirador a que la ingeniería eléctrica en el futuro sería satisfactoria y agradecida.

Al Ing. Dany Jorge Cañihua Flórez, quien con su apoyo incondicional fue fuente de conocimiento en el desarrollo practico de nuestra tesis.

Al Ing. Basilio Salas Alagón. Por su constante apoyo moral y amical en todas las transiciones de nuestra formación y desarrollo de nuestro trabajo de tesis.

Jimi Franco y Giraldo

DEDICATORIAS

A Dios y la Virgen del Carmen, con todo mi amor y gratitud por la oportunidad de vivir y ser feliz con los seres que amo, por sus infinitas bendiciones y por el logro de este objetivo de vida y enseñanza.

Al amor de mi vida, a mi compañera, mi confidente y amiga, mi esposa IVETTE, por su constante aliento, apoyo, entrega y enseñanza, por estar conmigo, a mi lado y entregarme su amor incondicional cada minuto del día y cada día.

A mis dos inspiraciones, mis bellos amores, mis hijos JIMENA y GUSTAVO, por su gran cariño y amor, por hacerme sentir cada día un héroe, por sus hermosas sonrisas, oportunas travesuras y porque simplemente los amo.

A la mujer que me dió la vida, que por muchas noches velo mis sueños y a quien amé, amo y amaré, a mi bella mamá ROSITA, porque me enseñó que a pesar de todo debemos seguir adelante y por su entrega para con todos sus hijos.

Con el más prodigioso de mis sentimientos a mis abuelos; a mi mamá HILDA, por su amor eterno, enseñanzas infinitas, alegres y picaros momentos. A mi papá BERNABE, por su fuerza, caballerosidad, rectitud y sutil amor a sus nietos, a ambos ángeles celestiales que desde el cielo cuidan nuestro camino.

A mis hermanos JOEL, HEBER y MIJAIL, con todo mi amor fraternal, por su alegría, picardía, apoyo y aliento en todo instante en el proceso de alcanzar este objetivo.

JIMI FRANCO

DEDICATORIAS

A ti Señor mío, por guiar mis pasos a cada instante, dándome fortaleza, sabiduría y sobre todo la oportunidad de culminar este ansiado sueño.

A mis Padres Giraldo Castillo y Herminia Meléndez por su infinito amor y apoyo incondicional.

A mi esposa, Erika; por su amor, paciencia y comprensión.

A mi amado Hijo, Piero Joaquín; que con su llegada a este mundo lleno de regocijo mi presente y es un referente para mi futuro.

A mis Hermanos Marco y Kentelium por sus palabras de aliento y su apoyo constante.

GIRALDO

JURADO DE TESIS

Ing. M.Sc. Vladimiro Canal Bravo
Presidente de jurado

Ing. Mgt. Octavio Cañihua Cayocusi
1° Dictaminante de tesis

Ing. Dr. Willy Morales Alarcón
2° Dictaminante de tesis

Ing. Mary Elisa Barrionuevo Prado
1° Juez replicante de tesis

Ing. M.Sc. Clemente Cuba Huamani
2° Juez replicante de tesis

Ing. Mario Gonzales Vargas
Asesor de tesis

INDICE GENERAL

Pág.

Agradecimientos

Dedicatorias

Jurados

Índice general

Índice de figuras

Índice de tablas

Resumen

Introducción

CAPÍTULO – I

GENERALIDADES.	17
1.1 El problema.	17
1.1.1 Selección del problema.	17
1.1.2 Formulación del problema.	20
1.1.2.1 Problema general.	20
1.1.2.2 Problemas específicos.	20
1.1.3 Objetivos del problema.	20
1.1.3.1 Objetivo general.	20
1.1.3.2 Objetivos específicos.	20
1.1.4 Justificación de la investigación.	20
1.1.5 Limitaciones de la investigación.	22
1.2 Metodología.	22
1.2.1 Método de la investigación.	22
1.2.2 Diseño de la investigación.	23
1.2.3 Técnicas y herramientas de recolección de datos.	23
1.2.4 Análisis de datos.	23
1.3 Hipótesis y variables.	24
1.3.1 Hipótesis general.	24
1.3.2 Hipótesis específicas.	24
1.3.3 Variables e indicadores.	24
1.3.3.1 Variable independiente e indicadores.	24

1.3.3.2 Variable dependiente e indicadores.	24
1.3.3.3 El objeto de estudio.	25

CAPÍTULO – II

MARCO TEÓRICO.	26
2.1. Antecedentes.	26
2.1.1 Artículo: evaluación de la operación del generador síncrono basado en la formulación matemática de la curva de capacidad.	26
2.1.2 Tesis: implementación y análisis de la curva de capacidad del generador síncrono de polos salientes utilizando software de ingeniería.	27
2.1.3 Tesis: software para la determinación de la carta de operación de generadores sincrónicos de rotor cilíndrico.	28
2.1.4 Proyecto de investigación titulado “Determinación de curvas de capacidad de una máquina síncrona de polos salientes”.	30
2.2 Marco conceptual.	31
2.2.1 La máquina síncrona.	31
2.2.2 El modelo de la máquina síncrona.	31
2.2.3 El rotor.	34
2.2.4 El estator.	38
2.2.5 El circuito equivalente del generador síncrono.	41
2.2.6 Las ecuaciones de potencia para generador de rotor cilíndrico.	44
2.2.7 Las ecuaciones de potencia para generador de rotor con polos salientes.	46
2.2.8 La carta de operación del generador síncrono.	48
2.2.9 La corriente máxima de armadura.	51
2.2.10 Potencia máxima de la turbina (motor primo)	52
2.2.11 Corriente de excitación máxima y mínima en generadores de polos lisos.	52
2.2.12 Corriente de excitación máxima y mínima en generadores de polos salientes.	55
2.2.13 Determinación del límite de estabilidad en generadores de polos lisos.	59
2.2.14 Límite de estabilidad en generadores de polos salientes.	59
2.2.15 Las curvas de capacidad.	60

CAPÍTULO III.**DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS ELÉCTRICOS DEL GENERADOR SINCRONO Y LA INCIDENCIA DE LA TENSION Y CORRIENTE DE EXCITACIÓN.**

Y CORRIENTE DE EXCITACIÓN.	64
3.1. Generalidades.	64
3.2. Prueba de vacío.	64
3.3. Prueba en corto circuito.	66
3.4. Prueba de deslizamiento.	67
3.5. Prueba de calentamiento.	69
3.6. Determinación de los parámetros de reactancias síncronas del eje directo (X_d) y el eje cuadratura (X_q)	70
3.6.1. Determinación de la reactancia síncrona en el eje directo (X_d)	70
3.6.2. Determinación de la reactancia síncrona en el eje de cuadratura (X_q)	71
3.7. Determinación de los parámetros de reactancias síncronas del eje directo (X_d) y el eje cuadratura (x_q), mediante pruebas experimentales.	71
3.7.1. Finalidad.	71
3.7.2. Introducción.	71
3.7.3. Material y equipo a utilizar.	72
3.7.4. Procedimiento para la implementación de la práctica.	72
EVALUACIÓN.	79

CAPÍTULO – IV**DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES FASORIALES DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE POTENCIA Y, LA GRÁFICA DE LOS LIMITES DE OPERACIÓN DEL GENERADOR SINCRONO (APLICACIÓN C.H. MACHUPICCHU II – G1). ...**

4.2. Ecuaciones fasoriales para graficar las curvas de capacidad de potencia y el análisis gráfico de los límites de operación.	80
4.2.1. Consideraciones iniciales.	80
4.2.2. El Diagrama fasorial del generador síncrono de polos salientes.	81
4.2.3. Transformación de los 4 fasores cerrados a triángulo de potencias.	81

	Pág.
4.3. Determinación de los lugares geométricos de las curvas de capacidad de capacidad y los límites de operación del generador de polos salientes.	84
4.3.1. Determinación del lugar geométrico de la corriente máxima del estator.	86
4.3.2. Ecuación del lugar geométrico de la corriente máxima de excitación.	87
4.3.3. Ecuación del lugar geométrico de la máquina motriz (turbina).	89
4.3.4. Ecuación del lugar geométrico de la corriente mínima de excitación.	90
4.3.5. Límite de estabilidad permanente teórico.	92
4.3.6. Límite de estabilidad permanente práctico.	93
4.4. Análisis y gráfica de las ecuaciones en coordenadas polares de las curvas de capacidad de potencia de las centrales hidroeléctricas recientes.	94
4.4.1. Central Hidroeléctrica Machupicchu II.	95
4.4.1.1 Gráfica de la ecuación de la corriente máxima del estator.	97
4.4.1.2 Gráfica de la ecuación de la corriente máxima de excitación.	98
4.4.1.3 Gráfica de la ecuación de la potencia máxima de la turbina.	99
4.4.1.4 Gráfica de la ecuación de la potencia mínima de la turbina.	100
4.4.1.5 Gráfica de la ecuación del círculo de reacción de corriente de excitación cero.	101
4.4.1.6 Gráfica de la ecuación de la corriente mínima de excitación.	102
4.4.1.7 Gráfica de la ecuación de la estabilidad permanente teórica.	103
4.4.1.8 Gráfica de la ecuación de la estabilidad práctica.	104
4.4.1.9 Gráfica de la región de operación del generador síncrono.	105
EVALUACIÓN.	107

CAPÍTULO – V

DESARROLLO DE UN SOFTWARE EN LENGUAJE MATLAB PARA GRAFICAR LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE POTENCIA Y LA APLICACIÓN DE LA MISMA EN ALGUNAS C.H. DEL SEIN.	108
5.1 Generalidades.	108
5.2 Paquete informático Matlab.	108
5.2.1 Live Editor de Matlab.	108
5.2.2 Desarrollo del software en Live Editor.	109
5.2.2.1 Diseño de inicio y salida de las gráficas de la curva de capacidad de potencia.	109

	Pág.
5.2.2.2 Diseño de las entradas y salidas de datos numéricos del software.	110
5.2.2.3 Diseño, Ejecución del código para el procesamiento de datos y grafica de las curvas de capacidad.	112
5.3 Flujograma de software.	113
5.4 Grafica de las Curvas de Capacidad utilizando el software grafico en lenguaje Matlab.	114
5.4.1 Central Hidroeléctrica Machupicchu II.	115
5.4.1.1 Región de operación del generador síncrono utilizando software en Matlab.	117
5.4.2 Central Hidroeléctrica Chaglla.	118
5.4.2.1 Región de operación del generador síncrono utilizando software en Matlab.	120
5.4.3 Central Hidroeléctrica Huanza.	121
5.4.3.1 Región de operación del generador síncrono utilizando software en Matlab.	123
5.4.4 Central Hidroeléctrica Cerro del Águila.	124
5.4.4.1 Región de operación del generador síncrono utilizando software en Matlab.	126
5.4.5 Central Hidroeléctrica Santa Teresa.	127
5.4.5.1 Región de operación del generador síncrono utilizando software en Matlab.	129
5.4.6 Central Hidroeléctrica Cheves.	130
5.4.6.1 Región de operación del generador síncrono utilizando software en Matlab.	132
EVALUACIÓN.	133

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO – I. GENERALIDADES

Figura 1.1. Estadística de fallas en unidades de generación año 2014.	19
--	----

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

Figura 2.1. Modelo gráfico de la máquina síncrona.	32
Figura 2.2. El diagrama fasorial del Generador síncrono de polos salientes.	33
Figura 2.3. Esquema de rotor cilíndrico y rotor de polos salientes.	34
Figura 2.4. Rotor cilíndrico o sin saliencia.	35
Figura 2.5. Esquema de rotor de polos salientes.	36
Figura 2.6. Rotor de polos salientes.	37

	Pág.
Figura 2.7. Devanados trifásicos de la armadura: a1, a2, a3.	38
Figura 2.8. Estator y los devanados de armadura del generador síncrono.	40
Figura 2.9. Circuito equivalente del generador síncrono.	41
Figura 2.10. Diagrama fasorial del generador síncrono.	42
Figura 2.11. Diagrama fasorial modificado del generador síncrono.	43
Figura 2.12. Diagrama fasorial del generador síncrono en condición de sub-excitado.	44
Figura 2.13. Gráfica de los polos salientes linealizados y la fuerza magnetomotriz producida	46
Figura 2.14. Diagrama fasorial del generador síncrono con rotor de polos salientes	47
Figura 2.15. Carta de Operación del generador síncrono con rotor de polos salientes	49
Figura 2.16. La curva de la corriente de armadura del generador síncrono con rotor de polos salientes.	50
Figura 2.17. Gráfica de la potencia mecánica máxima de la turbina o motor primo del generador síncrono con rotor de polos salientes.	51
Figura 2.18. Gráfica de la potencia mecánica máxima de la turbina o motor primo del generador síncrono con rotor de polos salientes.	52
Figura 2.19. Diagrama fasorial del generador síncrono	53
Figura 2.20. Gráfica del lugar geométrico de la corriente máxima de excitación	55
Figura 2.21. Gráfica del diagrama fasorial del generador de polos salientes.	55
Figura 2.22. Gráfica de ecuación de Limacon de Pascal	57
Figura 2.23. Construcción del lugar geométrico del límite de la corriente mínima de excitación para generadores de polos salientes.	57
Figura 2.24. Gráfica de los límites de estabilidad de los generadores de polos lisos	58
Figura 2.25. Gráfica de las curvas características de la Potencia-ángulo.	59
Figura 2.26. Gráfica del límite de estabilidad en generadores de polos salientes.	60
Figura 2.27. Gráfica del límite de estabilidad en generadores de polos lisos.	61
Figura 2.28. Gráfica del límite de estabilidad en generadores de polos salientes	63

**CAPÍTULO – III DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS ELÉCTRICOS DEL
GENERADOR SINCRONO Y LA INCIDENCIA DE LA TENSION Y
CORRIENTE DE EXCITACIÓN**

	Pág.
Figura 3.1. Disposición de los equipos para la prueba de circuito abierto del generador síncrono.	65
Figura 3.2. Gráfica de las características de circuito abierto del generador síncrono	66
Figura 3.3. Disposición de los equipos para la prueba de corto circuito del generador síncrono.	66
Figura 3.4 Gráfica de la característica de corto circuito del generador síncrono.	67
Figura 3.5 Gráfica de las pruebas de deslizamiento del generador síncrono.	68
Figura 3.6 Gráfica de las pruebas de deslizamiento del generador síncrono.	69
Figura 3.7 Curva característica de la temperatura del bobinado de armadura.	69
Figura 3.8 Curva característica de vacío y cortocircuito.	70
Figura 3.9 Circuito equivalente por fase de la máquina síncrona.	72
Figura 3.10 Características de vacío y corto circuito	73
Figura 3.11 Diagrama de conexiones	74
Figura 3.12 Relación entre la corriente de excitación y la tensión en vacío.	75
Figura 3.13 Diagrama a instalar	75
Figura 3.14 Relación entre la corriente de campo y corriente de corto circuito.	76
Figura 3.15 Súper posición de las figuras 3.13 y 3.14.	78

CAPÍTULO – IV DE TERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES FASORIALES DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE POTENCIA Y, LA GRÁFICA DE LOS LIMITES DE OPERACIÓN DEL GENERADOR SÍNCRONO (APLICACIÓN C.H. MACHUPICCHU II – G1)

Figura 4.1. Diagrama fasorial del generador de Polos Salientes.	81
Figura 4.2. Diagrama vectorial de corrientes del Generador de Polos Lisos.....	82
Figura 4.3. Diagrama vectorial de corrientes del generador de Polos Salientes.....	83
Figura 4.4. Diagrama vectorial de Tensiones del generador de polos lisos y salientes.....	83
Figura 4.5. Diagrama vectorial de potencias del generador de polos lisos y salientes.	84
Figura 4.6. Diagrama vectorial para el cálculo total de la potencia activa.....	85
Figura 4.7. Lugar geométrico de la corriente máxima del estator	87
Figura 4.8. Lugar geométrico de las variaciones de la curva Limacón de Pascal	88

	Pág.
Figura 4.9. Lugar geométrico de la Corriente Máxima de excitación (Limacon de Pascal)	89
Figura 4.10. Lugar geométrico de la máxima potencia de la turbina(Recta paralela a Q)	90
Figura 4.11. Lugar geométrico de la Corriente mínima de excitación (Limacon de pascal)..	91
Figura 4.12. Determinación matemática del lugar geométrico de la estabilidad teórica	93
Figura 4.13. Lugar geométrico de la corriente de estator MACHUPICCHU: G1.	97
Figura 4.14. Lugar geométrico de la corriente máxima de excitación MACHUPICCHU:G1.98	98
Figura 4.15. Lugar geométrico de la potencia máxima de la turbina MACHUPICCHU:G1. 99	99
Figura 4.16. Lugar geométrico de la potencia mínima MACHUPICCHU: G1.	100
Figura 4.17. geométrico de la corriente de excitación cero MACHUPICCHU: G1.	101
Figura 4.18. Lugar geométrico de la corriente mínima de excitación MACHUPICCHU:G1. 102	102
Figura 4.19. Lugar geométrico de la estabilidad permanente teórica MACHUPICCHU:G1.. 103	103
Figura 4.20. Lugar geométrico de la estabilidad permanente teórica MACHUPICCHU:G1.. 104	104
Figura 4.21. Región de operación del generador síncrono MACHUPICCHU:G1.	105

**CAPÍTULO – V DESARROLLO DE UN SOFTWARE EN LENGUAJE MATLAB PARA
GRAFICAR LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE POTENCIA Y LA
APLICACIÓN DE LA MISMA EN ALGUNAS C.H. DEL SEIN**

Figura 5.1. Entorno de trabajo del software.	109
Figura 5.2. Espacio de salida de la gráfica de las curvas de capacidad.	109
Figura 5.3. creación de los ingresos y salidas de datos.	111
Figura 5.4. creación de los ingresos y salidas de datos.	112
Figura 5.5. Lugar geométrico de las curvas de capacidad de potencia.	112
Figura 5.6. Flujograma del software para la gráfica de las curvas de Capacidad.	113
Figura 5.7. Región de operación del generador síncrono MATLAB MACHUPICCHU:G1.117	117
Figura 5.8. Región de operación del generador síncrono CHAGLLA:G1.	120
Figura 5.9. Región de operación del generador síncrono HUANZA:G1.	123
Figura 5.10. Región de operación del generador síncrono CERRO DEL AGUILA:G1.	126
Figura 5.11. Región de operación del generador síncrono SANTA TERESA:G1.	129
Figura 5.12. Región de operación del generador síncrono CHEVES:G1.	132

INDICE DE TABLAS

CAPÍTULO – III DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS ELÉCTRICOS DEL GENERADOR SINCRONO Y LA INCIDENCIA DE LA TENSION Y CORRIENTE DE EXCITACIÓN

Tabla 3.1. Medición de la tensión en vacío, y corrientes de excitación.	74
Tabla 3.2. Medición de la corriente de campo y la corriente de corto circuito.	76
Tabla 3.3. Medición de la corriente de campo y la corriente de corto circuito.	77
Tabla 3.4. Resumen de la tabla 3.3.	78

CAPÍTULO – IV DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES FASORIALES DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE POTENCIA Y, LA GRÁFICA DE LOS LIMITES DE OPERACIÓN DEL GENERADOR SINCRONO (APLICACIÓN C.H. MACHUPICCHU II – G1)

Tabla 4.1. Características de la CENTRAL.HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II. ..	95
--	----

CAPÍTULO – V DESARROLLO DE UN SOFTWARE EN LENGUAJE MATLAB PARA GRAFICAR LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE POTENCIA Y LA APLICACIÓN DE LA MISMA EN ALGUNAS C.H. DEL SEIN

Tabla 5.1. Características de la CENTRAL.HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II. ..	115
Tabla 5.2. Características de la CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHAGLLA.	118
Tabla 5.3. Características de la CENTRAL HIDROELÉCTRICA HUANZA.	121
Tabla 5.4. Características de la CENTRAL HIDROELÉCTRICA CERRO DEL AGUILA.	124
Tabla 5.5. Características de la CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTA TERESA.	127
Tabla 5.6. Características de la CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHEVES.	130

CONCLUSIONES.

SUGERENCIAS.

BIBLIOGRAFIA.

ANEXOS.

RESUMEN

Un sistema eléctrico en general tiene que garantizar la calidad de suministro y de producto de la energía eléctrica sin crear perturbaciones, perder la estabilidad y cuidar la vida útil del equipamiento.

El problema que abordó el presente proyecto está relacionada con las condiciones operativas del generador síncrono tanto de polos lisos o de polos salientes; es decir, analizar a las variables de entrada y de salida, expresadas como ecuaciones y gráficas, entre ellos el par (T_r), velocidad (ω_r), corriente de excitación (I_f), tensión inducida (E_a) y tensión de armadura (V_a).

El otro problema considerado se refiere a los límites de operación de las variables y la identificación de las zonas de operación adecuadas y zonas críticas, las que están relacionadas con el control, el mantenimiento y la toma de decisiones.

El objetivo formulado fue evaluar las curvas de capacidad de potencia y el análisis gráfico para una mejor definición funcional integrada de los límites de operación del generador síncrono, para lograr este objetivo se evaluaron los límites de las curvas de capacidad de la corriente de campo, corriente del estator, el par mecánico, estabilidad teórico y práctico; graficando las mismas mediante un software interactivo en Matlab y se determinó los límites de operación de los generadores síncronos de las centrales hidroeléctricas Chaglla, Cerro del Águila, Quitaraca, Santa Teresa, Cheves y Machupicchu II, como estudio de casos.

Por otra parte, se analizaron las ecuaciones matemáticas de las curvas de capacidad en función de las potencias activa P y la potencia reactiva Q expresadas en coordenadas rectangulares y polares del generador síncrono, se graficó los lugares geométricos y determinó el comportamiento del generador y los límites de operación en función de las diferentes variables del generador.

La gráfica y la visualización de los puntos de funcionamiento del generador síncrono acompañado de las curvas de potencia o capacidad, son de gran aplicación, debido a que permiten mantenimientos preventivos e informan sobre la posibilidad de sobrepasar los límites operativos y consecuentes fallas que pudieran presentarse.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los Generadores síncronos trifásicos tienen aplicación en todos los sistemas de generación eléctrica de grandes potencias especialmente en las Centrales Eléctricas que alimentan a los Sistemas Eléctricos Interconectados; en el caso del Perú el SEIN, las centrales hidroeléctricas, térmicas a gas, eólicas, biogás y otras de gran capacidad utilizan los generadores síncronos en la etapa de transformación de energía mecánica rotatoria a energía eléctrica. Es cierto que en muchas centrales pequeñas se tiende a usar los generadores asíncronos de inducción, pero sin embargo para generaciones importantes su línea de acción está bastante limitado. La operación de los Generadores síncronos requiere el control de muchas variables entre ellas las mecánicas, eléctricas, magnéticas, térmicas e inclusive el ruido audible; en el presente proyecto las ecuaciones de equilibrio del generador se expresan para la operación en estado estacionario, que de por sí ya es un campo muy amplio y complejo.

Desde la óptica práctica y con la intención de facilitar la comprensión operativa del Generador síncrono, se han descrito y planteado un conjunto de métodos tanto analíticos como gráficos tomando en cuenta la aplicación específica a la que estaba dirigida. Hace muchos años atrás los métodos gráficos tuvieron bastante aplicación en el análisis de las “Curvas de Capacidad del Generador síncrono” pero, sin embargo, estas gráficas tenían ciertos defectos de precisión y versatilidad de manejo, sin contar con el tiempo que implicaba su gráfica e implementación para cada caso o punto de operación de la máquina.

En la actualidad y en virtud al desarrollo de las herramientas informáticas es posible desarrollar métodos gráficos de evaluación del comportamiento del Generador síncrono en diferentes puntos de operación, de tal forma que directa, práctica y visualmente se pueda predecir el comportamiento de las variables y parámetros de esta máquina en cualquier punto de operación y esencialmente *evaluar inclusive los límites críticos* de operación.

En esta perspectiva, el objetivo del presente proyecto es determinar los límites de operación del generador síncrono mediante el análisis gráfico de las curvas de capacidad de potencia, las que serán obtenidas a partir de los parámetros y un estudio de casos.

Los Autores

CAPÍTULO - I

GENERALIDADES

1.1. El problema.

1.1.1. Selección del problema.

El uso de las máquinas eléctricas en la generación de energía eléctrica constituye una de las aplicaciones fundamentales, especialmente la aplicación de los generadores síncronos o los denominados alternadores. Estas máquinas eléctricas tiene varias puertos de entrada y salida de energía, una de ellas es la *puerta de entrada de energía mecánica* con las variables de torque o par (T_r) y velocidad (W_r) las mismas que son obtenidas normalmente de las turbinas, motores primo o de combustión interna, la otra *puerta de entrada de energía eléctrica* es de corriente continua o excitatriz con las variables tensión (V_{cd}) y de corriente (I_{cd}) señales de tensión y corriente continua que ingresan a los devanados de los polos del rotor produciendo campos fijos en el tiempo y en el espacio (Φ), la otra *es la salida eléctrica* que está conectada a la red y la carga con sus variables de tensión $V(a)$ y corriente $I(a)$ alternas y trifásicas.

Uno de los problemas operativos del generador síncrono a diferencia de otras máquinas es el control de las variables de cada una de las fuentes de entrada y de salida como son: T_r , W_r , V_f , I_f , Φ , E_a , V_a , I_a , además de frecuencia f y los parámetros de la máquina. Cuando el generador opera, la carga no es constante muy al contrario esta varía en diferentes porcentajes de forma aleatoria de acuerdo al consumo del cliente, además que el incremento o variabilidad de carga implica una carga activa o reactiva y también la variabilidad del factor de potencia. Una forma de analizar la interacción de las fuentes y por consiguiente de las variables mencionadas es mediante el modelamiento y el uso de la *Función de Transferencia*, pero tiene algunas desventajas, no muestra las fuentes y sus valores de manera funcional, integrada y gráfica en diferentes puntos de operación, es decir, no es muy explícita; pero sin embargo, existe un método práctico basado en el análisis gráfico de las curvas de comportamiento *o curvas de capacidad de potencia* que en esencia es la gráfica de los lugares geométricos de las diferentes ecuaciones operativas del generador, para luego interpretarlas, analizarlas y evaluarlas en forma gráfica y práctica visualizando al mismo tiempo todas las curvas de comportamiento del generador. En la actualidad se tienen herramientas graficadoras que permiten un análisis amigable e interactuante para efectos de análisis operativo gráfico del generador a diferencia de

las gráficas manuales que se realizaban hace muchos años atrás.

Otro problema que se presenta en el análisis de las curvas de capacidad de potencia es determinar y luego evaluar los *límites de operación*, es decir identificar las zonas donde la operación del generador es normal y que zonas no son adecuadas y cuáles son las críticas, para luego explicarlas caso por caso y tomar decisiones; el operador del generador debe estar capacitado en la interpretación de las curvas operativas que representan al comportamiento del generador concordante con los sistemas de control que también cumplen similar función, pero que no explican ni evalúan el comportamiento de las variables y parámetros del sistema de generación.

Si no se conoce las ecuaciones de equilibrio y las correspondientes curvas de capacidad de potencia, así como el análisis gráfico de los límites de operación del generador, no es posible explicar menos evaluar las condiciones operativas normales y críticas, por consiguiente, no podrá tomarse decisiones correctas en caso de operación inestable o en casos de mantenimientos preventivos o correctivos.

En consecuencia, para un análisis exhaustivo del generador síncrono desde el punto de vista operativo es importante conocer en detalle el comportamiento de las variables en diferentes puntos de operación y poder evaluar las características multifuncionales e intervinientes de las variables para definir puntos específicos de comportamiento.

En la actualidad, la energía eléctrica debe de ser suministrada dentro de los parámetros estipulados por la norma técnica de calidad de los servicios eléctricos ya que es un determinante de una eficiente operación de las centrales de generación eléctrica; por lo cual estas empresas se encuentran invirtiendo en su mantenimiento, ampliación y renovación de sus equipos eléctricos así como en los estudios de coordinación de protección y análisis de confiabilidad para brindar al cliente una calidad de producto de acuerdo a norma, que será controlado y verificado por el organismo supervisor de la energía y minería - OSINERGMIN.

Es por lo expuesto anteriormente que todas las empresas de generación eléctrica tienen la responsabilidad de operar de acuerdo a las condiciones técnicas de los grupos de generación reportados al MINEM; para lo cual se hace necesario la presentación del diagrama circular de potencia o *Curva de Capacidad actualizada*, con sus sectores de operación en estado estacionario.

Cada año el sistema eléctrico interconectado nacional a exigencia de los entes reguladores, publican información estadística sobre comportamiento de los grupos de generación de las

diferentes centrales hidroeléctricas, esta información es fundamental como se aprecia en anexos del presente trabajo.

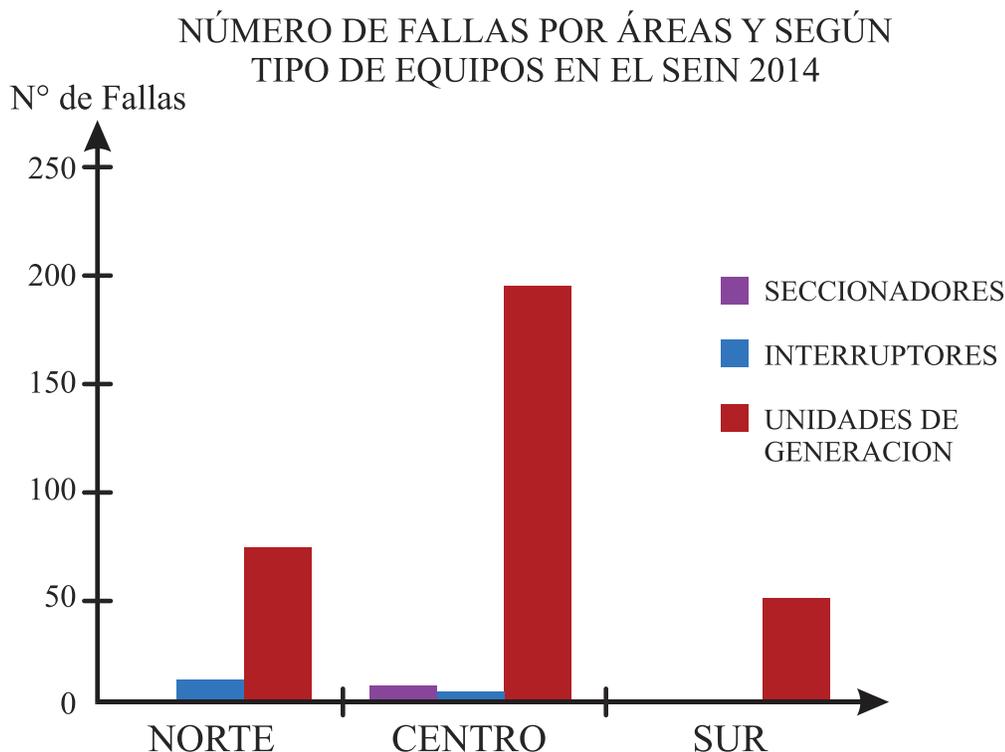


Figura 1.1 : Estadística de fallas en unidades de generación año 2014.
Fuente: SEIN

En la figura 1.1 se aprecia una muestra del año 2014, que hay una gran cantidad de veces y grupos de generación que salen del sistema por algún motivo y/o especialmente por cuestiones de desconocimiento de niveles de operación o simples fallas de operación, o por acción de sistemas de protección de los grupos de generación que de alguna manera dependen de una carta de operación.

Se reafirma entonces que el análisis de los límites o lugares geométricos de operación tiene gran importancia; en tal sentido, será de gran utilidad conocer en detalle las regiones en la que la máquina sincrónica con y sin saliencia operará de forma favorable o desfavorable, además de determinar las causas y los efectos cuando el generador síncrono opera cerca de los límites críticos de las curvas operativas. Finalmente, la evaluación de las *curvas de capacidad de potencia* mediante el análisis gráfico nos brindara las regiones en las cuales los grupos de generación sincrónica operan óptimamente, también significará un aporte de carácter académico como herramienta didáctica para la enseñanza del comportamiento de los generadores síncronos.

1.1.2. Formulación del problema.

1.1.2.1. Problema general.

¿De qué manera la evaluación de las curvas de capacidad de potencia y el análisis gráfico permitirán una mejor definición funcional integrada de los límites de operación del generador síncrono?

1.1.2.2. Problemas específicos.

A. ¿En qué medida intervienen la tensión y corriente de la excitatriz en la determinación de los límites de operación del generador síncrono?

B. ¿Cómo interviene la potencia activa P y la potencia reactiva Q en las ecuaciones de las curvas de capacidad de potencia que permitan graficar y definir los límites de operación del generador síncrono?

C. ¿De qué manera, un software que grafique las curvas de capacidad, favorecerán el buen comportamiento de los generadores y operación de las mismas?

1.1.3. Objetivos del problema.

1.1.3.1. Objetivo general

Evaluar las curvas de capacidad de potencia y el análisis gráfico para una mejor definición funcional integrada de los límites de operación del generador síncrono.

1.1.3.2. Objetivos específicos

a.- Demostrar la incidencia de la tensión y corriente de la excitatriz en la determinación de los límites máximos y mínimos de operación del generador síncrono.

b.- Determinar las ecuaciones de las curvas de capacidad en función de las potencias activa P y la potencia reactiva Q para graficar los límites de operación del generador síncrono.

c.- Desarrollar un software en lenguaje Matlab, que nos permita graficar las curvas de capacidad de potencia del generador síncrono para polos salientes y polos lisos.

1.1.4. Justificación de la investigación.

La demanda de un servicio eléctrico de calidad es una exigencia permanentemente, la misma se traduce en un conjunto de características, técnicas y comerciales, inherentes al suministro

eléctrico. La calidad de los servicios eléctricos esta normada por el Ministerio de Energía y Minas mediante las Normas técnicas de Calidad de los Servicios Eléctricos NTSC¹ y viene configurada entre otros por los siguientes aspectos:

- a.- Calidad de suministro, relativo a las interrupciones de servicio, la duración y la frecuencia.
- b.- Calidad del producto, relativa a las características de la onda de tensión, la frecuencia y la presencia de armónicos.

La calidad de suministro y la calidad del producto están relacionadas en gran medida a la operación satisfactoria de los generadores síncronos, en consecuencia, estas máquinas eléctricas deberán estar en condiciones convenientes de operación y control para evitar posibles interrupciones o anomalías en las características de la energía eléctrica.

La simplificación operativa en los sistemas de control en las cuales se evalúan el comportamiento de los generadores síncronos tiene pertinencia, debido al permanente cambio de la carga y consecuentemente al constante cambio del punto de operación de la máquina eléctrica. Una herramienta básica para la previsión de carga y cambios del “punto de operación” es la evaluación operativa de las curvas de capacidad de potencia del generador síncrono; es decir, conocer entre otros la gráfica de recorridos límite de corriente de campo, corriente del estator, límite mínimo y máximo de la turbina, límite del calentamiento de cabezales o de subexcitación, límite práctico y teórico de estabilidad, para luego determinar los límites de operación del generador síncrono.

En el presente trabajo se plantea utilizar una herramienta gráfica que permita visualizar las curvas de capacidad de potencia del generador síncrono para su correspondiente evaluación y determinar las características operativas que proporcionen datos para optimizar la operación de las máquinas de generación eléctrica.

Un aporte significativo es demostrar la dependencia existente entre las diferentes puertas de entrada y de salida de energía del generador síncrono, es decir la *puerta de entrada de energía mecánica* con las variabilidades de par (T_r) y velocidad (W_r), la *puerta de entrada de energía eléctrica* de corriente continua o excitatriz con las variabilidades de tensión (V_f) y de corriente

¹ Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos, Ministerio de Energía y Minas- Dirección General de Electricidad, Lima 1997.

(I_f) como señales de tensión y corriente continua que ingresan a los devanados de los polos del rotor produciendo campos fijos en el tiempo y en el espacio (Φ), la otra *fente es de salida eléctrica* que está conectada a la red y la carga con sus variables de tensión $V(a)$ y corriente $I(a)$, tensión y corriente de armadura.

Esta dependencia entre las variables será demostrada mediante las relaciones teóricas y la aplicación de los parámetros en un software gráfico y graficar cada una de las curvas de capacidad de potencia para desarrollar el análisis gráfico de los límites de operación del generador síncrono de polos lisos y de polos salientes.

1.1.5. Limitaciones de la investigación.

Entre las limitaciones que se consideran importantes mencionar son las siguientes:

- a.- El diseño y aplicación de la herramienta informática que grafique cada una de las características operativas en función de los datos iniciales del generador síncrono será aplicable solamente para operación en estado permanente o puntos de operación en zonas de estado estable.
- b.- La prueba experimental para determinar los parámetros y las características operativas, así como las curvas de capacidad de potencia se desarrollarán con generadores de potencias menores a las que se utilizan en los grupos de generación convencionales del sistema eléctrico.
- c.- Los generadores de las empresas adscritas al Sistema eléctrico interconectado nacional permanentemente están expuestos a pruebas experimentales, en tal razón la página web del COES (Comisión de Operación económica del sistema) y del MINEM muestran los valores de los parámetros de los generadores. En tal sentido, como apoyo se hizo uso de dicha base de datos para graficar las curvas de capacidad de potencia.

1.2. Metodología.

1.2.1. Método de la investigación

Para establecer el método de la investigación, es necesario identificar el tipo de investigación a desarrollar; en tal sentido el presente trabajo de investigación está identificada de la siguiente forma:

De acuerdo al ENFOQUE es de carácter CUANTITATIVO en vista de que será un trabajo de

evaluación operativa del generador síncrono donde se obtendrá una base de datos que servirán para desarrollar un proceso inductivo de investigación.

De acuerdo al OBJETIVO que persigue es una investigación APLICADA o tecnológica en vista de que se pretende desarrollar el análisis funcional integrado de los límites de operación del generador síncrono.

De acuerdo al ALCANCE O NIVEL es una investigación EXPLICATIVA, porque está dirigida a evaluar las curvas de capacidad de potencia mediante el análisis gráfico y explicar los límites de operación del generador síncrono.

En consecuencia, el método a utilizar será el EXPLICATIVO, que contiene las estrategias para lograr los objetivos, expresa el procedimiento para comprobar las hipótesis planteadas para dar respuesta al problema planteado, tiene tres etapas básicas: Proceso, Control y Objetivos.

1.2.2. Diseño de investigación.

Se utilizó el DISEÑO CUASI EXPERIMENTAL que cumple con las siguientes etapas:

- A.- Manejo de la variable independiente.
- B.- Cálculo del efecto que produce la variable independiente en la variable dependiente
- C.- Construcción de aplicaciones.

1.2.3. Técnicas y herramientas de recolección de datos.

En el presente trabajo se utilizó las siguientes técnicas y herramientas:

- Observación y adquisición de datos; utilizando como herramienta la guía o procedimiento de laboratorio para las diferentes pruebas.
- Revisión de materiales académicos y en las páginas web del COES, OSINERGMIN, MINEM y empresas de generación eléctrica.
- Prueba experimental de laboratorio que permitió validar los datos de las diferentes variables para lograr una base de datos y graficar las curvas de capacidad de potencia.

1.2.4. Análisis de datos.

Para el análisis de datos fue necesario utilizar los diferentes estadígrafos de análisis cuantitativo, como son los histogramas y correlación.

Para el gráfico de las curvas de capacidad de potencia del generador síncrono se utilizó un software graficador en Matlab con la finalidad de analizar el gráfico interactivo.

1.3. Hipótesis y variables.

1.3.1. Hipótesis general

Las evaluaciones de las curvas de capacidad de potencia mediante el análisis gráfico permitirán una mejor definición funcional de manera integrada de los límites de operación del generador síncrono”

1.3.2. Hipótesis específicas

- A.- La tensión y corriente de la excitatriz intervienen en gran medida en la determinación de los límites de operación del generador síncrono.
- B.- Las ecuaciones de las curvas de capacidad están relacionadas directamente con las potencias activa P y reactiva Q y definen los límites de operación del generador síncrono.
- C.- El desarrollo del software gráfico, nos permite visualizar e identificar automática e inmediatamente los límites de operación y la región correcta de operación de un generador síncrono de polos salientes y polos lisos.

1.3.3. Variables e indicadores.

Las variables del presente trabajo de investigación son las siguientes:

1.3.3.1. Variable Independiente e indicadores.

La variable independiente conocida como causa es:

“El Generador Síncrono”

Los indicadores son:

- Número de polos.
- Potencia nominal de fabricación.
- Tensión nominal de fabricación.

1.3.3.2. Variable dependiente e indicadores

La variable Dependiente conocida como efecto es:

A. “Las curvas de capacidad de potencia”

Los indicadores son:

- La potencia activa del generador síncrono
- La potencia reactiva del generador síncrono
- Las reactancias síncronas X_d y X_q
- El par, velocidad, tensión y factor de potencia.

B. “Los límites de operación”

Los indicadores son:

- Límites de corriente de campo
- Límites de corriente del estator
- Límites mínimo y máximo de la fuente de energía mecánica
- Límite práctico y teórico de estabilidad

1.3.3.3. El objeto de estudio

El objeto de estudio es la máquina síncrona de polos salientes.

CAPÍTULO - II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes.

Con la finalidad de conocer los trabajos precedentes respecto a las curvas características operativas del generador, se presentan los siguientes antecedentes de diferentes autores:

2.1.1. Artículo: Evaluación de la operación del generador síncrono basado en la formulación matemática de la curva de capacidad¹.

En el artículo presentado por M. Sc. D. Zócimo Náupari Huatuco, M.Sc. Manfred F. Bedrigaña Aronés y Dr. V. Leonardo Casas. Manifiestan que: "...la operación de la máquina síncrona puede ser representado utilizando el diagrama de operación o curva de capacidad. La construcción de dicha curva se realiza considerando varios límites los cuales definen la región donde el generador opera en forma estable. Desde hace varias décadas, los límites de potencia activa y reactiva generada, que definen la entrega o absorción de potencia de una máquina síncrona fueron estudiadas por muchos investigadores quienes la denominaron carta de capacidad. En ese entonces se dieron pautas para la construcción geométrica de esa curva de operación y siempre fue posible construir de forma práctica, pero ese método resultaba complejo y laborioso. Actualmente la curva de capacidad de la máquina síncrona de polos salientes y de rotor cilíndrico, considerando todos los límites, pueden ser graficados automáticamente con el computador siempre que fuesen conocidas las ecuaciones matemáticas de dichos límites (p.301)." En el mismo documento concluyen de la siguiente forma: "Es necesario enfatizar que el método analítico para la representación de los límites de operación de los generadores síncronos que se muestran en este trabajo ha sido desarrollado en coordenadas polares para facilitar la construcción de estos límites. El diagrama de operación P-Q de la máquina es construida en forma más sencilla con el método geométrico usado en referencia. La construcción del diagrama de operación de la máquina síncrona a partir de las ecuaciones obtenidas para los límites, utilizando la asistencia de un computador y usando lenguajes de programación y su consecuente análisis computacional, resulta muy útil para el ingeniero de sistemas de potencia, para

¹ Zócimo Náupari Huatuco, M.Sc. Manfred F. Bedrigaña Aronés y Dr. V. Leonardo Casas. (2011, enero), XVII Conimera. Memorias, p. 301-309.

el operador de una central de generación eléctrica y para el área académica que estudia el comportamiento de la máquina síncrona (p.307)”.

Como es posible apreciar, la tendencia actual es la gráfica de las curvas de operación de la máquina síncrona a partir de las ecuaciones obtenidas para los límites es utilizando la asistencia de programas de un computador; en tal sentido, visualizar las características de funcionamiento de la máquina síncrona principalmente las curvas de capacidad posibilita una interpretación directa y viable, evitando de este modo operaciones inadecuadas que estén fuera de los límites pre-establecidos y consecuentemente evitar fallas y prolongar el tiempo de vida útil del generador síncrono.

2.1.2. Tesis: Implementación y análisis de la curva de capacidad del generador síncrono de polos salientes utilizando software de ingeniería².

En la tesis indicada, Castillo Haro, Raúl Eligio manifiestan que: “En las centrales hidroeléctricas constantemente se controlan los parámetros de operación de los equipos que conforman los grupos de generación, es por ello que se implementan los controles operativos, que son documentos que permiten constantemente registrar y hacer seguimiento a todos los parámetros operativos, para llevar el control óptimo del funcionamiento de dichos grupos de generación.

Caso particular es el generador síncrono, que es el equipo más importante dentro del grupo de generación y que por consiguiente se requiere llevar un control óptimo de todos sus parámetros operacionales tales como: las temperaturas del bobinado tanto del rotor como del estator, aislamiento de los bobinados (descargas parciales), vibraciones, potencia máxima y mínima de la máquina motriz (turbina), velocidad de rotación (RPM) de la turbina, frecuencia, tensión y corriente tanto del sistema de excitación como en los bornes del generador, la potencia reactiva que absorbe o que genera, etc.

Por lo tanto, realizando el control adecuado de estos parámetros, se logra generar la mayor cantidad de potencia activa y por ende el alargamiento de la vida útil tanto del generador síncrono como de los demás equipos de generación”. Entre las principales conclusiones que sustenta la referida tesis son:

² Castillo Haro, Raúl,(2013). *Implementación y análisis de la curva de capacidad del generador síncrono de polos salientes utilizando software de ingeniería*. Lima. Perú, p. 4,209.

- “1.-El desarrollo matemático expresada en la deducción de las ecuaciones de los límites de operación, más las pruebas de campo y la experiencia que se tiene de la operación real del generador síncrono, permiten determinar la curva de capacidad del Grupo de Generación N° 5 de la CH Yaupi.
- 2.-Debido a la importancia de los generadores síncronos en los sistemas de generación de energía eléctrica, es fundamental conocer los parámetros de operación del generador, así como las regiones de operación dentro de la curva de capacidad del mismo, para asegurar la confiabilidad y no dañar la vida útil del generador síncrono.
- 3.-La implementación y el análisis de la curva de capacidad van a permitir a los operadores de las centrales hidroeléctricas conocer los puntos de operación adecuados y las regiones donde se pueden generar la mayor cantidad de potencia activa”.

La tesis mencionada ratifica que las temperaturas del bobinado sean del rotor como del estator, los aislamientos de los bobinados, las vibraciones, la potencia máxima y mínima de la turbina, velocidad de rotación de la turbina, frecuencia, tensión y corriente de la excitatriz así como de la armadura del generador, son muy importantes y están interrelacionados y tienen un campo de operación normal, luego una operación fuera de estos límites implican riesgos y principalmente la disminución de la vida útil de la máquina.

2.1.3. Tesis: Software para la determinación de la carta de operación de generadores síncronos de rotor cilíndrico³.

Esta tesis fue sustentada por Garcés Castillo, Sebastián Alejandro (2015), y manifiesta que “En la actualidad, existen algunas centrales de generación eléctrica que no cuentan con todos los diagramas de operación de sus unidades generadoras. Por lo que es necesario disponer de una herramienta que permita dibujar la carta de operación de estas. Tanto es así que se ha convertido en una exigencia por parte de las autoridades relacionadas al sector eléctrico en Chile, tales como, (Centro de despacho económico de carga – Sistema interconectado central) CDEC-SIC y CDEC-

³ Garcés Castillo, Sebastián Alejandro. (2015). *Software para la determinación de la carta de operación de generadores síncronos de rotor cilíndrico*. Santiago de Chile. Chile, p. 1, 71.

SING, que coordinan el despacho económico de carga en el sistema.

El disponer de un instrumento que pueda mostrar los límites de operación y los datos de placa en tiempo real y actualizado, permite a los operadores del sistema tomar decisiones importantes frente a cualquier contingencia y/o falla en el generador o sistema. Además de resguardar que el generador no pierda sincronismo, evitar una desconexión indeseada por parte del sistema, preservar las aislaciones en sus enrollados lo cual se traduce en no acortar la vida útil de este y que mantenga su eficiencia nominal.

El trabajo desarrolla en forma confiable y exitosa una herramienta computacional que dibuja cartas de operación de generadores síncronos de rotor cilíndrico, dentro de una interfaz proporcionada por la (Interfaz gráfica del usuario) GUI de Matlab. En la cual se representan los límites de operación del generador y se muestran en la interfaz las características nominales y de placa de este, además de la programación de un generador de datos de frecuencia, tensión y punto de operación (Q,P) utilizado en el mismo programa para representar la toma de datos que varían en el tiempo real como simulación de un sistema SCADA real. El programa se validó empleando datos de máquinas térmicas de diferentes capacidades y características, los datos de sus unidades fueron obtenidas de las fuentes; CDEC-SIC y Endesa, obteniéndose curvas bastante similares. Con la existencia de un error menor al 5%, puesto que los diagramas originales no cuentan con la recta del factor de potencia de 0.85 y esta fue trazada manualmente. Además, la curva definida por el Límite de Estator es mayor para tensiones menores lo que contradice la ecuación de E_{max} que para tensiones menores a la nominal el radio de la semicircunferencia es menor, por lo que se asume un límite por temperatura considerado por el fabricante, al igual que las rectas de estabilidad permanente, $\delta_{crít}$ presentan una atenuación al acercarse al eje Q.

Cabe considerar que para poder realizar las comparaciones se tuvo que imponer $P_{min} = 0$ para todas las unidades generadoras bajo estudio, lo cual contradice que el mínimo técnico de la turbina está en torno al 30% de la potencia nominal para máquinas térmicas de rotor cilíndrico y se consideró también para la comparación $E_{min} = 0$, salvo para la Unidad 1-2 de Huasco TV que lo tiene considerado. Esto contradice a que no es posible anular los flujos residuales en la excitatriz principal, aunque se elimine la corriente de excitación, siempre aparece una fem residual que alcanza un 15% de V. Además, que se mantiene operando con un límite de estabilidad teórico de 70° y no 90° para evitar que la máquina se salga de sincronismo. Por otro lado, es necesario definir bien, si dados los parámetros del generador, al generar las curvas de las restricciones, estas

realmente se intersectan. Puesto que depende de los parámetros de diseño si las curvas efectivamente se intersectan, es decir si $E_{m\acute{a}x}$ se intersecta primero con $S_{m\acute{a}x}$ o con $P_{m\acute{a}x}$ por ejemplo. Existiendo toda una lógica detrás de las curvas generadas. Al contar con un programa que sea capaz de graficar la carta de operación de cualquier generador de rotor cilíndrico, proporciona al operador un método fácil para tomar decisiones seguras cuando ocurre alguna contingencia o falla. La interfaz facilita la introducción de los datos, y el compilado permite la ejecución desde cualquier Matlab de la misma versión o superior, sin necesidad de otro software adicional. De acuerdo a los resultados, se concluye que se cumplieron de forma exitosa los objetivos planteados inicialmente. Es así como el programa se valida y es capaz de graficar cualquier carta de operación en forma confiable, mientras el generador sea de rotor cilíndrico (p.1, p.71)”.

El trabajo indicado tiene algunas restricciones cómo es posible notar, entre ellos la limitación está en que el software está diseñado solamente para generadores síncronos de rotor cilíndrico y por otra parte el software no está a disposición pública y es de uso restringido al autor.

Pero sin embargo se reafirma la importancia de las curvas de capacidad y la aplicación que ellas tienen en la operación de los grupos de generación.

2.1.4. Proyecto de investigación titulado “**Determinación de curvas de capacidad de una máquina síncrona de polos salientes**” elaborado por Haydn Ottoniel Mazariégo Morales.

En sus conclusiones indica que: “No se puede operar el generador sin conocimiento de sus valores nominales y sin conocimiento de los límites de operación, ya que si esto no se toma en cuenta, el generador podría ser sometido a esfuerzos mecánicos y térmicos en sus devanados provocando su daño permanente...Las curvas de capacidad de generador síncrono de polos salientes se determinan, mediante un código de programación, los límites de operación del generador cuando sean obtenidos sus valores característicos...La diferencia entre las curvas de capacidad de un generador de rotor cilíndrico y un generador de polos salientes, están en la presencia del límite de excitación, el cual está presente solo en el caso de un generador de polos salientes debido al par de reluctancia que este posee”

Se tomaron en cuenta las conclusiones formuladas por el autor de este documento, en especial al hecho de que no se puede operar el generador sin conocimiento de los valores nominales y los límites de operación.

2.2. Marco conceptual.

2.2.1. La Máquina Síncrona.

El texto de Máquinas Eléctricas de George J. Thaler y Milton L. Wilcox⁴, señala que “La energía eléctrica en abundancia ha sido la llave para la expansión industrial y el progreso material en las décadas recientes. La conversión de energía de forma mecánica a eléctrica se lleva a cabo casi exclusivamente por un dispositivo importante (El generador síncrono). Dicho dispositivo puede usarse como un generador o como un motor, sin ninguna diferencia notable en su construcción o diseño. Como generador el alternador puede operarse como una máquina independiente, pero comúnmente solo es una de tantas máquinas en un sistema de potencia interconectado, en donde opera en paralelo y en sincronismo con otros alternadores. Para operar satisfactoriamente bajo tales condiciones, el alternador debe permanecer sincronizado con el sistema y debe tomar su parte de la carga”

Las componentes constructivas de la máquina síncrona son generalmente el sistema de excitación, el rotor o campo y el estator o armadura.

El sistema de excitación puede ser básicamente mediante el conjunto de anillos rozantes y escobilla o el sistema de excitación sin escobillas.

2.2.2. El modelo de la máquina síncrona

La máquina síncrona convencional se modela mediante los ejes α , β , δ tomando en cuenta las diferentes variables del circuito eléctrico del estator, así como también del rotor y por otra parte las variables del circuito mecánico; en el modelo se consideran los parámetros concurrentes del estator y rotor considerando entre estas las impedancias, resistencias, inductancias propias mutuas y rotacionales.

Las resistencias de la bobina del estator se consideran similares en el aspecto constructivo, luego las resistencias por fase del estator son:

$$R_{\alpha} = R_{\beta} = R_{\delta} = R_s$$

La resistencia del rotor compuesto por varios devanados en serie y alimentados por corriente directa será:

$$R_r$$

⁴ Thaler George & Wilcox Milton, (1974), Máquinas Eléctrica: Estado dinámico y permanente, México DF, México, Editorial Limusa, p.253.

Los parámetros inductivos propios de los devanados del estator serán:

$$L_{\alpha} = L_{\beta} = L_{\delta} = L_{\alpha\beta\delta}^s$$

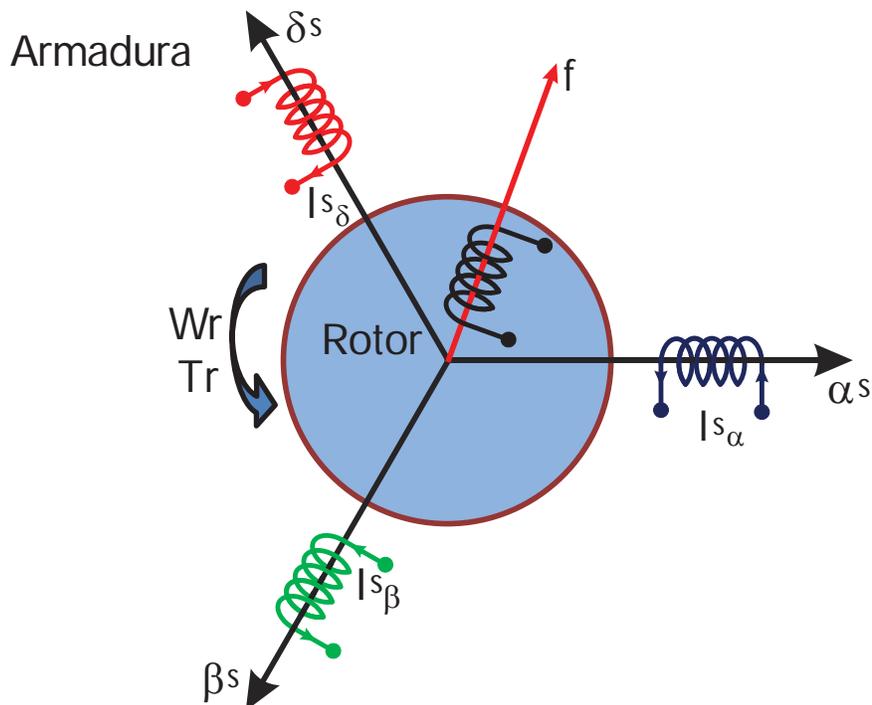


Figura 2.1 : Modelo gráfico de la máquina síncrona

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta las variables y parámetros del modelo α, β, δ la Máquina síncrona se grafica en la figura 2.1; como puede apreciarse en ella se muestran las tensiones y corrientes aplicadas en cada fase desfasadas en 120 grados eléctricos una de otra. Las inductancias rotacionales entre el devanado del rotor con respecto al estator en un modelo d-q son: G_{dq}^{rs} , G_{qd}^{rs} y las inductancias del rotor del eje en cuadratura con respecto al directo G_{qd}^{rr} , G_{dq}^{rr} son inherentes a la interrelación de los diferentes devanados.

Los circuitos eléctricos del estator tienen las variables de tensión (v) y corriente (i) para cada fase, mientras que los devanados del rotor están alimentados por corriente directa; y por otra parte el circuito mecánico tiene las variables Par (T_r) y Velocidad de giro del rotor (W_r).

La matriz (ecuación 2.1) muestra el modelo d-q del Generador síncrono, considerando las variables de tensión, de corriente y la impedancia se expresa con $p = d/dt$ del modo siguiente:

$$\begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \\ v_d^r \\ v_q^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d^s + L_d^s p & 0 & M_d^{st} p & 0 \\ 0 & R_q^s + L_q^s p & 0 & M_q^{sr} p \\ M_q^{sr} p & G_{dq}^{rs} W_r & R_q^s + L_q^s p & G_{dq}^{rs} W_r \\ -G_{dq}^{rs} W_r & M_q^{sr} p & -G_{dq}^{rs} W_r & R_q^s + L_q^s p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \\ i_d^r \\ i_q^r \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.1

Las ecuaciones (2.2), (2.3) y (2.4) de equilibrio mecánico están expresadas de la siguiente forma:

$$T_r = (Jp + D) * W_r + T_e \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$T_e = \frac{P_e}{W_r} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$T_e = G_{qd}^{rs} i_d^s i_q^r - G_{dq}^{rs} i_q^s i_d^r + (G_{qd}^{rr} - G_{dq}^{rr}) i_d^r i_q^r \quad \text{Ecuación 2.4}$$

El Diagrama fasorial del Generador Síncrono se representa en la figura 2.2, en la misma se considera la reactancia síncrona en el eje directo y la reactancia síncrona en el eje en cuadratura, así como las variables corriente y las variables tensión.

En este diagrama no se considera las resistencias en el eje en cuadratura y en el eje directo, esta simplificación facilita el análisis fasorial, y los posibles errores presentados por esta simplificación son pequeños que en la práctica no son determinantes.

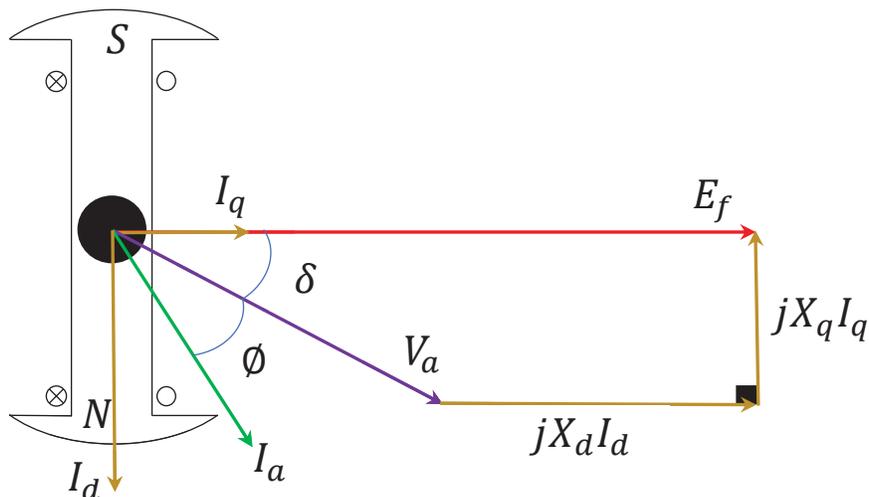


Figura 2.2: El diagrama fasorial del Generador síncrono de polos salientes
Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones de la Potencia activa P y la potencia reactiva Q, en función de los parámetros y variables esta expresada mediante las siguientes ecuaciones:

$$P = \frac{V_a E_f}{X_d} \text{sen} \delta + \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen}(2\delta) \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$Q = \frac{V_a E_f}{X_d} \text{cos} \delta + \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \text{cos}(2\delta) - \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) \quad \text{Ecuación 2.6}$$

2.2.3. El rotor.

Es de dos tipos el primero es de polos sin saliencia o denominado también cilíndrico y el de polos salientes o con saliencia, el esquema se muestra en la Figura 2.3, ambos tipos tienen sus propias características y aplicaciones.

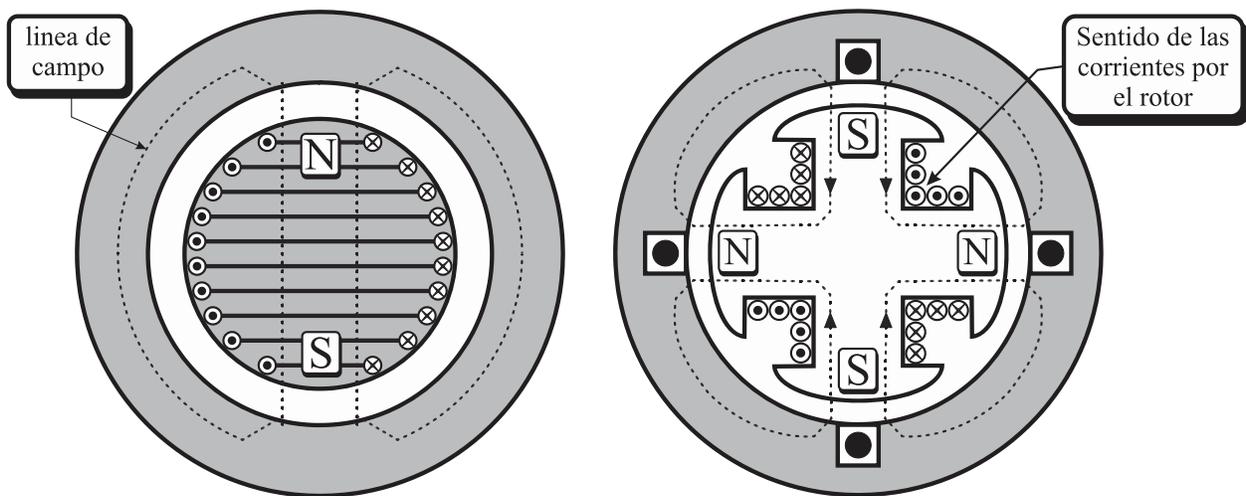


Figura 2.3: Esquema de rotor cilíndrico y rotor de polos salientes
Fuente: <http://www.dimie.uniovi.es>

El *rotor cilíndrico* se utiliza en grupos de generación de “alta velocidad” aquellos que utilizan turbinas de gas o de vapor con velocidades de 3600 rpm y 1800 rpm a 60 Hz; constructivamente respecto a sus dimensiones, la longitud axial (L) es mayor que el diámetro (D), el número de polos es de 2 y 4, siendo el primero el más usual que el segundo.

La distribución del flujo en el entrehierro es más “uniforme” y de forma más próxima a la sinusoidal de tal forma que se reduce la presencia de armónicas en las tensiones y las corrientes.

El devanado o conductor esta mejor distribuida en el entorno de la superficie del rotor y los efectos de la viscosidad del aire o ruido audible son menores.

La alimentación del devanado del rotor o de campo (f) es con señal de corriente continua (D.C.), en algunos casos es lograda mediante el uso de generadores compuestos de c.d. o sistemas de rectificación C.A. a C.D. (puentes de tiristores), denominados excitatrices estáticas.

El número de polos (P), la velocidad síncrona (W_{sin}) y la frecuencia están expresados por la ecuación 2.1.

$$f = \frac{P * W_{sin}}{120}$$

Ecuación 2.7.

La Figura 2.4 muestra un rotor del tipo cilíndrico en la cual se puede notar la superficie “lisa” y las características constructivas señaladas.



Figura 2.4: Rotor cilíndrico o sin saliencia.

Fuente: <http://www.tpetit.es/ca/galeria-de-treballs/barres-rotor-bobinat-rotor-mt>

El *rotor de polos salientes* se utiliza en grupos de generación de “baja velocidad” aquellos que utilizan turbinas hidráulicas con velocidades de 900 rpm o menores, con una frecuencia de 60 Hz; constructivamente respecto a sus dimensiones, la longitud axial (L) es menor que el diámetro (D), el número de polos puede ser de 8 o mayores, las turbinas más usuales que utiliza como fuente mecánica son las Pelton, Francis, Kaplan y Michel Banki entre otros.

La distribución del flujo en el entrehierro no es precisamente “uniforme” debido a la presencia de los polos, es por esta razón que se consideran las reactancias síncronas X_d (eje directo) y X_q (eje en cuadratura), en este tipo de rotor de polos salientes existe mayor probabilidad de la presencia de armónicas en las tensiones y las corrientes.

El devanado o conductor es del tipo concentrado en cada polo de tal forma que crean polaridades alternas en el entrehierro, como se muestra en el esquema de la figura 2.5.

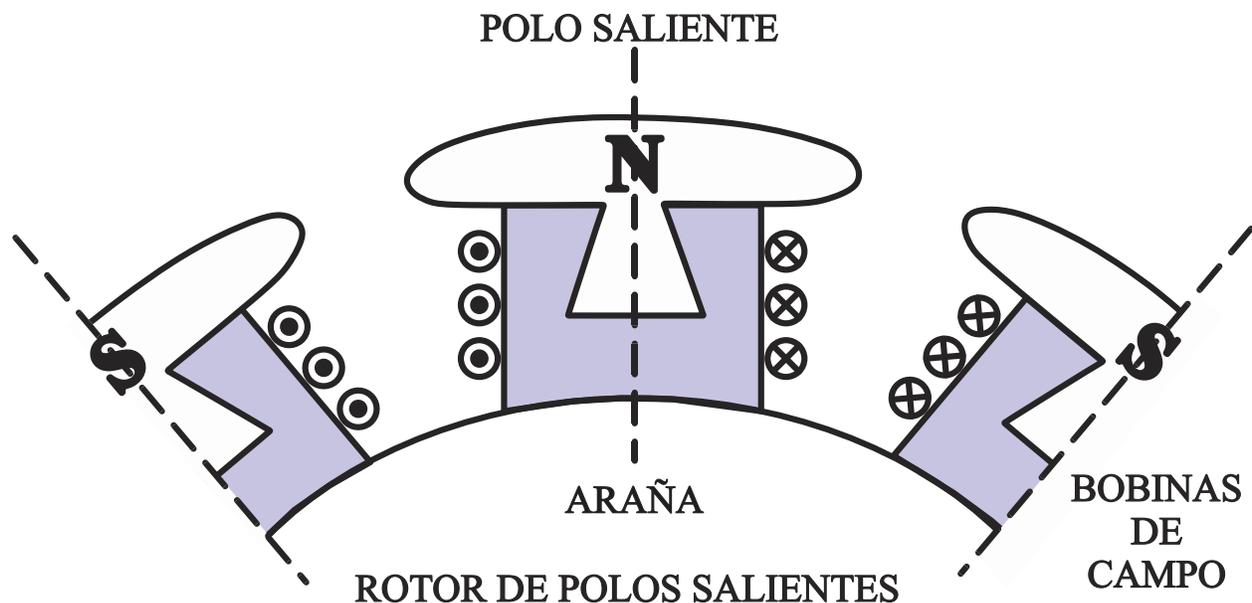


Figura 2.5: Esquema de rotor de polos salientes.
Fuente: <http://virtualaprende.com/maquinas-electricas/circuito-equivalente-generator-sincrono/>

En este caso, la alimentación del devanado del rotor a cada uno de los polos (P) es con señal de corriente continua (C.D.), obteniendo campos alternados, las fuentes de la corriente pueden ser los generadores compuestos de c.d. o sistemas de rectificación C.A. a C.D. (puentes de tiristores), denominados excitatrices estáticas.

El número de polos (P), la velocidad síncrona (W_s) y la frecuencia están expresados por la ecuación 2.7.

La Figura 2.6 muestra un rotor del tipo de polos salientes, se visualizan las características constructivas del mismo; el eje o árbol conforman normalmente una sola estructura mediante bridas especiales con el eje de la turbina que es la encargada de transmitir el Par (T_r) y la velocidad (W_r) como variables mecánicas.

También se puede apreciar que el entrehierro no es uniforme debido a la presencia de “espacios” entre los polos los mismos se encuentran ocupados por los devanados o conductores de campo. Las componentes básicas son: el eje, la araña o sistema de sujeciones ancladas al eje, los polos magnéticos y los devanados concentrados.



Figura 2.6: Rotor de polos salientes.

Fuente: <https://es.slideshare.net/mpernia/maq-sincronasmapc-sep2014>.

2.2.4. El estator.

Denominado armadura o inducido, para ambos casos de rotor cilíndrico o rotor de polos salientes el estator es similar en su estructura, está conformado básicamente por el núcleo magnético y el devanado del tipo distribuido.

Los devanados de armadura están conformados por un número determinado de espiras, y están conectados de tal manera que sus efectos eléctricos y magnéticos son acumulativos. Estos devanados pueden ser de paso completo o paso fraccional. Una bobina de paso completo se expande 180° medidos eléctricamente y una bobina de paso fraccionario se expande menos de 180° pero pocas veces menos de 120° .

Un embobinado trifásico resulta de la suma de un conjunto de bobinas de armadura desplazados a 120° y 240° medidos eléctricamente, de la primera fase para producir un sistema de tres voltajes iguales en magnitud y desplazados entre sí en 120° . La figura 2.7 muestra los devanados trifásicos desfasados.

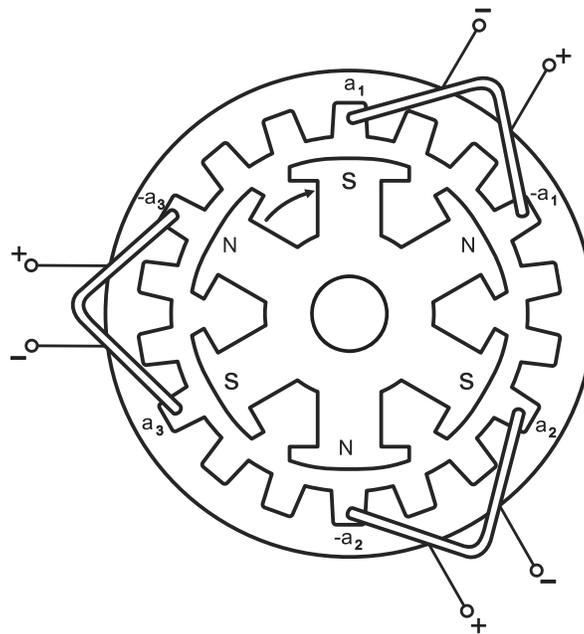


Figura 2.7: Devanados trifásicos de la armadura: a1, a2, a3
Fuente: Máquinas Eléctricas, Thaler & Wilcox.

Los bobinados se llaman *bobinados de ranura completa*, ya que ocupan una estructura donde el número de ranuras por polo es completo. Un arreglo más común para máquinas de C-A es el bobinado de ranura fraccional, para el cual el número de ranuras por polo es una fracción. El análisis de los embobinados de ranura-completa es más sencillo que el del embobinado de ranura

fraccional y aun así sirve para mostrar los principios básicos relacionados con las fmm e inductancias de los bobinados de armadura. Los bobinados de paso-fraccional tiene dos ventajas: (a) es posible el usar las mismas laminaciones del estator con el resultado de una menor inversión en dados, para estructuras de polos salientes con una variedad de numero de polos, y (b) la contribución hacia una buena forma de onda es equivalente a aquella de un embobinado de ranura integral con un gran número de ranuras por polo. Bobinados de ranura fraccional son también usados hasta alguna extensión en motores de inducción.

En general el estator del generador síncrono conocido también como armadura contiene a los devanados distribuidos trifásicos inducidos y que normalmente están conectados en estrella y con neutro; una fórmula general que explica la relación entre el flujo (Φ) producido por el campo (f), la velocidad de giro del rotor (W_r), y las constantes de diseño (K) está indicada por la ecuación mostrada.

$$e(t) = K * \Phi * N * W_r \quad \text{Ecuación 2.8.}$$

Un diagrama fasorial que incluye los fasores de voltaje, corriente, y encadenamiento de flujo facilitan el análisis del comportamiento de una máquina sincrónica de estado estable. Con el objeto de relacionar a la fase del encadenamiento del flujo al voltaje que resulta de su variación en el tiempo es necesario establecer convenciones respecto al signo de los voltajes inducidos en un generador.

La tensión inducida en bobina y el factor de paso también pueden expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_{bobina} = \frac{2\pi f N_{bobina} K_p K_d \phi}{\sqrt{2}} = 4.44 f K_p K_d N_{bobina} \phi$$

Ecuación 2.9

$$K_p = \text{sen} p \frac{\pi}{2}$$

Ecuación 2.10

Donde :

- Kp = Factor de paso
- Kd = Factor de distribución
- N = Número de espiras
- Φ = Flujo de campo

La estructura constructiva del estator tiene un núcleo en el cual están troqueladas un determinado número de ranuras y dientes en la superficie interna, las ranuras contienen a los devanados aislados adecuadamente, mientras que los dientes son los conductores del flujo magnético provenientes del campo (f) y la armadura (a), el núcleo se construye de material magnético laminado el cual también es aislado para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

La figura 2.8 muestra las componentes del estator de la máquina síncrona, se aprecia la doble capa y el paso fraccionario, en la parte externa del núcleo están los canales de ventilación y luego la carcasa de sujeción que viene a ser el soporte de las tapas las mismas que contienen a los rodamientos encargados de mantener un entrehierro simétrico entre el núcleo del rotor y el núcleo del estator.



Figura 2.8: Estator y los devanados de armadura del generador síncrono
Fuente: <https://es.dreamstime.com/foto-de-archivo-estator-de-un-motor-el%C3%A9ctrico-grande-image50782326>

2.2.5. El circuito equivalente del generador síncrono

El gráfico del circuito equivalente del generador síncrono permite identificar las variables que actúan en la máquina así como los parámetros que constituyen este generador, la estructura de campo (f) es representado mediante su efecto, es decir la tensión generada E_f y la armadura mediante la corriente de armadura (I_a), la tensión en los bornes (V_a), así mismo estarán representados la Reactancia síncrona (X_s) y la Resistencia del devanado de armadura (R_a), luego de ser identificados estos elementos se formularán las ecuaciones de equilibrio que interrelacionen las variables y los parámetros, las que servirán de insumo para la gráfica de las curvas operativas.

La figura 2.9 muestra la estructura del circuito equivalente del generador síncrono en la misma se visualiza las variables y los parámetros.

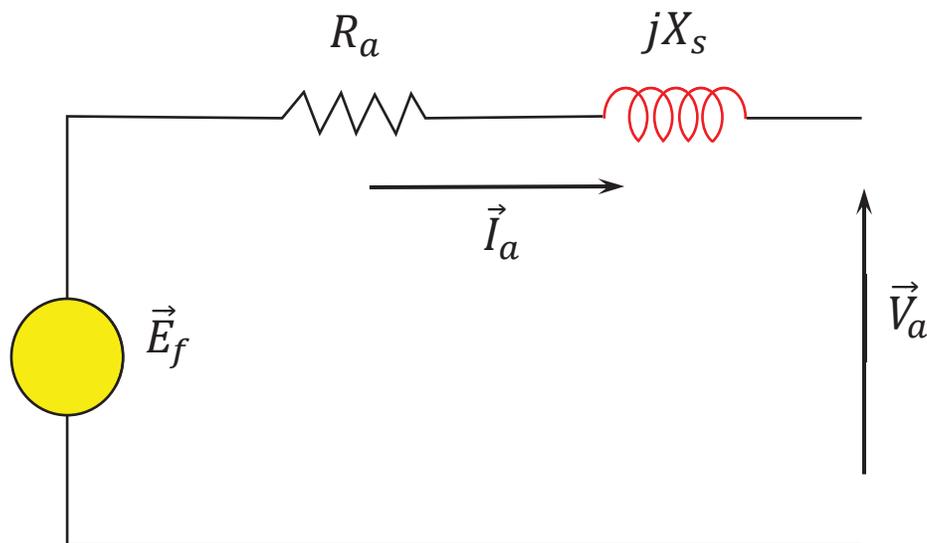


Figura 2.9: Circuito equivalente del generador síncrono
Fuente: Elaboración Propia

Del circuito equivalente se tiene que señalar que la Reactancia síncrona resulta de la suma de dos reactancias: a) La reactancia de reacción de armadura (X_{ra}) y b) La reactancia de dispersión (X_d), las mismas que son inherentes a las máquinas eléctricas rotativas. La reacción de armadura se presenta cuando circula la corriente de armadura (I_a) creando un campo magnético denominado “reacción de armadura” y que interactúa con el flujo magnético de campo presentándose los fenómenos de distorsión y disminución del flujo principal o de campo. Por otra parte, la presencia de los “flujos de dispersión” tanto en el estator como en el rotor depende de la configuración física del diseño de los núcleos magnéticos.

En consecuencia

$$X_s = X_{ra} + X_d$$

Ecuación 2.11

X_s = Reactancia síncrona
 X_{ra} = Reactancia de reacción de armadura
 X_d = Reactancia de dispersión

Por consiguiente, la reactancia síncrona será dependiente de la reacción de armadura y los flujos de dispersión tanto del rotor como del estator.

A partir del circuito equivalente se obtiene la siguiente ecuación:

$$\bar{E}_f = \bar{V}_a + (R_a + jX_s)\bar{I}_a$$

Ecuación 2.12

Donde:

$$Z_a = (R_a + j X_s)$$

E_f = Tensión inducida/ tensión de armadura
 I_a = Corriente de armadura/ corriente de carga
 V_a = Tensión en bornes de armadura/ tensión de carga
 R_a = Resistencia de armadura
 X_s = Reactancia síncrona

Considerando la condición operativa como *sobre-excitado*, y con factor de potencia en retraso o inductivo, el diagrama fasorial será como se muestra en la figura 2.10:

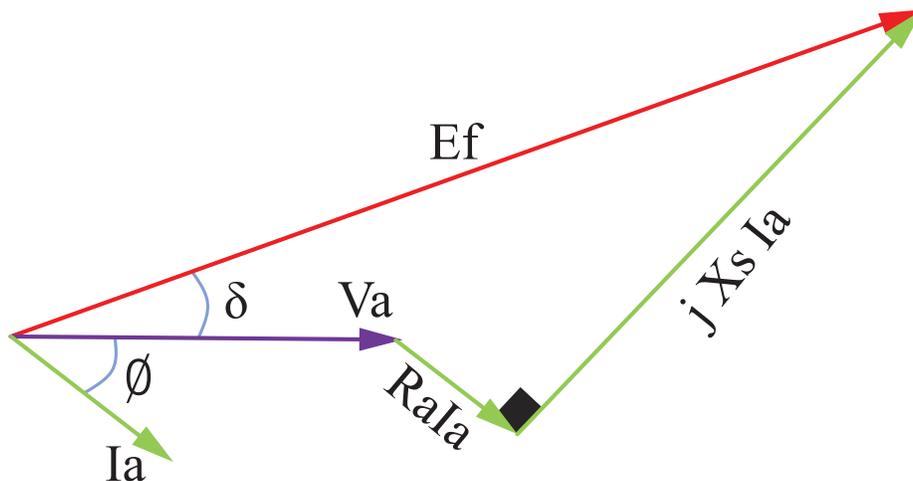


Figura 2.10: Diagrama fasorial del generador síncrono
Fuente: Elaboración Propia

Donde:

δ = Ángulo par / ángulo de potencia

Φ = Ángulo de factor de potencia

En muchas aplicaciones prácticas la resistencia de armadura (R_a) es muy pequeña comparada con la reactancia síncrona (X_s), en esas condiciones es viable despreciar el valor de R_a y considerar $R_a \cong 0$.

Esta decisión facilita muchos análisis teóricos, especialmente cuando se trata de las gráficas de las curvas operativas, siendo las implicancias de la ausencia de la resistencia de armadura poco significativa en los cálculos prácticos de operación.

Luego el diagrama fasorial del generador síncrono mostrada en la figura 2.10 tendrá una ligera modificación sin el registro del fasor producto entre la resistencia de armadura y la corriente de armadura.

Si el grupo de generación está conectado a un sistema eléctrico, la tensión de salida o de bornes (V_a) está determinada por la red, por consiguiente, se mantiene fija; del mismo modo la frecuencia (f) estará fijada por el sistema de red infinita, luego la velocidad de la turbina (W_s) será una velocidad síncrona.

En condiciones de *sobre-excitado*, la corriente de armadura (I_a) está en retraso con la tensión de bornes (V_a), quiere decir que operativamente viene alimentando una carga inductiva y se cumple que el ángulo de factor de potencia es $\Phi < 0$ y por otra parte el ángulo de potencia o de par es $\delta > 0$.

En estas nuevas condiciones el diagrama fasorial modificado será como se muestra en la figura 2.11.

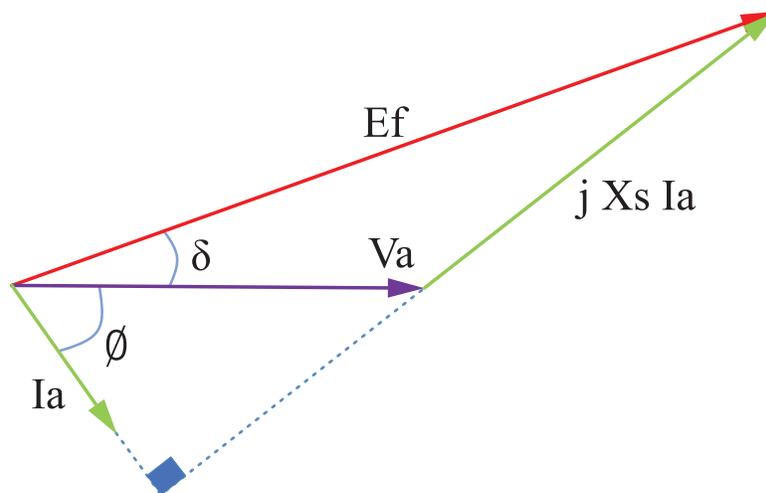


Figura 2.11: Diagrama fasorial modificado del generador síncrono *En condición de sobre-excitado*.
Fuente: Elaboración Propia

Donde: $R_a = 0$

En condiciones de **sub-excitación** la corriente de armadura (I_a) está adelantada fasorialmente de la tensión en bornes (V_a), es decir el ángulo de factor de potencia se encuentra en adelanto $\Phi > 0$ y por otra parte el ángulo de potencia tiene un valor que está en adelanto $\delta > 0$. Se entiende que en estas condiciones el generador síncrono se encuentra alimentando una carga capacitiva, como se muestra en la figura 2.12.

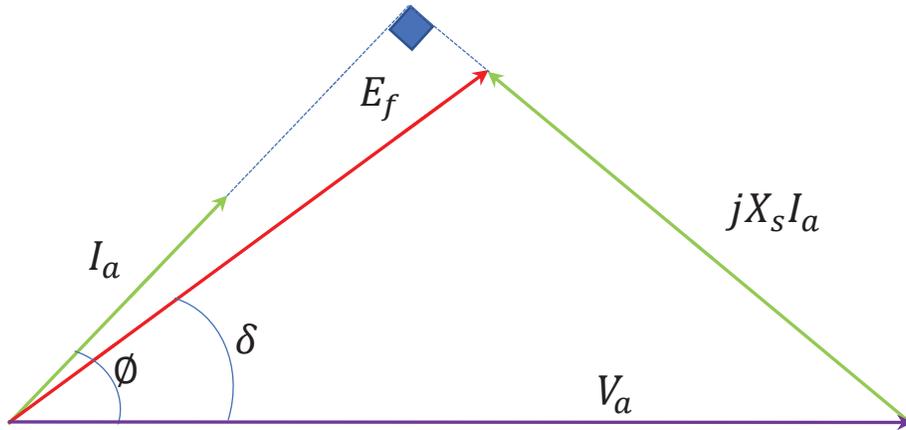


Figura 2.12: Diagrama fasorial del generador síncrono en condición de sub-excitado.
Fuente: Elaboración Propia

2.2.6. Las Ecuaciones de Potencia para Generador de rotor cilíndrico.

Las ecuaciones de la Potencia Activa (P) y la Potencia Reactiva (Q), se obtienen a partir de la figura 2.10.

Donde:

$$\bar{E}_f = \bar{V}_a + (R_a + jX_s)\bar{I}_a \quad \text{Ecuación 2.13}$$

$$\bar{E}_f = E_f \angle \delta, \quad \bar{V}_a = V_a \angle 0, \quad \bar{I}_a = I_a \angle -\phi \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Despejando la corriente de ecuación 2.7

$$\bar{I}_a = \frac{E_f \angle \delta - V_a \angle 0}{Z \angle \alpha} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Luego aplicando la Potencia de generación:

$$\bar{S} = \bar{V} \bar{I}^*$$

Ecuación 2.16

Reemplazando tenemos:

$$\bar{S} = \frac{V_a E_f}{Z} \cos(\alpha - \delta) - \frac{V_a^2}{Z} \cos \alpha + j \frac{V_a E_f}{Z} \operatorname{sen}(\alpha - \delta) - j \frac{V_a^2}{Z} \operatorname{sen} \alpha$$

Ecuación 2.17

Luego disgregando, se tiene:

$$P = \frac{V_a E_f}{Z} \cos(\alpha - \delta) - \frac{V_a^2}{Z} \cos \alpha$$

Ecuación 2.18

$$Q = \frac{V_a E_f}{Z} \operatorname{sen}(\alpha - \delta) - \frac{V_a^2}{Z} \operatorname{sen} \alpha$$

Ecuación 2.19

Si la resistencia de armadura (R_a) se desprecia, luego $Z=jX_s$ y también $\alpha=90^\circ$ se tiene que:

$$P = \frac{V_a E_f}{X_s} \operatorname{sen} \delta$$

Ecuación 2.20

$$Q = \frac{V_a}{X_s} (E_f \cos \delta - V_a) = \frac{V_a E_f}{X_s} \cos \delta - \frac{V_a^2}{X_s}$$

Ecuación 2.21

En la ecuación 2.21 la Potencia monofásica Reactiva está determinada por la diferencia entre la potencia reactiva total y la potencia reactiva consumida de un generador sincrónico además se hace necesario precisar que si:

- La potencia reactiva es mayor que cero y $E_f \cos \delta > V_a$; la máquina sincrónica genera potencia reactiva.

- La potencia reactiva es menor que cero y $E_f \cos\delta < V_a$; la máquina síncrona consume potencia reactiva.

Con respecto al *Par en el eje* se considera que:

$$T_r = \frac{P}{\omega_r} = \frac{V_a E_f}{X_s \omega_s} \text{sen}\delta$$

Ecuación 2.22

2.2.7. Las Ecuaciones de Potencia para Generador de rotor con polos salientes.

Debido a la presencia de las reluctancias diferenciadas en el rotor por la presencia de los polos de material magnético y la zona de interpolos, se presentan dos reactancias síncronas uno denominado en el eje directo (X_d) y en el otro en el eje en cuadratura (X_q). La figura 2.13, muestra la zona de interpolos y su relación gráfica con la fuerza magnetomotriz.

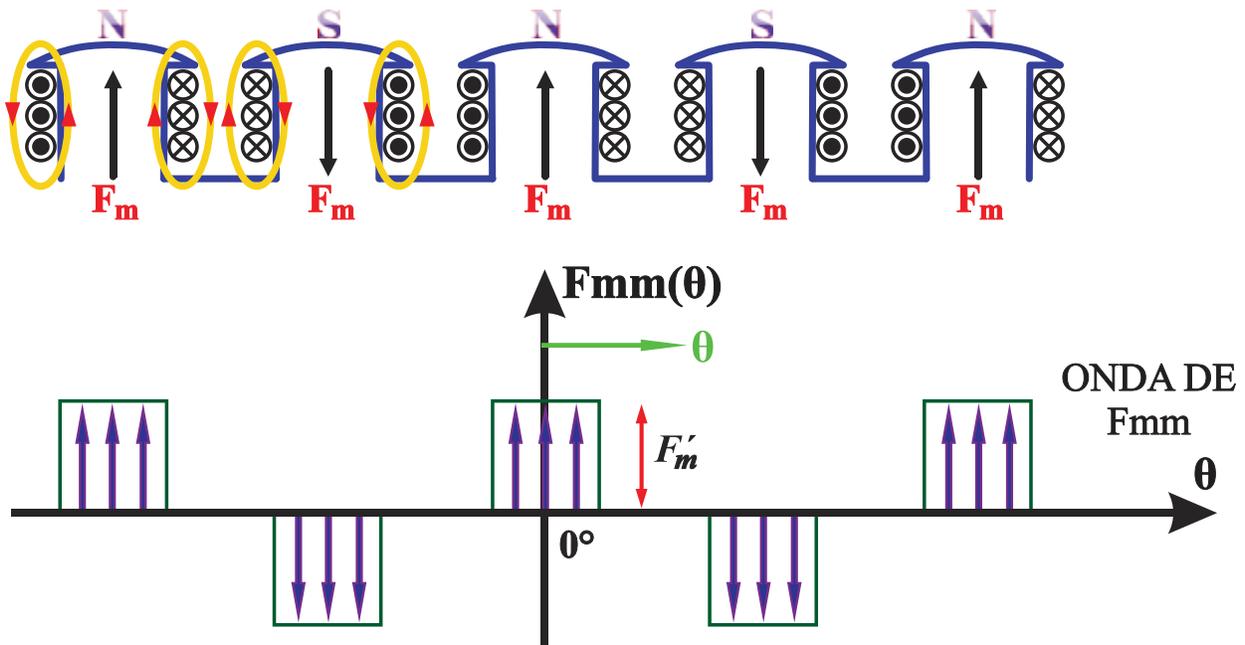


Figura 2.13: Gráfica de los polos salientes linealizados y la fuerza magnetomotriz producida.
Fuente: Implementación y análisis de la curva de capacidad del generador síncrono de polos salientes.
Raúl Castillo Haro.

Por otra parte el diagrama fasorial despreciando el valor de la resistencia de armadura (R_a) es mostrado en la figura 2.14 siguiente:

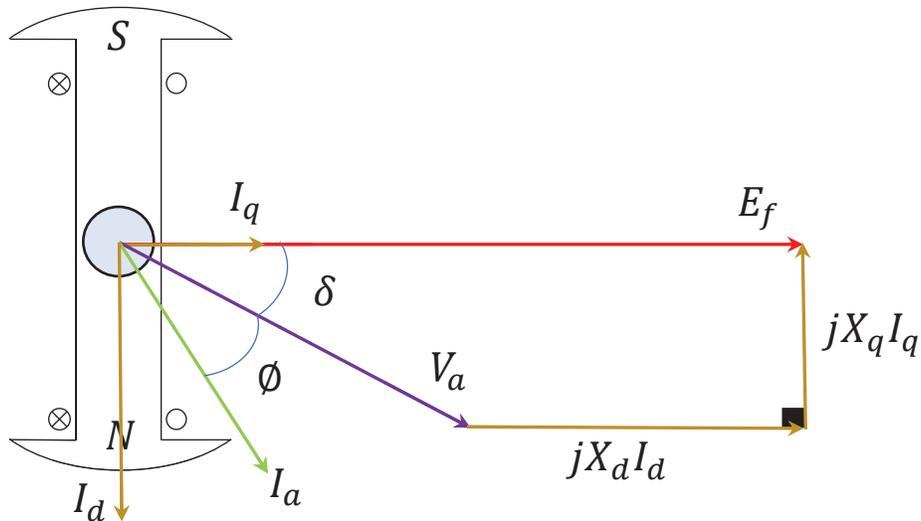


Figura 2.14: Diagrama fasorial del generador síncrono con rotor de polos salientes.
Fuente: Elaboración propia

Las ecuaciones de **Potencia Activa P** luego de un proceso de remplazos y disgregaciones para este caso son:

$$P = \frac{V_a E_f}{X_d} \text{sen} \delta + \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen}(2\delta)$$

Ecuación 2.23

Luego el **Par en el eje** será:

$$T_r = \frac{P}{W_r} = \frac{V_a E_f}{X_d W_r} \text{sen} \delta + \frac{V_a^2}{2 W_r} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen}(2\delta)$$

Ecuación 2.24

Si se desea realizar una equivalencia con el rotor liso o cilíndrico se considera una reluctancia uniforme luego se cumple que:

$$X_d = X_q = X_s$$

La **Potencia Reactiva Q** de una máquina síncrona de polos salientes será:

$$Q = \frac{V_a E_f}{X_d} \cos \delta + \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \cos(2\delta) - \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right)$$

Ecuación 2.25

En la ecuación 2.25 la Potencia monofásica Reactiva para una máquina de polos salientes está determinada por la diferencia entre la potencia reactiva total y la potencia reactiva consumida en el eje directo y transversal de una maquina sincrónica.

2.2.8. La carta de operación del generador síncrono.

La figura 2.15 muestra un ejemplo de las curvas de operación o también llamada carta de operación de un generador síncrono de polos lisos, en ella se visualiza entre otras curvas las siguientes:

- Límite mínimo de la corriente de excitación
- Límite máximo de la corriente de excitación
- Círculo de reacción de la corriente de excitación cero
- Límite máximo de corriente de armadura (estator)
- Potencia máxima del motor primo (turbinas)
- Límite práctico de estabilidad
- Límite teórico de estabilidad

Estas curvas se intersectan en diferentes puntos de tal forma que determinan una zona o un área determinado en la cual el generador opera en forma confiable y segura, también se define una zona de operación óptima de la máquina, la misma que está limitada por el ángulo de factor de potencia.

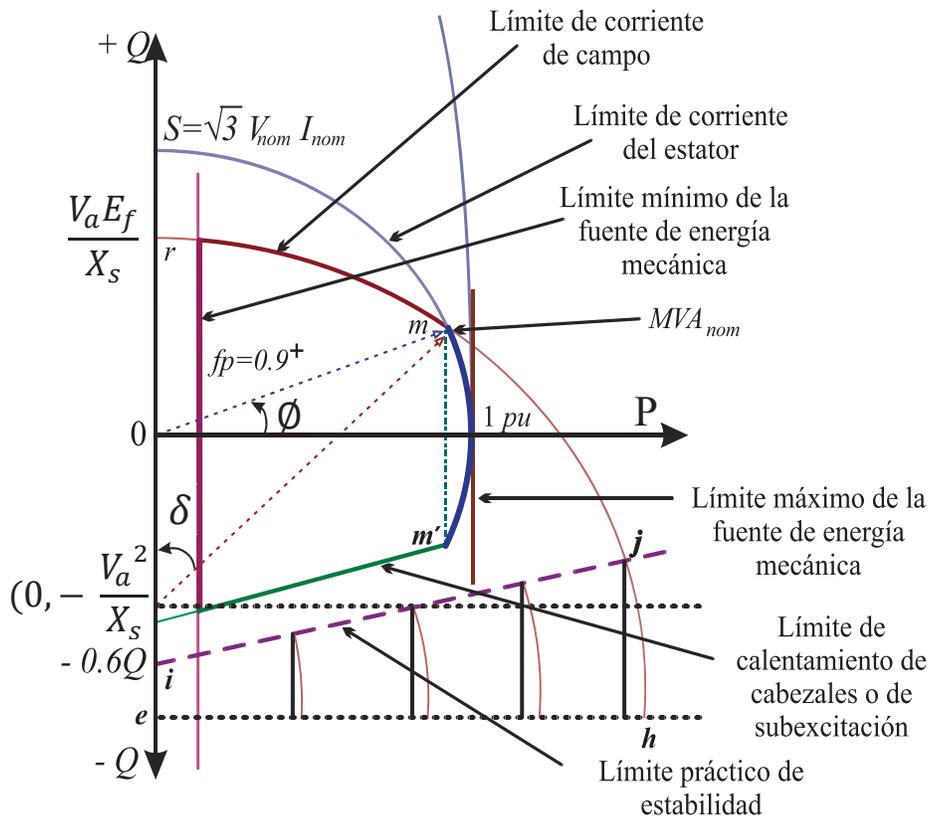


Figura 2.15: Carta de Operación del generador síncrono con rotor de polos lisos.
Fuente: Gomez Palacio, Durango. Modelado del Generador síncrono

En esta gráfica operativa (figura 2.15) se observa que, para distintos ángulos de carga y factores de potencia, el generador síncrono desarrolla valores diferentes de potencia activa y reactiva. Además, se observa que el generador suministra en la zona de sobre-excitación potencia reactiva inductiva; en cambio, en la zona de sub-excitación el generador suministra potencia reactiva capacitiva.

En un caso simulado, con la presencia del límite de corriente de excitación en la región de sobre-excitación no se puede mantener la misma potencia aparente a un factor inductivo más bajo, debido a que, al acercarse el punto de operación a este límite, se producirá un aumento de temperatura en el bobinado del rotor, por consiguiente, se deduce que el generador síncrono reducirá su capacidad de Generación cuando la corriente este en retraso.

En cambio, en la zona sub-excitada una pérdida del par magnético debido a la baja corriente de excitación puede determinar la salida del generador síncrono, también si el generador sufriera una disminución de la corriente de campo el generador continuará entregando potencia activa debido a la potencia del motor primo (turbina), pero absorbería del sistema potencia reactiva para mantener

la excitación, en este caso se puede producir un sobrecalentamiento en el hierro del estator.

Se demuestra entonces que la adecuada interpretación de las curvas en la *carta de operación* permite la toma de decisiones pertinente para cada caso que se presente con cargas variables o factores de potencia variables dentro de los límites óptimos de operación del generador síncrono.

Las curvas de capacidad de potencia de un generador se derivan de manera simplificada sin tomar en cuenta el efecto de saturación, despreciando la resistencia y la capacitancia en los devanados.

La manera de obtener la zona geométrica de operación de la máquina síncrona será cuando esta se encuentre operando a sus valores nominales; es decir valores a los cuales la máquina no sufra daño ni envejecimiento prematuro en sus devanados y núcleo.

La figura 2.16 nos muestra las curvas de capacidad de potencia o curvas de capacidad de un generador síncrono de polos salientes.

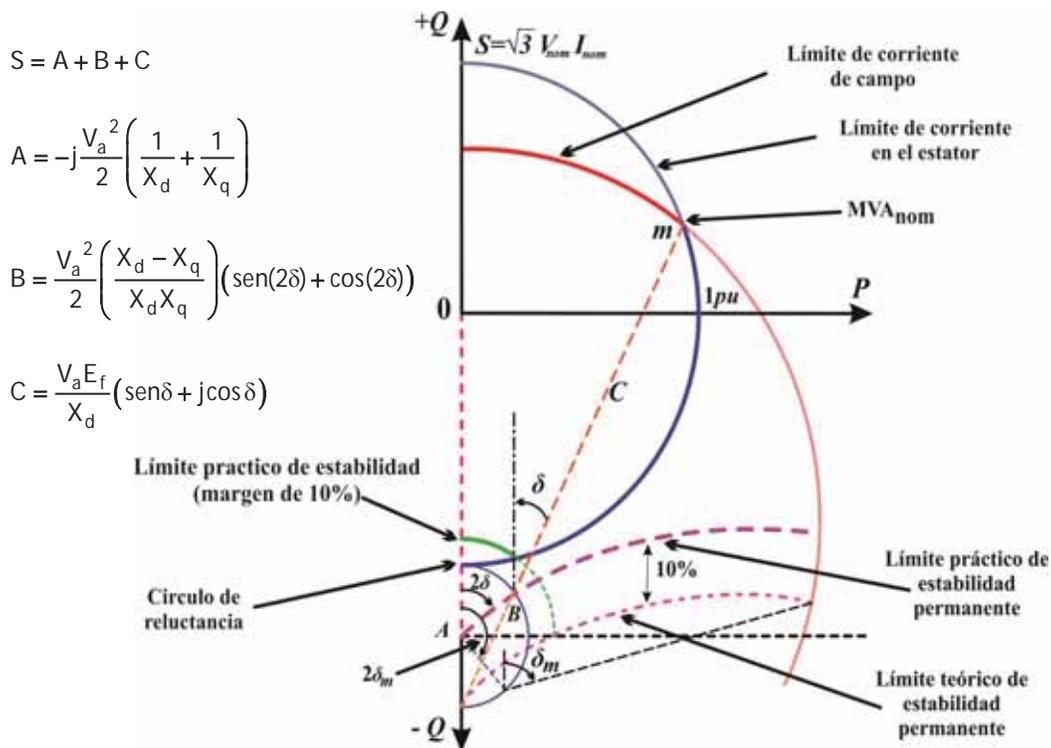


Figura 2.16: Las curvas de capacidad de potencia del generador síncrono de polos salientes
Fuente: Modelado del generador. Gómez Palacio Durango.

2.2.9. La corriente máxima de armadura

También denominada corriente en los devanados del estator del generador síncrono, esta corriente produce un incremento de la temperatura del conductor debido al efecto Joule, esta temperatura se expande por el medio circundante es decir por las componentes físicas de la máquina,

para evitar este fenómeno se instalan sistemas de refrigeración que atenúan estos efectos, pero sin embargo si la corriente de armadura máxima $I_{a(max)}$ fuera excedida esto generaría un incremento de temperatura en los devanados estáticos de la máquina que terminaría deteriorando el material aislante de esta. (Castillo, R., 2013)

Según Gerson La Torre García, para fines prácticos, la corriente máxima de armadura (estator) $I_{a(max)}$, se puede considerar como la corriente nominal establecida en la placa de características de la máquina, luego se tiene que:

$$I_{a(max)} = I_{(nominal)} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

La gráfica de esta ecuación será una “*curva operativa*” representada por una semicircunferencia con radio igual a la potencia nominal:

$$S_n = 3VI_{a(max)} = 3VI_{(nominal)} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

Donde:

V = Tensión de fase en los bornes de la armadura del generador

$I_{a(max)}$ = Corriente de fase de la armadura o el estator.

La figura 2.17 muestra la gráfica de la curva de la corriente máxima de armadura $I_{a(max)}$, representado en los ejes de potencia activa (P) y potencia reactiva (Q).

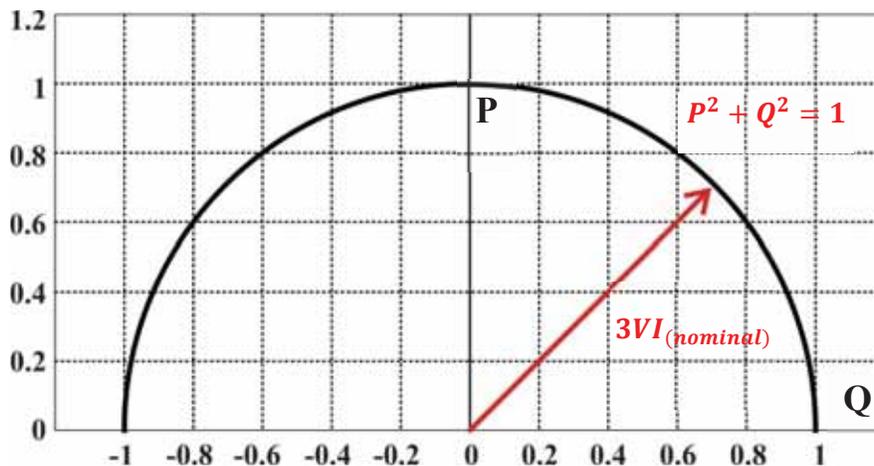


Figura 2.17: La curva de la corriente de armadura del generador síncrono con rotor de polos salientes.
Fuente: Determinación de la carta de Operación de un generador Síncrono mediante pruebas de Campo y diseño asistido por computadora. Gerson La Torre García

2.2.10. Potencia máxima de la turbina (motor primo)

El límite de la potencia de la turbina está limitado por la capacidad de diseño que normalmente puede entregar esta máquina (turbina o motor primo).

La grafica de su lugar geométrico está dado por una función constante que se encuentra a una distancia igual a la potencia máxima del motor primo y paralela al eje de la potencia reactiva.

En la figura 2.18 se visualiza la *recta de límite de la potencia de la turbina* que concuerda con la potencia activa que puede entregar el generador y en la carta de operación también se puede considerar como límite de potencia máxima la *potencia efectiva del generador* síncrono, la misma que es evaluada anualmente por el COES en todos los grupos generadores del SEIN.

Las variables de *máxima corriente de armadura* $I_a(\max)$ y la *potencia máxima de la turbina* se muestran integrados en la figura 2.18.

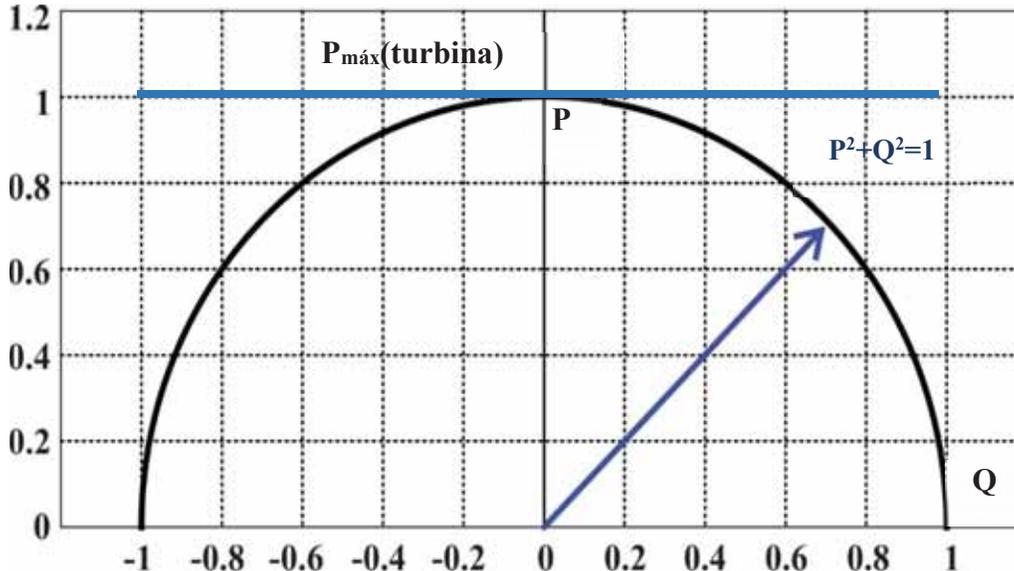


Figura 2.18: Gráfica de la potencia mecánica máxima de la turbina o motor primo del generador síncrono con rotor de polos salientes.

Fuente: Determinación de la carta de Operación de un generador Síncrono mediante pruebas de Campo y diseño asistido por computadora. Gerson La Torre García

2.2.11. Corriente de excitación máxima y mínima en generadores de polos lisos.

Se conoce que la tensión inducida de armadura (E_f) está expresada por la ecuación 2.8

$$e(t) = K * \Phi * N * \omega_r.$$

En esta ecuación la constante K, N y ω_r tienen valores establecidos y fijos, mientras que el flujo magnético (Φ) depende de la corriente aplicada al devanado de campo, en consecuencia se puede

afirmar que la tensión inducida de armadura E_f depende directamente de la corriente de excitación del campo (I_f).

En consecuencia, esta corriente de excitación se encuentra restringida por el calentamiento del devanado de campo o de rotor y por las características propias de la excitatriz.

Será necesario recordar que la corriente que circula por los devanados del campo es una señal de corriente continua C.D. la misma que produce campos magnéticos unidireccionales e invariables en el tiempo, en el caso de rotor de polos saliente son electroimanes de acuerdo al número de polos de diseño.

A partir del diagrama fasorial (figura 2.19) se deducirá los límites de la corriente de excitación máxima y mínima del generador.

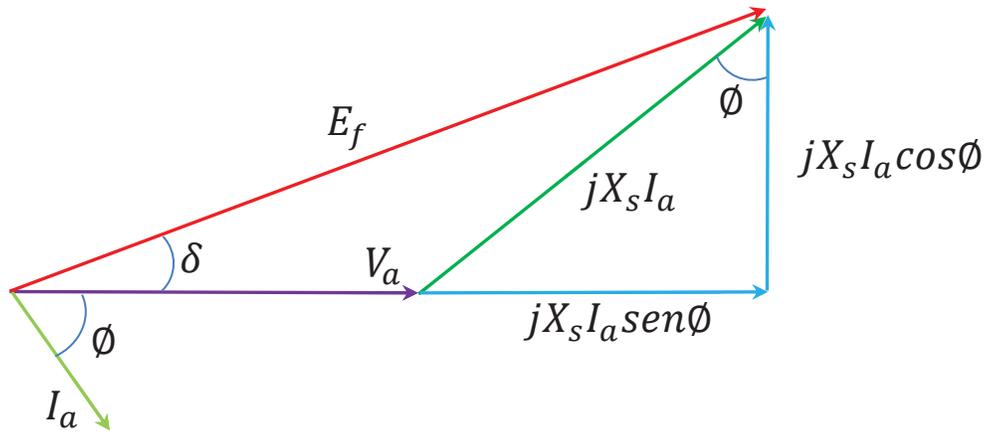


Figura 2.19: Diagrama fasorial del generador síncrono.
Fuente: Elaboración propia.

A partir del diagrama fasorial se plantea la siguiente ecuación:

$$I_a * X_s * \cos \phi = E_f * \sin \delta$$

Ecuación 2.28

También:

$$P * X_s = V_a * E_f * \sin \delta$$

Ecuación 2.29

Luego:

$$P = \frac{V_a * E_f * \sin \delta}{X_s}$$

Ecuación 2.30

De similar forma:

$$I_a * X_s \sin \phi + V_a = E_f * \cos \delta$$

Ecuación 2.31

Entonces:

$$Q * X_s + V_a^2 = V_a * E_f * \cos\delta$$

Ecuación 2.32

Por consiguiente:

$$Q = \frac{V_a * E_f * \cos\delta}{X_s} - \frac{V_a^2}{X_s}$$

Ecuación 2.33

Luego para el triángulo de potencias con potencias trifásicas se combinan las ecuaciones 2.30 y 2.33, tenemos que:

$$P_{3\phi}^2 + (Q_{3\phi} + \frac{V_a^2}{X_s})^2 = 9 (\frac{E_f * V_a}{X_s})^2$$

Ecuación 2.34

Sabemos que la ecuación general de la circunferencia es:

$$(x - h)^2 + (y - k)^2 = r^2$$

Ecuación 2.35

Luego la ecuación 2.34, tiene las características siguientes:

El centro de la circunferencia es:

$$P_0 = 0 \quad y \quad Q_0 = -3 \frac{V_a^2}{X_s}$$

Ecuación 2.36

Y el radio de la circunferencia será:

$$r = 3 \frac{E_f * V_a}{X_s}$$

Ecuación 2.37

Por consiguiente, el límite de la corriente de excitación en la máquina será:

$$E_f = E_f \max$$

Ecuación 2.38

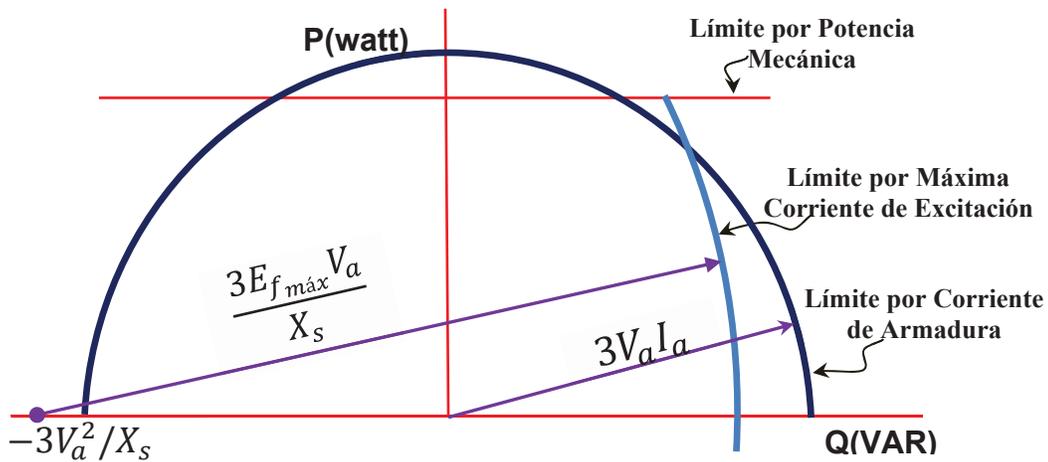


Figura 2.20: Gráfica del lugar geométrico de la corriente máxima de excitación
 Fuente: Determinación de la carta de Operación de un generador Síncrono mediante pruebas de Campo y diseño asistido por computadora. Gerson La Torre García

Las pruebas en vacío permiten obtener datos prácticos para definir la corriente máxima de excitación (figura 2.20), la misma que proviene de una fuente rotatoria de corriente continua o una fuente estática rectificadora, las que son transmitidas mediante el sistema anillos rozantes escobillas o como en los generadores modernos no usan este sistema y se denominan “sin anillos rozantes”.

También de acuerdo a Gerson La Torre García, en la práctica cuando no se conoce el valor de la corriente mínima de excitación, se estima entre un 5% a 10% de la corriente de excitación máxima permisible.

2.2.12. Corriente de excitación máxima y mínima en generadores de polos salientes.

Con la finalidad de establecer el máximo y mínimo límite de excitación de una máquina sincrónica con saliencia, se procede en forma similar al ítem 2.2.11, se utiliza el diagrama fasorial de la figura 2.14 que se replica en la figura 2.21 y las ecuaciones de potencia del generador de polos salientes.

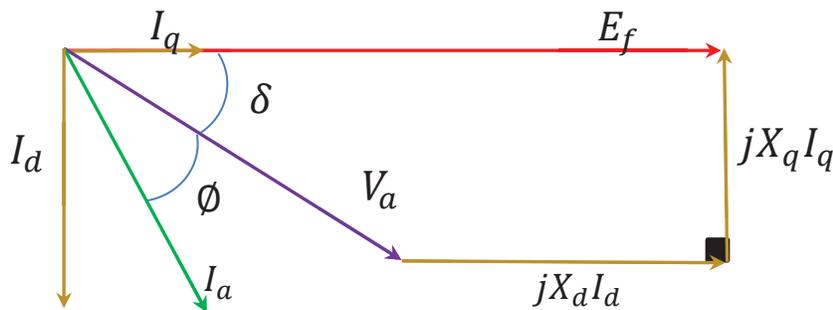


Figura 2.21: Gráfica del diagrama fasorial del generador de polos salientes.
 Fuente: Elaboración propia.

En este diagrama fasorial (figura 2.21), considerando la ecuación 2.23 y aplicando la identidad trigonométrica:

$$\text{sen } 2\delta = 2 \text{ sen } \delta * \text{cos } \delta$$

Ecuación 2.39

Se tiene para un sistema trifásico:

$$P_{3\phi} = 3 \left[\frac{V_a E_f}{X_d} + \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{cos } \delta * V_a^2 \right] \text{sen } \delta$$

Ecuación 2.40

También se tiene:

$$Q_{3\phi} + 3 \frac{V_a^2}{X_q} = 3 \left[\frac{V_a * E_f}{X_d} + \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{cos } \delta * V_a^2 \right] \text{cos } \delta$$

Ecuación 2.41

Transformando a coordenadas polares se tiene:

$$r = 3 \left[\frac{V_a * E_f}{X_d} + \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{cos } \delta * V_a^2 \right]$$

Ecuación 2.42

Luego la ecuación de Limacon de Pascal:

$$P_{3\phi}^2 + \left[Q_{3\phi} + 3 * \frac{V_a^2}{X_q} \right]^2 = r^2$$

Ecuación 2.43

Como en el caso anterior, no se cuenta con el valor de la tensión inducida (fem) se procede mediante el método práctico para encontrar el límite por corriente máxima de excitación.

En la práctica según, Gerson La Torre García cuando no se conoce el valor de la corriente mínima de excitación se estima como un 5% a 10% de la corriente máxima de excitación y se procede en forma similar al caso anterior, así como se observan en las figuras 2.22 y figura 2.23:

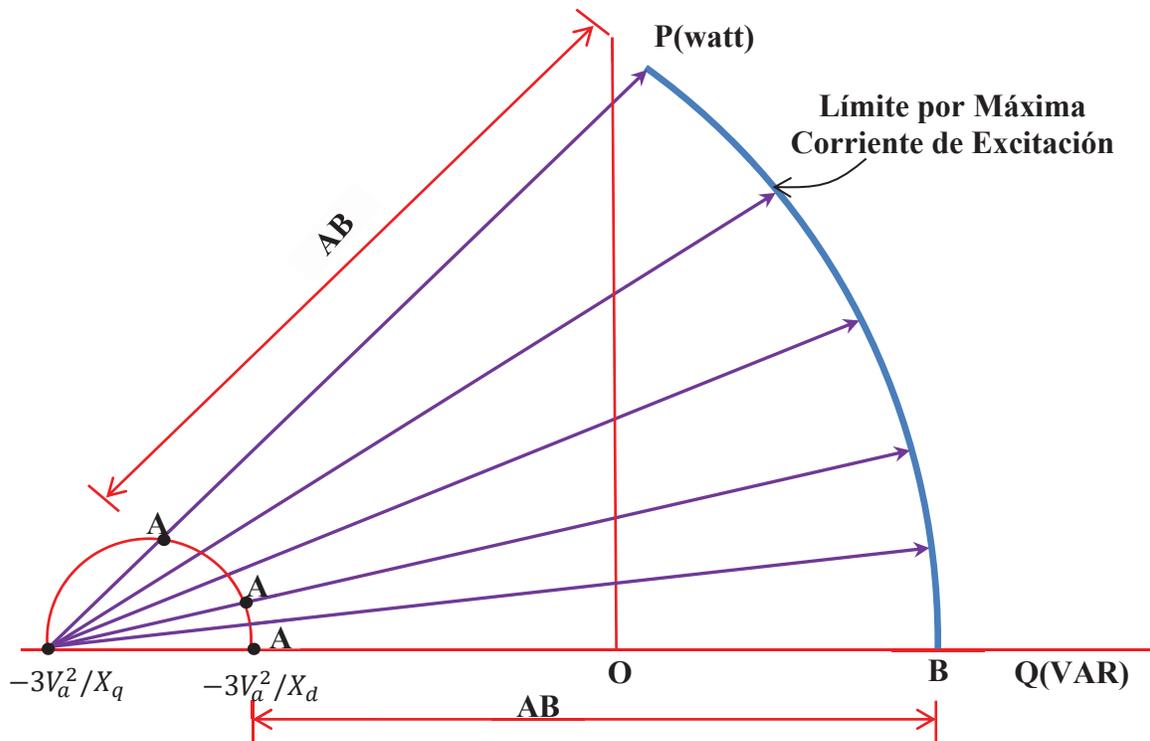


Figura 2.22: Gráfica de ecuación de Limacon de Pascal

Fuente: Determinación de la carta de Operación de un generador Síncrono mediante pruebas de Campo y diseño asistido por computadora. Gerson La Torre García

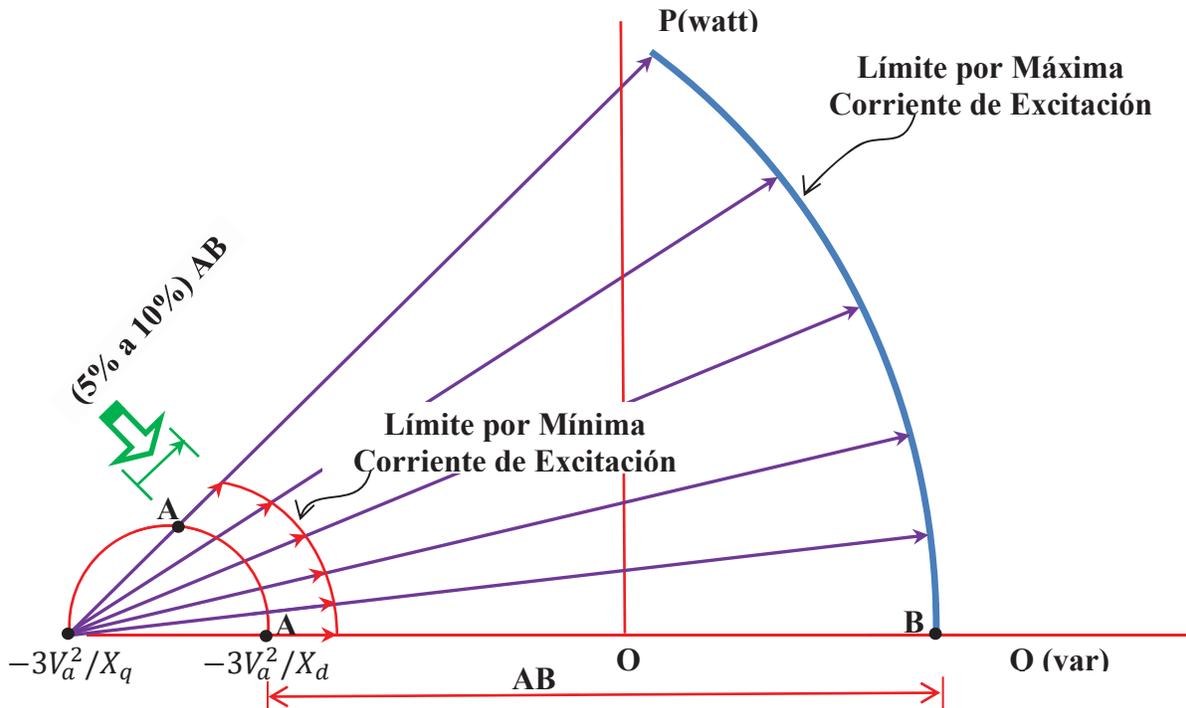


Figura 2.23: Construcción del lugar geométrico del límite de la corriente mínima de excitación para generadores de polos salientes.

Fuente: Determinación de la carta de Operación de un generador Síncrono mediante pruebas de Campo y diseño asistido por computadora. Gerson La Torre García

2.2.13. Determinación del límite de estabilidad en generadores de polos lisos.

De conformidad con Gerson La Torre García, la potencia producida por un generador síncrono también depende del ángulo de torque o de par (δ) que está definido entre la tensión en bornes del generador (V_a) y la tensión inducida (E_f). La potencia máxima que puede suministrar el generador corresponde a un ángulo de $\delta=90^\circ$, pero esto no se da en la realidad ya que un generador a plena carga alcanza ángulos de carga típicos de 15° a 20° .

En las cartas de operación el límite de estabilidad teórico corresponde a una línea trazada en forma paralela al eje de la potencia activa a partir del par ordenado $(-3\frac{V_a^2}{X_s}, 0)$; que al ser interceptadas por las circunferencias generadas para diferentes valores de potencia y disminuidas cada una de estas (potencias máximas) en un 10 a 20 %, el lugar geométrico del límite práctico de estabilidad quedara determinado al unir los interceptos que se originan al trazar rectas horizontales desde los valores de potencias disminuidas a cada circunferencia correspondiente tal como se indica en la figura 2.24: (Castillo, R., 2013)

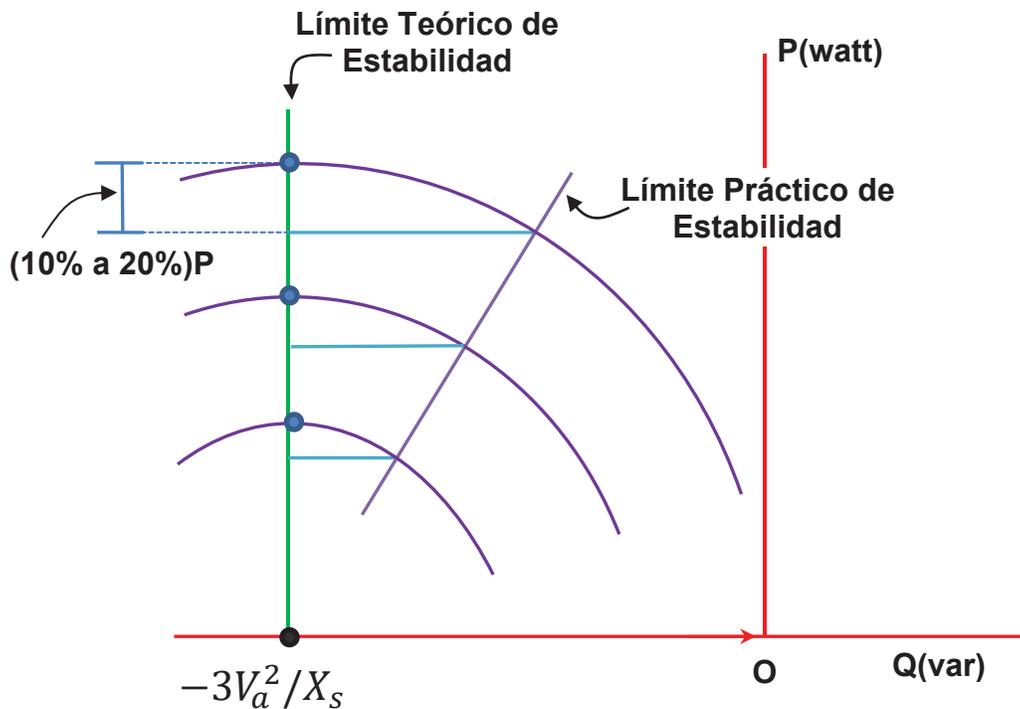


Figura 2.24: Gráfica de los límites de estabilidad de los generadores de polos lisos.
Fuente: Elaboración propia

2.2.14. Límite de estabilidad en generadores de polos salientes.

En la figura 2.25 se grafica la característica potencia-ángulo de la ecuación 2.40, cuyos términos $\frac{V_a E_f}{X_d} \text{sen} \delta$ y $\frac{V_a^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q} \text{sen} 2\delta$ representan a un motor sin saliencias y el efecto de estas; así mismo se observa que se tienen efectos debido a la saliencia que presenta la maquina sincrónica incluso cuando no existe campo de excitación por lo que se puede afirmar que ambos son independientes.

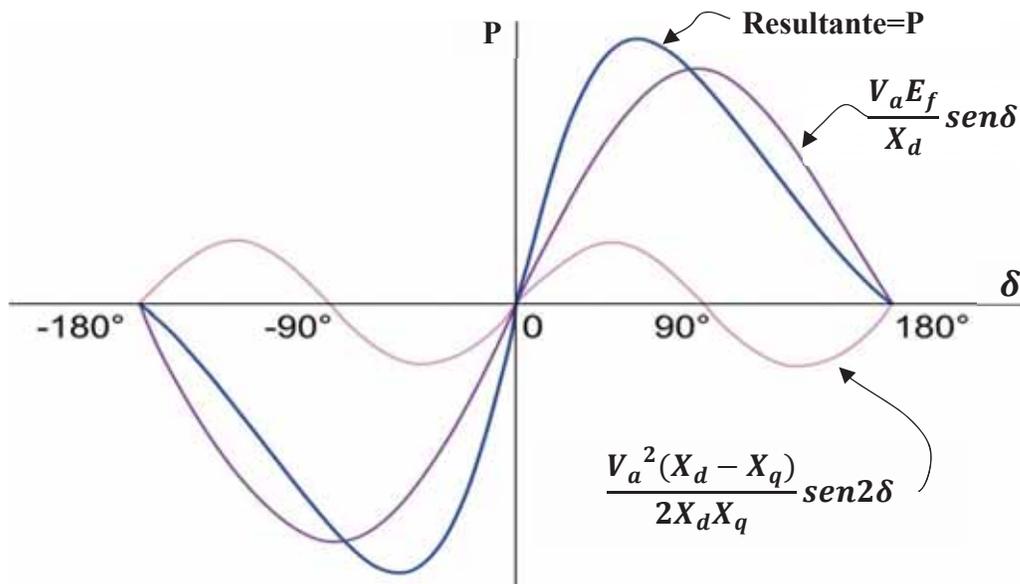


Figura 2.25: Gráfica de las curvas características de la Potencia-ángulo.
Fuente: Thaler Wilcox

En la figura 2.26 a partir del par ordenado $(-3 \frac{V_a^2}{X_q}, 0)$ se trazan rectas secantes para distintos ángulos. Los puntos de intersección originados por estas rectas secantes con el lugar geométrico de reacción de armadura se proyectan de forma horizontal hasta que se intercepten con el otro extremo de la misma circunferencia. Los nuevos puntos de intersección se proyectan verticalmente hacia la intersección con su línea recta correspondiente, la unión de estos interceptos nos representa límite teórico de estabilidad. Al disminuir el límite teórico de estabilidad en un rango del 10 al 20 % de la potencia nominal con la finalidad de crear un margen de seguridad, entonces se grafican limaones para distintos valores de E_f : desde el punto de intersección, entre el límite de estabilidad teórico y los limaones se grafica una recta vertical con la disminución porcentual fijada, luego se prolonga en forma horizontal estos puntos, hasta interceptar con los limaones correspondientes. Finalmente, la unión de los puntos resultantes genera el límite práctico de estabilidad. (La Torre, G, 2011)

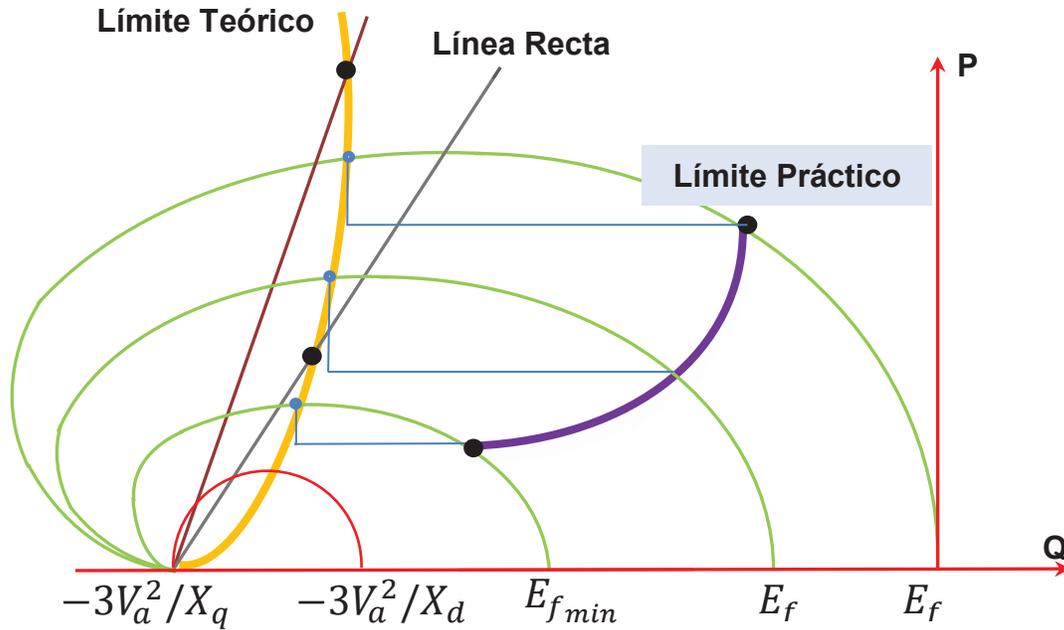


Figura 2.26: Gráfica del límite de estabilidad en generadores de polos salientes.
Fuente: Elaboración propia

2.2.15. Las curvas de Capabilidad.

De acuerdo a lo propuesto por Gómez Palacio, Durango (2009), las curvas de capacidad de un generador se derivan de manera simplificada sin tomar en cuenta el *efecto de saturación*, despreciando la resistencia y capacitancia en los devanados. Cuando la máquina síncrona opera en sus valores nominales; es decir, valores a los cuales los devanados y el núcleo alcanzan la temperatura de régimen de diseño, se obtienen las fronteras de la región de operación dentro de la cual la máquina no sufre daño ni envejecimiento prematuro.

Para un Generador de POLOS LISOS se tiene que las ecuaciones de las potencias son:

$$S = \sqrt{3} * V_{nom} * I_{nom} \tag{Ecuación 2.44}$$

También

$$P = \frac{V_a * E_f}{X_s} \text{sen } \delta \tag{Ecuación 2.45}$$

$$Q = \frac{V_a}{X_s} [E_f \text{cos} \delta - V_a] \tag{Ecuación 2.46}$$

La relación de potencias es:

$$P^2 + Q^2 = S^2 \tag{Ecuación 2.47}$$

$$P^2 + \left[Q + \frac{V_a^2}{X_s}\right]^2 = \left(\frac{V_a * E_f}{X_s}\right)^2$$

Ecuación 2.48

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$

Ecuación 2.49

Luego:

$$a=0$$

$$b = -\frac{V_a^2}{X_s}$$

Por consiguiente, a partir de estas ecuaciones se grafica las curvas de capacidad de la figura 2.27 que se muestra.

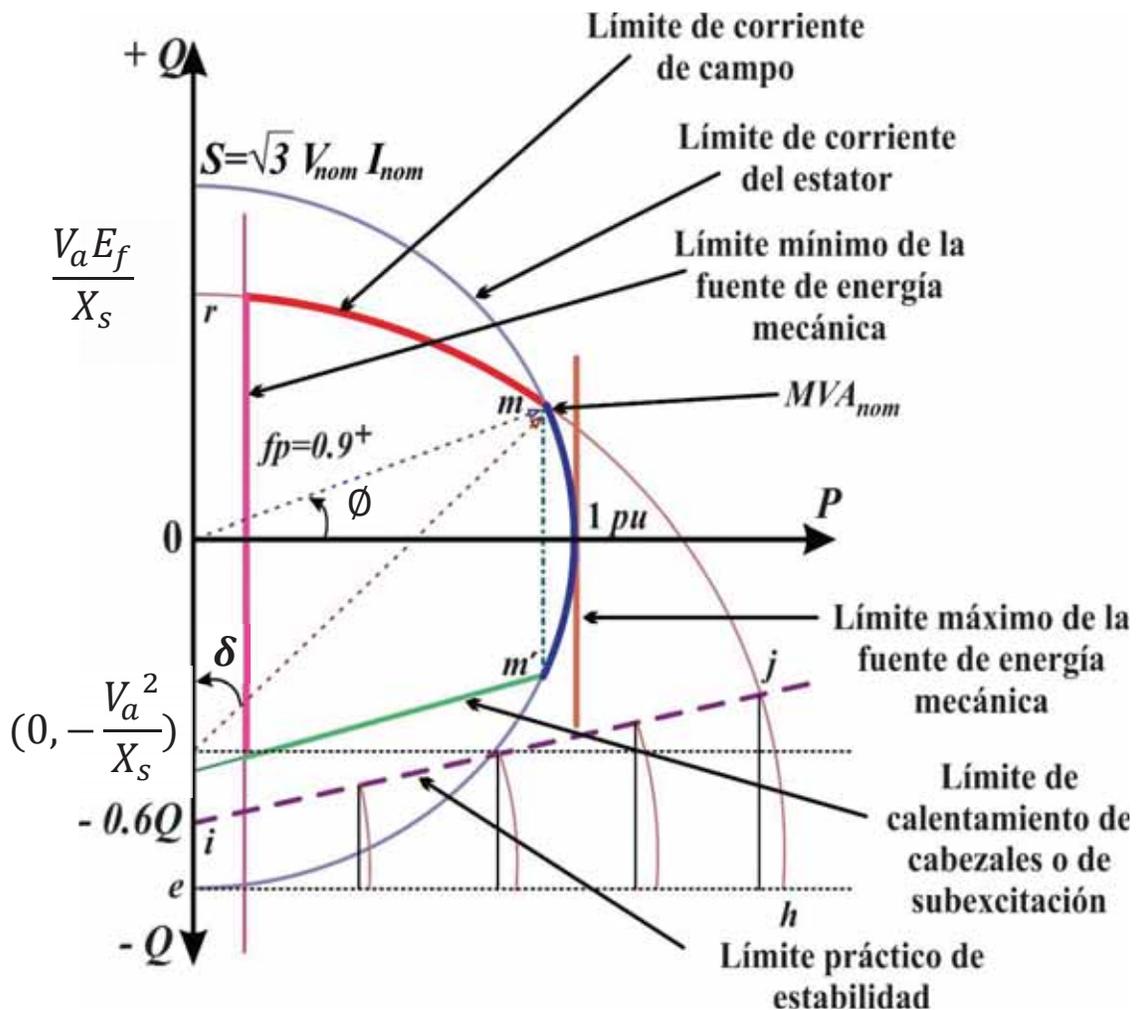


Figura 2.27: Gráfica del límite de estabilidad en generadores de polos lisos. Fuente: Gómez Palacio Durango (2009). Modelamiento del Generador Síncrono.

Por otra parte, las ecuaciones de potencia para el generador de POLOS SALIENTES son:

$$S = \sqrt{3} * V_{nom} * I_{nom}$$

Ecuación 2.50

$$P = \frac{V_a * E_f}{X_d} \text{sen}\delta + \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen}(2\delta)$$

Ecuación 2.51

$$Q = \frac{V_a * E_f}{X_d} \text{cos}\delta + \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d * X_q} \right) \text{cos}(2\delta) - \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right)$$

Ecuación 2.52

El ángulo δ es :

$$\delta = \tan^{-1} \frac{I_a * X_q * \text{cos}\phi}{V_a + I_a * X_q * \text{sen}\phi}$$

Ecuación 2.53

El voltaje interno: $E_f = V_a * \text{cos}\delta + I_a * X_d * \text{sen}(\delta + \phi)$

Ecuación 2.54

El ángulo máximo $\delta_{\text{máx}}$ es:

$$\delta_{\text{máx}} = \text{cos}^{-1} \left[-\frac{C}{8B} + \sqrt{\left(\frac{C}{8B}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right]$$

Ecuación 2.55

Como se sabe que, $S = P + jQ$, reemplazando:

$$S = -j \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right) + \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d * X_q} \right) (\text{sen}(2\delta) + j\text{cos}(2\delta)) + \frac{V_a * E_f}{x_d} (\text{sen}\delta + j\text{cos}\delta)$$

Ecuación 2.56

Donde: $S = A + B + C$

$$A = -j \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right)$$

Ecuación 2.57

$$B = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d * X_q} \right) (\text{sen}(2\delta) + j\text{cos}(2\delta))$$

Ecuación 2.58

$$C = \frac{V_a * E_f}{x_d} (\text{sen}\delta + j\text{cos}\delta)$$

Ecuación 2.59

A partir de estas ecuaciones se obtiene la gráfica de las curvas de operación del generador síncrono de Polos salientes, mostrados en la figura 2.28.

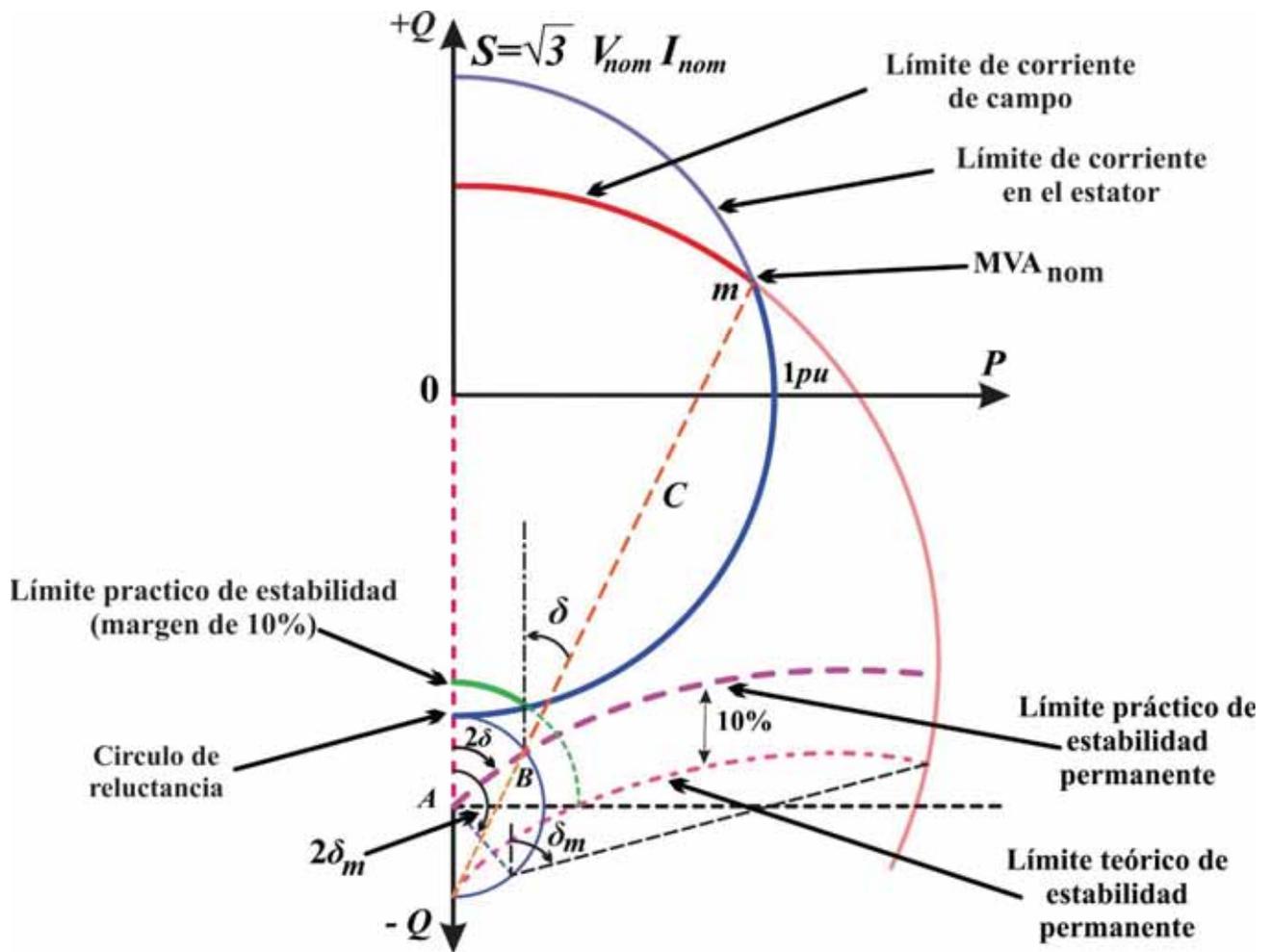


Figura 2.28: Gráfica del límite de estabilidad en generadores de polos salientes.
Fuente: Gómez Palacio Durango (2009). Modelamiento del Generador Síncrono.

CAPÍTULO - III

DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS ELÉCTRICOS DEL GENERADOR SINCRONO Y LA INCIDENCIA DE LA TENSION Y CORRIENTE DE EXCITACIÓN

3.1 Generalidades.

En este capítulo describiremos y realizaremos en laboratorio el proceso experimental de las pruebas de vacío, cortocircuito y deslizamiento que son recomendadas por la IEEE Std 115-1995 o IEC 60034-4 para la obtención de los parámetros correspondientes a los generadores sincrónicos sin saliencia y generadores sincrónicos con saliencia.

Dichos parámetros a ser calculados en estos ensayos son la reactancia sincrónica para el caso de generadores sincrónicos sin saliencia, mientras que en el caso de los generadores sincrónicos con saliencia será necesario calcular la reactancia sincrónica en el eje directo y cuadratura; considerando en ambos casos a la resistencia del inducido como despreciable.

3.2 Prueba de vacío

Esta prueba es necesaria para ver el comportamiento de la tensión en bornes de la máquina, para diferentes valores de la corriente de excitación y consiste en hacer que el rotor del generador gire a velocidad síncrona sin tener carga conectada en los bornes del devanado de armadura; para luego a través del incremento y su respectiva medición de la corriente de campo del circuito inductor proveniente del generador de corriente continua se puedan obtener en forma simultánea las mediciones de la tensión en bornes de la máquina y la frecuencia; siendo esta última constante en todo el ensayo. (Martínez M. E, 2003)

Algunas sugerencias que la Norma IEC 60034-4 nos proporciona para realizar dichas pruebas son:

- a) Se deben de tomar seis; diez y dos lecturas hasta el 60%, entre el 60%-110% y por encima del 110% respectivamente; con la finalidad de obtener una mejor resolución de la curva de Vacío. (Martínez M. E, 2003)
- b) La lectura de la tensión debe ser efectuada en las tres fases y una vez que exceda el 110% las lecturas deberán ser tomadas más rápidamente, todo esto en condiciones de excitación y velocidad constantes. (Martínez M. E, 2003)

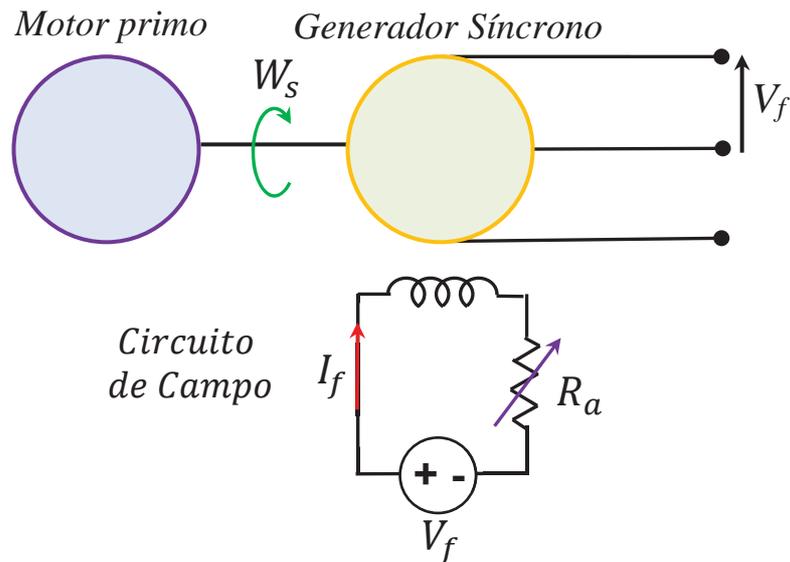


Figura 3.1: Disposición de los equipos para la prueba de circuito abierto del generador síncrono.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.1, el motor primo simula a la turbina y aplica el Par (T_r) y la velocidad síncrona (W_s) al generador, por otra parte, la excitatriz dota de energía eléctrica en Corriente directa (I_f) al campo del Generador, mientras que la puerta de salida se encuentra en vacío, sin carga.

La curva mostrada en la figura 3.2, se grafica a partir de la tensión en bornes del devanado de armadura y para los valores obtenidos de la corriente de campo; así mismo, una vez graficada esta curva será posible calcular, para cualquier valor de excitación su respectiva tensión en bornes de la máquina sincrónica.

Tal como se aprecia en la figura 3.2 la curva tiene en un primer instante un desarrollo lineal (recta del entrehierro) que poco a poco va curvándose según se incrementa el valor de la corriente del devanado inductor (I_f), todo esto debido a la saturación del material magnético del cual están construidos estas máquinas.

Como se sabe cuándo las máquinas presentan una tensión residual alta que gráficamente se evidencia con un corte al eje de ordenadas por encima del origen, la curva debe de ser corregida prolongando la parte recta de la curva hasta intersectarla con el eje de las abscisas, esta longitud hallada representa el valor que deberá ser añadido al valor medido para obtener los valores reales de la corriente de campo.

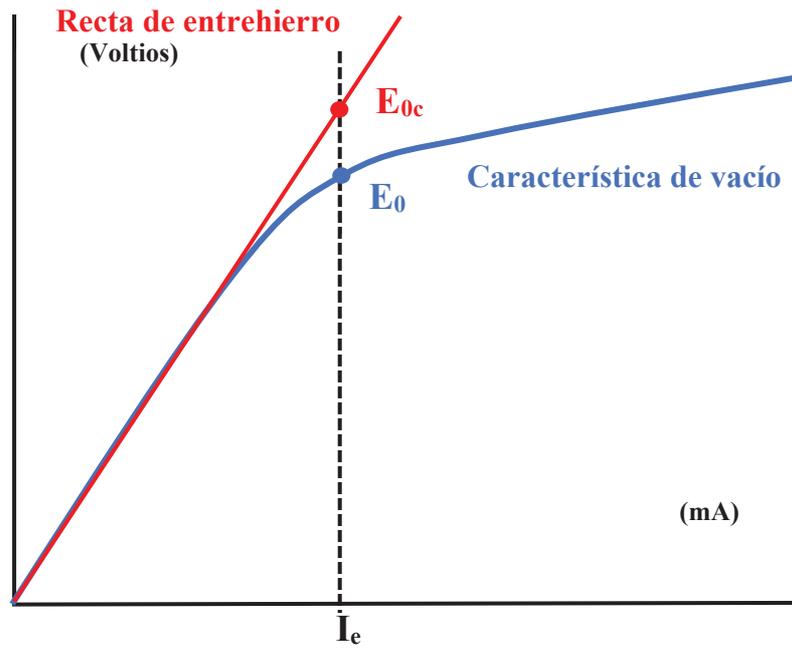


Figura 3.2: Gráfica de la características de circuito abierto del generador síncrono.
Fuente: Elaboración propia.

3.3 Prueba en corto circuito

Esta prueba se desarrolla para observar el comportamiento de la corriente del devanado de armadura (I_a) debido al incremento de la corriente de campo (I_f) y consiste en hacer girar a velocidad síncrona (W_s) el rotor del generador con los bornes de salida cortocircuitado, para registrar lecturas desde el 25% hasta el 125% del valor nominal de la corriente del inducido. (Martínez M. E, 2003)

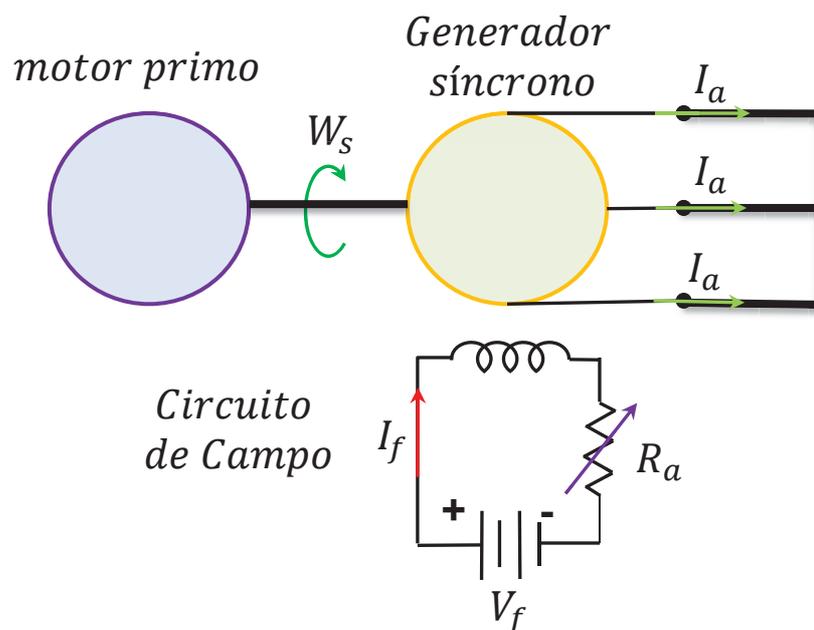


Figura 3.3: Disposición de los equipos para la prueba de corto circuito del generador síncrono.
Fuente: Elaboración propia.

Debido a que la operación de algunas máquinas entre el 100% y 125% de la corriente nominal podría generar riesgo de daño, esta será desarrollada por el fabricante. (Martínez M. E, 2003)

Para el desarrollo de esta prueba se muestra en la figura 3.3 el diagrama de conexiones; en donde se aprecia el motor primo que se encarga de proporcionar el par y la velocidad síncrona (W_s) a la máquina en prueba, al mismo tiempo que es alimentado mediante la excitatriz por la corriente del inductor (I_f).

En esta prueba algunas variables que deben de ser controladas son la corriente de campo, la corriente de armadura y la velocidad del primotor, esta última en grupos de generación reales será proporcionada por las turbinas; sean estas hidráulicas, a vapor, a gas u otro tipo.

Finalmente, la gráfica que se muestra en la figura 3.4 representa la característica de cortocircuito obtenida a partir de las lecturas tomadas en la prueba de cortocircuito; la misma que es representada por una recta.

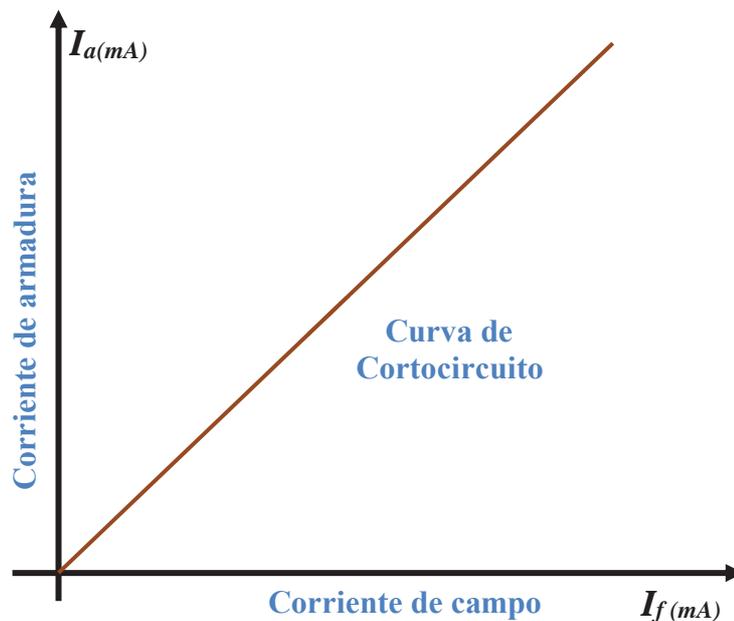


Figura 3.4: Gráfica de la característica de corto circuito del generador síncrono.
Fuente: Elaboración propia.

3.4 Prueba de deslizamiento

Esta prueba es realizada para obtener el valor de la reactancia síncrona del eje en cuadratura en los generadores síncronos de polos salientes y consiste en alimentar al devanado de armadura con una fuente trifásica balanceada y el circuito inductor abierto con el rotor girando a velocidad diferente a la velocidad síncrona de la máquina. (La Torre, G., 2011)

El registro de los valores de la tensión y corriente de armadura, así como la tensión inducida del rotor, se realiza con voltímetros u osciloscopios.

Como se observa en las figuras 3.5 y 3.6 es posible definir la reactancia en el eje directo saturada (X_d) y la reactancia en el eje cuadratura saturada (X_q) a partir de la variación de la corriente del inducido, la tensión del estator y la tensión en bornes del estator; tal como se muestra: (La Torre, G., 2011)

$$X_d = \frac{V_{max}}{I_{min}}$$

Ecuación 3.1

$$X_q = \frac{V_{min}}{I_{max}}$$

Ecuación 3.2

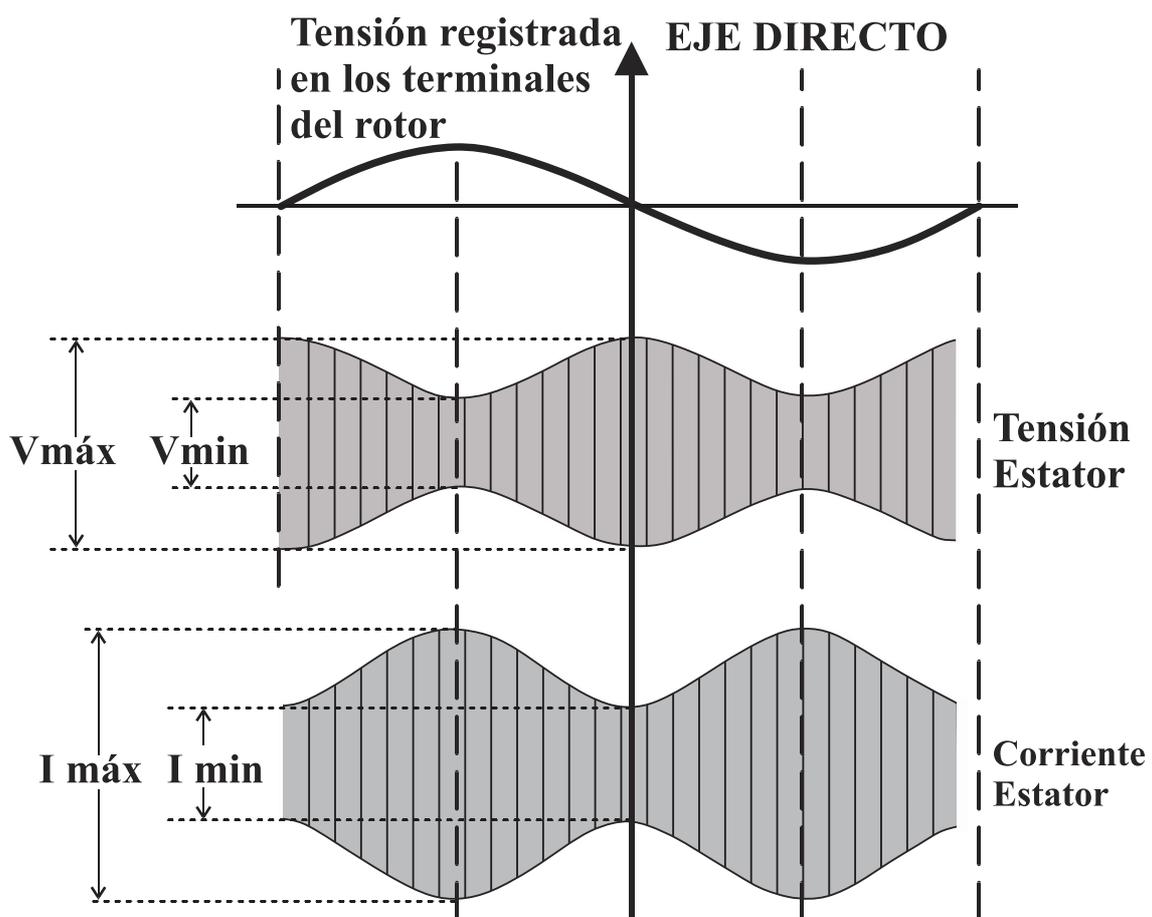


Figura 3.5: Gráfica de las pruebas de deslizamiento del generador síncrono. Fuente: Gerson La Torre García. Determinación de la carta de operación.

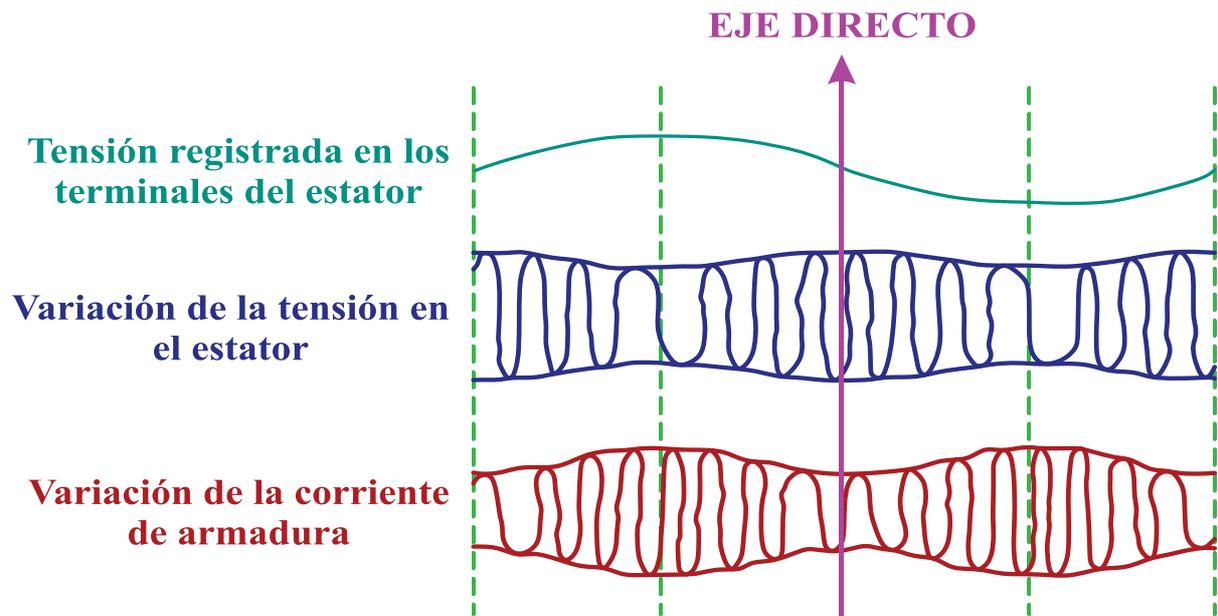


Figura 3.6: Gráfica de las pruebas de deslizamiento del generador síncrono.
 Fuente: Castillo Haro, Raúl. Implementación y análisis de la curva de capacidad.

3.5 Prueba de calentamiento¹

Se realiza para determinar el límite de la corriente máxima de estator y el incremento de temperatura con respecto a la temperatura ambiente; esta temperatura depende del sistema de refrigeración de la máquina y consiste en mantener inalterable la corriente del inducido, la tensión, la potencia y la frecuencia, el aislamiento de la máquina hasta que este alcance una temperatura constante; mientras registramos lecturas a intervalos de cada media hora aproximadamente.

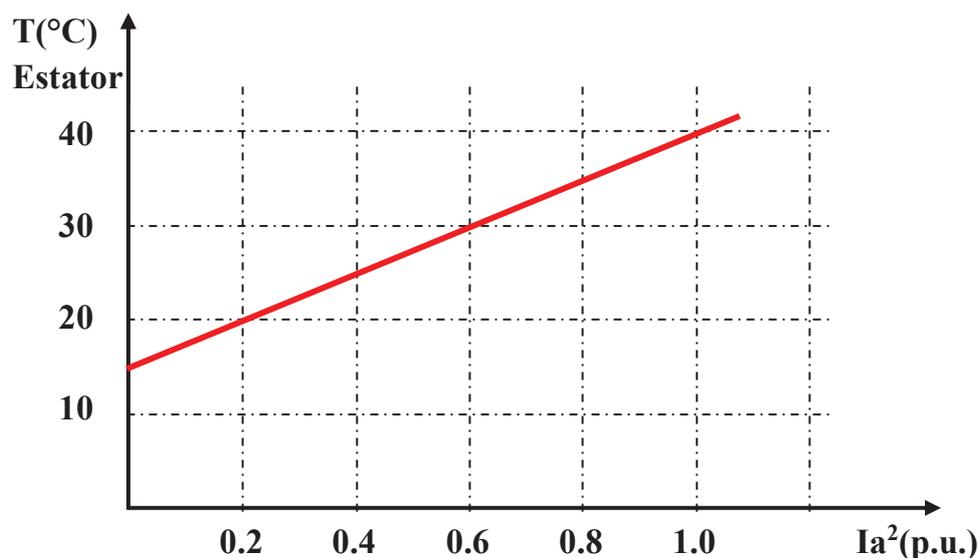


Figura 3.7: Curva característica de la temperatura del bobinado de armadura.
 Fuente: Elaboración propia.

¹ Antara, Ronal. (2003). Universidad Nacional de Ingeniería del Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono. Referencia: Martínez Marroquín, Manuel. Universidad San Carlos de Guatemala.

3.6 Determinación de los parámetros de reactancias síncronas del eje directo (X_d) y el eje en cuadratura (X_q)

Detallaremos los pasos a seguir para determinar las reactancias síncronas en un generador de polos salientes, cabe mencionar que el caso de un generador de polos lisos la reactancia síncrona es igual a la reactancia en el eje directo por lo que solo bastara con encontrar este parámetro. (Castillo, R., 2013)

3.6.1 Determinación de la reactancia síncrona en el eje directo (X_d)

La *reactancia síncrona no saturada* se calcula a partir de las curvas características de vacío y cortocircuito tal como se muestra en la figura 3.8. (Castillo, R., 2013)

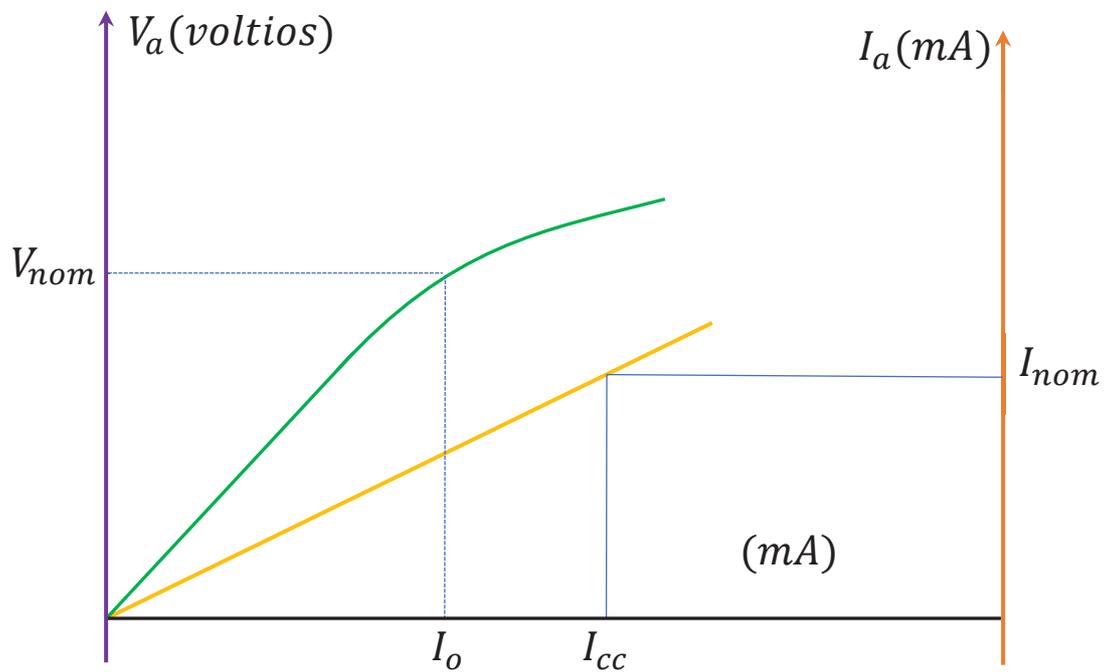


Figura 3.8: Curva característica de vacío y cortocircuito.
Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, la reactancia síncrona en el eje directo no saturada se determinará a partir de la siguiente relación:

$$X_d = \frac{I_{cc}}{I_0}$$

Ecuación 3.3

Donde:

X_d = Reactancia síncrona en el eje directo no saturado.

I_{cc} = Corriente de cortocircuito para la corriente nominal en la armadura.

I_o = Corriente de vacío no saturada para la tensión nominal en la línea del entrehierro.

Este valor también equivale a la reactancia síncrona (X_s) para el caso del *generador de polos lisos*.

3.6.2 Determinación de la reactancia síncrona en el eje de cuadratura (X_q)

Una vez obtenidos los valores E_{max} , E_{min} , I_{max} , I_{min} en la prueba de deslizamiento así como el valor de la reactancia síncrona de eje directo (X_d); podremos determinar las reactancias síncronas saturadas directa y cuadratura mostradas en las ecuaciones 3.4 y 3.5; (Castillo, R., 2013)

$$X_{ds} = \frac{E_{max}}{I_{min}}$$

Ecuación 3.4

$$X_{qs} = \frac{E_{min}}{I_{max}}$$

Ecuación 3.5

que luego serán utilizadas para calcular la reactancia sincrónica en el eje cuadratura dada por la ecuación 3.6

$$X_q = X_d \left(\frac{X_{qs}}{X_{ds}} \right) = X_d \left(\frac{E_{min}}{E_{max}} \right) \left(\frac{I_{min}}{I_{max}} \right)$$

Ecuación 3.6

3.7 Determinación de los parámetros de reactancias síncronas del eje directo (X_d) y el eje en cuadratura (X_q), mediante pruebas experimentales.

3.7.1 Finalidad:

Obtener los parámetros básicos de la máquina síncrona, mediante las pruebas en vacío y corto circuito.

3.7.2 Introducción

La máquina Síncrona deriva su nombre del concepto de Velocidad Síncrona, que se refiere a la velocidad establecida por el campo magnético giratorio en el estator de la máquina y que es la velocidad a la cual gira la flecha del motor. La Máquina Síncrona puede trabajar tanto

como motor como generador. La Velocidad Síncrona está determinada por el número de polos (P) y la frecuencia de la línea de alimentación (f) de la siguiente manera:

$$N_s = 120 \frac{f}{P} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

El circuito equivalente por fase de la Máquina Síncrona es como el que se muestra en la figura 3.9, donde X_s representa la Reactancia Síncrona la cual es la Reactancia Efectiva que una fase " V_e " bajo las condiciones trifásicas balanceadas del funcionamiento normal de la máquina, esta junto con la Resistencia de Armadura R_a forman la Impedancia Síncrona de una fase. La impedancia síncrona de la máquina está dada por:

$$Z_s = \sqrt{R_a^2 + X_s^2} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Y el circuito de la Máquina Síncrona por fase es el siguiente:

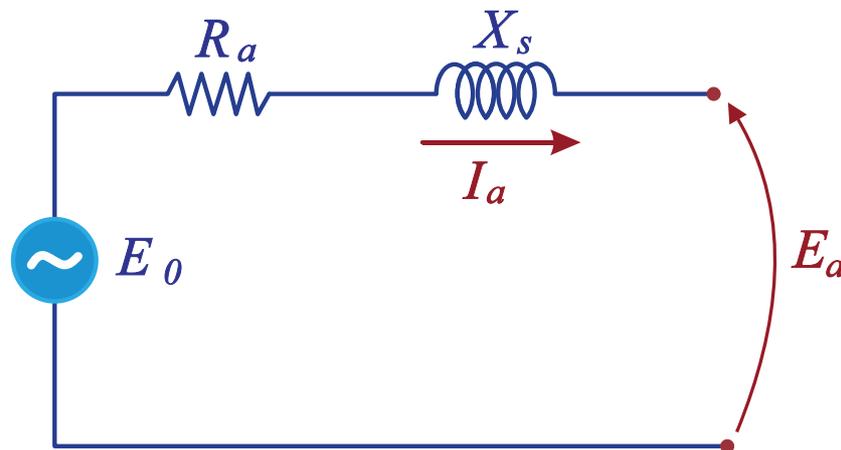


Figura 3.9: Circuito equivalente por fase de la máquina síncrona.
Fuente: Elaboración propia.

Donde:

R_a : es la resistencia del devanado de armadura.

X_s : es la reactancia síncrona de la máquina.

3.7.3 Material y equipo a utilizar

Módulo experimental del Laboratorio.

3.7.4 Procedimiento para la implementación de la práctica

1. Para obtener la resistencia de armadura, se aplica un voltaje de c.d. a una de las bobinas de la Máquina Síncrona, se mide su corriente y voltaje y se aplica la ley de ohm obteniendo el valor de resistencia en una de las fases.

Otra manera consiste en medir la resistencia directamente con un ohmímetro, aunque el primer método es el más adecuado.

2. El valor de la Reactancia Síncrona no saturada para una máquina en particular se puede determinar de la característica de circuito abierto y de la característica de cortocircuito como lo muestra la siguiente figura.

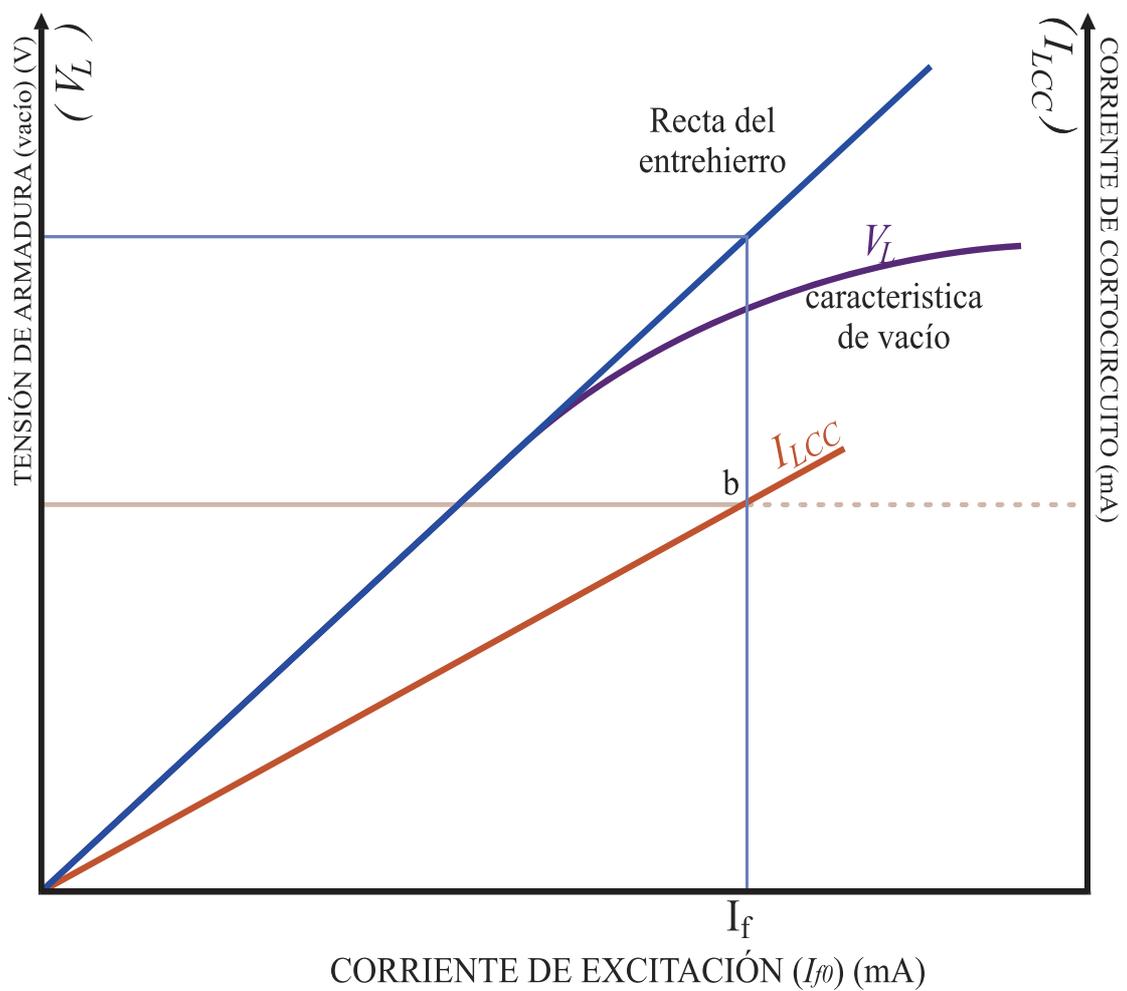


Figura 3.10: Características de vacío y corto circuito.

Fuente: Elaboración propia.

3. De la característica de circuito abierto se obtiene el valor de la corriente de excitación para lograr el voltaje nominal de la máquina en circuito abierto.

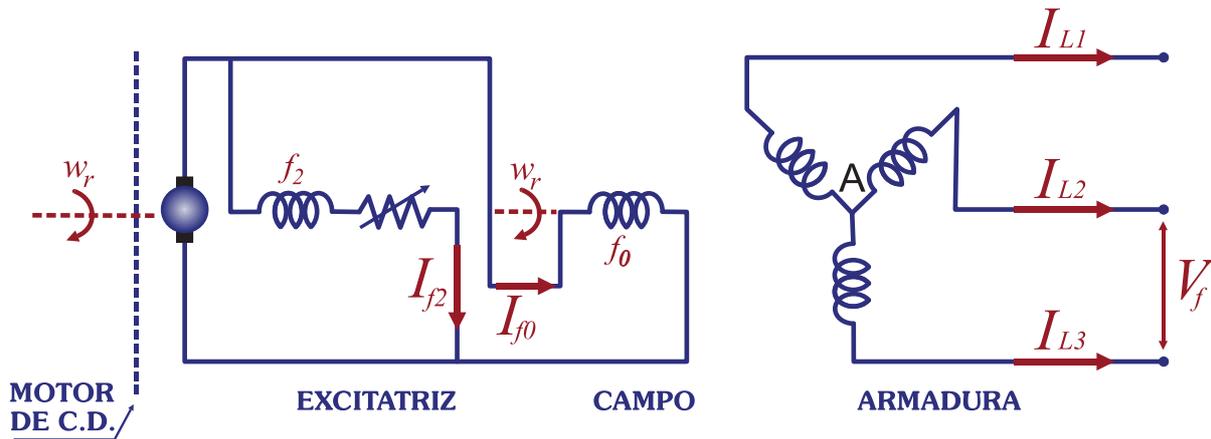


Figura 3.11: Diagrama de conexiones
Fuente: Elaboración propia.

Para ello se arma el circuito que se muestra en la Fig. 3.11, haciendo girar el rotor de la máquina impulsado por el motor de c.d. a 1800 rpm (Velocidad Síncrona) esto se hace partiendo de cero excitación en el campo inductor ($I_f = 0$) aumentándola gradualmente hasta llegar al voltaje en terminales nominal de la máquina, que en este caso por ser $I_a = 0$; $E_a = V_t$ ($E_a = 220V$) tomando valores intermedios para obtener la línea de V_L .

Tabla 3.1: Medición de la tensión en vacío, y corrientes de excitación.

PRUEBA	EXCITACIÓN (I_{f0}) (mili Amperios)	TENSIÓN EN VACÍO (V_t) (Voltios)
1	74.2	113
2	86.4	130
3	95.8	141
4	150	203
5	170	221
6	190	234
7	210	258
8	235	270
9	275	309
10	303	323

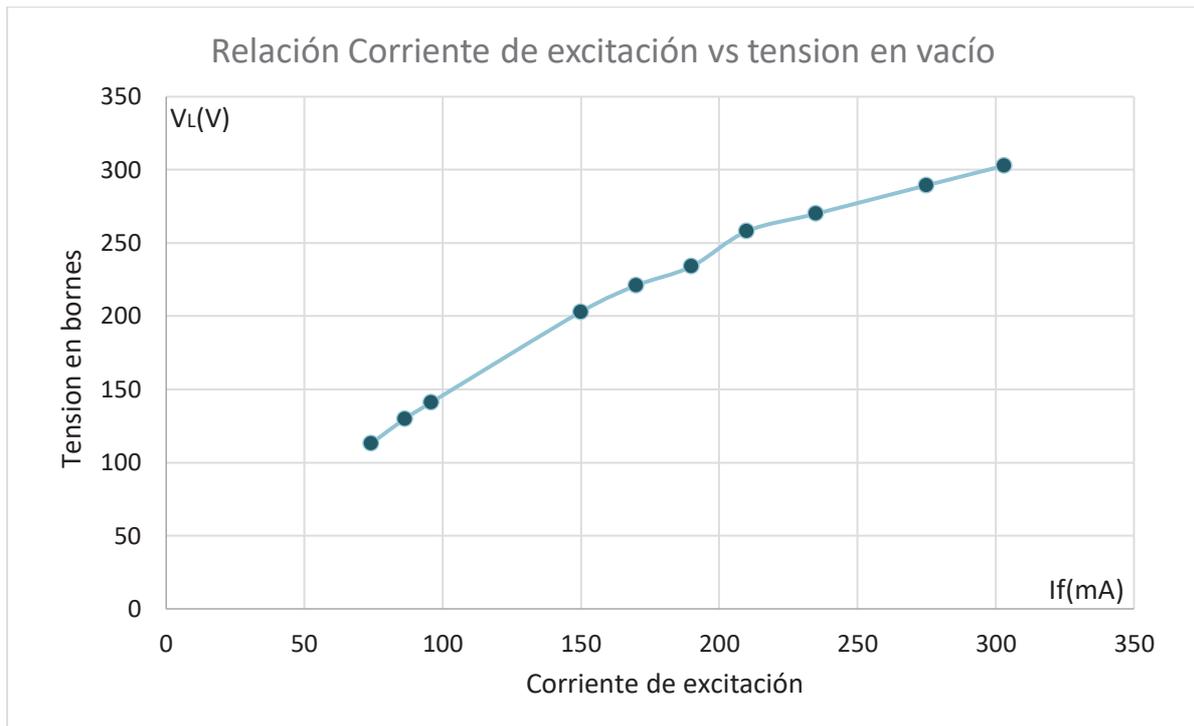


Figura 3.12: Relación entre la corriente de excitación y la tensión en vacío
Fuente: propia.

La figura 3.12 muestra gráficamente el comportamiento de la corriente de excitación en el rotor del generador sin conexión a ninguna carga, denominado en vacío y el comportamiento de la tensión en bornes de la tabla 3.1 obtenidas en laboratorio según la tabla 3.1.

- De la característica de cortocircuito se obtiene una línea que representa la relación entre la corriente de campo inductor (I_f) versus la corriente de cortocircuito en la armadura (I_{LCC}). Para ello se arma el circuito de la siguiente figura, esta línea se grafica con el eje de I_f común para la característica de tensión de armadura (Vacío). Tal como está representada en la figura.

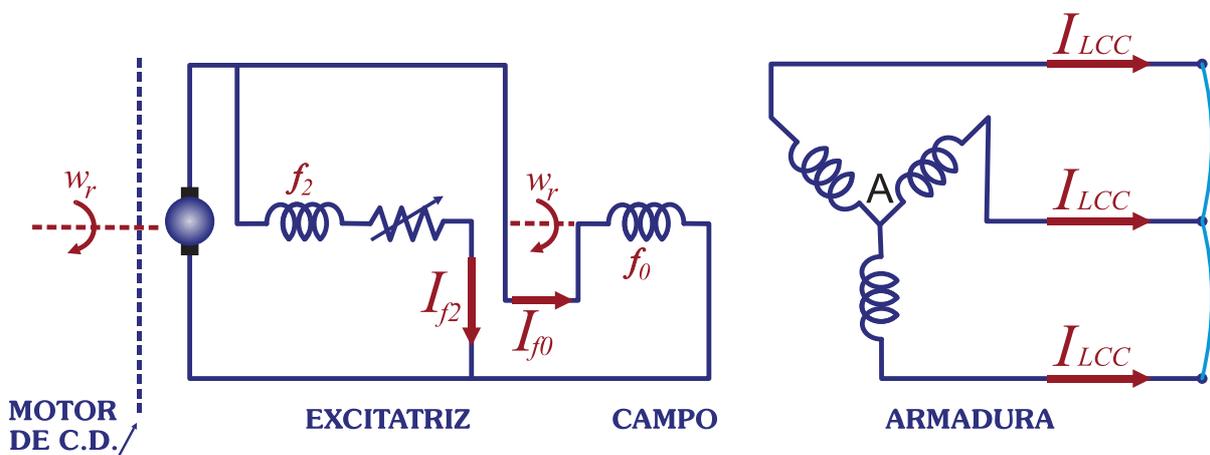


Figura 3.13: Diagrama a instalar
Fuente: Guía de laboratorio Maquinas eléctricas II – UNSAAC.

Tabla 3.2: Medición de la corriente de campo y la corriente de corto circuito.

PRUEBA	CORRIENTE DE CAMPO I_{fo} (mili AMPERIOS)	CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO I_{cc} (AMPERIOS)
1	17.7	0.03
2	96.6	0.14
3	175.7	0.29
4	192.4	0.32
5	235	0.47
6	250	0.45
7	275	0.49
8	290	0.52
9	300	0.54
10	303	0.55

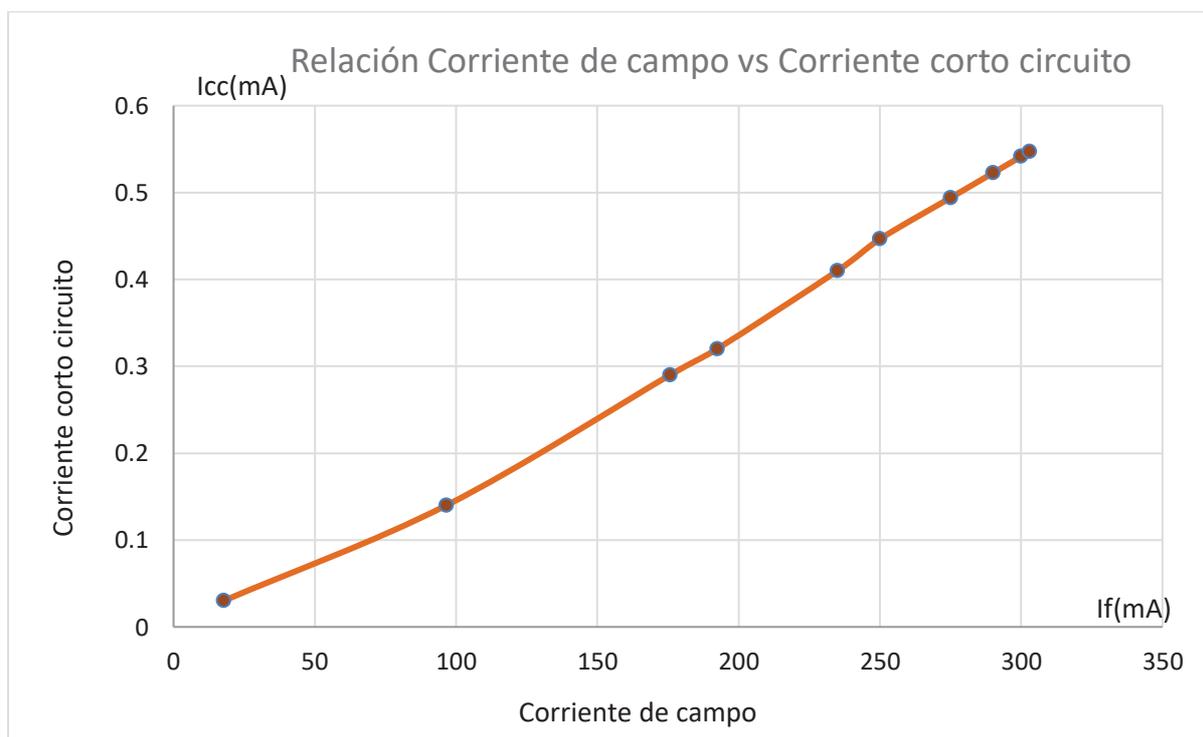


Figura 3.14: Relación entre la corriente de campo y corriente de corto circuito
Fuente: propia.

La figura 3.14 muestra gráficamente el comportamiento de la corriente de campo en el rotor del generador, corto circuitando los bornes versus la corriente de corto circuito según la tabla 3.2 obtenidas en laboratorio.

5. En el eje 0 se muestran los valores para E_a y en el eje o' para I_a . En el punto donde se cruzan las líneas de corriente de armadura de cortocircuito con la línea de la corriente de campo necesaria para obtener E_a nominal (punto f), se traza una línea perpendicular a O' y en este punto se obtiene el valor de I_a y con este valor calcular la reactancia Síncrona de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$X_s = \sqrt{\left(\frac{E_a}{I_a}\right)^2 - R_a^2} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Tabla 3.3: Medición de la corriente de campo y la corriente de corto circuito.

PRUEBA	EXCITACIÓN (I_{f0}) (mili Amperios)	TENSIÓN EN VACÍO (V_L) (Voltios)	CORRIENTE DE CAMPO I_{f0} (mili AMPERIOS)	CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO I_{cc} (AMPERIOS)
1	74.2	113	17.7	0.03
2	86.4	130	96.6	0.14
3	95.8	141	175.7	0.29
4	150	203	192.4	0.32
5	170	221	235	0.47
6	190	234	250	0.45
7	210	258	275	0.49
8	235	270	290	0.52
9	275	309	300	0.54
10	303	323	303	0.55

Las tablas 3.1 y 3.2 se combinan en la tabla 3.3 para poder graficar y encontrar un punto comun en la grafica, que nos ayude a determinar los parametros necesarios para hallar la reactancia sincrona según la ecuacion 3.9.

En la figura 3.15 se puede apreciar a simple vista una interseccion aproximada que con ayuda de la tabla 3.3 tomamos en consideración, vemos que para una corriente de excitación 303 mili amperios se tiene una tension en vacío de 323 voltios y para la misma cantidad de corriente de campo se otuvo una corriente de corto circuito de 0.55 mili amperios, asi cono se aprecia en la figura 3.15.

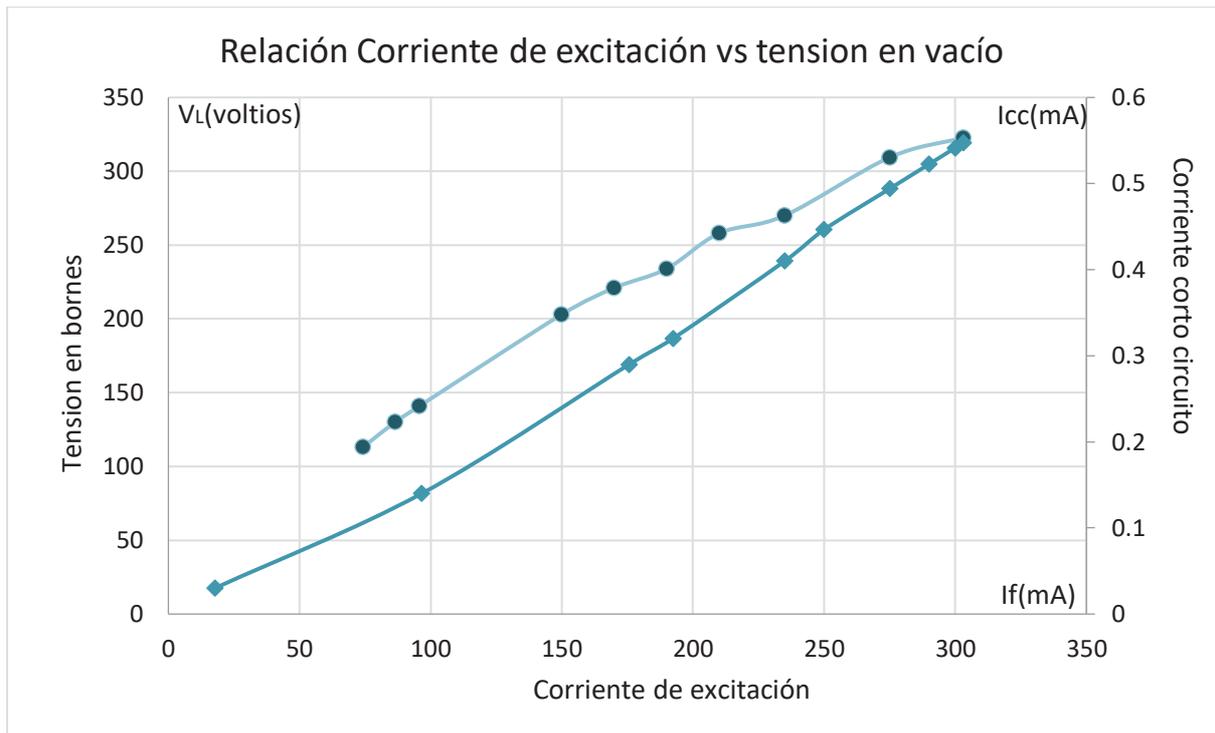


Figura 3.15: Súper posición de las figuras 3.13 y 3.14
Fuente: propia.

La figura 3.15 nos muestra gráficamente el punto aproximado de intersección de ambas gráficas el cual nos proporciona los datos de corriente de excitación, corriente en corto circuito y tensión en vacío.

Tabla 3.4. Resumen de la tabla 3.3.

PRUEBA	EXCITACIÓN (I_{f0}) (mili Amperios)	TENSIÓN EN VACÍO (V_L) (Voltios)	CORRIENTE DE CAMPO I_{f0} (mili AMPERIOS)	CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO I_{cc} (AMPERIOS)
10	303	323	303	0.55

Según la ecuación 3.9 se tiene $E_a = 323$ voltios, $I_{cc} = 0.55$ amperios y $R_a = 0$, y de esta manera determinamos la reactancia síncrona requerida.

$$X_S = \sqrt{\left(\frac{E_a}{I_{cc}}\right)^2 - R_a^2} = \sqrt{\left(\frac{323}{0.55}\right)^2 - 0^2} = 587.27 \text{ Ohmios}$$

$$X_S = 587.27 \text{ Ohmios}$$

Otro experimento simulador se puede apreciar en los anexos.

EVALUACIÓN

Todo generador síncrono tiene características inherentes de fabricación para diferentes tipos de cargas y potencias, sin embargo se hace necesario realizar pruebas de laboratorio para graficar correctamente las curvas de capacidad de potencia.

Para obtener los parámetros eléctricos de un generador síncrono, se hizo uso del laboratorio de máquinas eléctricas de la facultad de ingeniería eléctrica y se seleccionó un generador síncrono de 4 polos salientes de fabricación alemana, LUCAS – NUELLE LEHR de tensión nominal 400/230 voltios y corriente 0,45/0,7 amperios cosphi de 1/0,8.

Se realizó la prueba en vacío (sin carga) con una corriente mínima de 74.2 mili amperios y se obtuvo una tensión en vacío de 113 voltios, a medida que se incrementa la corriente de excitación en miliamperios se observa el incremento también de la tensión en vacío y cuando se llegó a aplicar la mayor corriente de excitación de 303 mili amperios se obtiene una tensión en vacío de 323 voltios. Se constata de esta forma que no se puede incrementar la corriente de excitación para obtener más lecturas ya que se corre el riesgo de sobrepasar el límite térmico del bobinado de la máquina y dañar las características del mismo. También se evidencia que para las pruebas, se tiene que seguir obligatoriamente un protocolo de pruebas para proteger la máquina.

De esta misma manera y con el cuidado en el manejo, se efectuó la prueba en corto circuito, en dicha prueba se aplicó una corriente de excitación de 17,7 mili amperios obteniendo una corriente de corto circuito de 0,03 amperios y a medida que se incrementó la corriente de campo la corriente de corto circuito también se incrementó, la corriente de excitación se aplicó hasta una corriente máxima de 303 mili amperios y obteniendo una corriente de corto circuito de 0,55 amperios, con estos valores máximos y haciendo uso de la ecuación 3.9 se determinó la reactancia síncrona del generador síncrono seleccionado de 587.27 ohmios. (Otro ejemplo similar se puede apreciar en el anexo número 5).

Estas pruebas se realizan en cada generador síncrono en las centrales hidroeléctricas del SEIN, sin embargo estos datos se actualizan cada año mediante el anuario técnico de OSINERGMIN y del COES, algunos de estos parámetros eléctricos se pueden apreciar en las tablas 5.1 hasta la tabla 5.6 de las C.H. seleccionadas para el estudio y aplicación.

CAPÍTULO – IV

ECUACIONES FASORIALES DE LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE POTENCIA Y ANÁLISIS GRÁFICO DE LOS LÍMITES DE OPERACIÓN DEL GENERADOR SÍNCRONO (APLICACIÓN C.H. MACHUPICCHU II – G1)

4.1 Generalidades

La generación de energía eléctrica implica un conjunto de procesos y etapas las mismas que básicamente lo conforman dos componentes fundamentales la turbina y el generador, la turbina tiene características propias y dependen de un conjunto de variables principalmente el caudal o gasto y la altura, estas variables determinan entre otras la potencia mecánica P_m compuesto por el Par y la velocidad de salida y que en resumen se convierte en una limitante del proceso de generación (Potencia máxima de la máquina motriz).

Por otra parte, el generador normalmente síncrono tiene tres componentes inherentes: la excitatriz, el estator y el rotor y cada una de ellas se convierten en limitantes cuando en la operación pueden sobrecalentarse, específicamente son los devanados y los materiales aislantes que tienden a deteriorarse y disminuyen el tiempo de vida útil de la máquina y que a su vez se constituyen en limitantes del proceso de generación.

Otra limitante también es la estabilidad estática del ángulo de potencia, cuyo análisis se desarrolla en el presente capítulo en los dos principales tipos de generadores síncronos: de polos lisos y de polos salientes.

4.2 Ecuaciones fasoriales para graficar las curvas de capacidad de potencia y el análisis gráfico de los límites de operación.

4.2.1 Consideraciones iniciales

Para evitar el deterioro de los aislantes debido al incremento de la temperatura en las estructuras electromagnéticas del generador; se buscará limitar sus efectos controlando que los valores de diseño térmico del devanado de campo y de la corriente de armadura sean excedidos además de buscar que el equipo este en sincronismo permanente y que la potencia activa entregada por el generador sincrónico no supere la potencia de la turbina.

4.2.2 El Diagrama Vectorial del generador síncrono de polos salientes

Para obtener las ecuaciones de las curvas de capacidad utilizaremos el diagrama de la figura 4.1 a partir de la cual hallaremos las ecuaciones de la potencia activa y la potencia reactiva del generador síncrono de polos salientes.

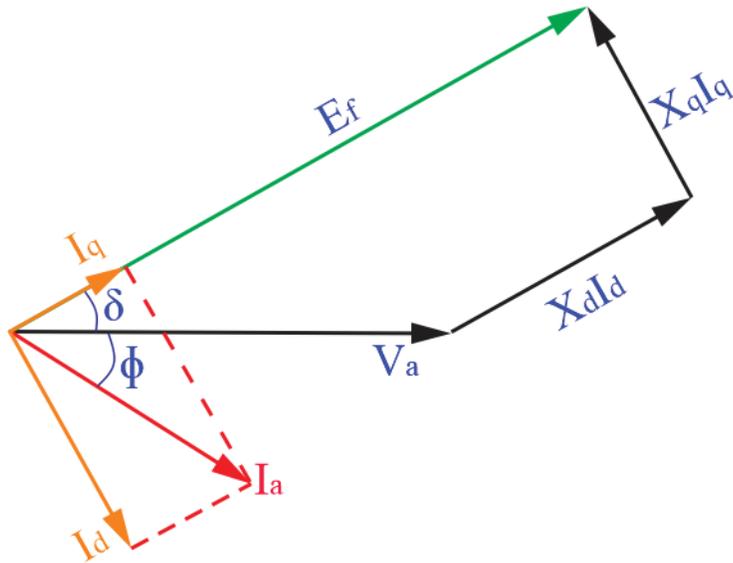


Figura 4.1: Diagrama Vectorial del Generador de Polos Salientes.
Fuente: Propio

Donde:

X_d : Reactancia Sincrónica Directa.

X_q : Reactancia Sincrónica en Cuadratura.

δ : Ángulo de carga.

ϕ : Ángulo del Factor de Potencia.

E_f : Fuerza de voltaje Inducida.

V_a : Tensión inducida en el devanado de Armadura.

I_a : Corriente inducida en el devanado de Armadura.

4.2.3 Transformación de los 4 fasores cerrados a triángulo de potencias.

Para obtener el diagrama triangular de potencia que después será utilizado en la construcción del diagrama circular para máquinas síncronas (diagrama de Capacidad) tomaremos como referencia el diagrama vectorial mostrada en la figura 4.1; al cual lo dividiremos entre la reactancia sincrónica directa, para obtener el diagrama vectorial de corrientes donde el vector AB representa a

la corriente del devanado de armadura en el eje directo (I_d), así mismo el lado BD que corresponde a la suma del vector CB y su proyección representa a la corriente del devanado de armadura en el eje cuadratura (I_q), siempre que la proyección del vector CB sea igual a $(I_q(X_d - X_q)/X_d)$; de tal forma que si trazamos un vector desde punto A al punto D este represente a la corriente del devanado de armadura (I_a). (Castillo, R, 2013)

Del mismo modo trazamos el vector resultante OD (corriente de campo: (E_f'/X_d)) de la suma de los vectores OA (corriente de corto circuito: V_a/X_d) y AD (corriente del devanado de Armadura: I_a), obteniendo el triángulo OAD mostrado en la figura 4.2 que representa el diagrama vectorial de corrientes para la máquina síncrona de polos lisos. (Castillo, R, 2013)

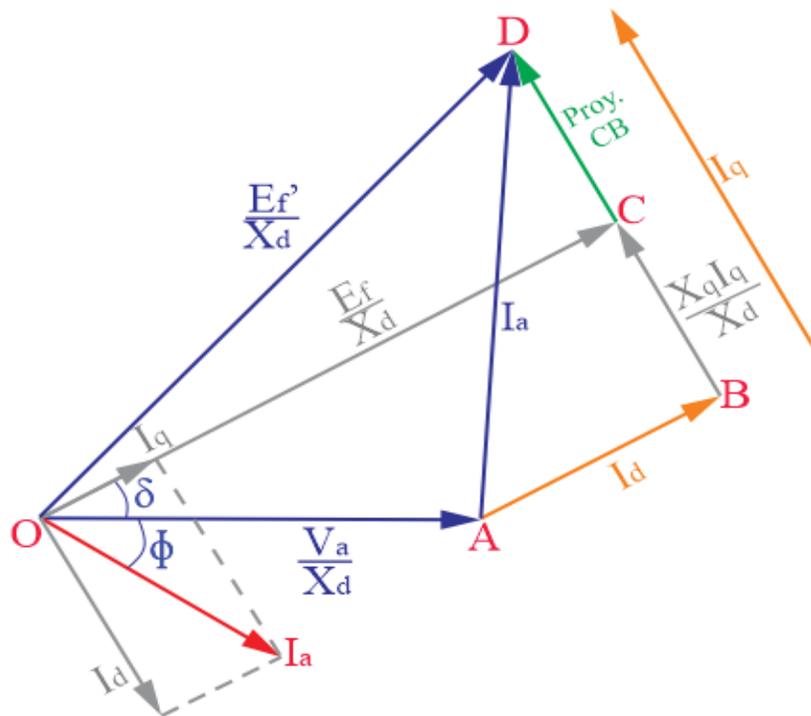


Figura 4.2: Diagrama Vectorial de Corrientes del Generador de Polos Lisos.
Fuente: Propia.

A partir del diagrama vectorial de corrientes del generador de polos lisos mostrado en la figura 4.2 se traza un vector paralelo al vector corriente de campo de tal forma que se interseque con la proyección OF del vector OA (corriente de cortocircuito: V_a/X_d), donde el diagrama vectorial FOD, la semicircunferencia de diámetro OF y el valor $I_q(X_d - X_q)/X_d$ representan el diagrama de corrientes del generador de polos salientes de la figura 4.3, la corriente de excitación cero y la contribución del efecto de polos salientes a la corriente de campo respectivamente. (Castillo, R, 2013)

Y de forma similar para la potencia reactiva se tiene que:

$$Q = \frac{V_a * E_f * \cos\delta}{X_d} + \frac{V_a^2}{2 * X_d * X_q} * (X_d - X_q) * \cos 2\delta - \frac{V_a^2}{2 * X_d * X_q} * (X_d + X_q)$$

Ecuación 4.2

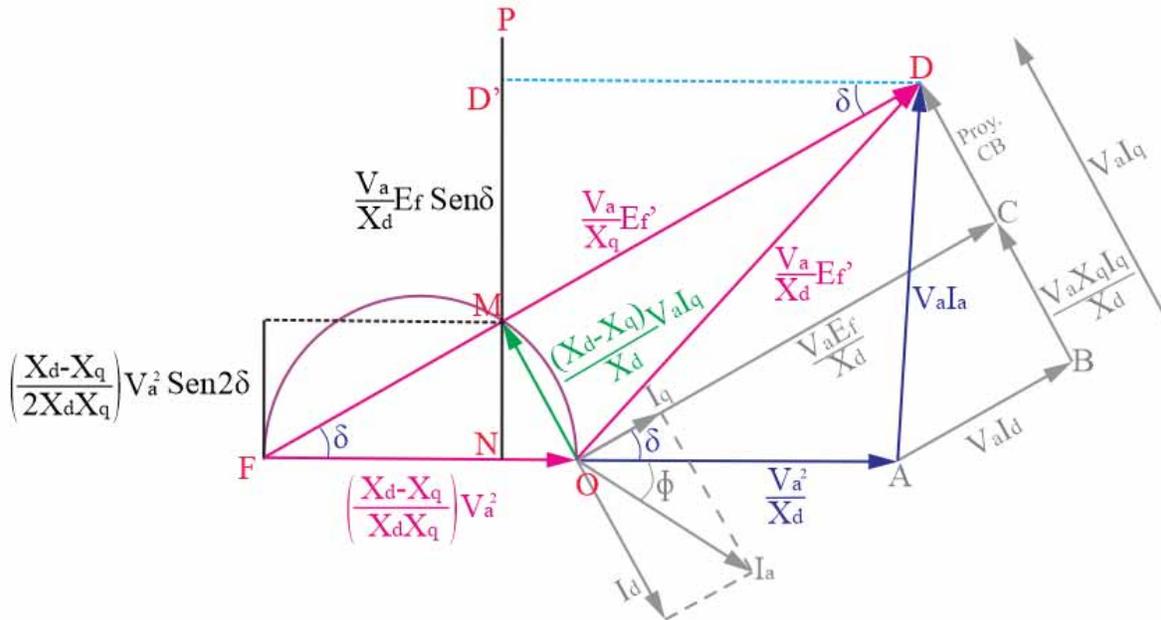


Figura 4.6: Diagrama Vectorial para el cálculo total de la potencia activa.
Fuente: Propia

Realizando cambios de variable para los términos semejantes:

$$U = \frac{V_a * E_f}{X_d}$$

$$W = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d * X_q} \right)$$

$$Z = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d * X_q} \right)$$

y reemplazando en las ecuaciones se tiene que la potencia activa y reactiva:

$$P = (U + 2W \cos\delta) \sin\delta$$

Ecuación 4.3

$$Q + W + Z = (U + 2W \cos\delta) \cos\delta$$

Ecuación 4.4

Luego hacemos un cambio de variable, tal que:

$$K = W + Z = \frac{V_a^2}{X_q}$$

$$R = U + 2W \cos\delta$$

Luego reemplazando en 4.45 y 4.46 se tiene:

$$P = R \operatorname{sen}\delta$$

Ecuación 4.5

$$Q = R \cos\delta - K$$

Ecuación 4.6

4.3.1 Determinación del lugar geométrico de la corriente máxima del estator.

Para determinar el lugar geométrico de la corriente, partiremos de la expresión pitagórica de la potencia aparente mostrada en la ecuación 4.7.

$$P^2 + Q^2 = S_{max}^2$$

Ecuación 4.7

Luego al reemplazar la ecuación 4.5 y 4.6 en 4.7 y realizar las operaciones correspondientes en la ecuación 4.8:

$$(R \operatorname{sen}\delta)^2 + (R \cos\delta - K)^2 = S_{max}^2$$

Ecuación 4.8

Se determina la ecuación de la corriente máxima del devanado de armadura en coordenadas polares; la cual está dada por:

$$R = K \cos\delta + \sqrt{S_{max}^2 - K^2 \operatorname{sen}^2\delta}$$

Ecuación 4.9

Al graficar la ecuación 4.9 en coordenadas polares se obtiene la curva mostrada en la figura 4.6:

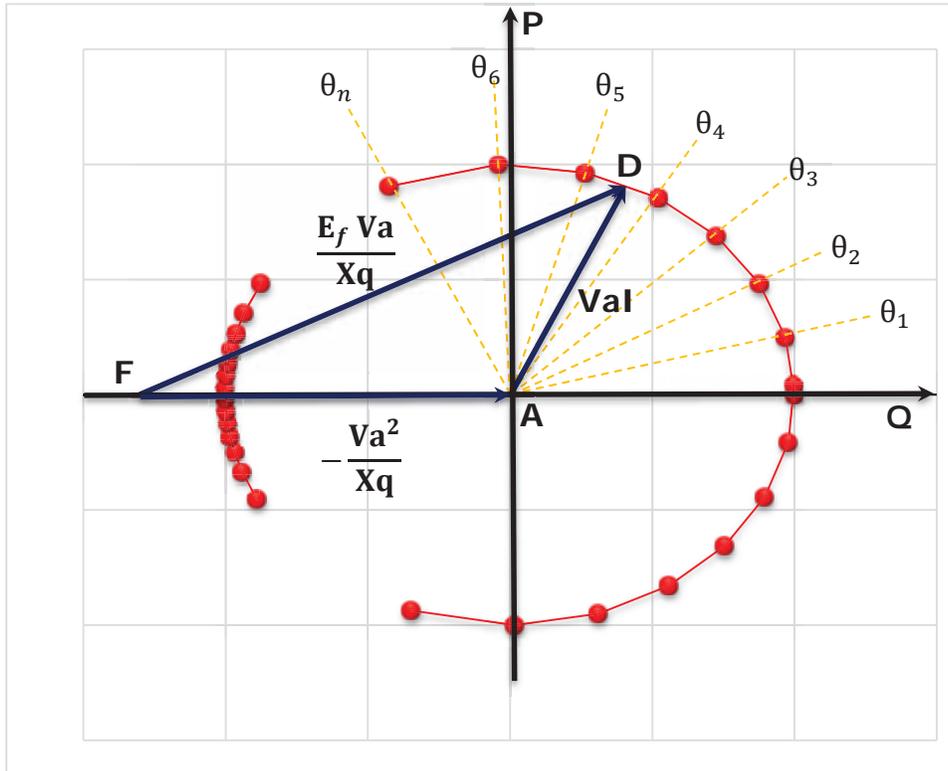


Figura 4.7: Lugar geométrico de la corriente máxima del estator
Fuente: Propia.

4.3.2 Ecuación del lugar geométrico de la Corriente Máxima de Excitación

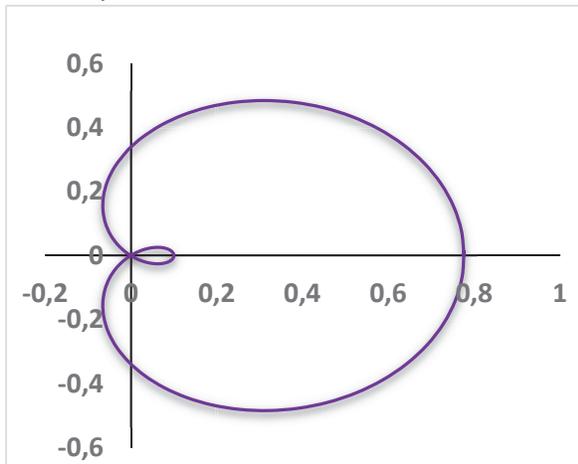
A partir de la ecuación 4.4 y luego de realizar el cambio de variable determinamos la expresión mostrada en la ecuación 4.10, que se muestra a continuación.

$$R = U + 2W \cos \delta$$

Ecuación 4.10

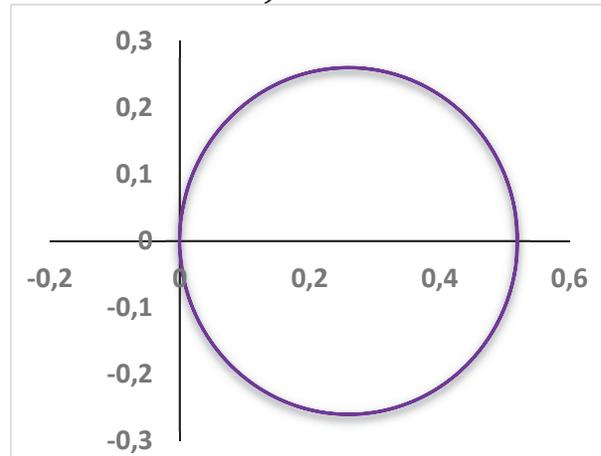
La representación gráfica de la Ecuación 4.10 nos determina el lugar geométrico de la corriente máxima de Excitación; dicha curva es denominada Limaçon de Pascal y puede presentar las variaciones mostradas en la figura 4.7. (Castillo, R., 2013)

a) Limacon o caracol con rizo



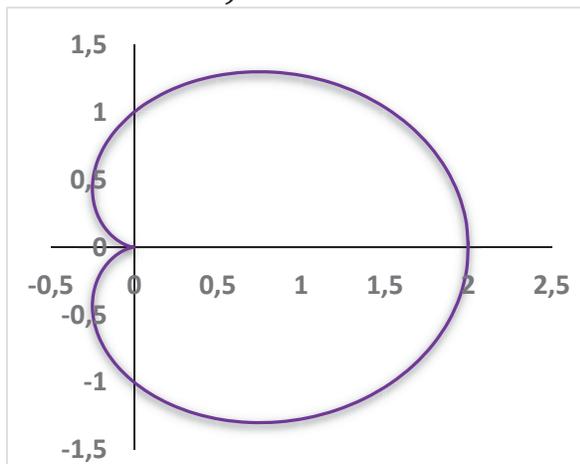
$$R = 0.3381 + 0.4386 * \cos \theta$$

b) Circunferencia



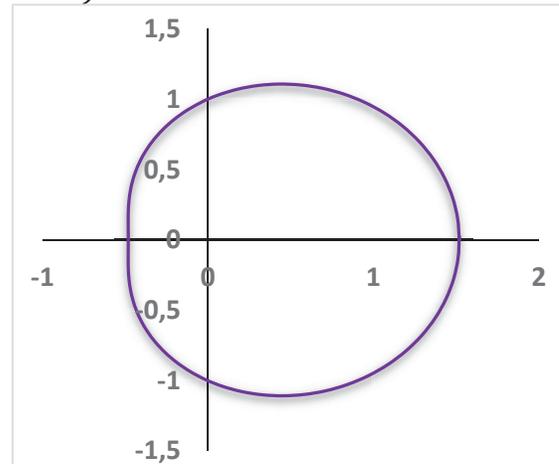
$$R = 0.52 * \cos \theta$$

c) Cardioide



$$R = 1 + 1 * \cos \theta$$

d) Limacon o caracol sin rizo



$$R = 1 + 0.52 * \cos \theta$$

Figura 4.8: a, b, c, d Lugar geométrico de las variaciones de la curva Limaçon de Pascal
Fuente: Propia.

Además el Limacon de Pascal graficado en la figura 4.8 posee un radio variable igual a $E_f V_a / X_d$ cuyo centro se encuentra en el punto F.

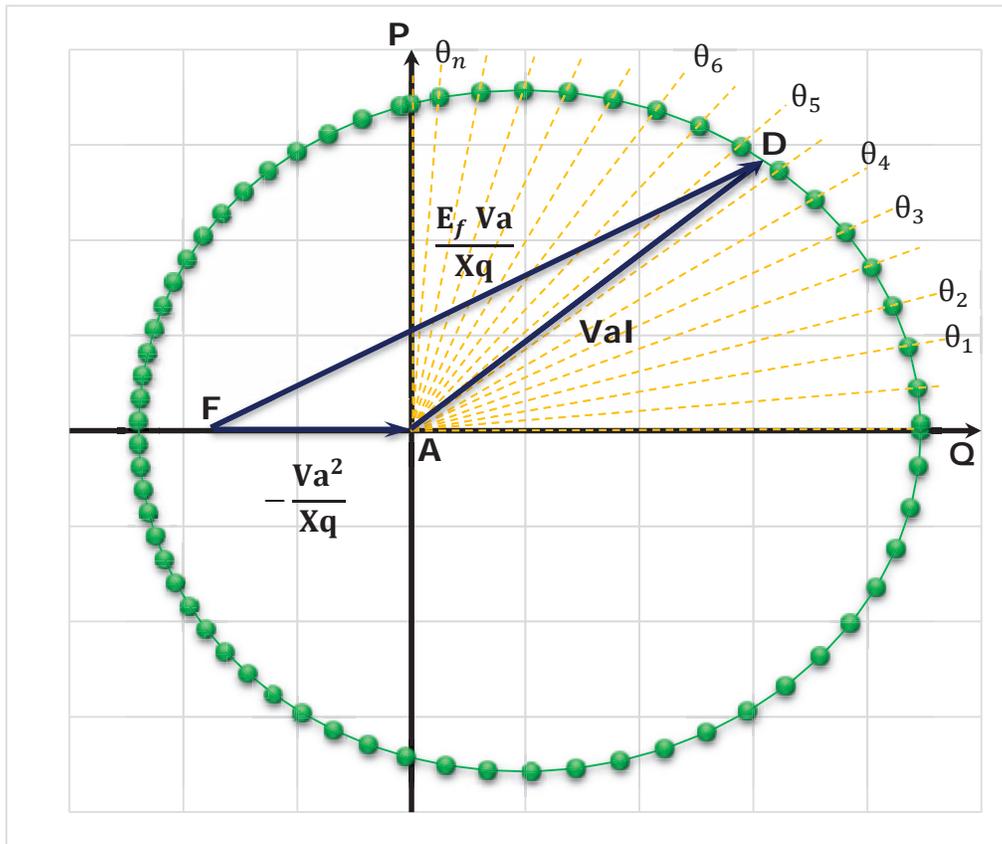


Figura 4.9: Lugar geométrico de la Corriente Máxima de excitación (Limaçon de Pascal)
Fuente: Propia.

4.3.3 Ecuación del lugar geométrico de la Máquina Motriz (Turbina).

Tomando como referencia la ecuación 4.5 se determina que la potencia máxima que la turbina puede producir está dada por la expresión mostrada en la ecuación 4.12.

$$P_{max} = R \operatorname{sen} \delta = P_{turbina \text{ maxima}}$$

$$R = \frac{P_{turbina \text{ maxima}}}{\operatorname{sen} \delta}$$

Ecuación 4.12

Luego al graficar la ecuación 4.12 en coordenadas polares; se observa en la figura 4.9 el lugar geométrico de la potencia máxima de la turbina.

Para determinar la ecuación 4.14 del círculo de reacción mostrado en la figura 4.10 se asume que la variable “U” de la ecuación 4.10 que representa a la corriente de excitación máxima, es igual a cero cuyo radio estará dado por la expresión 4.15; donde $e\%(R)$ puede tomar valores entre el 5% y 10%.

$$R = 2W \cos\delta$$

Ecuación 4.14

$$R_{min} = r + e\%(R)$$

Ecuación 4.15

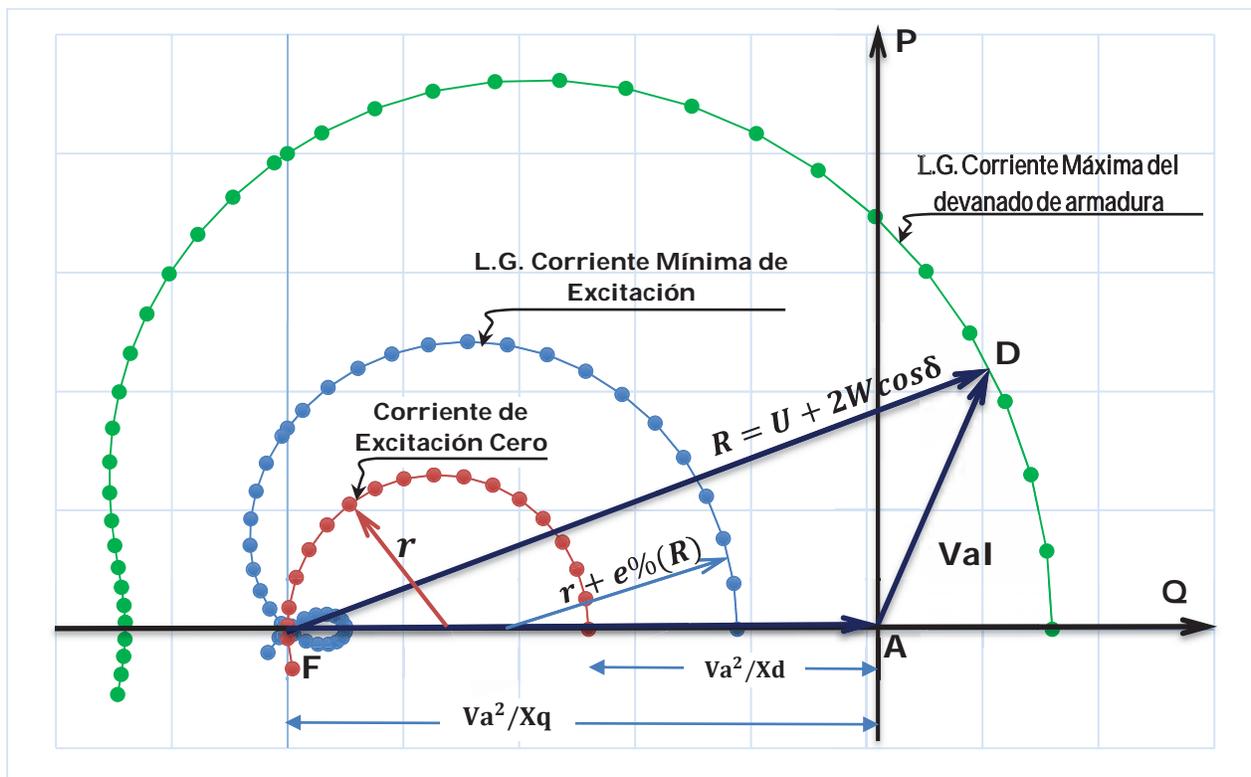


Figura 4.11: Lugar geométrico de la Corriente mínima de excitación (Limaçon de pascal).
Fuente: Propia

Por lo tanto, la ecuación que determina el lugar geométrico de la corriente mínima de excitación estará dada por la expresión de la ecuación 4.16

$$R = U + e\%(U + 2W \cos\delta)$$

Ecuación 4.16

4.3.5 Límite de Estabilidad Permanente Teórico

Para poder determinar el límite de estabilidad teórico utilizaremos el modelo de un generador sincrónico que se encuentra entregando potencia a un gran sistema eléctrico (barra infinita), donde al incrementar o disminuir la cantidad de caudal, también aumenta y disminuye la potencia de la turbina y por ende la potencia activa suministrada al sistema debido al desplazamiento físico del rotor o al incremento del ángulo de potencia. (Castillo, R., 2013)

Si la máquina comienza a embalsarse; se dice que el límite de estabilidad ha sido sobrepasado; pues esta máquina ya no opera dentro de zona estable de la característica $P = f(\delta)$.

Para determinar la ecuación del límite de estabilidad permanente teórico se plantea el método geométrico que se determina mediante la figura 4.11, en el cual se detallan los valores de las longitudes tanto del triángulo inscrito en el círculo de reacción de la corriente de excitación cero como del triángulo que contiene a la curva del límite de estabilidad permanente teórico. Cabe señalar que el objetivo, en coordenadas polares, es hallar el valor de R en función del ángulo de potencia; es decir, $R = f(\delta)$ ². Luego se tiene:

$$R \cos \delta = 2W \operatorname{sen}^2 \delta$$

$$R = \frac{2W \operatorname{sen}^2 \delta}{\cos \delta}$$

$$R = 2W \operatorname{sen} \delta \tan \delta$$

Ecuación 4.17

² Castillo Haro, Raúl, (2013). *Implementación y análisis de la curva de capacidad del generador síncrono de polos salientes utilizando software de ingeniería*. Lima. Perú, p.124

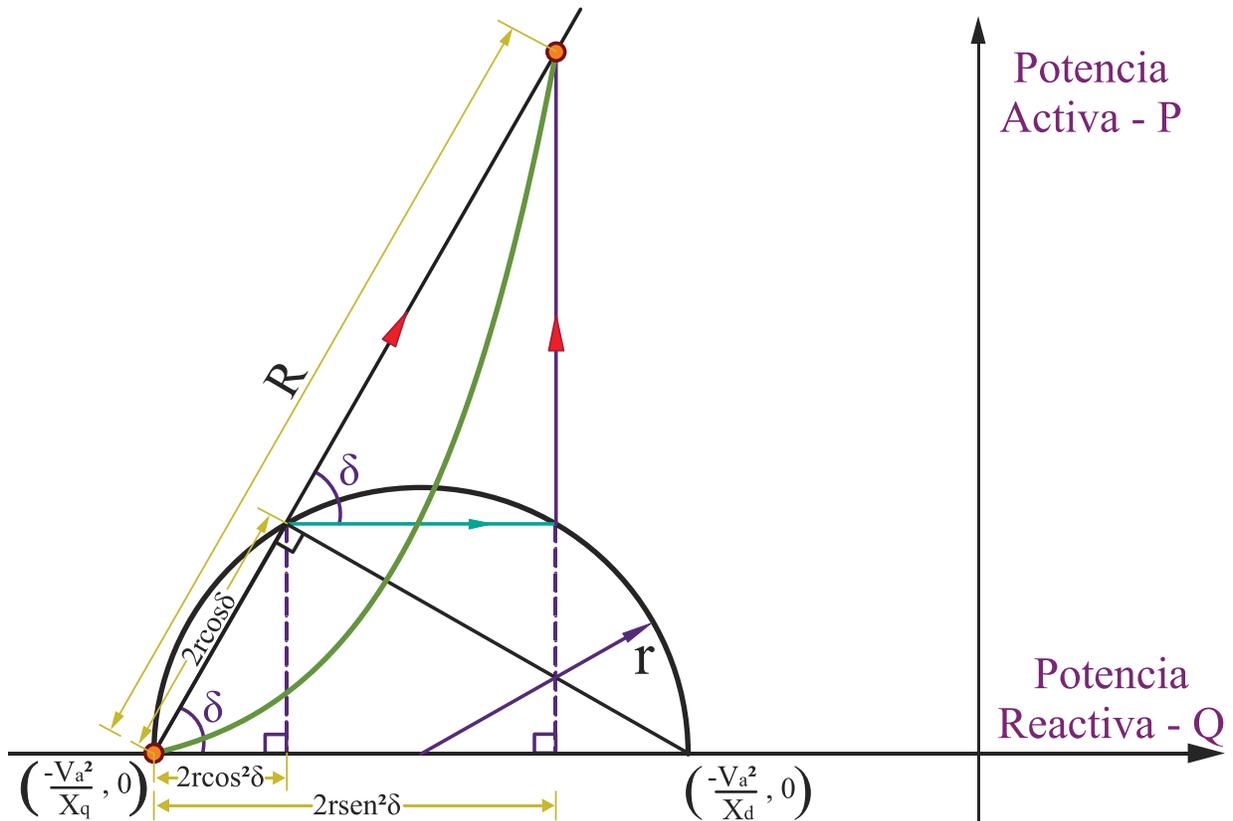


Figura 4.12: Determinación matemática del lugar geométrico de la estabilidad teórica.
Fuente: Propia

4.3.6 Límite de estabilidad permanente práctico

En la práctica este Límite de Estabilidad consiste en dejar un margen de seguridad del 10% a 20% de la potencia activa nominal, tal como se muestra en la ecuación 4.18. (Castillo, R., 2013)

$$P_{\text{Práctico}}^{\text{limite}} = P_{\text{teórico}}^{\text{limite}} - a * P_{\text{Nominal}}$$

Ecuación 4.18

Donde:

a: Margen de Seguridad del límite de estabilidad (10% a 20%).

4.4 Análisis y gráfica de las ecuaciones en coordenadas polares de las curvas de capacidad de potencia de las centrales hidroeléctricas recientes³.

Para el análisis y gráfica de las ecuaciones de las curvas de capacidad de potencia se han definido la C.H. Machupicchu II; esta central hidroeléctrica es de reciente puesta en marcha y fue considerada en el documento publicado por Osinergmin el año 2018; sin embargo, se pueden considerar también en este análisis cualquier otra Central del SEIN.

El análisis de las ecuaciones de las curvas de capacidad de potencia implica considerar las ecuaciones definidas a partir de los diagramas fasoriales del generador síncrono sean estas de rotor cilíndrico o rotor de polos salientes, también se considera las ecuaciones del lugar geométrico tanto en coordenadas rectangulares P-Q y coordenadas polares vistos en el capítulo II y este capítulo respectivamente.

³ OSINERGMIN, SUPERVISIÓN DE CONTRATOS DE PROYECTOS DE GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN OPERACIÓN, Agosto 2018, División de Supervisión de Electricidad, pag. 64 al 74.

4.4.1 Central Hidroeléctrica Machupicchu II

Tabla 4.1. Características de la **CENTRAL.HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II**⁴

DENOMINACION	C.H. MACHUPICCHU II
EMPRESA CONSECCIONARIA	EGEMSA
TECNOLOGÍA	Generación Hidráulica
UBICACIÓN Departamento Provincias Distrito Altitud	Cusco Urubamba Machupicchu 2 070 msnm
DATOS TÉCNICOS DE CENTRAL Potencia Instalada Número de Unidades de Generación Salto Neto Caudal Nominal Recurso Hídrico Casa de Máquinas	102 MW 1 Turbina 356,2 m 31,0 m ³ /s Río Urubamba (llamado Vilcanota) Subterráneo
DATOS TÉCNICOS DE TURBINA Tipo de Turbina Potencia Nominal Caudal Nominal Velocidad	Francis Vertical 101,3 MW 31,0 m ³ /s 450 rpm
DATOS TÉCNICOS GENERADOR Potencia Tensión de Generación Factor de Potencia	120 MVA 13,8 kV 0,85
DATOS TÉCNICOS DEL TRANSFORMADOR Tipo Potencia Nominal Nivel de Tensión	Monofásico 3 x 40 MVA + 1 x 40 MVA (reserva) 13,8/138 kV
DATOS DE CONTRATO Tipo de contrato Firma de Contrato Puesta en Operación Comercial (POC)	Concesión Definitiva 29.11.1994 15.08.2015
INFORMACIÓN RELEVANTE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El proyecto aprovecha una curva del río Vilcanota bordeando la ciudadela de Machupicchu. Las obras de toma se ubican en el km 107 de la línea férrea Cusco-Machupicchu y la central está ubicada en el km 123 de dicha línea. ▪ EGEMSA otorgó a Graña y Montero S.A. la buena pro para la ejecución de las obras. La supervisión estuvo a cargo del Consorcio Supervisión C.H. Machupicchu formado por la Consultora Lahmeyer Agua y Energía de Perú y Estudios Técnicos de Colombia. Actualmente, la supervisión está a cargo del consorcio Servicios Técnicos de Ingeniería de Consulta INTGR (Sucursal de Integral S.A. Colombia) y ENERGOPROJEKT HIDROINZENJERING S.A. (Sucursal Perú). ▪ La central al operar en forma experimental, evacuó temporalmente la energía producida por la central a través de la L.T. 138 kV Machupicchu-Cachimayo (L-1001) y L.T. 138 kV Machupicchu-Quencoro (L- 1002). ▪ La construcción de la L.T. 138 kV S.E. C.H. Machupicchu II-S.E Suriray está culminada y permitirá inyectar al SEIN la energía generada por la C.H. Machupicchu II, luego que entre en operación la L.T. 220 kV Machupicchu-Abancay-Cotaruse de Consorcio Transmantaro (23.08.2015). ▪ Las obras concluyeron el 27.06.2015, entrando en operación experimental hasta el 28.07.2015, luego de lo cual entró en etapa de reajustes, calibraciones y mantenimiento de algunas instalaciones hasta el 15.08.2015, fecha en que tiene autorización para entrar en operación. ▪ Con carta COES/D/DP-1326-2015 del 13.08.2015, el COES aprueba la Puesta en Operación Comercial del Grupo N° 04 de la II fase de la C.H. Machupicchu, desde las 00:00 horas del 15.08.2015, con una potencia efectiva de 99,86 MW. ▪ El monto de inversión aproximado fue de US\$ 148,8 millones.

Fuente: Osinergmin- Supervisión de contratos de proyectos de generación y transmisión de energía eléctrica en operación Agosto-2018

⁴ OSINERGMIN, SUPERVISIÓN DE CONTRATOS DE PROYECTOS DE GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN OPERACIÓN, Agosto 2018, División de Supervisión de Electricidad, pag. 64 al 74.

GRUPO DE GENERACIÓN 1 MACHUPICCHU: G1

Datos de cálculo:

1. Potencia: $S_n = 120MW \rightarrow S_a = 1p.u.$
2. Tensión: $V_n = 13.8 kV \rightarrow V_a = 1p.u.$
3. Corriente: $I_n = 5020.44 A \rightarrow I_a = 1p.u.$
4. Factor de potencia: 0.85
5. Ángulo de factor de potencia: $\phi = \cos^{-1}(0.85) = 31.79^\circ$
6. Reactancia síncrona en el eje d: $X_d = 1.023$
7. Reactancia síncrona en el eje q: $X_q = 0.668$
8. Potencia máxima de la turbina: $99.86 MW \rightarrow P_{max} = 99.86/120 = 0.83 p.u.$
9. Potencia mínima de la turbina: $40 MW \rightarrow P_{min} = 40/120 = 0.33 p.u.$
10. Margen de seguridad del límite práctico de estabilidad: $a\% = 10\%$
11. Margen de seguridad de la mínima corriente de excitación de campo: $a\% = 10\%$
12. El ángulo Par o ángulo de carga:

$$\text{Aplicando } \delta = \tan^{-1} \left[\frac{X_q I_a \cos \phi}{V_a + X_q I_a \sin \phi} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{0.668 * 1 * \cos(31.79)}{1 + 0.668 * 1 * \sin(31.79)} \right]$$

$$\delta = 22.78^\circ$$

13. La tensión inducida de armadura E_f :

$$\text{Considerando } E_f = V_a \cos \delta + X_d I_a \sin(\delta + \phi) = 1 * \cos(22.78) + 1.023 * 1 * \sin(22.78 + 31.79)$$

$$E_f = 1.756p.u.$$

14. Sustitución de variables

Aplicando:

$$U = \frac{V_a * E_f}{X_d} = 1.716$$

$$W = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d * X_q} \right) = 0.26$$

$$Z = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d * X_q} \right) = 1.24$$

$$K = Z + W = 1.50$$

15. Dominio de las gráficas:

$$\delta = (0^\circ, 90^\circ)$$

4.4.1.1 Gráfica de la ecuación de la corriente máxima del estator

Tomando en cuenta la ecuación 4.54:

$$I_{\text{estator}}^{\text{maxima}} = K \cos \delta + \sqrt{S_{\text{max}}^2 - K^2 \sin^2 \delta} \rightarrow I_{\text{estator}}^{\text{maxima}} = 1.50 \cos \delta + \sqrt{1 - 2.25 \sin^2 \delta}$$

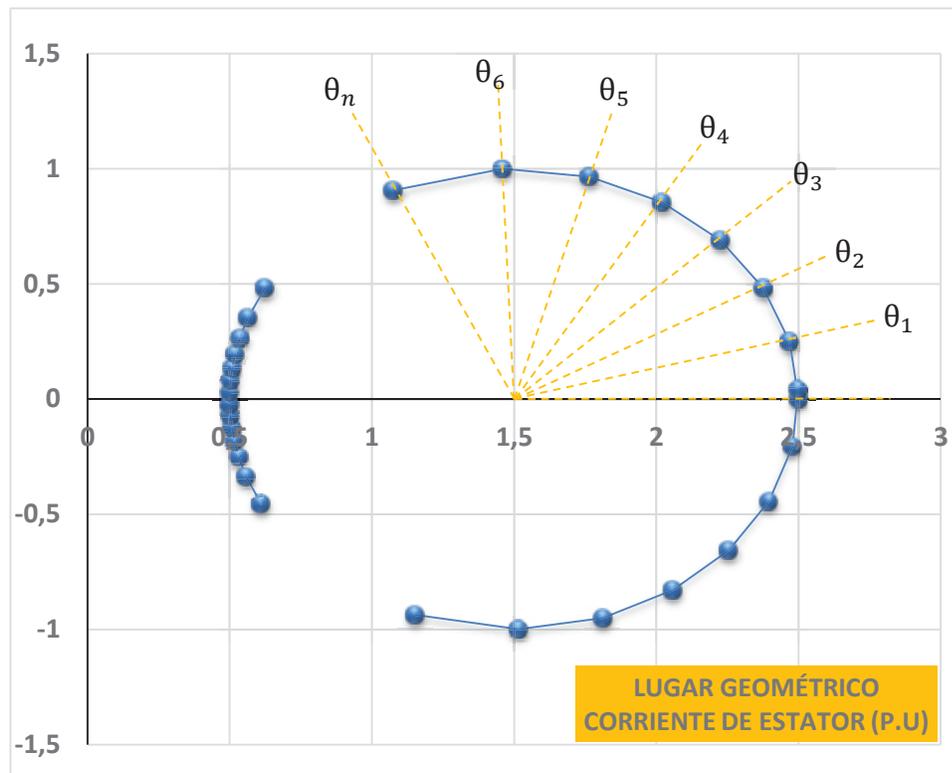


Figura 4.13: Lugar geométrico de la corriente de estator MACHUPICCHU: G1.
Fuente: Propia

La figura 4.13 muestra el lugar geométrico de la corriente de armadura en la cual se observa que cuando el ángulo de torque es 0° , la corriente máxima alcanzada en el estator es de 1 p.u (la cual es producida en su totalidad por la corriente de excitación) y la potencia total generada será reactiva.

A medida que el ángulo de carga va aumentando a $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$ la corriente en el devanado de armadura (1 p.u) estará producida por la corriente de excitación (que comenzará a disminuir a medida que el ángulo par aumente) y por el movimiento físico del rotor debido al incremento del caudal de agua que se traducirá en la aparición e incremento de la potencia activa y la reducción de la potencia reactiva.

4.4.1.2 Gráfica de la ecuación de la corriente máxima de excitación

Tomando en cuenta la ecuación 4.57:

$$I_{\text{maxima excitacion}} = U + 2W \cos \delta \quad \rightarrow \quad I_{\text{maxima excitacion}} = 1.716 + 0.52 \cos \delta$$

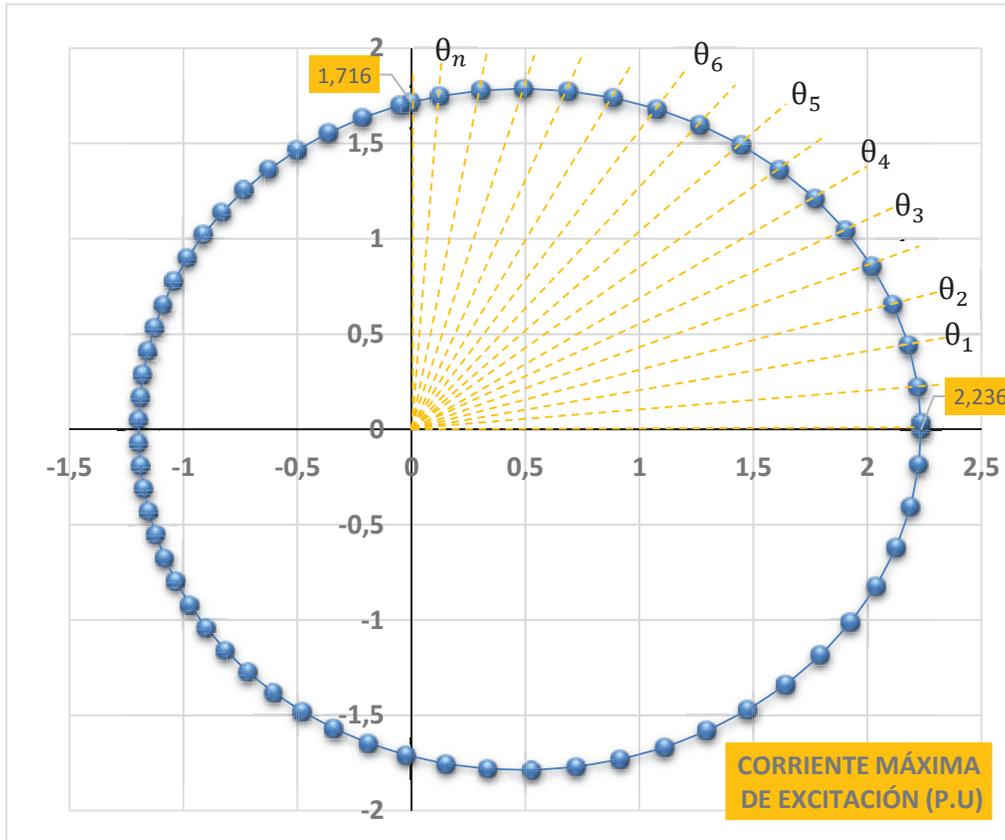


Figura 4.14: Lugar geométrico de la corriente máxima de excitación MACHUPICCHU: G1.
Fuente: Propia

La figura 4.14 muestra el lugar geométrico de la corriente máxima de excitación en la cual se observa que cuando el ángulo de torque es 0° , la corriente máxima de excitación que circula en el devanado de campo será de 0.736 p.u.

A medida que el ángulo de carga va aumentando a $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$ la corriente en el devanado de campo va disminuyendo y se produce el movimiento físico del rotor debido al incremento del caudal de agua, con la finalidad de mantener constante la tensión en bornes del generador

4.4.1.3 Gráfica de la ecuación de la potencia máxima de la turbina

Tomando en cuenta la ecuación 4.61:

$$P_{\text{turbina}}^{\text{máxima}} = \frac{P_{\text{turbina}}^{\text{máxima}}}{\text{sen } \delta} \quad \rightarrow \quad P_{\text{turbina}}^{\text{máxima}} = \frac{0.83}{\text{sen } \delta}$$

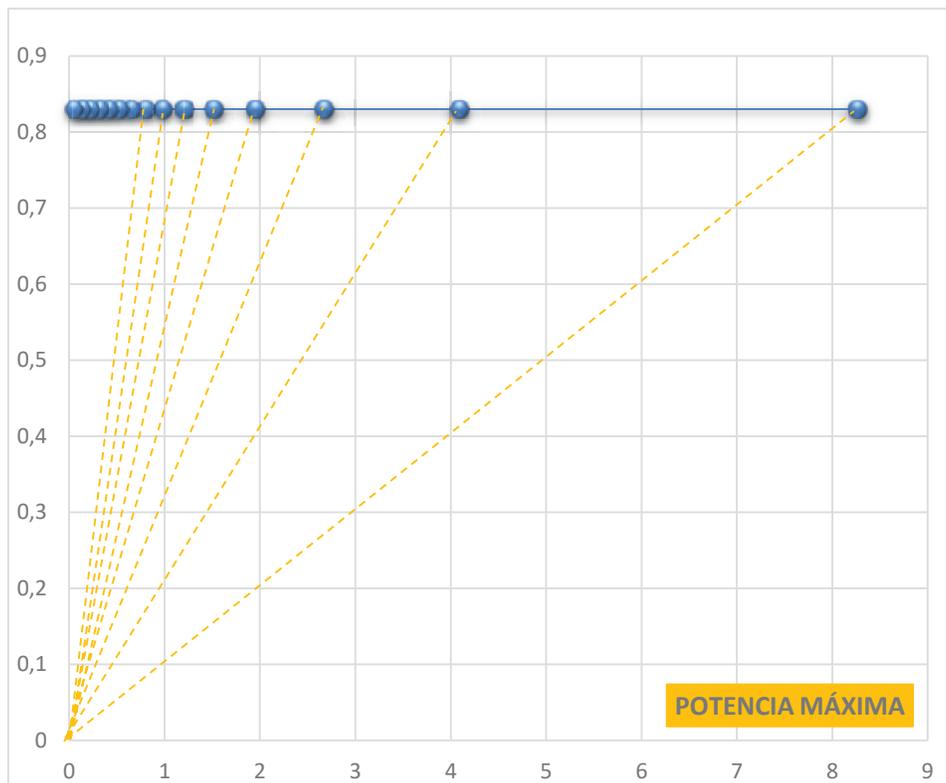


Figura 4.15: Lugar geométrico de la potencia máxima de la turbina MACHUPICCHU: G1.
Fuente: Propia

La figura 4.15 muestra el lugar geométrico de la potencia máxima suministrada por la turbina; para un ángulo de torque de 90° ; igual a 0.83p.u., ya que se trata de una función constante, para cualquier valor angular siempre resultará igual a 0.83p.u. siendo este una de las curvas límite requerida para que el generador funcione correctamente.

4.4.1.4 Gráfica de la ecuación de la potencia mínima de la turbina

Tomando en cuenta la ecuación 4.61, pero para valor de potencia mínima de turbina

$$P_{\text{turbina}}^{\text{mínima}} = \frac{P_{\text{turbina}}^{\text{mínima}}}{\text{sen } \delta} \rightarrow P_{\text{turbina}}^{\text{mínima}} = \frac{0.33}{\text{sen } \delta}$$

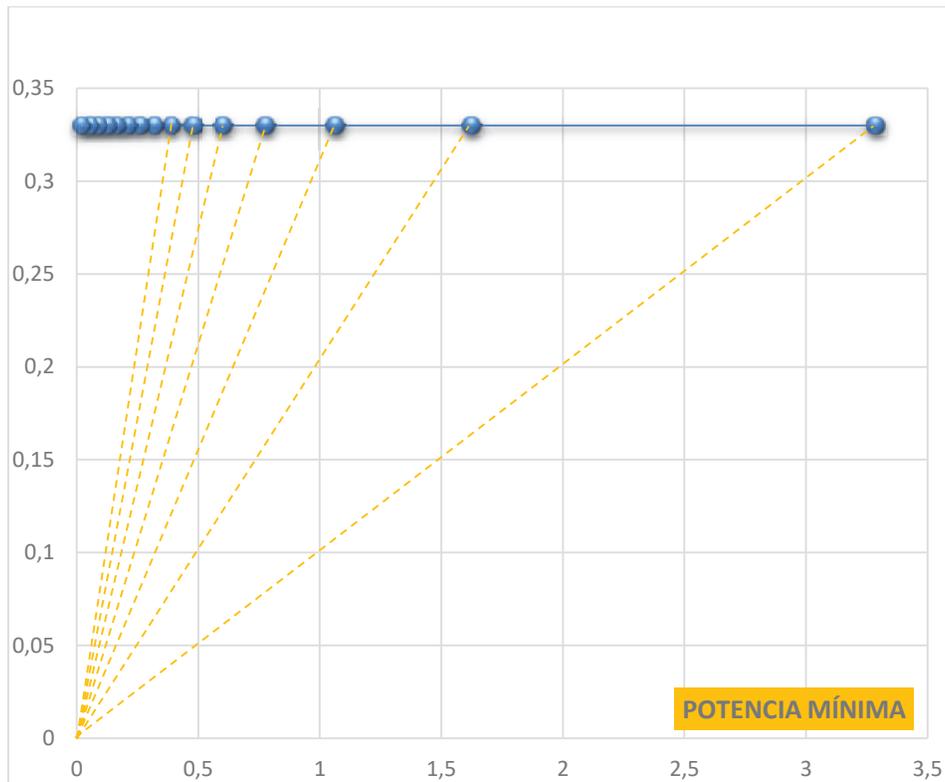


Figura 4.16: Lugar geométrico de la potencia mínima MACHUPICCHU: G1.
Fuente: Propia

La figura 4.16 muestra la potencia mínima suministrada por la turbina; para un ángulo de torque de 90° ; igual a 0.33 p.u.

4.4.1.5 Gráfica de la ecuación del círculo de reacción de corriente de excitación cero

Considerando la ecuación 4.65: $R = 2W \cos \delta \rightarrow I_{exc. \text{ cero}} = 0.52 \cos \delta$

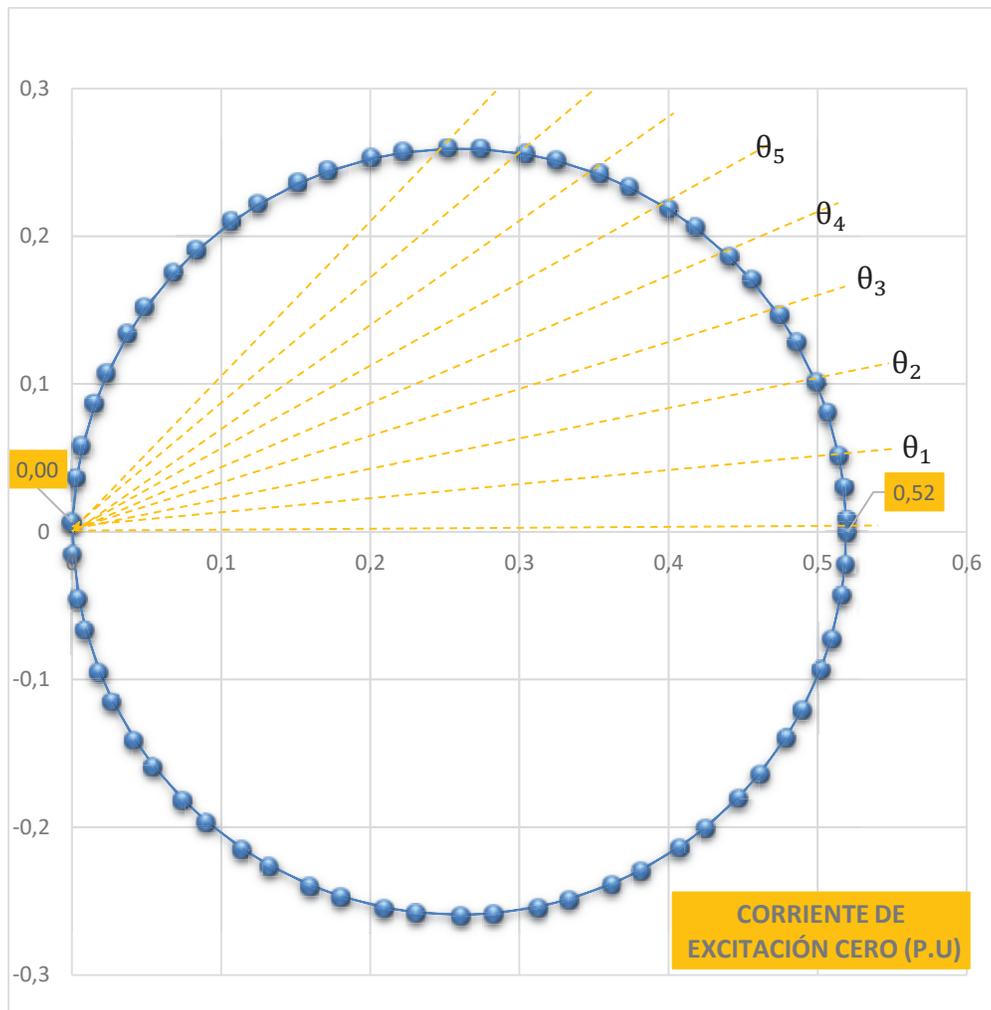


Figura 4.17: Lugar geométrico de la corriente de excitación cero MACHUPICCHU: G1.
Fuente: Propia

La figura 4.17 representa el lugar geométrico del círculo de reacción de la corriente de excitación cero de radio igual 0.251 p.u. en la que se observa el fenómeno de la inducción magnética residual o magnetismo residual presente en todos los materiales ferromagnéticos de las máquinas eléctricas en general.

4.4.1.6 Gráfica de la ecuación de la corriente mínima de excitación

Expresando la ecuación 4.68-a se tiene:

$$R = W + e\%(U + 2W \cos \delta) \quad \rightarrow \quad I_{min.exc.} = 0.3381 + 0.4316 \cos \delta$$

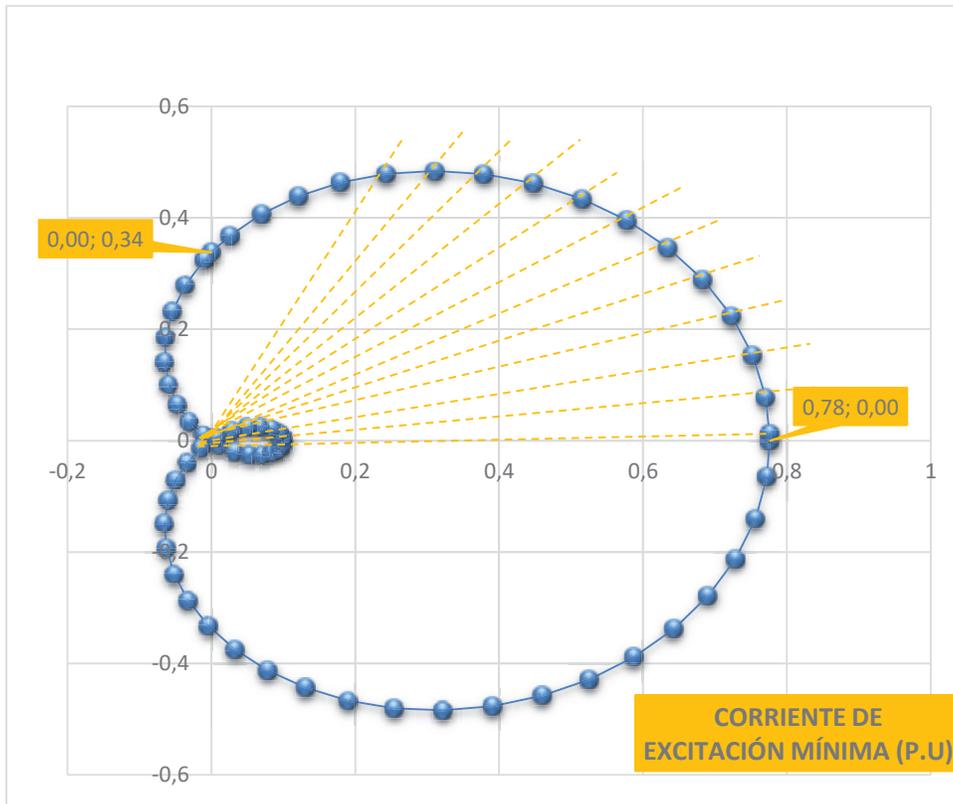


Figura 4.18: Lugar geométrico de la corriente mínima de excitación MACHUPICCHU: G1.
Fuente: Propia

La figura 4.18 muestra el lugar geométrico de la corriente mínima de excitación en la cual se observa que cuando el ángulo de torque es 0° , la corriente mínima de excitación que circula en el devanado de campo será de 0.529 p.u.

A medida que el ángulo de carga va aumentando a $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$ la corriente en el devanado de campo va disminuyendo y se produce el movimiento físico del rotor debido al incremento del caudal de agua esto con la finalidad de mantener constante la tensión en bornes del generador.

4.4.1.7 Gráfica de la ecuación de la estabilidad permanente teórica

Considerando la ecuación 4.68-b se tiene:

$$R = 2W \operatorname{sen} \delta \tan \delta \quad \rightarrow \quad E_{per.teórica} = 0.52 \operatorname{sen} \delta \tan \delta$$

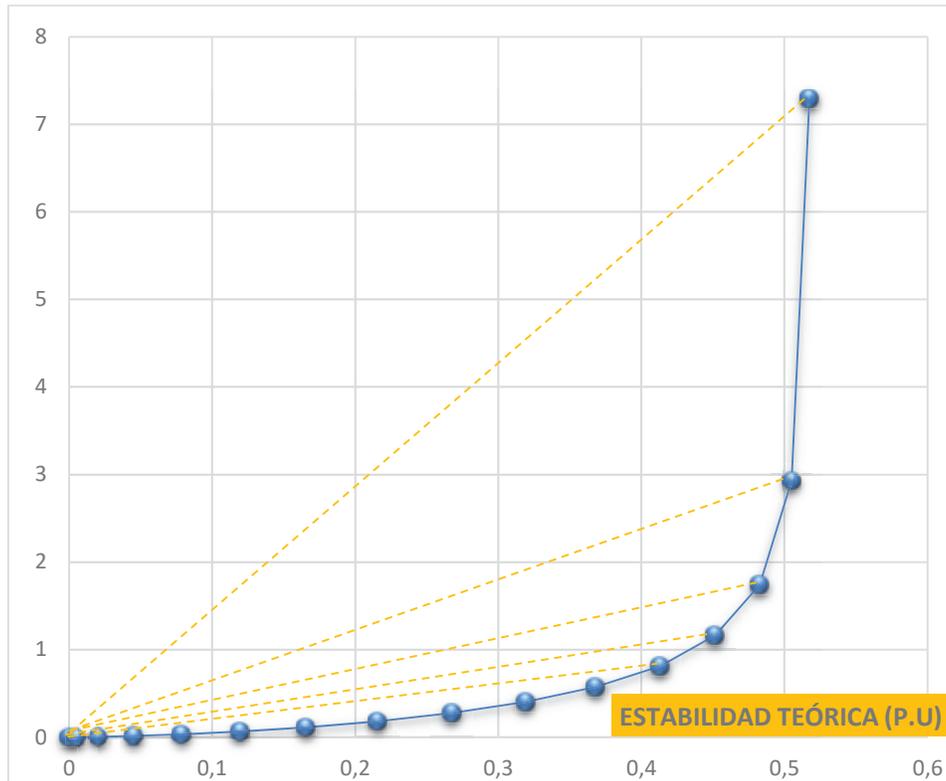


Figura 4.19: Lugar geométrico de la estabilidad permanente teórica MACHUPICCHU: G1.
Fuente: Propia

La figura 4.19 muestra al ángulo de torque máximo que puede tomar para que exista estabilidad en la máquina.

4.4.1.8 Gráfica de la ecuación de la estabilidad práctica

Tomando en cuenta la ecuación 4.82 tenemos:

$$R = \frac{W}{(1 - \text{sen } \delta)} + 2W \tan \delta \text{sen } \delta \quad \rightarrow \quad E_{\text{per.práctica}} = \frac{0.26}{(1 - \text{sen } \delta)} + 0.56 \tan \delta \text{sen } \delta$$

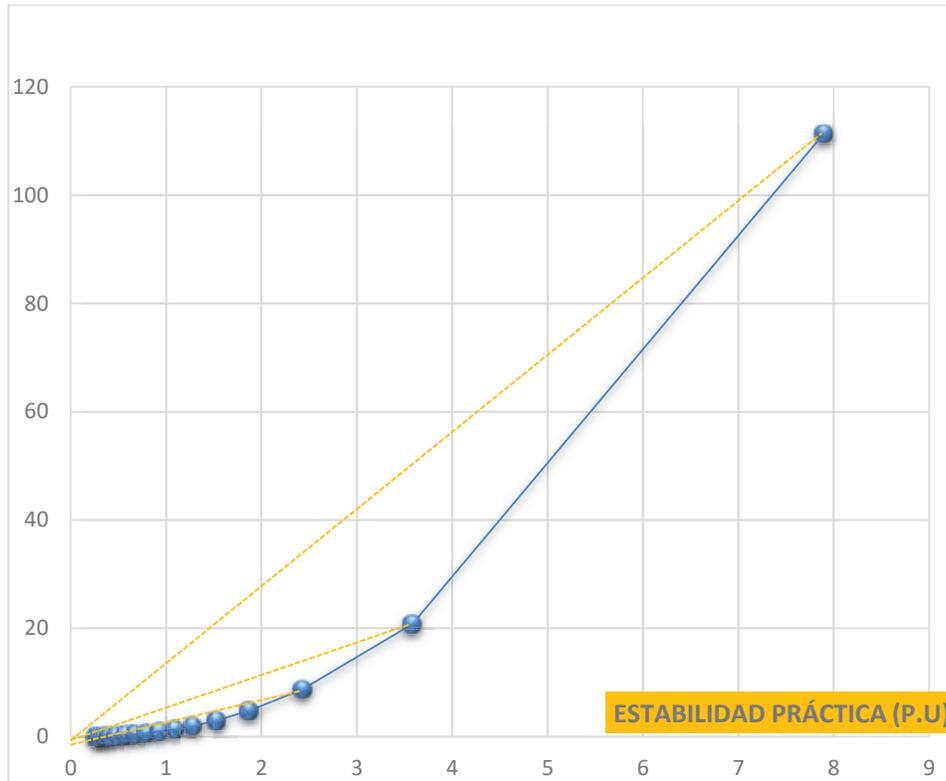


Figura 4.20: Lugar geométrico de la estabilidad permanente teórica MACHUPICCHU: G1.
Fuente: Propia

La figura 4.20 muestra el lugar geométrico del límite de estabilidad práctico del generador, que según la teoría desarrollada corresponde a un margen de seguridad del 10% al 20% respecto a la estabilidad teórica.

4.4.1.9 Gráfica de la región de operación del generador síncrono.

Al graficar todas las ecuaciones anteriores juntas; estas nos delimitan una región, en la cual se aprecia una zona capacitiva y una zona inductiva; además de siete puntos de operación los cuales nos permitirán analizar el comportamiento del generador síncrono de la **Central Hidroeléctrica Machupicchu II** y de cualquier otro generador.

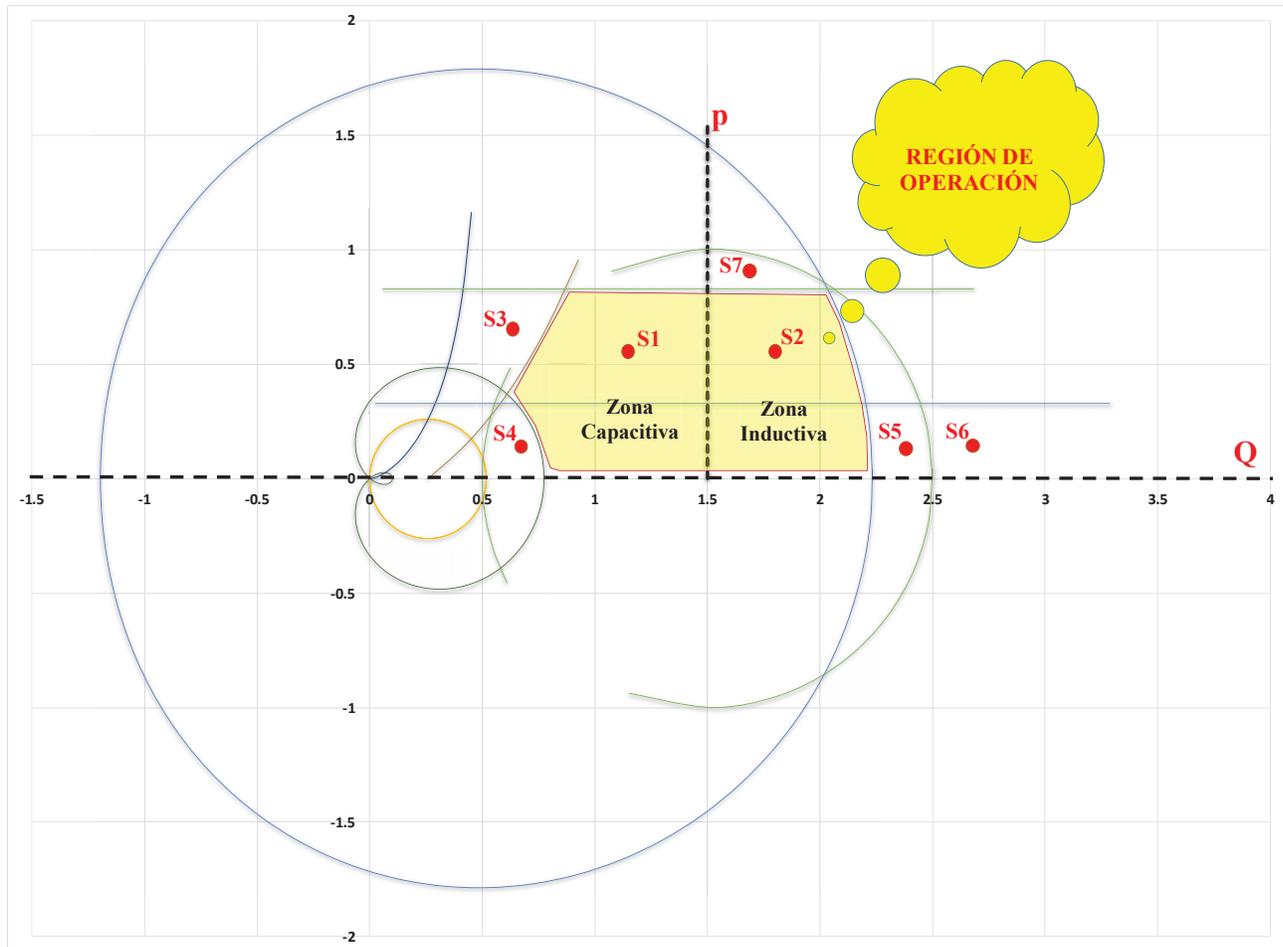


Figura 4.21: Región de operación del generador síncrono MACHUPICCHU: G1.
Fuente: Propia

Por consiguiente:

- i. En la figura 4.21; S1 y S2, representan a los puntos de operación en el que el generador funciona sin inconvenientes.

- ii. S5, representa al punto de operación en el cual un generador a excedido el límite térmico del devado de campo (deterioro del aislamiento de la excitatriz).
- iii. S4, representa al punto de operación en el cual el generador sale de funcionamiento debido a la pérdida del par electromagnético.
- iv. S3, representa al punto de operación en el cual el generador sale de funcionamiento debido a la pérdida de estabilidad.
- v. S6, representa al punto de operación en el cual el generador a excedido el valor de la corriente nominal permisible del devanado de armadura (deterioro del aislamiento del generador); y
- vi. Por último S7, representa al punto de operación en el cual el generador sale de funcionamiento por la aparición de un par de aceleración. (pérdida de sincronismo o estabilidad por embalamiento del generador)

Los puntos de operación S3, S4, S5, S6, S7 se producirán generalmente en escenarios de Sobre carga o salida de cargas grandes para tiempos muy cortos.

EVALUACIÓN

Como se mencionó en el capítulo – I página 21 el objeto de estudio es el generador síncrono de polos salientes y en base a este, partimos del diagrama fasorial de un generador de polos salientes (figura 4.1) aplicando matemática y propiedades de operaciones fasorial se determinó las ecuaciones del generador síncrono, como se aprecia en la página 96 ecuaciones 4.45 a ecuación 4.48, con esto podemos evidenciar que de la tesis planteada por Castillo Haro en la página 23, las ecuaciones planteadas son las mismas haciendo que estas sean de aplicación generalizada a cualquier generador síncrono de polos salientes y así de esta manera estas nos sirven para desarrollar un software que permita la gráfica de las curvas de potencia requerida.

Se determinó los lugares geométricos de las curvas de capacidad y de los límites de operación del generador de polos salientes así como los lugares geométricos de los Limaçones de Pascal, etc. Para el análisis y grafica de las ecuaciones de las curvas de capacidad de potencia se definieron las centrales hidroeléctricas CHAGLLA, CERRO DEL AGUILA, QUITARACSA, SANTA TERESA, CHEVEZ Y MACHUPICCHU – II de reciente puesta en marcha según documento publicado por Osinergmin año 2018. con respecto a la C.H. MACHUPICCHU – II y sus respectivos datos según tabla 4.1 y los datos técnicos del grupo de generación #1 de la página 128. Se tienen las siguiente ecuaciones:

$I_{\text{maxima estator}} = 1.50 \cos \delta + \sqrt{1 - 2.25 \text{sen}^2 \delta}$	$P_{\text{máxima turbina}} = \frac{0.83}{\text{sen } \delta}$
$I_{\text{maxima excitacion}} = 1.716 + 0.52 \cos \delta$	$P_{\text{mínima turbina}} = \frac{0.33}{\text{sen } \delta}$
$I_{\text{min.exc.}} = 0.3381 + 0.4316 \cos \delta$	$I_{\text{exc. cero}} = 0.52 \cos \delta$
$E_{\text{per.práctica}} = \frac{0.26}{(1 - \text{sen } \delta)} + 0.56 \tan \delta \text{sen } \delta$	$E_{\text{per.teórica}} = 0.52 \text{sen } \delta \tan \delta$

Ecuaciones propias para la Central Hidroeléctrica mencionada. Vale aclarar que el procedimiento de reemplazo y tabulación de las ecuaciones para su grafica determina un tiempo de trabajo, el cual se pretende disminuir con la creación del software. La evaluación de las curvas de capacidad permite determinar los lugares geométricos de los parámetros mencionados en el cuadro. Finalmente se evidencio la región optima de operación para el grupo de generación #1 de la C.H. MACHUPICCHU - II

CAPÍTULO – V

DESARROLLO DE UN SOFTWARE EN LENGUAJE MATLAB PARA GRAFICAR LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE POTENCIA Y LA APLICACIÓN DE LA MISMA EN ALGUNAS C.H. DEL SEIN

5.1 Generalidades

Como se sabe el generador normalmente síncrono tiene tres componentes inherentes: la excitatriz, el estator y el rotor y cada una de ellas se convierten en limitantes cuando en la operación pueden sobrecalentarse, específicamente son los devanados y los materiales aislantes que tienden a deteriorarse y disminuyen el tiempo de vida útil de la máquina y que a su vez se constituyen en limitantes del proceso de generación.

Por lo tanto, en esta sección se muestra el desarrollo de un software en lenguaje Matlab; que permite la visualización gráfica de las curvas de Capacidad, las cuales determinan en conjunto una región de operación, que permite al operador de las centrales eléctricas tomar las decisiones que sean pertinentes para mejorar la operación de los grupos de generación.

5.2 Paquete informático Matlab

Es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas se hallan la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

5.2.1 Live Editor de Matlab

El live editor es una nueva manera de crear, editar y ejecutar código de Matlab en un entorno interactivo; generando resultados y graficas junto al código de los produce.

5.2.2 Desarrollo del software en Live Editor.

5.2.2.1 Diseño de inicio y salida de las gráficas de la curva de capacidad de potencia.

En *Figura 5.1*. se muestra Inicialmente creación del entorno de trabajo; utilizando para ello el siguiente código:

```
SS.f=figure('Resize','off','WindowStyle','normal','Name','CURVA DE CAPABILIDAD',...  
           'NumberTitle','off','units','pixels','Position',[80 80 1250 600]);
```

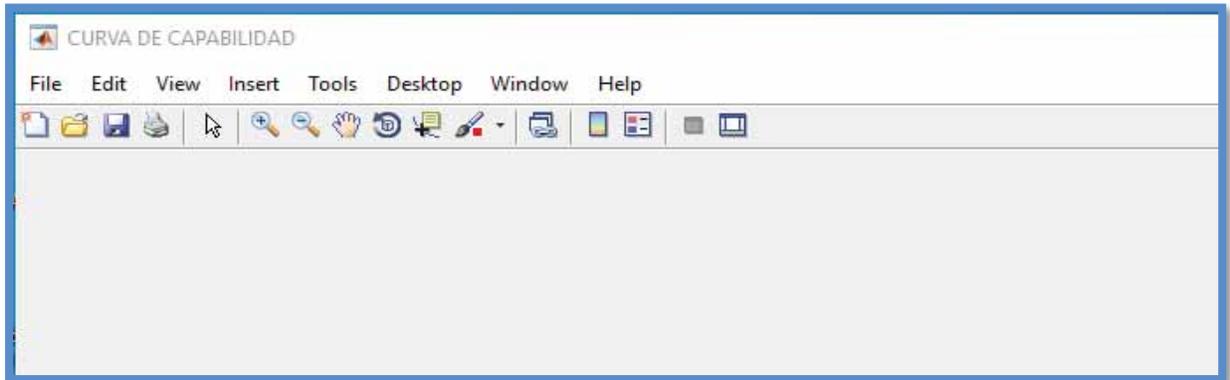


Figura 5.1: Entorno de trabajo del software
Fuente: Propio

Dentro de este entorno de trabajo creamos el espacio en el cual se graficará las curvas de capacidad de potencia utilizando el siguiente código:

```
SS.ax= axes ('units','pixels','Position',[400 250 620 550]);  
ar =110;
```

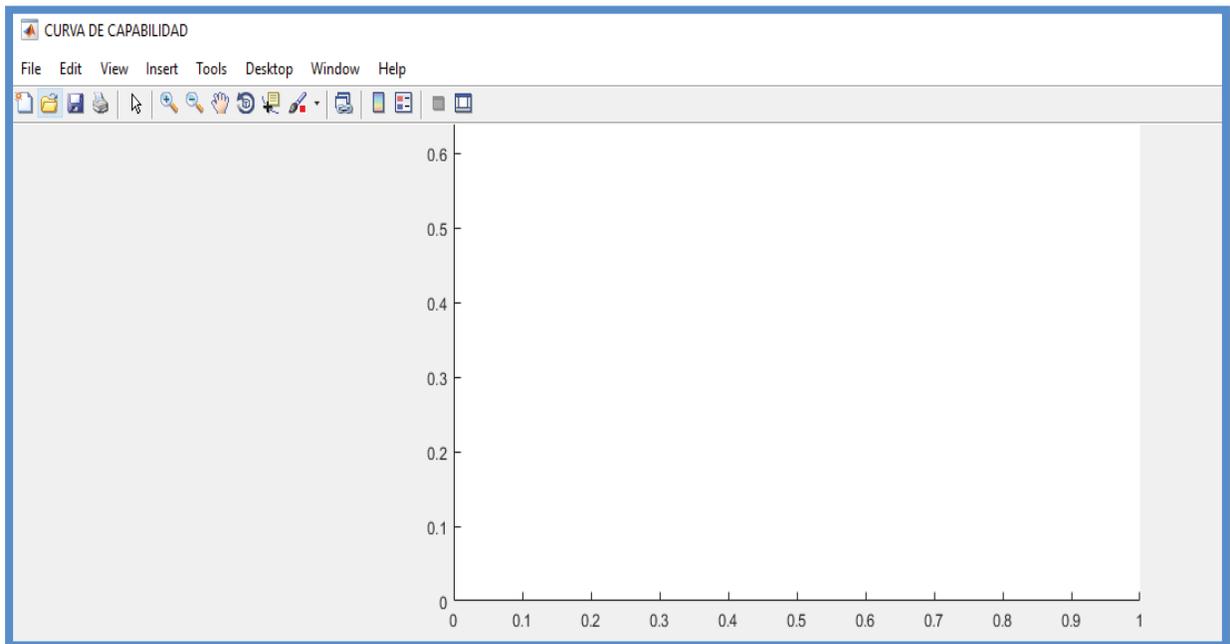


Figura 5.2: Espacio de salida de la gráfica de las curvas de capacidad
Fuente: Propio

5.2.2.2 Diseño de las entradas y salidas de datos numéricos del software.

En *Figura 5.2.* se muestra la creación de los **Static Text** del tipo generador, tipo de convención, tipo de datos y sus respectivos **Radios Button**, así como los **Edit Text** para los datos de ingreso y salida de la corriente de armadura, tensión interna, tensión en bornes de la máquina y sus respectivos ángulos con el siguiente código:

```
SS.bg1 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[10
320+80+ar 150 60]);
SS.bg2 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[10
240+80+ar 150 80]);
SS.bg3 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[10
180+80+ar 150 60]);
SS.bg4 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[160
240+80+ar 190 140]);
SS.bg5 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[160
180+80+ar 190 60]);
SS.bg6 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[10 120+ar
340 140]);
SS.bg7 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[870+180
210+ar 170 250]);
%-----
SS.pbl=icontrol(SS.bg5,'Style','pushbutton','string','Trazar
carta','position',[100 10 80 40],'Callback',{@TrazarCarta,SS});
%-----
SS.rb1=icontrol(SS.bg1,'Style','radiobutton','string','Polos
Lisos','position',[20 40-20 100 25],'Callback',{@PL,SS});
SS.rb2=icontrol(SS.bg1,'Style','radiobutton','string','Polos
Salientes','position',[20 20-20 100 25],'Callback',{@PS,SS});
SS.rb3=icontrol(SS.bg2,'Style','radiobutton','string','Europea','position',[2
0 60-20 100 25]);
SS.rb4=icontrol(SS.bg2,'Style','radiobutton','string','Americana','position',
[20 40-20 100 25]);
SS.rb5=icontrol(SS.bg2,'Style','radiobutton','string','Motor','position',[20
20-20 100 25]);
SS.rb6=icontrol(SS.bg3,'Style','radiobutton','string','ohm/fase','position',[
20 40-20 200 25]);
SS.rb7=icontrol(SS.bg3,'Style','radiobutton','string','P.U.','position',[20
20-20 200 25]);
SS.rb8=icontrol(SS.bg5,'Style','radiobutton','string','VA','position',[20 40-
20 50 25],'Callback',{@VA,SS});
SS.rb9=icontrol(SS.bg5,'Style','radiobutton','string','P.U.','position',[20
20-20 50 25],'Callback',{@PU,SS});
%-----
SS.rb10=icontrol(SS.bg7,'Style','checkbox','string','Limite del
Estator','position',[10 240-20 140 25],'Callback',{@UNITARIO,SS},'Value',1);
SS.rb11=icontrol(SS.bg7,'Style','checkbox','string','Factor de
Potencia','position',[10 220-20 140 25],'Callback',{@FPO,SS},'Value',1);
SS.rb12=icontrol(SS.bg7,'Style','checkbox','string','Puntos de
Intersección','position',[10 200-20 140 25],'Callback',{@hc,SS},'Value',1);
%-----
texto01=icontrol(SS.bg1,'Style','text','string','Generador','position',[20
60-18 60 15],'ForegroundColor','b');
```

```

texto02=uicontrol(SS.bg2,'Style','text','string','Convención ','position',[20
80-18 60 15],'ForegroundColor','b');
texto03=uicontrol(SS.bg3,'Style','text','string','Graficas','position',[20 60-
18 60 15],'ForegroundColor','b');
texto04=uicontrol(SS.bg4,'Style','text','string','Ingreso
Datos','position',[20 122 70 15],'ForegroundColor','b');
texto05=uicontrol(SS.bg5,'Style','text','string','Tipo Datos','position',[20
60-18 60 15],'ForegroundColor','b');
texto06=uicontrol('Style','text','fontWeight','bold','string','Ingreso de
Datos','position',[90 460+110 200 25],'ForegroundColor','k','FontSize',12);
%-----
mv=-201;
mh=-160;
SS.ed1=uicontrol(SS.bg4,'Style','edit','string','','position',[260+mh 300+mv
80 20]);
SS.ed2=uicontrol(SS.bg4,'Style','edit','string','','position',[260+mh 280+mv
80 20]);
SS.ed3=uicontrol(SS.bg4,'Style','edit','string','','position',[260+mh 260+mv
80 20]);
SS.ed4=uicontrol(SS.bg4,'Style','edit','string','','position',[260+mh 240+mv
80 20]);
SS.ed5=uicontrol(SS.bg4,'Style','edit','string','','position',[260+mh 220+mv
80 20]);

%-----
SS.edt1=uicontrol(SS.bg4,'Style','text','string','Potencia(VA)','position',[16
0+mh 300+mv 100 20]);
SS.edt2=uicontrol(SS.bg4,'Style','text','string','Tensión.fase(V)','position'

```

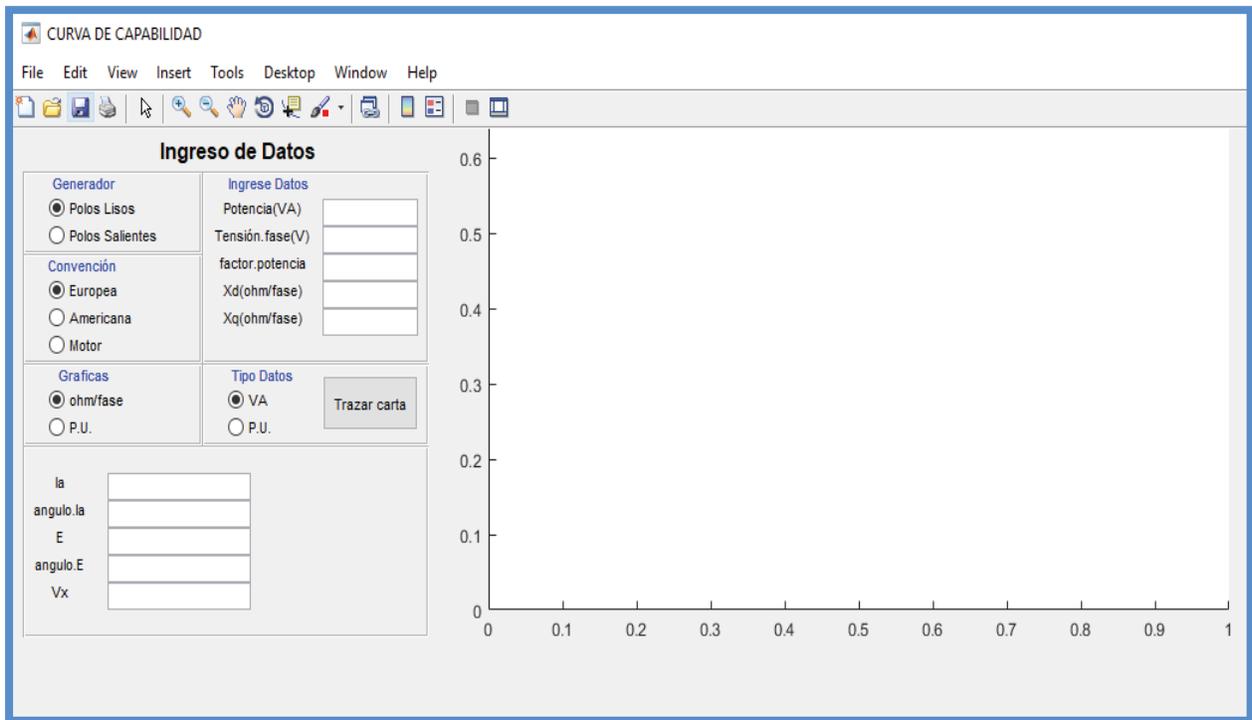


Figura 5.3: creación de los ingresos y salidas de datos
Fuente: Propio

5.2.2.3 Diseño, Ejecución del código para el procesamiento de datos y grafica de las curvas de capacidad.

El diseño y Programando (ver Anexo VI); para realizar cada una de las acciones necesarias para la gráfica de las curvas de capacidad de potencia en la secuencia deseada; se compila y ejecutan en el programa presionando el botón “Run” como se muestra *Fig. 5.4*.

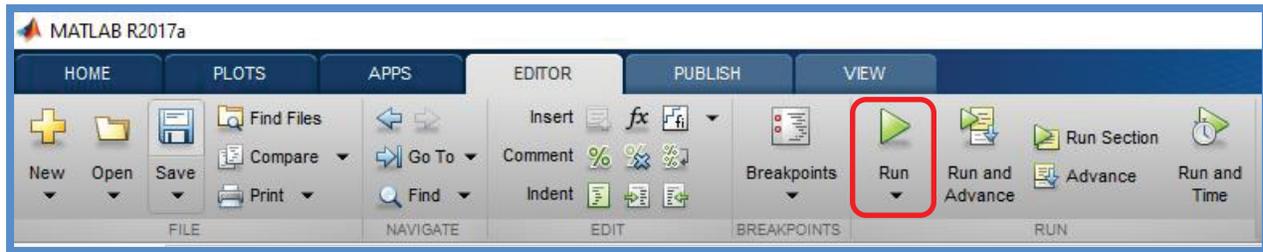


Figura 5.4: creación de los ingresos y salidas de datos
Fuente: Propio

Después de ingresar los datos y presionar el botón run se obtiene en la *Fig.5.5* los lugares geométricos de las curvas de capacidad del generador síncrono.

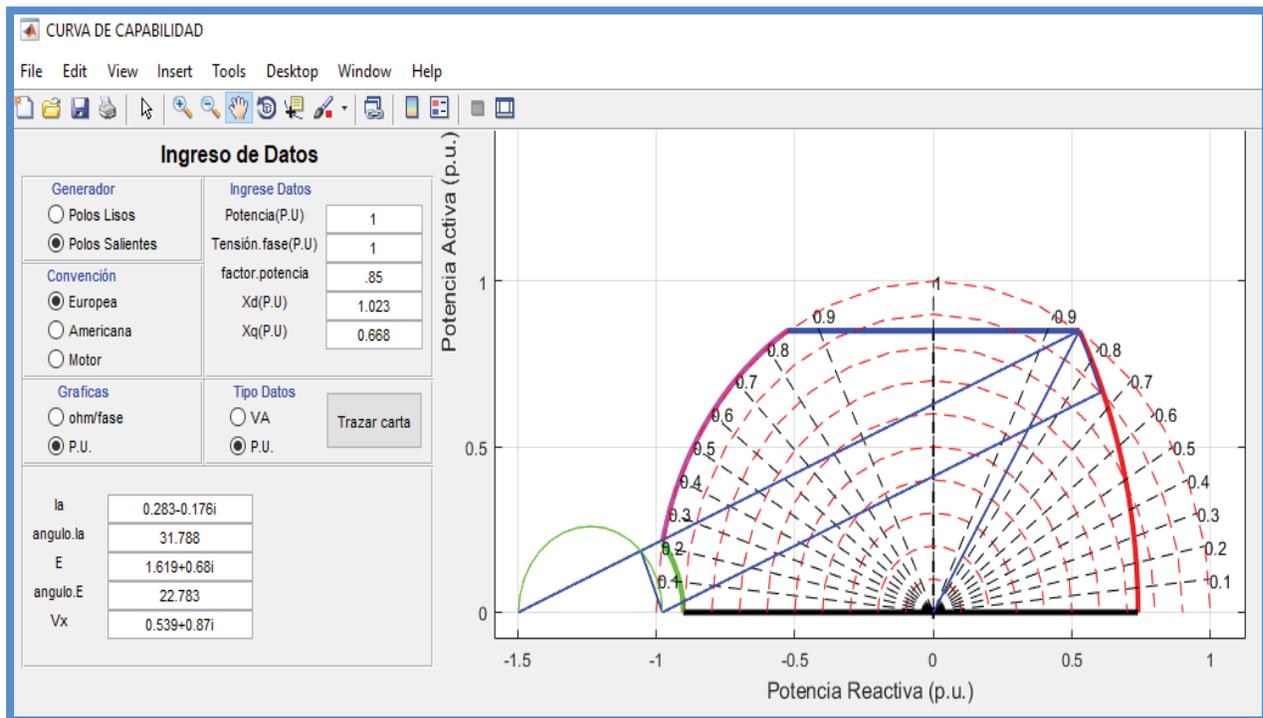


Figura 5.5: lugar geométrico de las curvas de capacidad de potencia
Fuente: Propio

5.3 Flujograma de software.

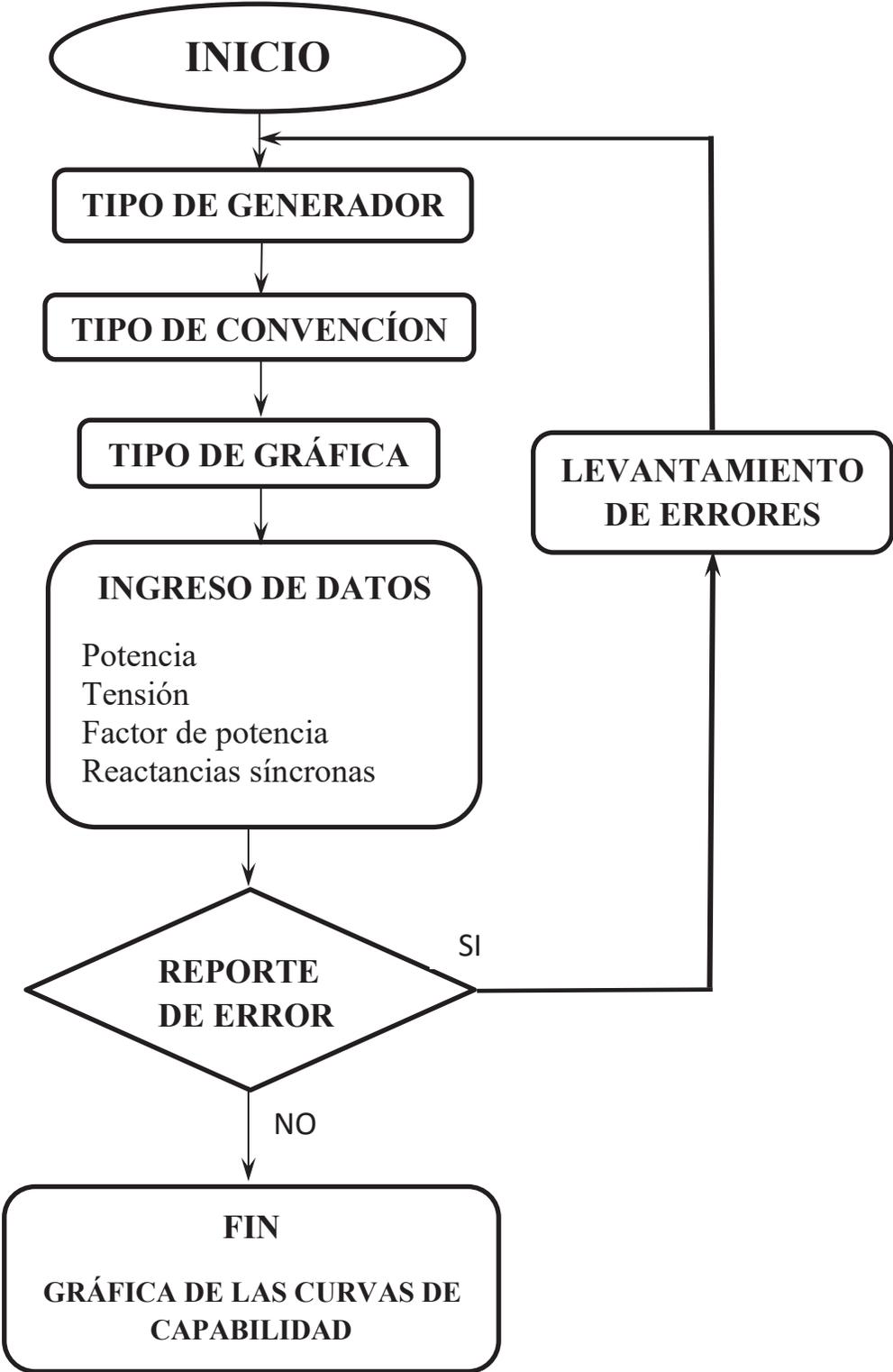


Figura 5.6: Flujograma del software para la gráfica de las curvas de Capacidad
Fuente: Propio

5.4 Grafica de las Curvas de Capabilidad utilizando el software grafico en lenguaje

Matlab.

Para graficar las ecuaciones de las curvas de Capacidad de potencia utilizando el software grafico desarrollado en Matlab se han definido las siguientes centrales eléctricas: C.H. Chaglla, C.H. Cerro del Águila, C.H. Quitaracsa, C.H. Santa Teresa, C.H. Cheves y C.H. Machupicchu II; estas centrales hidroeléctricas son de reciente puesta en marcha y fueron consideradas en el documento publicado por Osinergmin el año 2018; sin embargo, se pueden considerar también en este análisis cualquier otra Central del SEIN.

5.4.1 Central Hidroeléctrica Machupicchu II

Tabla 5.1. Características de la CENTRAL.HIDROELÉCTRICA MACHUPICCHU II¹

DENOMINACION	C.H. MACHUPICCHU II
EMPRESA CONSECONARIA	EGEMSA
TECNOLOGÍA	Generación Hidráulica
UBICACIÓN	
Departamento	Cusco
Provincias	Urubamba
Distrito	Machupicchu
Altitud	2 070 msnm
DATOS TÉCNICOS DE CENTRAL	
Potencia Instalada	102 MW
Número de Unidades de Generación	1 Turbina
Salto Neto	356,2 m
Caudal Nominal	31,0 m ³ /s
Recurso Hídrico	Río Urubamba (llamado Vilcanota)
Casa de Máquinas	Subterráneo
DATOS TÉCNICOS DE TURBINA	
Tipo de Turbina	Francis Vertical
Potencia Nominal	101,3 MW
Caudal Nominal	31,0 m ³ /s
Velocidad	450 rpm
DATOS TÉCNICOS GENERADOR	
Potencia	120 MVA
Tensión de Generación	13,8 kV
Factor de Potencia	0,85
DATOS TÉCNICOS DEL TRANSFORMADOR	
Tipo	Monofásico
Potencia Nominal	3 x 40 MVA + 1 x 40 MVA (reserva)
Nivel de Tensión	13,8/138 kV
DATOS DE CONTRATO	
Tipo de contrato	Concesión Definitiva
Firma de Contrato	29.11.1994
Puesta en Operación Comercial (POC)	15.08.2015
INFORMACIÓN RELEVANTE	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ El proyecto aprovecha una curva del río Vilcanota bordeando la ciudadela de Machupicchu. Las obras de toma se ubican en el km 107 de la línea férrea Cusco-Machupicchu y la central está ubicada en el km 123 de dicha línea. ▪ EGEMSA otorgó a Graña y Montero S.A. la buena pro para la ejecución de las obras. La supervisión estuvo a cargo del Consorcio Supervisión C.H. Machupicchu formado por la Consultora Lahmeyer Agua y Energía de Perú y Estudios Técnicos de Colombia. Actualmente, la supervisión está a cargo del consorcio Servicios Técnicos de Ingeniería de Consulta INTGR (Sucursal de Integral S.A. Colombia) y ENERGOPROJEKT HIDROINZENJERING S.A. (Sucursal Perú). ▪ La central al operar en forma experimental, evacuó temporalmente la energía producida por la central a través de la L.T. 138 kV Machupicchu-Cachimayo (L-1001) y L.T. 138 kV Machupicchu-Quencoro (L- 1002). ▪ La construcción de la L.T. 138 kV S.E. C.H. Machupicchu II-S.E Suriray está culminada y permitirá inyectar al SEIN la energía generada por la C.H. Machupicchu II, luego que entre en operación la L.T. 220 kV Machupicchu-Abancay-Cotaruse de Consorcio Transmantaro (23.08.2015). ▪ Las obras concluyeron el 27.06.2015, entrando en operación experimental hasta el 28.07.2015, luego de lo cual entró en etapa de reajustes, calibraciones y mantenimiento de algunas instalaciones hasta el 15.08.2015, fecha en que tiene autorización para entrar en operación. ▪ Con carta COES/D/DP-1326-2015 del 13.08.2015, el COES aprueba la Puesta en Operación Comercial del Grupo N° 04 de la II fase de la C.H. Machupicchu, desde las 00:00 horas del 15.08.2015, con una potencia efectiva de 99,86 MW. ▪ El monto de inversión aproximado fue de US\$ 148,8 millones. 	

Fuente: Osinergmin- Supervisión de contratos de proyectos de generación y transmisión de energía eléctrica en operación Agosto-2018

¹ OSINERGMIN, SUPERVISIÓN DE CONTRATOS DE PROYECTOS DE GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN OPERACIÓN, Agosto 2018, División de Supervisión de Electricidad, pag. 64 al 74.

GRUPO DE GENERACIÓN 1 MACHUPICCHU: G1

Datos de cálculo:

1. Potencia: $S_n = 120MW \rightarrow S_a = 1p.u.$
2. Tensión: $V_n = 13.8 kV \rightarrow V_a = 1p.u.$
3. Corriente: $I_n = 5020.44 A \rightarrow I_a = 1p.u.$
4. Factor de potencia: 0.85
5. Ángulo de factor de potencia: $\phi = \cos^{-1}(0.85) = 31.79^\circ$
6. Reactancia síncrona en el eje d: $X_d = 1.023$
7. Reactancia síncrona en el eje q: $X_q = 0.668$
8. Potencia máxima de la turbina: $99.86 MW \rightarrow P_{max} = 99.86/120 = 0.83 p.u.$
9. Potencia mínima de la turbina: $40 MW \rightarrow P_{min} = 40/120 = 0.33 p.u.$
10. Margen de seguridad del límite práctico de estabilidad: $a\% = 10\%$
11. Margen de seguridad de la mínima corriente de excitación de campo: $a\% = 10\%$
12. El ángulo Par o ángulo de carga:

$$\text{Aplicando } \delta = \tan^{-1} \left[\frac{X_q I_a \cos \phi}{V_a + X_q I_a \sin \phi} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{0.668 * 1 * \cos(31.79)}{1 + 0.668 * 1 * \sin(31.79)} \right]$$

$$\delta = 22.78^\circ$$

13. La tensión inducida de armadura E_f :

$$\text{Considerando } E_f = V_a \cos \delta + X_d I_a \sin(\delta + \phi) = 1 * \cos(22.78) + 1.023 * 1 * \sin(22.78 + 31.79)$$

$$E_f = 1.756 p.u.$$

14. Sustitución de variables

Aplicando:

$$U = \frac{V_a * E_f}{X_d} = 1.716$$

$$W = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d * X_q} \right) = 0.26$$

$$Z = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d * X_q} \right) = 1.24$$

$$K = W + Z = 1.50$$

15. Dominio de las gráficas:

$$\delta = (0^\circ, 90^\circ)$$

5.4.1.1 Región de operación del generador síncrono utilizando software en Matlab.

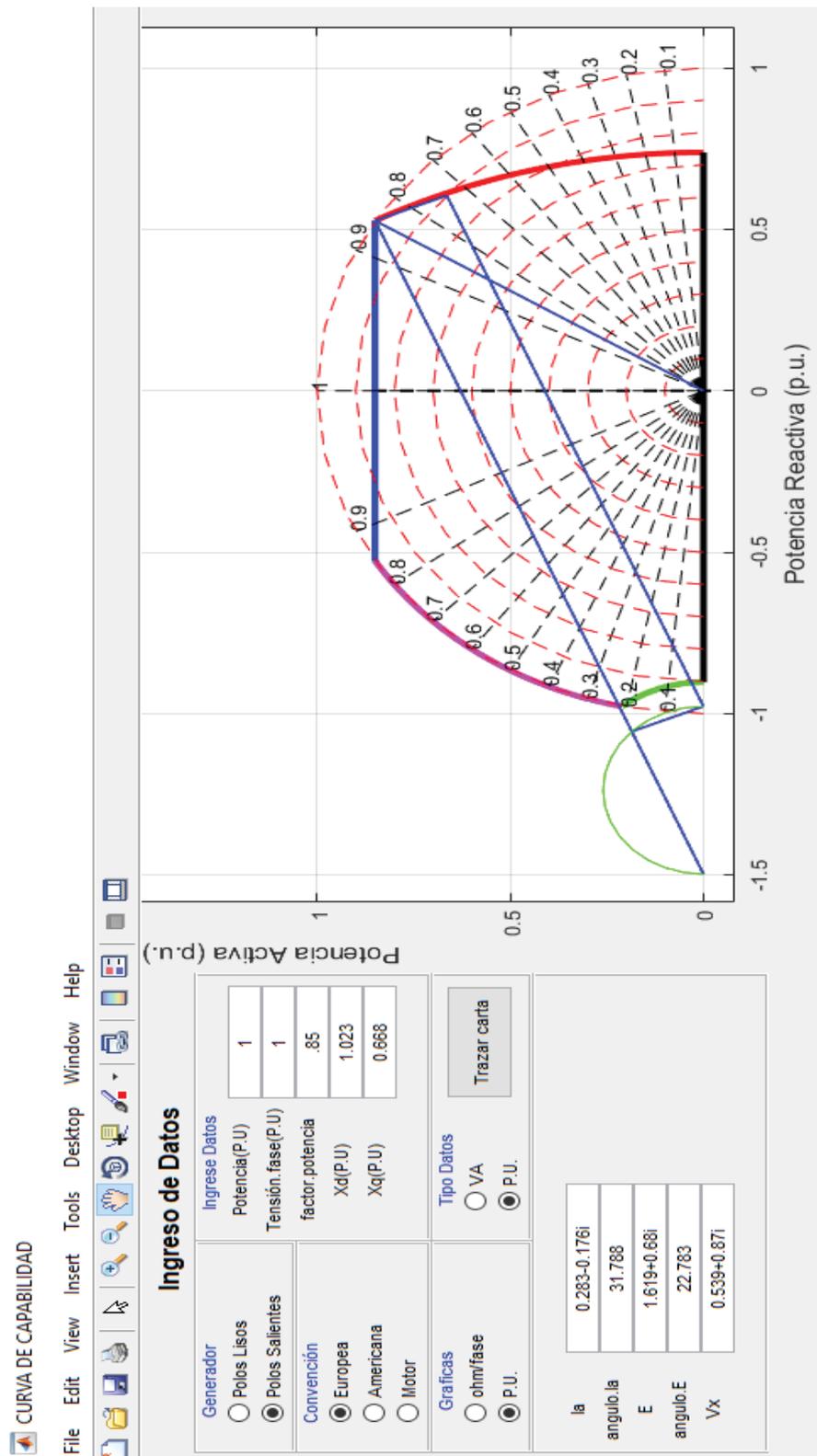


Figura 5.7: Región de operación del generador síncrono MATLAB MACHUPICCHU: G1.
Fuente: Propia

5.4.2 Central Hidroeléctrica Chaglla

Tabla 5.2. Características de la **CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHAGLLA² (456 MW)**

DENOMINACIÓN	CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHAGLLA		
EMPRESA CONCESIONARIA	EMPRESA GENERACIÓN HUALLAGA S.A.		
TECNOLOGÍA	Generación Hidráulica		
UBICACIÓN Departamento Provincias Distrito Altitud	Huánuco Huánuco y Pachitea Chinchao, Chaglla y Umari 1000 msnm		
DATOS TECNICOS DE CENTRAL Potencia Instalada Tipo de Central Longitud de Túnel Salto Neto Número de Unidades de Generación Recurso Hídrico Capacidad Efectiva de Almacenamiento Casa de Maquinas	456 MW (450 MW y 6MW) Hidráulica con Embalse 14.4 km 336m 3 Turbinas Rio Huallaga 328 500 m Superficie		
DATOS TECNICOS TURBINA Tipo de Turbina Potencia Caudal Nominal por Grupo Nivel de eje de Turbina	Turbina G1 Francis Vertical 225 MW 64.55 m ³ /s 1 196 msnm	Turbina G2 Francis Vertical 225 MW 64.55 m ³ /s 1 196 msnm	Turbina G3 Francis Vertical 6 MW 64.55 m ³ /s 1 196 msnm
DATOS TECNICOS GENERADO Potencia Tensión de Generación Factor de Potencia	225 MW 13.8 kv 0.9	225 MW 13.8 kv 0.9	225 MW 13.8 kv 0.9
DATOS TECNICOS DEL TRANSFORMADOR Potencia Nivel de Tensión	225 MVA 13.8/220kv	225 MVA 13.8/220kv	225 MVA 13.8/220kv
DATOS DE CONTRATO Tipo de Contrato Firma de Contrato Precio unitario de potencia Precio unitario de Energía HP Precio unitario de Energía HFP Puesta en Operación Comercial (POC)	Compromiso de Inversión (CCI-PROINVERSIÓN) 13.05.2011 5.95 US\$/KW-Mes (Contrato de suministro) 54.11 US\$/MWh (Contrato de Suministro) 43.64 US\$/MWh (Contrato de Suministro) 24.09.2016		
INFORMACION RELEVANTE	<ul style="list-style-type: none"> • La EMPRESA DE GENERACIÓN HUALLAGA S.A. culminó la ejecución física de las obras de su proyecto CH. Chaglla, las cuales están consideradas en el cronograma comprometido en el contrato de Concesión. • La concesión diseño, financió, suministro los bienes y servicios requeridos, para construir, operar y mantener la planta de generación eléctrica, destinada a suministrar la Energía al SEIN. • Se elaboró el informe con opinión favorable de la C.H. Chaglla, para el trámite de otorgamiento de licencia de uso de agua, en concordancia con el D.S. N° 041-2011-EM. • El COES aprobó la operación comercial de la pequeña central de 6 MW desde las 00:00 horas del 13.02.2016. • El COES aprobó la operación comercial del Grupo N°2(229.2MW) a partir de las 00:00 horas del día 23.09.2016 y el Grupo N° 1 (231.5MW) a partir de las 00:00 horas del día 24.09.2016.7 • La supervisión de la obra estuvo a cargo de la empresa WORLEYPARSONS. • El monto de inversión aproximado fue de 1 247 MM US\$. 		

Fuente: Osinergmin- Supervisión de contratos de proyectos de generación y transmisión de energía eléctrica en operación Agosto-2018

² OSINERGMIN, SUPERVISIÓN DE CONTRATOS DE PROYECTOS DE GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN OPERACIÓN, Agosto 2018, División de Supervisión de Electricidad, pag. 64 al 74.

GRUPO DE GENERACIÓN 1 – CHAGLLA: G1

DATOS INICIALES DE CÁLCULO:

1. Potencia: $S_n = 225 \text{ MW}$ $S_a = 1 \text{ p.u.}$
2. Tensión: $V_n = 13.8 \text{ kV}$ $V_a = 1 \text{ p.u.}$
3. Corriente: $I_n = 10459.24 \text{ A}$ $I_a = 1 \text{ p.u.}$
4. Factor de potencia: 0.9
5. Ángulo de facto de potencia: $\phi = \cos^{-1}(0.9) = 25.84^\circ$
6. Reactancia síncrona en el eje d: $X_d = 1$
7. Reactancia síncrona en el eje q: $X_q = 0.63$
8. Potencia máxima de la turbina: 230.9 MW $P_{max} = \frac{230.9}{225} = 1.02 \text{ p.u.}$
9. Potencia mínima de la turbina: 140 MW $P_{min} = \frac{140}{225} = 0.62 \text{ p.u.}$
10. Margen de seguridad del límite practico de estabilidad: $a\% = 10\%$
11. Margen de seguridad la mínima corriente de excitación de campo: $e\% = 5\%$
12. El Ángulo par o Ángulo de carga:

$$\text{Aplicando } \delta = \tan^{-1} \left[\frac{X_q I_a \cos \phi}{V_a + X_q I_a \sin \phi} \right] = \tan^{-1} 0.44 = 23.97^\circ$$

13. La tensión inducida de armadura E_f :

Considerando

$$E_f = V_a \cos \delta + X_d I_a \sin(\delta + \phi) = 1.677 \text{ p.u.}$$

14. Sustitución de variables

Aplicando

$$U = \frac{V_a * E_f}{X_d} = 1.677$$

$$W = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d * X_q} \right) = 0.29$$

$$Z = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d * X_q} \right) = 1.29$$

$$K = W + Z = 1.58$$

15. Dominio de las gráficas

$$\delta = (0^\circ, 90^\circ)$$

5.4.2.1 Región de operación del generador síncrono utilizando software en Matlab.

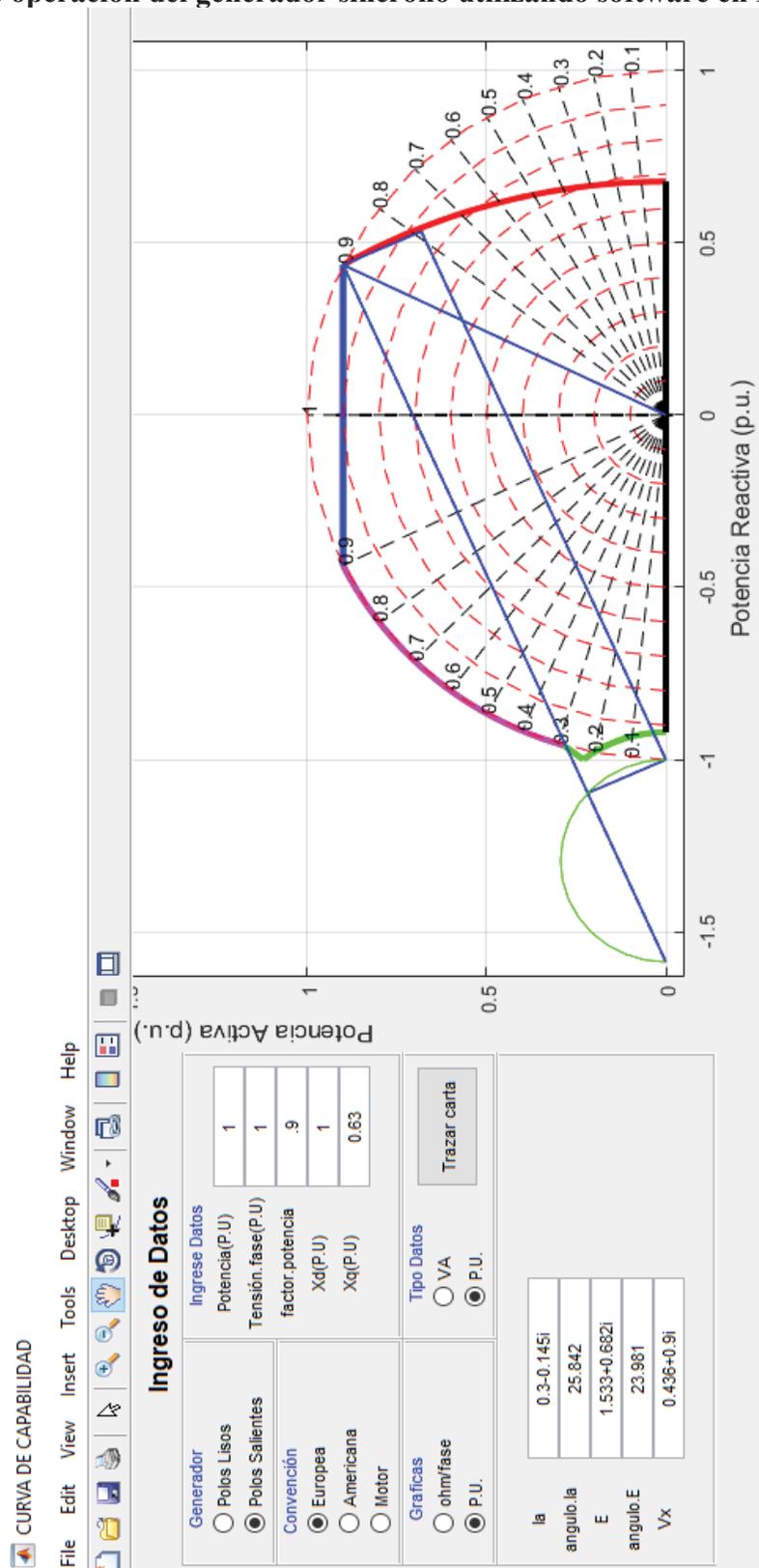


Figura 5.8: Región de operación del generador síncrono CHAGLLA: G1.
Fuente: Propia

5.4.3 Central Hidroeléctrica Huanza

Tabla 5.3. Características de la **CENTRAL HIDROELÉCTRICA HUANZA³ (90.6 MW)**

DENOMINACIÓN	CENTRAL HIDROELÉCTRICA HUANZA	
EMPRESA CONCESIONARIA	EMPRESA GENERACIÓN HUANZA S.A.	
TECNOLOGÍA	Generación Hidráulica	
UBICACIÓN Departamento Provincias Distrito Altitud	Lima Huarochirí Huanza 3 352 msnm	
DATOS TECNICOS DE CENTRAL Potencia Instalada Potencia Efectiva Energía Promedio Anual Tipo de Central Nivel del punto de Bocatoma Salto Neto Número de Unidades de Generación Caudal Nominal Recurso Hídrico Capacidad Efectiva de Almacenamiento	90.6 MW 96.76 MW 367 GWh Hidraulica de pasada 4 030.3 msnm 703 m 2 Turbinas 15.8 m ³ /s Rios Pallca y Conay 370 652 m ³	
DATOS TECNICOS TURBINA Tipo de Turbina Potencia Velocidad Angular Caudal Nominal Nivel de eje de Turbina	Turbina G1 Peltón eje vertical 46.2 MW 600 rpm 7.90 m ³ /s 3 346.5 msnm	Turbina G2 Peltón eje vertical 46.2 MW 600 rpm 7.90 m ³ /s 3 346.5 msnm
DATOS TECNICOS DE GENERADOR Potencia Tensión de Generación Factor de Potencia	53.2 MVA 13.8 KV 0.9	53.2 MVA 13.8 KV 0.9
DATOS TECNICOS DEL TRANSFORMADOR Potencia Nivel de Tensión	3 x 40 MVA + 1 x 40 MVA(reserva) 13.8/220 kv	
DATOS DE CONTRATO Tipo de Contrato Firma de Contrato Puesta en Operación Comercial (POC)	Concesión MINEM 21.02.2010 06.06.2014 (Unid. 1) y 22.02.2014 (Unid. 2)	
INFORMACION RELEVANTE		
<ul style="list-style-type: none"> • La central se encuentra ubicada en la cuenca del río Pallca, a 130 km al Este de Lima; es de pasada con regulación diaria. La central aprovecha las aguas de los ríos Pallca y Conay y los de la cuenca de Marcapomacocha que son derivados por el Túnel Trasandino. • Desde la presa de regulación diaria (construida sobre el río Pallca) se transportará el agua, mediante un Túnel de Conducción de 10 km y Tubería Forzada a la Casa de Máquinas en superficie. El agua del río Conay será captada en una presa de derivación, transportada por una tubería y descargada en la chimenea de equilibrio del túnel principal. • La energía producida es inyectada al SEIN a través de una derivación de la L.T. 220 kV Huayucachi – Zapallal a la altura de la Torre 409, a través de tres transformadores de 40 MVA que elevan la tensión de 13,8 kV a 220 kV. • La Unidad de Generación N° 1, está conectada al SEIN desde el 29.04.2014. Con Carta COES/D/DP-731- 2014 se aprobó la POC de esta unidad a partir de las 0:00 horas del 06.06.2014, con potencia efectiva de 49,18 MW. • El monto de inversión aproximado fue de 251 MM US\$. 		

Fuente: Osinergmin- Supervisión de contratos de proyectos de generación y transmisión de energía eléctrica en operación Agosto-2018

³ OSINERGMIN, SUPERVISIÓN DE CONTRATOS DE PROYECTOS DE GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN OPERACIÓN, Agosto 2018, División de Supervisión de Electricidad, pag. 64 al 74.

GRUPO DE GENERACIÓN 1 – HUANZA: G1

DATOS INICIALES DE CÁLCULO:

1. Potencia: $S_n = 46.2 \text{ MW}$ $S_a = 1 \text{ p.u.}$
2. Tensión: $V_n = 13.8 \text{ kV}$ $V_a = 1 \text{ p.u.}$
3. Corriente: $I_n = 2147.63 \text{ A}$ $I_a = 1 \text{ p.u.}$
4. Factor de potencia: 0.9
5. Ángulo de facto de potencia: $\phi = \cos^{-1}(0.9) = 25.84^\circ$
6. Reactancia síncrona en el eje d: $X_d = 0.993$
7. Reactancia síncrona en el eje q: $X_q = 0.636$
8. Potencia máxima de la turbina: 50.809 MW $P_{max} = \frac{50.809}{46.2} = 1.09 \text{ p.u.}$
9. Potencia mínima de la turbina: 4.5 MW $P_{min} = \frac{4.5}{46.2} = 0.09 \text{ p.u.}$
10. Margen de seguridad del límite practico de estabilidad: $a\% = 10\%$
11. Margen de seguridad la mínima corriente de excitación de campo: $e\% = 5\%$
12. El Ángulo par o Ángulo de carga:

$$\text{Aplicando } \delta = \tan^{-1} \left[\frac{X_q I_a \cos \phi}{V_a + X_q I_a \sin \phi} \right] = \tan^{-1} 0.448 = 24.14$$

13. La tensión inducida de armadura E_f :

Considerando

$$E_f = V_a \cos \delta + X_d I_a \sin(\delta + \phi) = 1.673 \text{ p.u.}$$

14. Sustitución de variables

Aplicando

$$U = \frac{V_a * E_f}{X_d} = 1.68$$

$$W = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d * X_q} \right) = 0.28$$

$$Z = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d * X_q} \right) = 1.28$$

$$K = W + Z = 1.56$$

15. Dominio de las gráficas

$$\delta = (0^\circ, 90^\circ)$$

5.4.3.1 Región de operación del generador síncrono utilizando software en Matlab.

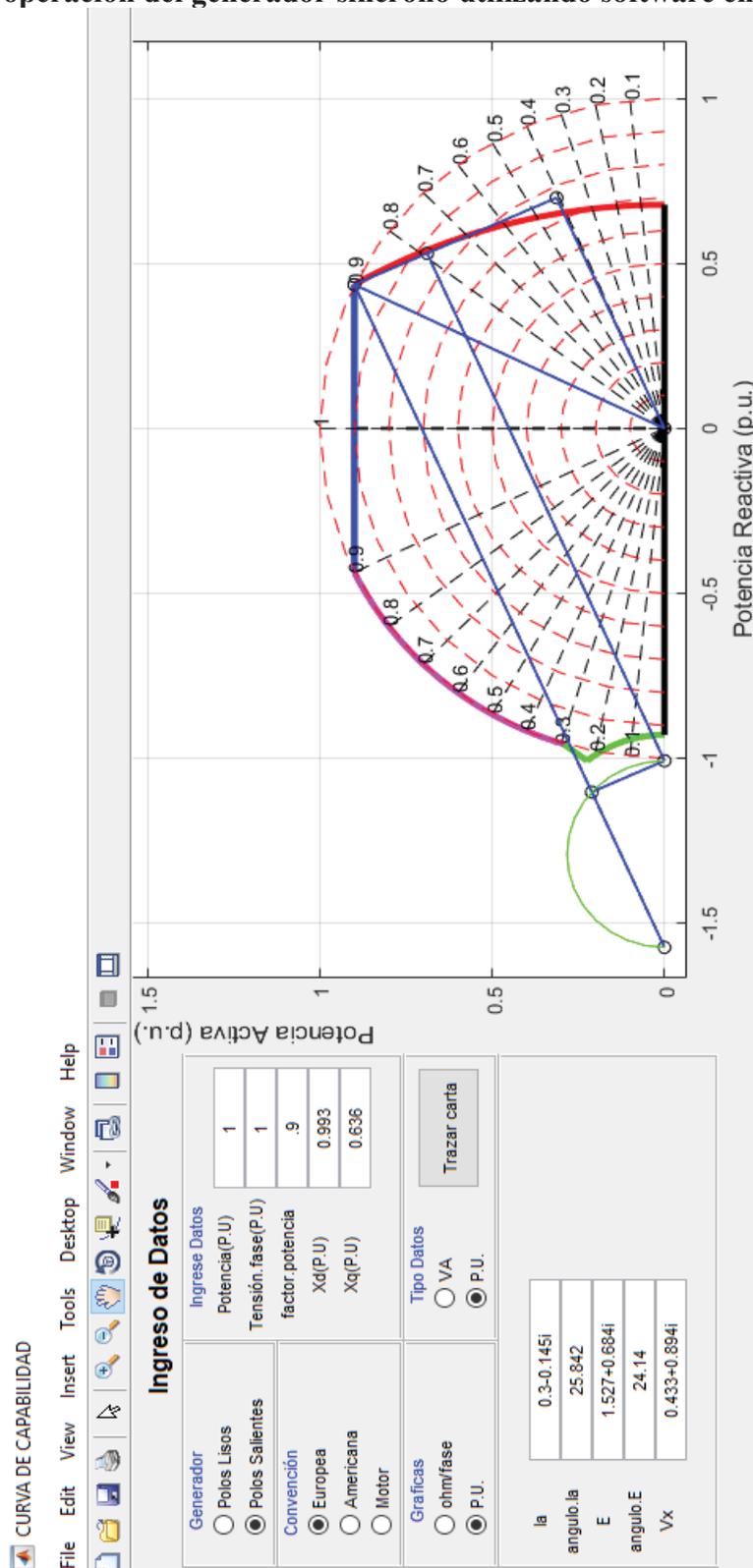


Figura 5.9: Región de operación del generador síncrono HUANZA: G1.
Fuente: Propia

5.4.4 Central Hidroeléctrica Cerro del Águila

Tabla 5.4. Características de la CENTRAL HIDROELÉCTRICA CERRO DEL ÁGUILA⁴ (513 MW)

DENOMINACIÓN	CENTRAL HIDROELÉCTRICA CERRO DEL ÁGUILA		
EMPRESA CONCESIONARIA	CERRO DEL ÁGUILA S.A.		
TECNOLOGÍA	Generación Hidráulica		
UBICACIÓN Departamento Provincias Distrito Altitud	Huancavelica Tayacaja Colcabamba - Surcubamba 2 972 msnm- 2 581 msnm		
DATOS TECNICOS DE CENTRAL Potencia Instalada Energía Promedio Anual Tipo de Central Longitud del Túnel de conducción. Número de unidades de generación. Salto Bruto Caudal Nominal Caudal Ecológico Caudal Hídrico Casa de Maquinas	513 MW 3 139 GWh Hidráulica de Embalse 5,739 km 3 Turbinas 295 m 210,5 m ³ /s 16 m ³ /s Río Mantaro En caverna		
DATOS TECNICOS TURBINA Tipo de Turbina Potencia Nominal Caudal Nominal Nivel de Eje de Turbina	Turbina G1 Francis Vert. 175 MW 70,16 m ³ /s 1 265 msnm	Turbina G2 Francis Vert. 175 MW 70,16 m ³ /s 1 265 msnm	Turbina G3 Francis Vert. 175 MW 70,16 m ³ /s 1 265 msnm
DATOS TECNICOS DE GENERADOR Potencia Tensión de Generación Factor de Potencia	201,35 MVA 13,8 kV 0,85	201,35 MVA 13,8 kV 0,85	201,35 MVA 13,8 kV 0,85
DATOS TECNICOS DEL TRANSFORMADOR Potencia Nivel de Tensión	9 x 71 MVA 13,8/220 kV		
DATOS DE CONTRATO Tipo de contrato Firma de Contrato Precio unitario de potencia Precio unitario de energía HP Precio unitario de energía HFP Puesta en Operación Comercial(POC)	Compromiso de Inversión (CCI-PROINVERSIÓN) 01.07.2011 5,75 US\$/kW-mes (contrato de suministro) 60,59 US\$/MWh (contrato de suministro) 48,86 US\$/ MWh (contrato de suministro) G1 y G2: 03.08.2016. G3: 25.08.2016		
INFORMACION RELEVANTE	<ul style="list-style-type: none"> • La Casa de Máquinas es en caverna. Se concluyó con el montaje del principal equipamiento electromecánico. (transformadores y turbinas). Se culminaron los trabajos en la presa de concreto. • El COES con carta COES/D-493-2016 del 18.05.2016, se aceptó la factibilidad de operación de la central con transformadores de potencia de 220 kV/ 13,8 kV. • Contractualmente, la POC estaba prevista para el 30.06.2016. La concesionaria solicitó al MINEM la postergación de la POC hasta el 30.08.2016 para las turbinas 1 y 2, y hasta el 31.10.2016 para la turbina 3. Dicho pedido está siendo evaluado por el MINEM. • Con cartas COES/D/DP-812-2016 y COES/D/DP-816, el COES aprobó la Operación Comercial de los Grupos G1 y G2 respectivamente, desde las 00:00 horas del 03.08.2016, con una potencia efectiva de 171,28 MW cada uno. • El monto de inversión aproximado fue de 948 MM US\$. 		

Fuente: Osinergmin- Supervisión de contratos de proyectos de generación y transmisión de energía eléctrica en operación Agosto-2018

⁴ OSINERGMIN, SUPERVISIÓN DE CONTRATOS DE PROYECTOS DE GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN OPERACIÓN, Agosto 2018, División de Supervisión de Electricidad, pag. 64 al 74.

GRUPO DE GENERACIÓN 1 – CERRO DEL AGUILA: G1

DATOS INICIALES DE CÁLCULO:

1. Potencia: $S_n = 201.35 \text{ MW}$ $S_a = 1 \text{ p.u.}$
2. Tensión: $V_n = 13.8 \text{ kV}$ $V_a = 1 \text{ p.u.}$
3. Corriente: $I_n = 9910.44 \text{ A}$ $I_a = 1 \text{ p.u.}$
4. Factor de potencia: 0.85
5. Ángulo de facto de potencia: $\phi = \cos^{-1}(0.85) = 31.78^\circ$
6. Reactancia síncrona en el eje d: $X_d = 1.044$
7. Reactancia síncrona en el eje q: $X_q = 0.724$
8. Potencia máxima de la turbina: 179.9 MW $P_{max} = \frac{179.9}{201.35} = 0.89 \text{ p.u.}$
9. Potencia mínima de la turbina: 58 MW $P_{min} = \frac{58}{201.35} = 0.28 \text{ p.u.}$
10. Margen de seguridad del límite práctico de estabilidad: $\alpha\% = 10\%$
11. Margen de seguridad la mínima corriente de excitación de campo: $e\% = 5\%$
12. El Ángulo par o Ángulo de carga:

$$\text{Aplicando } \delta = \tan^{-1} \left[\frac{X_q I_a \cos \phi}{V_a + X_q I_a \sin \phi} \right] = \tan^{-1} 0.445 = 24.01$$

13. La tensión inducida de armadura E_f :

Considerando

$$E_f = V_a \cos \delta + X_d I_a \sin(\delta + \phi) = 1.77 \text{ p.u.}$$

14. Sustitución de variables

Aplicando

$$U = \frac{V_a * E_f}{X_d} = 1.695$$

$$W = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d * X_q} \right) = 0.21$$

$$Z = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d * X_q} \right) = 1.17$$

$$K = W + Z = 1.38$$

15. Dominio de las gráficas

$$\delta = (0^\circ, 90^\circ)$$

5.4.4.1 Región de operación del generador síncrono utilizando software en Matlab.

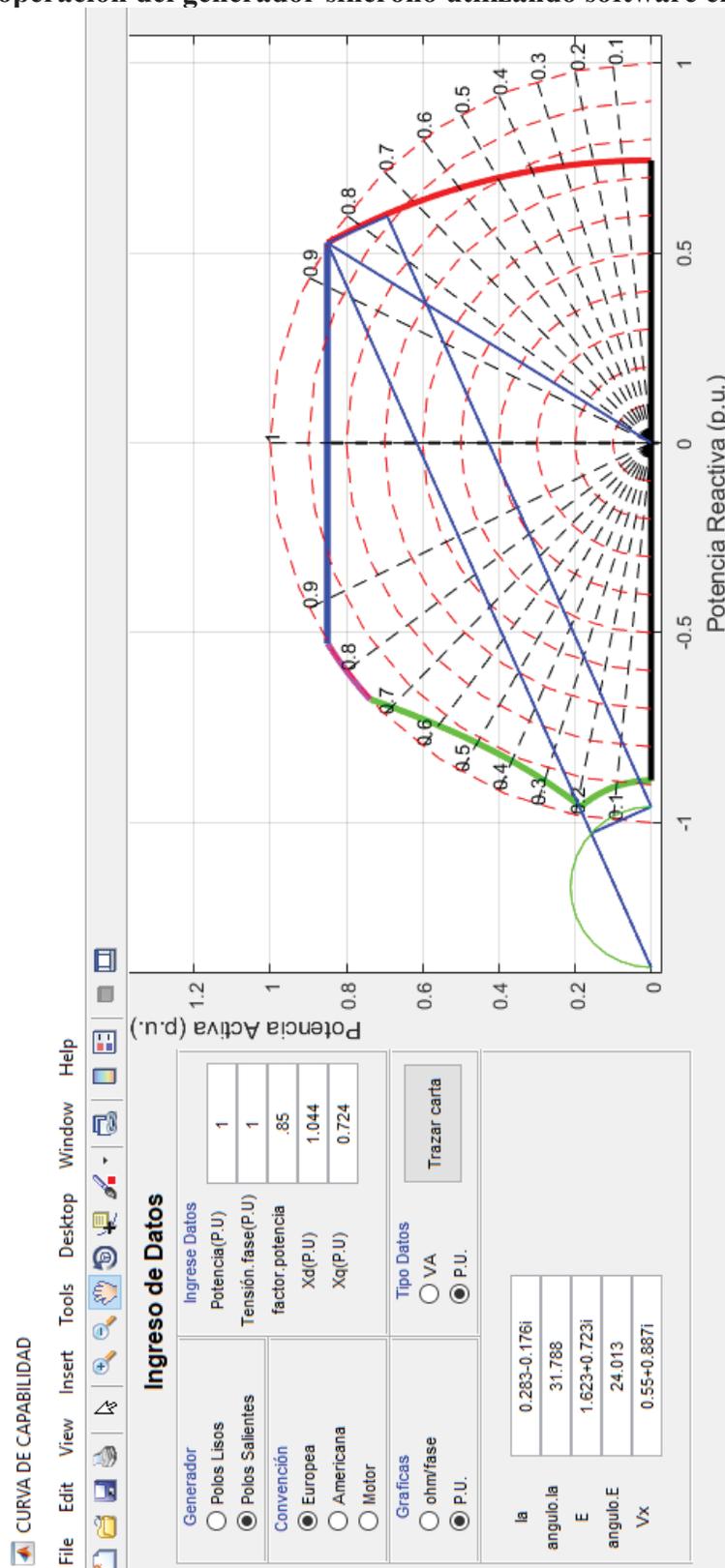


Figura 5.10: Región de operación del generador síncrono CERRO DEL AGUILA: G1.
Fuente: Propia

5.4.5 Central Hidroeléctrica Santa Teresa

Tabla 5.5. Características de la **CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTA TERESA**⁵

DENOMINACION	CENTRAL HIDROELÉCTRICA SANTA TERESA	
EMPRESA CONSECONARIA	LUZ DEL SUR S.A.A.	
TECNOLOGÍA	Generación Hidráulica	
UBICACIÓN		
Departamento	Cuzco	
Provincias	Urubamba	
Distrito	Machupicchu	
Altitud	2 438 msnm	
DATOS TÉCNICOS DE CENTRAL		
Potencia Instalada	91 MW	
Tipo de Central	Hidráulica de Embalse	
Número de Unidades de Generación	2 Turbinas	
Salto Bruto	186,8 m	
Caudal Nominal	61 m ³ /s	
Recurso Hídrico	Río Vilcanota	
Casa de Máquinas	En caverna	
DATOS TÉCNICOS DE TURBINA		
Tipo de Turbina	Turbina G1 Francis Vertical	Turbina G2 Francis Vertical
Potencia Nominal	49 MW	49 MW
Caudal Nominal	30,5 m ³ /s	30,5 m ³ /s
DATOS TÉCNICOS GENERADOR		
Potencia	45,5 MW	45,5 MW
Tensión de Generación	13,8 kV	13,8 kV
Factor de Potencia	0,9	0,9
DATOS TÉCNICOS DEL TRANSFORMADOR		
Potencia	3x40 MVA	
Nivel de Tensión	13,8/220 kV	
DATOS DE CONTRATO		
Tipo de contrato	Proceso Licitado por PROINVERSIÓN	
Firma de Contrato	23.02.2011	
Porcentaje “T” ofertado	15%	
Puesta en Operación Comercial (POC)	01.09.2015	
INFORMACIÓN RELEVANTE		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ La central aprovecha las aguas del río Vilcanota, previamente turbinadas en la C.H. Machupicchu; utilizando el desnivel de 186 m. entre el vertedero de la cámara de descarga de la C.H. Machupicchu y la Casa de Máquinas en caverna de la C.H. Santa Teresa. ▪ Está ubicada aguas abajo del cruce del puente Carrilluchayoc, en la margen derecha del río Vilcanota, a 1 km del poblado de Ccollpani. ▪ La central se conecta a la S.E. Suriray, construida como parte de la L.T. 220 kV Machupicchu- Abancay –Cotaruse (CTM). ▪ Por filtraciones en el proceso de carga de agua, la concesionaria optó por revestir todo el pique vertical con acero. Las obras de revestimiento del túnel ya fueron culminadas. ▪ Con carta COES/D/DP-1185-2015 del 09.07.2015, el COES aprueba el Estudio de Operatividad de la central. ▪ El 10.07.2015 se sincronizó por primera vez el generador G2, y el 17.07.2015 se sincronizó el generador G1. ▪ La Concesionaria solicitó ampliación de plazo de la POC hasta el 31.10.2015 por razones de fuerza mayor. Está solicitud cuenta con opinión favorable de Osinergmin. ▪ Osinergmin emitió opinión favorable para el otorgamiento de la Licencia de Uso de Agua. ▪ El avance de las obras es 100%. ▪ Con carta COES/D/DP-1409-2015 del 31.08.2015, el COES aprueba la Operación Comercial de la C.H. Santa Teresa con una potencia efectiva de 99,71 MW, a partir de las 00:00 horas del 01.09.2015. ▪ El monto de inversión aproximado fue de 154,5 MM US\$. 		

Fuente: Osinergmin- Supervisión de contratos de proyectos de generación y transmisión de energía eléctrica en operación Agosto-2018

⁵ OSINERGMIN, SUPERVISIÓN DE CONTRATOS DE PROYECTOS DE GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN OPERACIÓN, Agosto 2018, División de Supervisión de Electricidad, pag. 64 al 74.

GRUPO DE GENERACIÓN 1 SANTA TERESA: G1

Datos de cálculo:

1. Potencia: $S_n = 45.50 \text{ MW} \rightarrow S_a = 1 \text{ p. u.}$
2. Tensión: $V_n = 13.8 \text{ kV} \rightarrow V_a = 1 \text{ p. u.}$
3. Corriente: $I_n = 2115.09 \text{ A} \rightarrow I_a = 1 \text{ p. u.}$
4. Factor de potencia: 0.90
5. Ángulo de factor de potencia: $\phi = \cos^{-1}(0.90) = 25.84^\circ$
6. Reactancia síncrona en el eje d: $X_d = 1.166$
7. Reactancia síncrona en el eje q: $X_q = 0.480$
8. Potencia máxima de la turbina: $59 \text{ MW} \rightarrow P_{max} = 59/45.50 = 1.30 \text{ p. u.}$
9. Potencia mínima de la turbina: $20 \text{ MW} \rightarrow P_{min} = 20/45.50 = 0.44 \text{ p. u.}$
10. Margen de seguridad del límite práctico de estabilidad: $a\% = 10\%$
11. Margen de seguridad de la mínima corriente de excitación de campo: $a\% = 10\%$
12. El ángulo Par o ángulo de carga:

$$\text{Aplicando } \delta = \tan^{-1} \left[\frac{X_q I_a \cos \phi}{V_a + X_q I_a \sin \phi} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{0.48 * 1 * \cos(25.84)}{1 + 0.48 * 1 * \sin(25.84)} \right]$$

$$\delta = 19.66^\circ$$

13. La tensión inducida de armadura E_f :

Considerando

$$E_f = V_a \cos \delta + X_d I_a \sin(\delta + \phi) = 1 * \cos(19.66) + 1.166 * 1 * \sin(19.66 + 25.84)$$

$$E_f = 1.773 \text{ p. u.}$$

14. Sustitución de variables

Aplicando:

$$U = \frac{V_a * E_f}{X_d} = 1.521$$

$$W = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d * X_q} \right) = 0.61$$

$$Z = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d * X_q} \right) = 1.47$$

$$k = W + Z = 2.08$$

15. Dominio de las gráficas:

$$\delta = (0^\circ, 90^\circ)$$

5.4.5.1 Región de operación del generador síncrono utilizando software en Matlab.

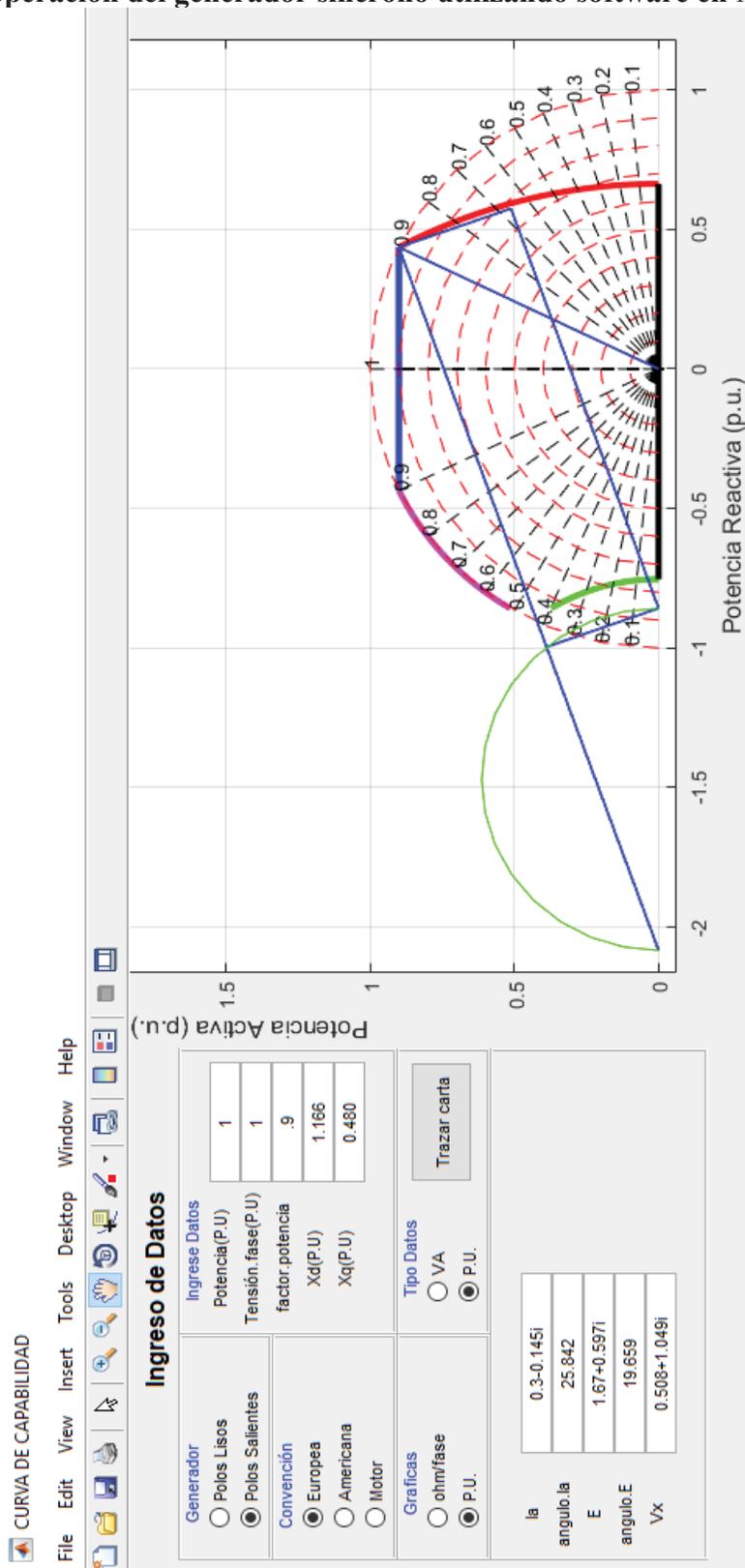


Figura 5.11: Región de operación del generador síncrono SANTA TERESA: G1.
Fuente: Propia

5.4.6 Central Hidroeléctrica Cheves

Tabla 5.6. Características de la **CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHEVES**⁶

DENOMINACION	CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHEVES	
EMPRESA CONSECONARIA	EMPRESA ELÉCTRICA CHEVES S.A.	
TECNOLOGÍA	Generación Hidráulica	
UBICACIÓN	Lima Huaura Sayán 668 msnm	
DATOS TÉCNICOS DE CENTRAL	Potencia Instalada 168,2 MW Energía Promedio Anual 426 GWh Tipo de Central Hidráulica de Embalse Número de Unidades de Generación 2 Turbinas Salto Bruto 600 m Caudal Nominal 33 m ³ /s Recurso Hídrico Ríos Huaura y Checras Casa de Máquinas En caverna	
DATOS TÉCNICOS DE TURBINA	Turbina G1 Tipo de Turbina Pelton eje Vertical Potencia Nominal 86 MW Velocidad Angular 400 rpm Caudal Nominal 16,5 m ³ /s	Turbina G2 Pelton eje Vertical 86 MW 400 rpm 16,5 m ³ /s
DATOS TÉCNICOS GENERADOR	Potencia 100 MVA Tensión de Generación 13,8 kV Factor de Potencia 0,86	100 MVA 13,8 kV 0,86
DATOS TÉCNICOS DEL TRANSFORMADOR	Potencia 2 x 100 MVA Nivel de Tensión 13,8/220 kV	
DATOS DE CONTRATO	Tipo de contrato Concesión Sum. Energ. Elect. Serv. Pub. Elec. (PROINVERSIÓN) Firma de Contrato 03.12.2009 Puesta en Operación Comercial (POC) 22.08.2015	
INFORMACIÓN RELEVANTE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El 12.10.2009, Empresa Eléctrica Cheves S.A. se adjudicó la Buena Pro de la Licitación Pública Internacional para el Suministro de Energía Eléctrica al Servicio Público de Electricidad, debiendo suministrar 109 MW a Empresas Distribuidoras de electricidad. ▪ La central está ubicada próxima a la localidad de Churín, distrito de Sayán, provincia de Huaura, departamento de Lima. ▪ La central utiliza los recursos de los ríos Huaura y Checras aprovechando una altura bruta de 600 m y un caudal de diseño de 33 m³/s. ▪ Las obras civiles se encuentran concluidas, al igual que las obras hidromecánicas. ▪ Las turbinas y los generadores se encuentran instalados; así como los transformadores de potencia. ▪ La concesionaria culminó las pruebas en blanco in situ de las unidades de generación. ▪ La concesionaria culminó la etapa de energización de la L.T. 220 kV C.H. Cheves-S.E. Huacho y de los transformadores de potencia. ▪ Mediante carta COES/D/DP-1084-2015 del 16.06.2015, el COES otorgó la autorización de conexión para las pruebas de puesta en servicio de la central. ▪ Osinergmin emitió opinión favorable para la obtención de la Licencia de Uso de Agua. ▪ Con carta COES/D/DP-1369-2015, el COES aprobó la Puesta en Operación Comercial de las Unidades de Generación N° 01 y N° 02 con 86,24 MW y 85,44 MW respectivamente, con lo que la potencia efectiva de la Central es de 171,68 MW. ▪ El monto de inversión aproximado fue de 506 MM US\$. 	

Fuente: Osinergmin- Supervisión de contratos de proyectos de generación y transmisión de energía eléctrica en operación Agosto-2018

⁶ OSINERGMIN, SUPERVISIÓN DE CONTRATOS DE PROYECTOS DE GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN OPERACIÓN, Agosto 2018, División de Supervisión de Electricidad, pag. 64 al 74.

GRUPO DE GENERACIÓN 1 CHEVES: G1

Datos de cálculo:

1. Potencia: $S_n = 100MW \rightarrow S_a = 1p.u.$
2. Tensión: $V_n = 13.8 kV \rightarrow V_a = 1p.u.$
3. Corriente: $I_n = 4183.70 A \rightarrow I_a = 1p.u.$
4. Factor de potencia: 0.86
5. Ángulo de factor de potencia: $\phi = \cos^{-1}(0.86) = 30.68^\circ$
6. Reactancia síncrona en el eje d: $X_d = 1.41$
7. Reactancia síncrona en el eje q: $X_q = 0.91$
8. Potencia máxima de la turbina: $89.9 MW \rightarrow P_{max} = 89.9/100 = 0.90 p.u.$
9. Potencia mínima de la turbina: $13.6 MW \rightarrow P_{min} = 13.6/100 = 0.14 p.u.$
10. Margen de seguridad del límite práctico de estabilidad: $a\% = 10\%$
11. Margen de seguridad de la mínima corriente de excitación de campo: $a\% = 10\%$
12. El ángulo Par o ángulo de carga:

$$\text{Aplicando } \delta = \tan^{-1} \left[\frac{X_q I_a \cos \phi}{V_a + X_q I_a \sin \phi} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{0.91 * 1 * \cos(30.68)}{1 + 0.91 * 1 * \sin(30.68)} \right]$$

$$\delta = 28.12^\circ$$

13. La tensión inducida de armadura E_f :

Considerando

$$E_f = V_a \cos \delta + X_d I_a \sin(\delta + \phi) = 1 * \cos(28.12) + 1.41 * 1 * \sin(28.12 + 30.68)$$

$$E_f = 2.088p.u.$$

14. Sustitución de variables

Aplicando:

$$U = \frac{V_a * E_f}{X_d} = 1.481$$

$$W = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d * X_q} \right) = 0.19$$

$$Z = \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d * X_q} \right) = 0.90$$

$$K = W + Z = 1.10$$

15. Dominio de las gráficas:

$$\delta = (0^\circ, 90^\circ)$$

5.4.6.1 Región de operación del generador síncrono utilizando software en Matlab.

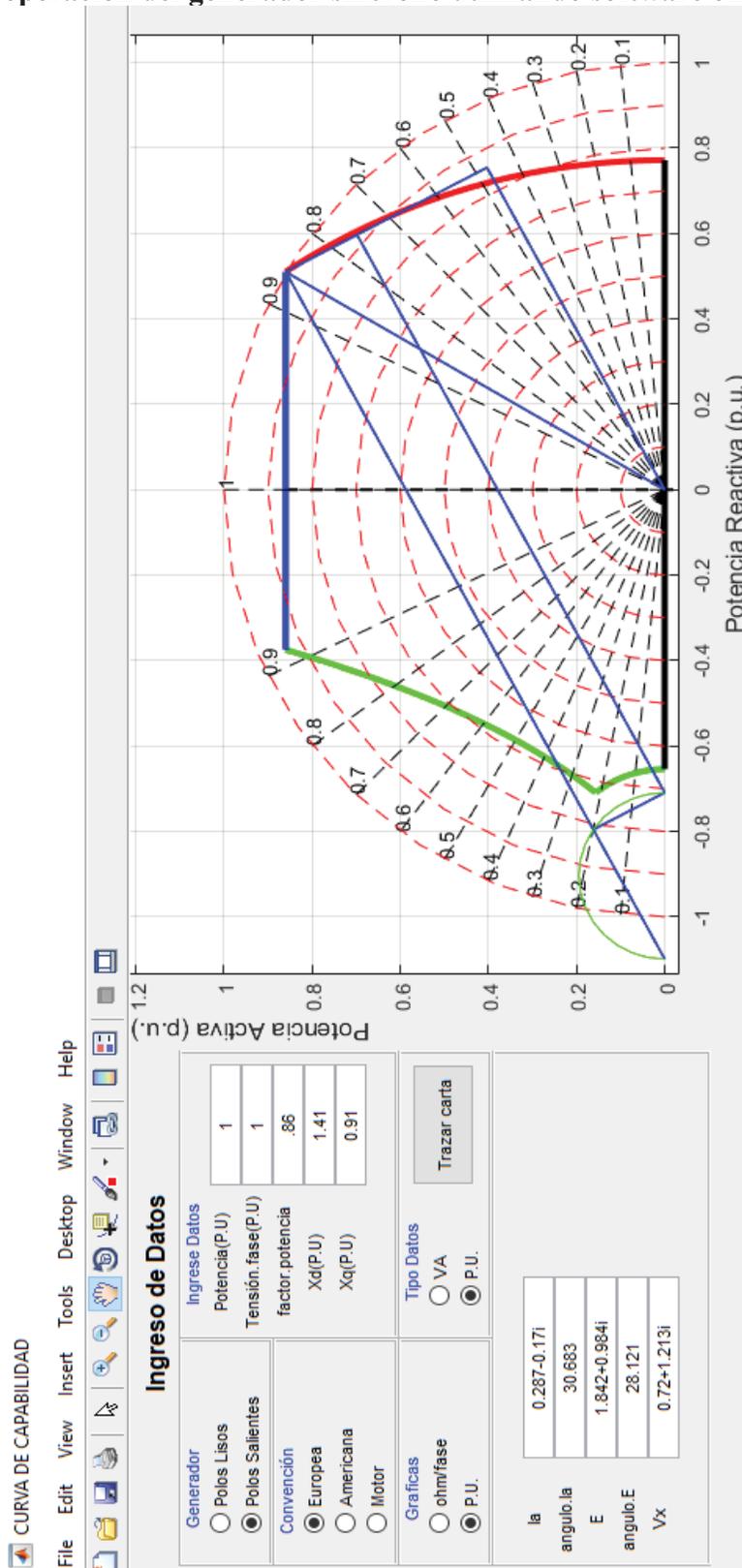


Figura 5.12: Región de operación del generador síncrono CHEVES: G1.
Fuente: Propia

EVALUACIÓN

Con la obtención de las ecuaciones fasoriales y de lugares geométricos de un generador síncrono mencionadas en el capítulo anterior se pudo desarrollar un software en lenguaje Matlab, para poder encontrar en forma fácil y rápida las curvas de capacidad de potencia del generador, ya sea de rotor liso como de polos salientes, con los datos correspondientes de cada grupo de generación según Osinergmin.

Al desarrollar el software en un lenguaje muy conocido en el área de ingenierías, permite que el estudiante de ingeniería como centrales de generación eléctrica, puedan acceder rápidamente y fácilmente a este programa y realizar las pruebas necesarias para el mejor funcionamiento y operación de los grupos de generación y así prolongar la vida útil de dichas maquinas eléctricas.

El desarrollo del software grafico posibilitó rápidamente obtener las curvas de potencia y permitió desarrollar un mejor análisis gráfico de la corriente máxima del estator, corriente de excitación mínima, corriente de excitación máxima, la potencia máxima del motor primo y el límite de estabilidad que permitirá a los operadores de las centrales hidroeléctricas en general conocer los diferentes puntos de operación y las regiones o áreas de generación activa y reactiva adecuadas en el sistema.

Con este software se pudo desarrollar las curvas de potencia en forma rápida y determinar la región optima de operación de los grupos de generación de las centrales hidroeléctricas de MACHUPICCHU – II – G1, CHAGLLA – G1, HUANZA – G1, CERRO DEL AGUILA – G1, SANTA TERESA – G1 y VHEVES – G1, como se aprecia en las paginas 147 al 164, usando los datos que se encuentran en las tablas de cada grupo de generación en las páginas mencionadas.

Con este desarrollo se puede determinar: la rapidez y efectividad de las regiones de operación optima de cualquier generador de energía eléctrica ya sea de polos lisos o de polos salientes siempre y cuando se conozca todos los datos necesarios que el software requiera. Al desarrollar las curvas de capacidad en la forma como se hizo en el capítulo – IV y determinar los límites de operación en el mejor de los casos se demora un promedio de 2 horas con gráficos y todo, a comparación del software, que solo se demora en colocar los datos y presionar RUN, solo se demora aproximadamente 5 minutos o menos, haciendo que el uso del software sea más conveniente y efectivo. El programa completo al alcance de la mano se encuentra en el anexo # 6.

CONCLUSIONES

1. Se demostró la incidencia de la corriente de excitación mínima y máxima en los límites de operación del devanado de campo del generador síncrono; demostrando en las gráficas de curvas los valores de las corrientes máxima y mínima de excitación en función del ángulo de potencia δ para las diferentes centrales eléctricas de generación del Sistema eléctrico interconectado nacional, donde se evidencia que para valores diferentes a los rangos de excitación mínima y máxima la operación del generador es inestable. al realizar las pruebas en vacío para la obtención de los parámetros eléctricos del generador síncrono a prueba, se aplicaron corrientes de excitación mínima de 74.2 mili amperios y se obtuvo una tensión en vacío de 113 voltios, y corriente de excitación máxima de 303 mili amperios se obtuvo una tensión en vacío de 323 voltios. Y que no se puede incrementar la corriente de excitación para que no se tome el riesgo de sobrepasar el límite térmico del bobinado de la máquina y dañar las características del mismo. También se evidencia que para las pruebas, se tiene que seguir obligatoriamente un protocolo de pruebas para proteger la máquina. Luego de esta misma manera y con el cuidado en el manejo, se efectuó la prueba en corto circuito, en dicha prueba se aplicó una corriente de excitación de 17,7 mili amperios obteniendo una corriente de corto circuito de 0,03 amperios, se aplicó una corriente máxima de 303 mili amperios y obteniendo una corriente de corto circuito de 0,55 amperios, finalmente con estos datos se puede determinar la reactancia síncrona del generador de 587.27 ohmios.
2. Se determinó las ecuaciones matemáticas de las curvas de capacidad y los lugares geométricos de las mismas y conociendo los datos de una determinada maquina síncrona se obtiene los límites y la región de operación óptima del generador; con los datos obtenidos para la central hidroeléctrica MACHUPICCHU – II de reciente puesta en marcha según documento publicado por Osinergmin año 2018. Se pudo obtener las siguiente ecuaciones:

$I_{maxima\ estator} = 1.50 \cos \delta + \sqrt{1 - 2.25 \text{sen}^2 \delta}$	$P_{maxima\ turbina} = \frac{0.83}{\text{sen} \delta}$
$I_{maxima\ excitacion} = 1.716 + 0.52 \cos \delta$	$P_{minima\ turbina} = \frac{0.33}{\text{sen} \delta}$
$I_{min.exc.} = 0.3381 + 0.4316 \cos \delta$	$I_{exc. \text{cero}} = 0.52 \cos \delta$
$E_{per.practica} = \frac{0.26}{(1 - \text{sen} \delta)} + 0.56 \tan \delta \text{sen} \delta$	$E_{per.teorica} = 0.52 \text{sen} \delta \tan \delta$

Con las cuales se evidencio la región óptima de operación para el grupo de generación #1 de la C.H. MACHUPICCHU - II

3. El desarrollo del software grafico posibilitó rápidamente obtener las curvas de potencia y permitió desarrollar un mejor análisis gráfico de la corriente máxima del estator, corriente de excitación mínima, corriente de excitación máxima, la potencia máxima del motor primo y el límite de estabilidad que permitirá a los operadores de las centrales hidroeléctricas en general conocer los diferentes puntos de operación y las regiones o áreas de generación activa y reactiva adecuadas en el sistema, logrando minimizar el tiempo de aplicación y obtención de los límites de operación optima del generador síncrono.

BIBLIOGRAFIA

- Máquinas Eléctricas: Stehen J. Chapman Ed. MC. Graw Hill, México 1987, pag. 375 al 409.
- Principios de Conversión de Energía Electromecánica
Meisel, Jerome, McGraw-Hill, Madrid España 1969, Talleres Gráficos de Ediciones Castilla S.A. pag. 477 al 515.
- Cálculo Industrial de Máquinas Eléctrica: Juan Corrales Martin. Ed. Universidad Politécnica de Barcelona España.
- Máquinas eléctricas: Ivanov-Smolenski, Ed. Mir
- Metodología de la Investigación: Hernández Sampieri, Roberto; Fernández Collado, Carlos; Pilar Baptista, Lucio, Ed. Mc Graw Hill; 6ta Edición
- Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos, Ministerio de Energía y Minas- Dirección General de Electricidad, Lima 1997.
- Zócimo Náupari Huatuco, M.Sc. Manfred F. Bedrigraña Aronés y Dr. V. Leonardo Casas. (2011, enero), XVII Conimera. Memorias, p. 301-309.
- Castillo Haro, Raúl,(2013). *Implementación y análisis de la curva de capacidad del generador síncrono de polos salientes utilizando software de ingeniería*. Lima. Perú, p. 4,209.
- Garcés Castillo, Sebastián Alejandro. (2015). *Software para la determinación de la carta de operación de generadores sincrónicos de rotor cilíndrico*. Santiago de Chile. Chile, p. 1, 71.
- Thaler George & Wilcox Milton, (1974), Máquinas Eléctrica: Estado dinámico y permanente, México DF, México, Editorial Limusa, p.253.
- Antara, Ronal. (2003). Universidad Nacional de Ingeniería del Perú. Protocolo de pruebas del generador síncrono. Referencia: Martínez Marroquín, Manuel. Universidad San Carlos de Guatemala.
- Castillo Haro, Raúl,(2013). *Implementación y análisis de la curva de capacidad del generador síncrono de polos salientes utilizando software de ingeniería*. Lima. Perú
- OSINERGMIN, SUPERVISIÓN DE CONTRATOS DE PROYECTOS DE GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN OPERACIÓN, Agosto 2018, División de Supervisión de Electricidad, pag. 64 al 74.

- Matlab, significa MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices" es un sistema algebraico computacional que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux.

WEBGRAFÍA

- <https://es.scribd.com/document/72259856/Curva-de-Capabilidad>
- biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0514_EA.pdf
- <https://mymemory.translated.net/es/Español/Inglés/capabilidad>

ANEXOS

ANEXO – I

MATRIZ DE CONSISTENCIA

MATRIZ DE CONSISTENCIA: LAS CURVAS DE CAPACIDAD DE POTENCIA Y EL ANÁLISIS GRÁFICO DE LOS LÍMITES DE OPERACIÓN DEL GENERADOR SÍNCRONO

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MÉTODO
GENERAL	GENERAL	GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	<p>LA INVESTIGACIÓN</p> <p>De acuerdo al ENFOQUE es de carácter CUANTITATIVO en vista de que será un trabajo de evaluación operativa del generador síncrono donde se obtendrá una base de datos que servirán para desarrollar un proceso inductivo de investigación.</p> <p>De acuerdo al OBJETIVO que persigue es una investigación APLICADA o tecnológica en vista de que se pretende desarrollar el análisis funcional integrado de los límites de operación del generador síncrono.</p> <p>De acuerdo al ALCANCE O NIVEL es una investigación EXPLICATIVA, porque está dirigida a evaluar las curvas de capacidad de potencia mediante el análisis gráfico y explicar los límites de operación del generador síncrono.</p> <p>En consecuencia el método a utilizar será el EXPLICATIVO, que contiene las estrategias para lograr los objetivos, expresa el procedimiento para comprobar las hipótesis planteadas para dar respuesta al problema planteado, tiene tres etapas básicas: Proceso, Control y Objetivos.</p> <p>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.</p> <p>El diseño a utilizar es el DISEÑO CUASI EXPERIMENTAL que cumple con las siguientes etapas:</p> <p>A.- Manejo de una o más variables independientes.</p> <p>B.- Cálculo del efecto que produce la variable independiente en la variable dependiente</p> <p>C.- Constructo de aplicaciones.</p>
<p>¿De qué manera la evaluación de las curvas de capacidad de potencia y el análisis gráfico permitirán una mejor definición funcional integrada de los límites de operación del generador síncrono?</p>	<p>Evaluar las curvas de capacidad de potencia y el análisis gráfico para una mejor definición funcional integrada de los límites de operación del generador síncrono.</p>	<p>La evaluación de las curvas de capacidad de potencia mediante el análisis gráfico permitirán una mejor definición funcional de manera integrada de los límites de operación del generador síncrono”</p>	<p>“El Generador Síncrono”</p> <p>Los indicadores son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Número de polos. • Potencia nominal de fabricación. • Tensión nominal de fabricación. 	
ESPECÍFICAS	ESPECÍFICAS	ESPECÍFICAS	VARIABLE DEPENDIENTE	
<p>A. ¿En qué medida intervienen la tensión y corriente de la excitatriz en la determinación de los límites de operación del generador síncrono?</p> <p>B. ¿Cómo interviene la potencia activa P y la potencia reactiva Q en las ecuaciones de las curvas de capacidad de potencia que permitan graficar y definir los límites de operación del generador síncrono?</p> <p>C. ¿De qué manera, un software que grafique las curvas de capacidad, favorecerán el buen comportamiento de los generadores y operación de las mismas?</p>	<p>A. Demostrar la incidencia de la tensión y corriente de la excitatriz en la determinación de los límites máximos y mínimos de operación del generador síncrono.</p> <p>B. Determinar las ecuaciones de las curvas de capacidad en función de las potencias activa P y la potencia reactiva Q para graficar y definir los límites de operación del generador síncrono.</p> <p>C. Desarrollar un software en lenguaje Matlab, que nos permita graficar las curvas de capacidad de potencia del generador síncrono para polos salientes y polos lisos.</p>	<p>A. La tensión y corriente de la excitatriz intervienen en gran medida en la determinación de los límites de operación del generador síncrono.</p> <p>B. Las ecuaciones de las curvas de capacidad están relacionadas directamente con las potencias activa P y reactiva Q y definen los límites de operación del generador síncrono.</p> <p>C. El desarrollo del software gráfico, nos permite visualizar e identificar automática e inmediatamente los límites de operación y la región correcta de operación de un generador síncrono de polos salientes y polos lisos.</p>	<p>1. “Curvas de capacidad de potencia”</p> <p>Los indicadores principales son:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ La potencia activa del generador síncrono ✓ La potencia reactiva del generador síncrono ✓ Las reactancias síncronas Xd y Xq ✓ El par, velocidad, tensión y factor de potencia. <p>2. “Los límites de operación”</p> <p>Los indicadores son:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ límites de corriente de campo ✓ límites de corriente del estator ✓ límite mínimo y máximo de la fuente de energía mecánica ✓ límite práctico y teórico de estabilidad 	

ANEXO – II

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

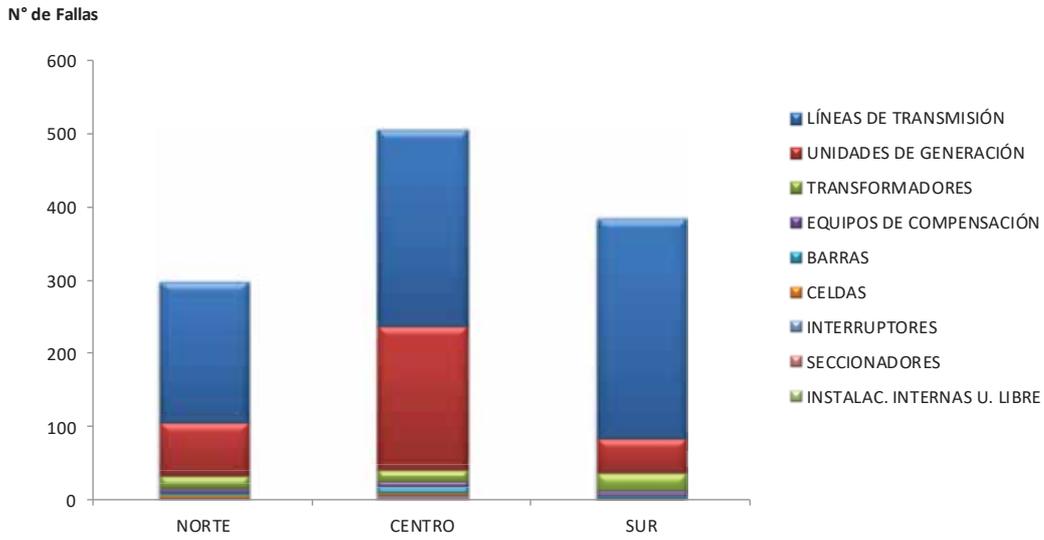
OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
“El Generador Síncrono”	El generador síncrono de polos lisos y de polos saliente con sus características inherentes de fabricación	<ul style="list-style-type: none"> • datos nominales de fabricación. • Revoluciones por minuto de la máquina. • Tensión de operación 	<p>. Los indicadores son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Número de polos. • Potencia nominal de fabricación. • Tensión nominal de fabricación.
VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
“Curvas de capacidad de potencia”	Características del comportamiento del generador síncrono de polos cilíndricos y salientes en estado estable: variantes y parámetros eléctricos y mecánicos expresados en forma gráfica.	<ul style="list-style-type: none"> • Las Potencias del generador • Parámetros eléctricos y mecánicos • Características operativas mecánicas y eléctricas. 	<p>Los indicadores son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La potencia activa del generador síncrono • La potencia reactiva del generador síncrono • Las reactancias síncronas X_d y X_q <p>El par, velocidad, tensión y factor de potencia</p>
“Los límites de operación”	Extremos operativos máximos y mínimos de las características del comportamiento de las variantes y parámetros eléctricos y mecánicos del generador síncrono.	<ul style="list-style-type: none"> • Variantes de la excitatriz • Variante del estator (armadura) • Variantes mecánicas • Estabilidad práctica y teórica. 	<p>Los indicadores son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • límites de corriente de campo • límites de corriente del estator • límite mínimo y máximo de la fuente de energía mecánica • límite práctico y teórico de estabilidad

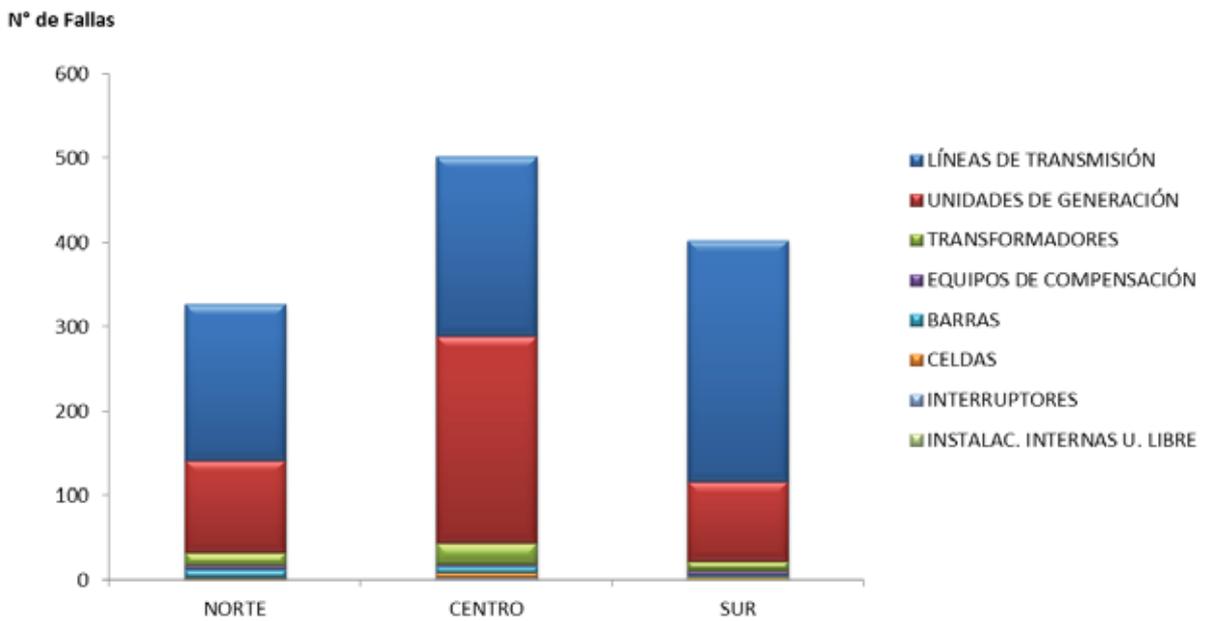
ANEXO – III

**ESTADÍSTICA DE FALLAS POR ÁREAS Y SEGÚN TIPO
DE EQUIPOS (SEIN AÑOS 2014; 2015; 2016 y 2017)**

NÚMERO DE FALLAS POR ÁREAS Y SEGÚN TIPO DE EQUIPOS EN EL SEIN 2014



NÚMERO DE FALLAS POR ÁREAS Y SEGÚN TIPO DE EQUIPOS EN EL SEIN 2015



NÚMERO DE FALLAS POR ÁREAS Y SEGÚN TIPO DE EQUIPOS EN EL SEIN 2016

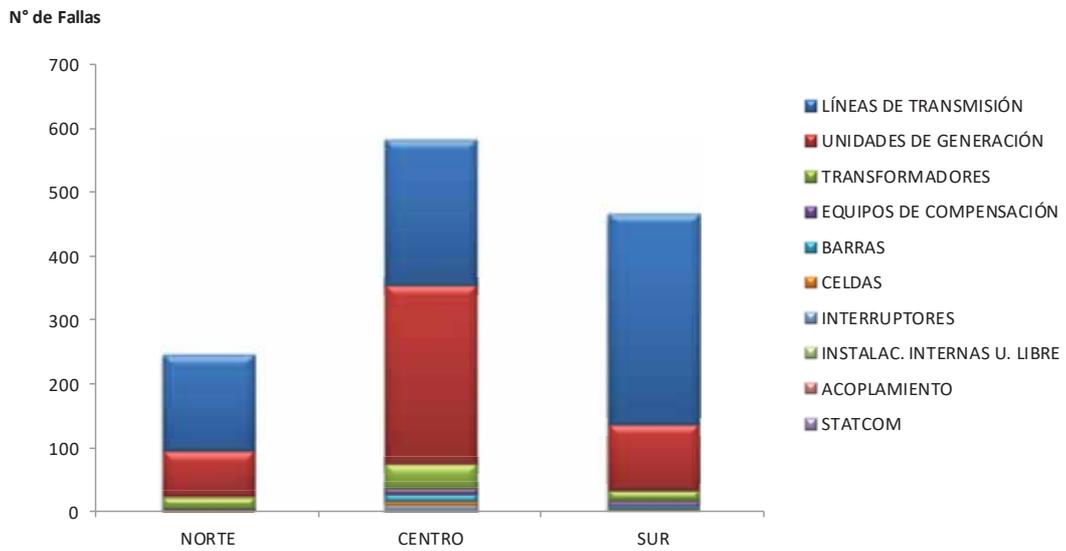
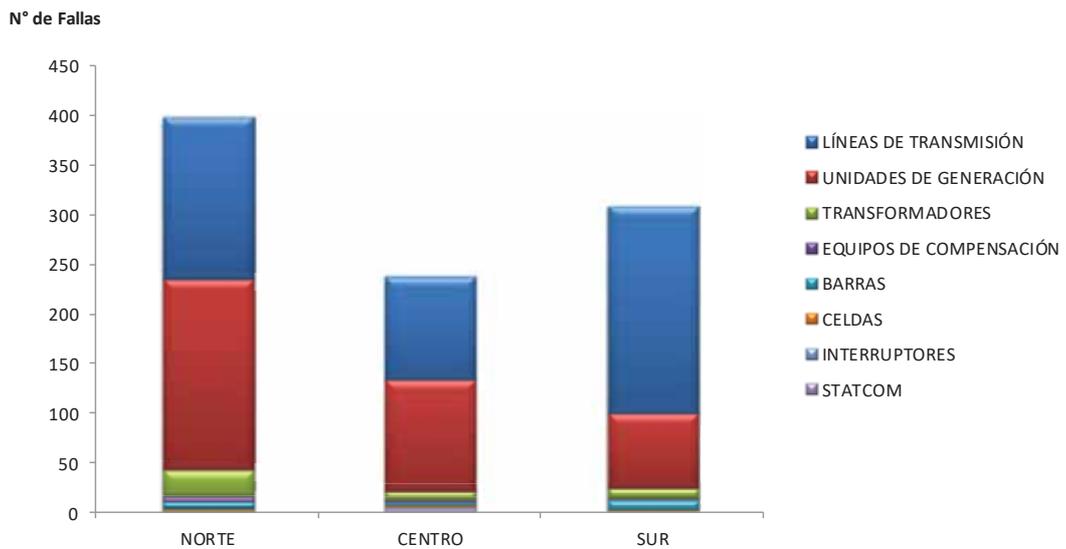


GRÁFICO N° 12.5

NÚMERO DE FALLAS POR ÁREAS Y SEGÚN TIPO DE EQUIPOS EN EL SEIN 2017



ANEXO – IV

**ESTADÍSTICAS DE FALLAS POR ÁREAS EN UNIDADES
DE GENERACIÓN (SEIN AÑOS 2014; 2015; 2016 y 2017)**

**ESTADÍSTICA DE FALLAS POR ÁREAS EN UNIDADES DE GENERACIÓN DEL SEIN
2014**

ÁREA	EMPRESA	UBICACIÓN	EQUIPO	CAUSA							TOTAL			
				EXT	FEC	FEP	FHU	FNA	OPE	FNI		OTR		
CENTRO	AGRO INDUSTRIAL PARAMONGA	PARAMONGA	CENTRAL							2		2		
		PARAMONGA	TV-01		2	1				1	9		13	
	CELEPSA	EL PLATANAL	G1		1						1		2	
		CHIMAY	G2								1		1	
	CHINANGO	YANANGO	G1		1								1	
			CENTRAL								1		1	
	EDEGEL	CALLAHUANCA	G1			2							2	
			G2		1								1	
			G3									1		1
			CENTRAL									1		1
		HUAMPANI	G1		1		1							2
			CENTRAL									1		1
		HUINCO	G1									1		1
			CENTRAL									2		2
		MOYOPAMPA	G1		1								1	
		SANTA ROSA	UTI5		1									1
			TG7		3									3
		VENTANILLA	CENTRAL										2	2
			TG3		1									1
			TG4		1									1
	TV			3							2		5	
	EGASA	PISCO	TG1		1						4		5	
			TG2		2	2					4		8	
	EGESUR	INDEPENDENCIA	CENTRAL		2						1		3	
			GR-1		2								2	
			GR-2		1									1
			GR-3		1									1
			GR-4		3									3
	ELECTROPERU	MANTARO	CENTRAL						1				1	
			G3		2								2	
			G4		2								2	
		RESTITUCION	G7		1									1
			G1									1		1
	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA DE JUNIN	RUNATULLO II	G3		3						1		4	
			G1								1		1	
	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA DE JUNIN	RUNATULLO III	G2		1						2		3	
			CENTRAL		1								1	
			G1										1	1
	EMGHUANZA	HUANZA	G2		1								2	
			CENTRAL			1						2		3
	ENERSUR	CHILCA UNO	G2			1							1	
			TG11									1		1
			TG12		1							2		3
			TG13									2	1	3
		YUNCAN	TV									1		1
	G1					1							1	
	FENIX POWER PERÚ	FENIX	G2								1		1	
			CENTRAL		2							3		5
	HIDROCAÑETE	NUEVO IMPERIAL	GT11		6						2		8	
			GT12		6						2	1	9	
			TV10		3						3		6	
			CENTRAL		2	1							1	4
	HUANCHOR	HUANCHOR	G1		3	2					1		6	
CENTRAL						1							1	
KALLPA	KALLPA	G1		1						2		3		
		TG1		1	1							2		
		TG2			1								1	
PETRAMAS	HUAYCOLORO	TV		6	1							7		
		CENTRAL	1	2		1				2	1	7		
		G1		2		1				1		4		
		G2		1						1		2		
SDF ENERGÍA	OQUENDO	G3		1		1				1		3		
		TG1		1								1		
		G1		3						1		4		
SN POWER	CAHUA	G2		2							1	3		
		CENTRAL	1									1		
	HUAYLLACHO	G2								1		1		
		MALPASO	CENTRAL	1									1	
	MISAPUQUIO	CENTRAL	1									1		
	OROYA	CENTRAL				1						1		
PACHACHACA	G1		1								1			
		G3		1								1		

NORTE	STATKRAFT	YAUPI	CENTRAL							1		1			
			G1		1	1							2		
			G2				1							1	
	STATKRAFT	CAHUA MALPASO	YAUPI	G1			1						1		
				G3	1								2		
		YAUPI	G5	1									1		
	TERMOSELVA AGUAS Y ENERGÍA PERÚ	AGUAYTÍA		TG1	4	1							5		
	EEPSA	MALACAS	CAÑA BRAVA	CENTRAL								1	1		
				G2										1	
	EGENOR	CAÑA BRAVA	CAÑÓN DEL PATO	TG4	1	1							2		
				TG5	1									1	
		CAÑÓN DEL PATO	CAÑÓN DEL PATO	CAÑÓN DEL PATO	G1								1	1	
					G1	1									1
					G2	3									3
			CARHUAQUERO	CARHUAQUERO	CARHUAQUERO	G2	1								1
						G3	2					1			
G5						2	1								
CARHUAQUERO IV PIURA		CARHUAQUERO IV PIURA	CARHUAQUERO IV PIURA	G1	6						2			8	
				G2	1									1	
				G3	1									1	
ELECTRICA RIO DOBLE		LAS PIZARRAS	LAS PIZARRAS	G1	2					1				3	
	TG			1	1								2		
	CENTRAL				3	1			1		1		6		
HIDROELECTRICA SANTA CRUZ	SANTA CRUZ I SANTA CRUZ II	SANTA CRUZ I SANTA CRUZ II	G1	1	6						5		12		
			G2	3	1								4		
			G2								1			1	
MAPLE ETANOL	MAPLE ETANOL	MAPLE ETANOL	CENTRAL		3					1		1			
			TV		1							1	2		
SINERSA	POECHOS 1		G1	1								1			
SN POWER	PARIAC	PARIAC	C.H. PARIAC	3								2	5		
			CH2 - G2					1					1		
			CH2 - G1							1			1		
			CH3 - G2	2									2		
			CH4 - G1	2									2		
SUR	EGASA	CHARCANI I	CHARCANI I	G2		1							1		
				G1							3		3		
		CHARCANI V	CHARCANI V	CHARCANI V	G2		3							3	
					G3							2		2	
		CHILINA D	CHILINA D	CHILINA D	CENTRAL		1							1	
					SLZ1							1			1
	CHILINA V MOLLENDO D	CHILINA V MOLLENDO D	CHILINA V MOLLENDO D	SLZ2							1		1		
				CCOMB							1			1	
	EGEMSA	MACHUPICCHU	MACHUPICCHU	GD3							1	1	2		
				CENTRAL							1		1		
				G1		5					1		6		
				G3							4		4		
	EGESUR	ARICOTA I	ARICOTA I	G2		1					2		3		
				CENTRAL		1							1		
	ENERSUR	ILO 1	ILO 1	CENTRAL		1							1		
				TG1		1							1		
ILO 2		ILO 2	ILO 2	TG2		1				5		6			
				TV12							1		1		
SAN GABÁN	RESERVA FRÍA PLANTA ILO	RESERVA FRÍA PLANTA ILO	TG2		1							1			
			TG3							1		1			
			G2				1			2		3			
SN POWER	SAN IGNACIO	SAN IGNACIO	CENTRAL						1			1			
			G1	1								1			
	ARCATA		ARCATA							1		1			
TOTAL FALLAS EN UNIDADES DE GENERACIÓN				19	144	20	9	4	1	108	12	317			

ESTADÍSTICA DE FALLAS POR ÁREAS EN UNIDADES DE GENERACIÓN DEL SEIN
2015

ÁREA	EMPRESA	UBICACIÓN	EQUIPO	CAUSA								TOTAL	
				EXT	FEC	FEP	FHU	FNA	OPE	FNI	OTR		
CENTRO	AGRO INDUSTRIAL PARAMONGA	PARAMONGA	PARAMONGA	1	1		1				1		4
			TGV01	1	12		2				5		20
	CHINANGO S.A.C.	YANANGO	C.H. YANANGO		1								1
			YANAN1		1								1
		CALLAHUANCA	CALL4								1		1
		HUINCO	HCO1		3						1		4
			HCO2		1		1						2
	EDEGEL	STA ROSA	STA ROSA - UT15		1								1
			TG7 WEST		4								4
		VENTANILLA	VENT_TG3		2	1	1						4
			VENT_TV		1								1
		MATUCANA	MAT1								1		1
	EGASA	PISCO	PISCO_TG1								1		1
			PISCO_TG2			3					1		4
	EGESUR		C.T. INDEPENDENCIA		5	1							6
		INDEPENDENCIA	INDEP_WAR1		10						2	1	13
			INDEP_WAR2		4								4
			INDEP_WAR3		2								2
			INDEP_WAR4		1								1
	ELECTRICA YANAPAMPA SAC	YANAPAMPA	G2		1								1
			MRO3		2								2
		MANTARO	MRO4		3						2		5
			MRO5		2						1		3
	ELECTROPERU		MRO6		1								1
			MRO2		3								3
		RESTITUCIÓN	RON1		2								2
			RON3		1								1
			RON2		1								1
	EMPRESA CONCESIONARIA ENERGIA LIMPIA SAC	LA GRINGA V	C.T. LA GRINGA	3	1		1						5
	EMPRESA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CHEVES S.A.	CHEVES	CHEVES G1		16						1		17
			CHEVES G2		12								12
			C.H. CHEVES								1		1
			G1		4								4
			G2		1								1
		RUNATULLO II	C.H. RUNATULLO II		4						1		5
	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA DE JUNIN		C.H. RUNATULLO III		1								1
		RUNATULLO III	G1		2								2
			G2		5								5
	EMPRESA DE GENERACION HUANZA	HUANZA	HUANZA G2				1						1
			HUANZA G1		3								3
			CHILCA1_TG11		1								1
			CHILCA1_TG12		1		1				2		4
			CHILCA1_TG13		1		1						2
	ENERSUR	CHILCA 1	CHILCA1_TV		1						2		3
			Caldero 1 (T.Vapor 1)		1								1
		YUNCÁN	YUNCAN G1		2								2
			YUNCAN G2		3		1						4
			CENTRAL TERMICA FENIX	1	3							1	5
	FENIX POWER PERÚ	FENIX	FENIX GT11		2								2
			FENIX GT12		2								2
			FENIX TV10		4								4
	HIDROCAÑETE S.A.	NUEVA IMPERIAL	CH-IMPERIAL		1								1
		N_Imperial		1	3							4	
HIDROELECTRICA HUANCHOR S.A.C.	HUANCHOR	C.H. HUANCHOR		2								2	
		HUANCHOR1		2								2	
KALLPA GENERACION	KALLPA	KALLPATG2		1								1	
		KALLPATV								1		1	
		G1			2	1				1		4	
LUZ DEL SUR	SANTA TERESA	G2		4						1		5	
		C.H. SANTA TERESA		3								3	
PETRAMAS	HUAYCOLORO	C.T. HUAYCOLORO	5	3		1	1			2		12	
		G1 1.6 MW		2								2	
		G3		1								1	
SDF ENERGIA	OQUENDO	C.T. OQUENDO		1								1	
		OQUENDO_TG1	1	2								3	
SHOUGESA	SAN NICOLÁS	SH_TV1		1								1	
STATKRAFT	CAHUA	CAHUA G1		1								1	

			CAHUA G2			1						1	
		MALPASO	MALP1		3							3	
			MALP2		1							1	
			MALP3		2							2	
		PACHACHACA	PACH3						2			2	
			PACH2		1							1	
		YAUPI	YAUP2		1	1						2	
			YAUP3		1							1	
			YAUP5		2						1	3	
	TERMOCHILCA	SANTO DOMINGO DE LOS OLLEROS AGUAYTÍA	OLLEROS TG1	1	1							2	
	TERMOSELVA		AGE_TG1							2			2
	AGUAS Y ENERGIA PERU	PÍAS 1	CENTRAL HIDROELECTRICA PÍAS 1	2	1							3	
				G2_C.H. PÍAS 1		3							3
				G1_C.H. PÍAS 1		1						1	2
	EEPSA	MALACAS RESERVA FRIA DE GENERACION TALARA	M_TG4		4					2		6	
				M_TG5		1					2		3
	EGENOR	CAÑA BRAVA	CBRAVA G1		2							2	
				C.H. CAÑON DEL PATO		3							3
			CAÑÓN DEL PATO	CPATO1		3							3
				CPATO3		4							4
				CPATO5		1							1
				CPATO6		3				1			4
				CPATO4		1							1
				CARHUAQUERO	CARQ1		3						
				CARQ2		2							2
				CARQ3		5							5
		CARHUAQUERO IV	CARQ4		2							2	
	ELECTROPERU	TUMBES	MAK1		3							3	
	EMPRESA ELECTRICA RIO DOBLE	LAS PIZARRAS	C.H. LAS PIZARRAS		3	2				1		6	
				G1	1	3		1			7		12
			G2		4							4	
	ENERSUR	QUITARACSA	QUITARACSA G1		3		1			1		5	
			QUITARACSA G2				1					1	
	MINERA CERRO VERDE	RECKA	C.T. RECKA				1					1	
			TG1-01MKA10		2							2	
	SDE PIURA	TABLAZO	TABLAZO_TG1		4				3			7	
	SINERSA	POECHOS II	POECHOS II G2		3							3	
				C.H. POECHOS II		1							1
		POECHOS I	POECHOS G1								1	1	
	STATKRAFT	PARIAC	C.H. PARIAC		1			1		1		3	
				CH2 - G1					1		2		3
				CH3 - G2					2				2
				CH4 - G1		1							1
				CH3 - G1		2							2
				CH4 - G2		1							1
		GALLITO CIEGO	GALLITO CIEGO G2		1							1	
	TERMOSELVA	AGUAYTÍA	AGE_TG2		3					1		4	
	EGASA	CHARCANI V	CHAR_V_G1							2		2	
				CHAR_V_G2		2					2		4
				CHAR_V_G3		1					5		6
			C.H. CHARCANI V		2					1		3	
			CHILINA D	CHI_SLZ12_SLZ1						2			2
				MOLL123_GD3		1							1
			MOLLENDO D	MOLL123_GD1		5							5
				MOLL123_GD2		3							3
				C.T. MOLLENDO DIESEL							1		1
			CHARCANI IV	CHAR_IV_G3							1		1
		CHAR_IV_G2			1							1	
		CHARCANI II	CHAR_II_G1		5							5	
			CHAR_II_G3		1							1	
			CHAR_II_G2		1				1			2	
	EGEMSA	MACHUPICCHU	MACHUP_G1		2							2	
				MACHUP_G3		2	1						3
				MACHUP_G4		3					5		8
				MACHUP_G2		1							1
	EGESUR	ARICOTA II	ARICOTA2_G1							1		1	
	ENERSUR	ILO 1	ILO1TG1_TG1		3							3	
				ILO1TG2_TG2		2					1		3
				ILO1TV3_TV3		1							1
				ILO1TV4_TV4		1							1

		ILO1CATKATO		2					2		4	
		ILO2	ILO2_CARB_TV1		2						2	
GENERADORA ENERGÍA DEL PERÚ	LA JOYA	C.H. LA JOYA							1		1	
		LA JOYA - G2	1								1	
		LA JOYA - G1		1								1
		SGAB2_G2		3		1						4
SAN GABAN	SAN GABÁN II	SGAB2_G1		1	1						2	
		TAPARACHI	TAPARACHI_MAN 3						1		1	
	HUAYLLACHO	C.H. HUAYLLACHO	1								1	
STATKRAFT	HUAYLLACHO	HUAYLLACHO G1	5				1				6	
		MISAPUQUIO	C.H. MISAPUQUIO	6				1				7
	MISAPUQUIO	MISAPUQUIO G2							1		1	
	SAN IGNACIO	C.H. SAN IGNACIO		1			1			1	3	
	SAN ANTONIO	C.H. SAN ANTONIO	1								1	
TOTAL FALLAS EN UNIDADES DE GENERACIÓN				35	296	7	18	8	0	80	6	450

ESTADÍSTICA DE FALLAS POR ÁREAS EN UNIDADES DE GENERACIÓN DEL SEIN
2016

ÁREA	EMPRESA	UBICACIÓN	EQUIPO	CAUSA							TOTAL
				EXT	FEC	FEP	FHU	FNA	FNI	OTR	
NORTE	AGUAS Y ENERGIA PERU	PÍAS 1	CENTRAL HIDROELECTRICA PÍAS 1	1						1	2
			G2_C.H. PÍAS 1		1						1
	EEPSA	MALACAS RESERVA FRIA DE GENERACION TALARA	M_TG4						1		1
			M_TG5		3						3
	EGENOR	CAÑA BRAVA	CBRAVA G1	1	2						3
			CPATO1		2						2
		CAÑÓN DEL PATO	CPATO4		1						1
			CARQ1		7		1				8
		CARHUAQUERO	CARQ2		3						3
			CARQ3		3		1			1	5
	EMPRESA ELECTRICA RIO DOBLE	LAS PIZARRAS	CARHUAQUERO IV CARQ4		2						2
			C.H. LAS PIZARRAS						1		1
	ENGIE	QUITARACSA	G1	1	2				1		4
			G2		5		1		1		7
	HIDROELECTRICA SANTA CRUZ	SANTA CRUZ I	QUITARACSA G1		4						4
			C.H. QUITARACSA						1		1
	MINERA CERRO VERDE	RECKA	SANTA CRUZ I						1		1
			SCRUZ_G1		1						1
	SDE PIURA	TABLAZO	SCRUZ_G2		1						1
			SCRUZII G1		1						1
	SINERSA	POECHOS II	TG1-01MKA10		1						1
			GT-2		1						1
	STATKRAFT	PARIAC	TABLAZO_TG1		4						4
			POECHOS II G2		1						1
	AGRO INDUSTRIAL PARAMONGA	PARAMONGA	C.H. POECHOS II		2		1				3
			PARAMONGA G1		1						1
	CELEPSA	EL PLATANAL	C.H. PARIAC		1						1
			CH3 - G2					2			2
	CERRO DEL AGUILA S.A.	CERRO DEL AGUILA	CH3 - G1	1						1	2
			CH4 - G2		1						1
	CHINANGO S.A.C.	YANANGO	GALLITO CIEGO G2		2						2
			GALLITO CIEGO G1		1						1
EDEGEL	SANTA ROSA	PARAMONGA		1						1	
		TGV01		14				1		15	
EGASA	PISCO	CH EL PLATANAL G1		4		1				5	
		CH EL PLATANAL G2				1				1	
ELECTRICA SANTA ROSA	SANTA ROSA II	C.H. CERRO DEL AGUILA		5						5	
		CERRO DEL AGUILA G1		8		1		4		13	
ELECTRICA YANAPAMPA SAC	YANAPAMPA	CERRO DEL AGUILA G2		1		1				2	
		CERRO DEL AGUILA G3		7		2		1		10	
EGESUR	INDEPENDENCIA	C.H. YANANGO		2						2	
		YANANI		3						3	
EMPRESA CONCESIONARIA ENERGIA LIMPIA SAC	LA GRINGA V	CHIMAY1		1		1				2	
		CHIMAY2		1						1	
ELECTROPERU	MANTARO	C.H. CHIMAY					1			1	
		HCO1		2						2	
ELECTRICA SANTA ROSA	PURMACANA	VENT_TG3		1					1	2	
		VENT_TV		1						1	
EMPRESA CONCESIONARIA ENERGIA LIMPIA SAC	LA GRINGA V	MATUCANA						1		1	
		MAT1						1		1	
ELECTRICA YANAPAMPA SAC	YANAPAMPA	TG7 WEST		2					1	3	
		UT15		1				1		2	
ELECTRICA YANAPAMPA SAC	YANAPAMPA	UT16		1						1	
		C.T. SANTA ROSA		3						3	
ELECTRICA YANAPAMPA SAC	YANAPAMPA	C.H. HUAMPANI		2						2	
		TG8 SIEMENS		1						1	
ELECTRICA YANAPAMPA SAC	YANAPAMPA	PISCO_TG2		1						1	
		INDEP_WAR1		3						3	
ELECTRICA YANAPAMPA SAC	YANAPAMPA	INDEP_WAR2		3					1	4	
		INDEP_WAR3		6						6	
ELECTRICA YANAPAMPA SAC	YANAPAMPA	G1	7							7	
		G3		3						3	
ELECTRICA YANAPAMPA SAC	YANAPAMPA	MRO3		1						1	
		MRO6				1				1	
ELECTRICA YANAPAMPA SAC	YANAPAMPA	MRO2		1						1	
		MRO1		2						2	
ELECTRICA YANAPAMPA SAC	YANAPAMPA	RON3		2						2	
		C.T. LA GRINGA	5	3						8	

EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA CANCHAYLLO SAC	CANCHAYLLO	G02		1						1	
	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA DE JUNIN	RUNATULLO II	G1		5						5
		RUNATULLO III	C.H. RUNATULLO III		1						1
			G1		5		1				6
	EMPRESA DE GENERACION HUALLAGA	CHAGLLA	G2		1						1
			CHAGLLA G1		5						5
		PCH CHAGLLA	CHAGLLA G2		5						5
			P.C.H CHAGLLA		3	8					11
	EMPRESA DE GENERACION HUANZA	HUANZA	CHAGLLA GP1		1		1		3		5
			HUANZA G1		2						2
	ENEL GENERACION PERU S.A.A.	VENTANILLA	VENT_TG4		1						1
		SANTA ROSA	TG7 WEST		2						2
		SANTA ROSA II	TG8 SIEMENS		1						1
	ENERSUR	CHILCA 1	CHILCA 1		1						1
			CHILCA1_TG12		1						1
			CHILCA1_TG11		1						1
			CHILCA1_TG12		1						1
			CHILCA1_TG13		3		1				4
			CHILCA1_TV		4				1		5
		YUNCÁN	Caldero 3 (T. Vapor 3)		1						1
			TG41 (Baja)		3		1				4
CHILCA 2		YUNCAN G2		1						1	
		CHILCA2_TG41		1	2					3	
FENIX POWER PERÚ	FENIX	CENTRAL TERMICA FENIX		3						3	
		FENIX GT11		1						1	
		FENIX GT12		1						1	
		FENIX TV10		5						5	
HIDROCAÑETE S.A.	NUEVA IMPERIAL	CH-IMPERIAL		1						1	
		N Imperial		3			1		1	5	
HIDROELECTRICA HUANCHOR S.A.C.	HUANCHOR	C.H. HUANCHOR		1						1	
		HUANCHOR1		1						1	
		HUANCHOR2		1						1	
HIDROELECTRICA SANTA CRUZ	HUASAHUASI I	HUASAHUASI I		1						1	
	HUASAHUASI II	HUASA_II_G1		2						2	
KALLPA GENERACION	KALLPA	KALLPATG2		2						2	
	LAS FLORES	TG1-LAS FLORES		1						1	
LUZ DEL SUR	SANTA TERESA	G1		4						4	
		G2		2						2	
		C.H. SANTA TERESA		1						1	
		C.T. HUAYCOLORO		5	6			1		12	
PETRAMAS	HUAYCOLORO	G1 1.6 MW		1						1	
		G3		2						2	
		G2 1.6 MW		1						1	
		C.T. OQUENDO		1						1	
SDF ENERGIA	OQUENDO	OQUENDO_TG1		2						2	
		C.H. CHANCAY		2	3					5	
SINERSA	CHANCAY	CHANCAY G1		2						2	
		CHANCAY G2		2						2	
		CAHUA G1		2						2	
	CAHUA	CAHUA G2		1						1	
		MALP1		2						2	
	MALPADO	MALP4		2						2	
		SAN IGNACIO	SAN IGNACIO G1		2					2	
	STATKRAFT	YAUPI	YAUP2		4		1		1		6
			YAUP3		4						4
			YAUP5		3						3
YAUP1				3						3	
CHEVES		YAUP4		1				1		2	
		C.H. YAUPI		2			1			3	
		CHEVES G1		1				1		1	
		CHEVES G2		1						1	
OROYA	C.H. OROYA					1			1		
TERMOSELVA	AGUAYTÍA	AGE_TG1		1						1	
		AGE_TG2		1						1	
SUR	EGASA	CHARCANI I						3		3	
		CHARCANI V	CHAR_V_G2					2		2	
			CHAR_V_G3		1			2		3	
		CHILINA D	CHI_SLZ12_SLZ1		5			2		7	
			CHI_SLZ12_SLZ2		3					3	
		MOLLENDO D	MOLL123_GD3		1					1	
			MOLL123_GD1		1					1	
			MOLL123_GD2		6					6	
		CHARCANI IV	CHAR_IV_G1					1		1	
		CHARCANI II	CHAR_II_G1		5			1		6	

		CHARCANI VI	CHARVI_G1		1				1		2		
EGEMSA	MACHUPICCHU		MACHUP_G1						2		2		
			MACHUP_G4	1	6						7		
			MACHUP_G2		2						2		
EGESUR		ARICOTA II	ARICOTA2_G1		3		1				4		
ENERSUR	ILO 2		ILO2_CARB_TV1		1						1		
			ILO1TG2_TG2		2						2		
			ILO1TV4_TV4		1							1	
	ILO 1		ILO1CATKATO		1							1	
			Caldero 3 (T. Vapor 3)		1							1	
			Caldero 4 (T. Vapor 4)		1							1	
	ENGIE	ILO 2		ILO2_CARB_TV1		2		1				3	
				C.T. RESERVA FRIA PLANTA ILO		1						1	
		RESERVA FRIA PLANTA ILO		PLANTAILO_TG2		3							3
				PLANTAILO_TG3		2							2
				C.T. NEPI							1		1
		ILO 4		NEPI_TG42		1					1		2
				NEPI_TG43							1		1
	C.H. LA JOYA		1								1		
GENERADORA ENERGÍA DEL PERÚ	LA JOYA		LA JOYA - G1		1				1		2		
		RESERVA FRIA PTO MALDONADO	CT RF PTO MALDONADO						1			1	
SAMAY I S.A.	PUERTO BRAVO		PUERTO BRAVO TG1		1		1				2		
			PUERTO BRAVO TG3		2						2		
			PUERTO BRAVO TG4		2							2	
SAN GABAN	SAN GABÁN II		SGAB2_G2		7					1	8		
			SGAB2_G1		1		1					2	
STATKRAFT	TAPARACHI		TAPARACHI_MAN4		1						1		
			C.H. HUAYLLACHO	1								1	
	HUAYLLACHO		HUAYLLACHO G1	2	1							3	
			C.H. MISAPUQUIO	4								4	
	MISAPUQUIO		MISAPUQUIO G2	2							2		
	SAN IGNACIO		C.H. SAN IGNACIO	1							1		
SAN ANTONIO		C.H. SAN ANTONIO	1							1			
TOTAL FALLAS EN UNIDADES DE GENERACIÓN					44	335	0	22	5	42	7	455	

ESTADÍSTICA DE FALLAS POR ÁREAS EN UNIDADES DE GENERACIÓN DEL SEIN
2017

ÁREA	EMPRESA	UBICACIÓN	EQUIPO	CAUSA						TOTAL	
				EXT	FEC	FEP	FH	FNA	FNI		OTR
NORTE	AGUAS Y ENERGIA PERU	PÍAS 1	CENTRAL HIDROELÉCTRICA PÍAS 1						1	1	
	EGENOR	CARHUAQUERO IV	CARQ4		1					1	
	EMPRESA ELECTRICA AGUA AZUL	POTRERO	C.H. POTRERO		15				1		16
			G1	1	14			3	2	20	
			G2		8		1		3		12
	EMPRESA ELECTRICA RIO DOBLE	LAS PIZARRAS	C.H. LAS PIZARRAS		4						4
			G1					1		1	
			G2		1					1	
	ENEL GENERACION PIURA S.A.	MALACAS	M_TG4							1	1
		MALACAS I	TG6						1		1
		RESERVA FRIA DE GENERACION TALARA	M_TG5		2						2
	ENGIE	QUITARACSA	C.H. QUITARACSA		2						2
			QUITARACSA G1		4						4
			QUITARACSA G2		2		2				4
	HIDROELECTRICA SANTA CRUZ	SANTA CRUZ I	SANTA CRUZ I		2				2	4	
	ORAZUL ENERGY	CAÑA BRAVA	CBRAVA G1		3				1		4
		CAÑÓN DEL PATO	CPATO1		1						1
			CPATO2		1		1				2
		CARHUAQUERO	CARQ1				2				2
		CARHUAQUERO IV	CARQ2		3					1	4
			CARQ4						1		1
	SDE PIURA	TABLAZO	TABLAZO TG1		1						1
	SINERSA	POECHOS I	C.H. POECHOS I		1						1
			POECHOS G2		2						2
			POECHOS G1						1		1
		POECHOS II	C.H. POECHOS II		1						1
			POECHOS II G1		5				3		8
			POECHOS II G2		1					1	
	STATKRAFT	GALLITO CIEGO	GALLITO CIEGO G1		2				1		3
			GALLITO CIEGO G2		1						1
PARIAC		C.H. PARIAC		1	1					2	
		CH2 - G1		1				1		2	
		CH4 - G1					1		1		
CENTRO	AGRO INDUSTRIAL PARAMONGA	PARAMONGA	TGV01	1	7		1		3	12	
	CELEPSA	EL PLATANAL	CH EL PLATANAL G1		1					1	
			CH EL PLATANAL G2		1					1	
	CERRO DEL AGUILA S.A.	CERRO DEL AGUILA	C.H. CERRO DEL AGUILA		5						5
			CERRO DEL AGUILA G1		3						3
			CERRO DEL AGUILA G2		7		1				8
			CERRO DEL AGUILA G3		9					9	
	CHINANGO S.A.C.	CHIMAY YANANGO	CHIMAY1		1						1
			C.H. YANANGO		2						2
	EGASA	PISCO	PISCO_TG1						1		1
			PISCO_TG2		1						1
	EGESUR	INDEPENDENCIA	C.T. INDEPENDENCIA		1						1
			INDEP_WAR1		1						1
			INDEP_WAR2		6						6
			INDEP_WAR3		2				1		3
			INDEP_WAR4						1		1
	ELECTRICA SANTA ROSA	PURMACANA	C.H. PURMACANA		2					2	
	ELECTRICA YANAPAMPA SAC	YANAPAMPA	G1		1				1	2	
	ELECTROPERU	MANTARO	MRO3		1						1
			MRO6		1						1
		RESTITUCIÓN	RON1		1	2					3
			RON2		1						1
	EMPRESA CONCESIONARIA ENERGIA LIMPIA SAC	LA GRINGA V	C.T. LA GRINGA		7				1		8
			Gringa G2		1						1
	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA CANCHAYLLO SAC	CANCHAYLLO	C.H. CANCHAYLLO		2						2
			G01		2						2
	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA DE JUNIN	RUNATULLO II	G1		1						1
	EMPRESA DE GENERACION ELECTRICA RIO BAÑOS S.A.C.	RUCUY	C.H. RUCUY		1	1					2
	EMPRESA DE GENERACION HUALLAGA	CHAGLLA	C.H. CHAGLLA		2						2
			CHAGLLA G1		4						4
CHAGLLA G2				3						3	
PCH CHAGLLA		CHAGLLA GP1		1	1			1		3	

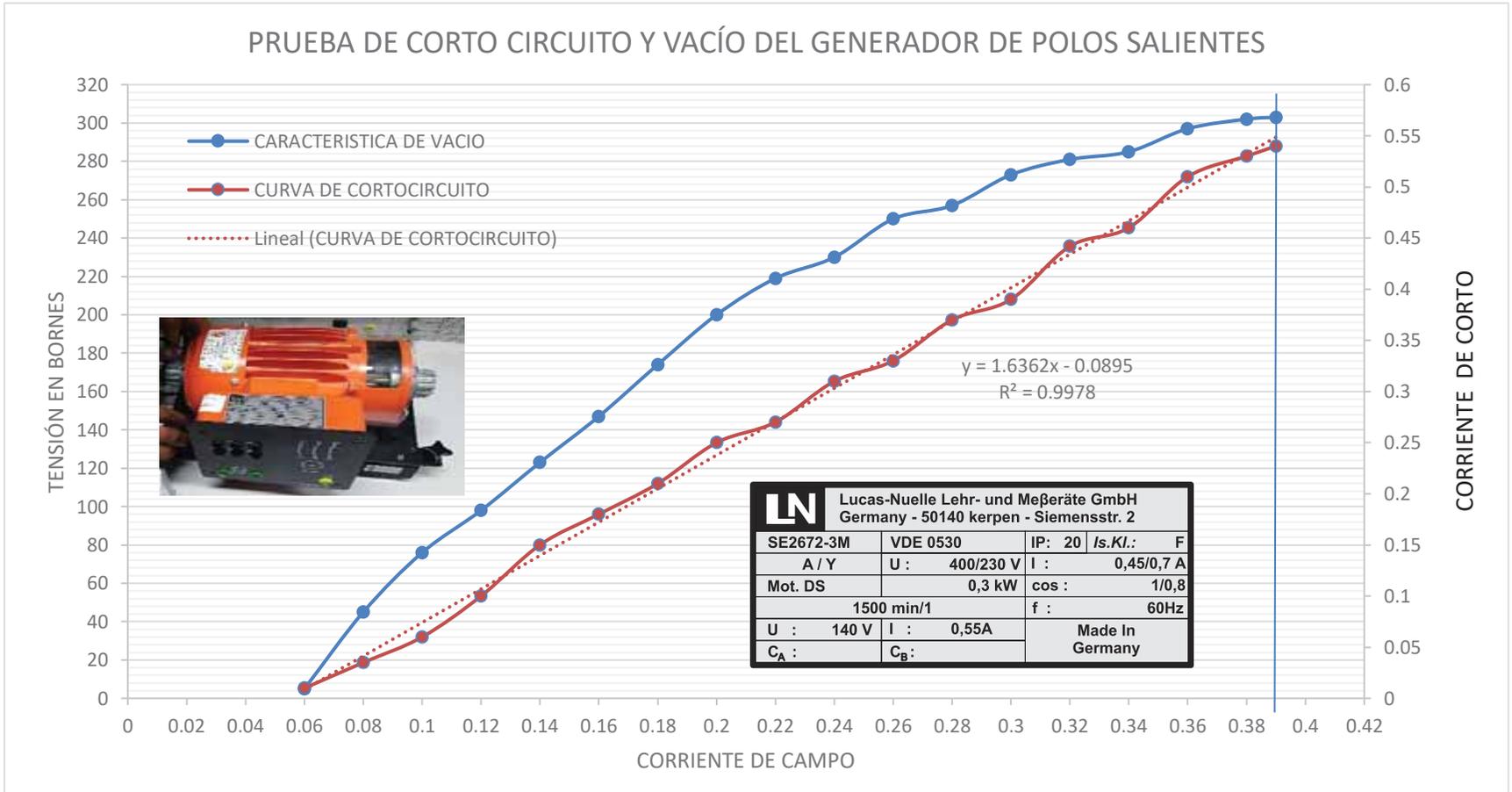
SUR	EMPRESA DE GENERACION HUANZA	HUANZA	P.C.H CHAGLLA	1	5					1	7				
			HUANZA G2						1		1				
		ENEL GENERACION PERU S.A.A.	CALLAHUANCA	CALL1		1						1			
				CALL3		1							1		
				CALL4	1					1			2		
				C.H. HUINCO						1			1		
			HUINCO	HCO1		2							2		
				HCO3						1			1		
			MATUCANA	MAT2						1			1		
			MOYOPAMPA	MOY1		2							2		
				MOY3		1							1		
			VENTANILLA	VENT_TG4		1							1		
		VENT_TV								1			1		
		ENGIE	CHILCA 1	CHILCA1_TG13		1		1					2		
				CHILCA1_TV		1								1	
		FENIX POWER PERÚ	FENIX	FENIX GT11		1							1		
		HIDROCAÑETE S.A.	NUEVA IMPERIAL	CH-IMPERIAL		1							1		
				N Imperial			3							3	
		HIDROELECTRICA SANTA CRUZ	HUASAHUASI I	HUASA_I_G1		1							1		
			HUASAHUASI II	HUASAHUASI II		1							1		
		HIDROMARAÑON	MARAÑON	MARAÑON G2		1				1			2		
		INFRAESTRUCTURA Y ENERGIAS DEL PERU	RESERVA FRIA PUCALLPA	CT RF PUCALLPA					1				1		
		KALLPA GENERACION	KALLPA	KALLPATG1		1							1		
				C.H. SANTA TERESA		1								1	
		LUZ DEL SUR	SANTA TERESA	G1		2							2		
				G2		3		1						4	
				C.T. HUAYCOLORO		12					4			16	
		PETRAMAS	HUAYCOLORO	Huay_G3		1							1		
		SINERSA	CHANCA Y	C.H. CHANCA Y		2							2		
				CHANCA Y G1		2							2		
				CHANCA Y G2		1								1	
		CAHUA	CHEVES	CAHUA G2		2							2		
				CHEVES G1		3								3	
		STATKRAFT	MALPASO	CHEVES G2		1							1		
				C.H. MALPASO				1						1	
				MALP1		2		1						3	
				MALP2		3		1		1				5	
			PACHACHACA	C.H. PACHACHACA	MALP3		1		1					2	
					MALP4		2				1				3
			YAUPI	C.H. YAUPI	C.H. PACHACHACA					1				1	
					PACH3		2								2
					YAUP1		1						1		1
					YAUP3		5								5
		TERMOCHILCA	SANTO DOMINGO DE LOS OLLEROS	YAUP4						1			1		
				OLLEROS TG1		1					1			2	
		EGASA	CHARCANI I	CHARCANI I		2							2		
				CHARCANI II		1				1				2	
			CHARCANI IV	CHARCANI IV	CHAR_IV_G1						1			1	
					CHAR_IV_G2		1								1
					CHAR_IV_G3		1								1
			CHARCANI V	CHARCANI V	CHAR_V_G1		1				1			2	
					CHAR_V_G2							1			1
			CHARCANI VI	CHARCANI VI	C.H. CHARCANI VI						1			1	
					CHARVI_G1							1			1
			CHILINA D	CHILINA D	CHI_SLZ12_SLZ1		3				1			4	
					CHI_SLZ12_SLZ2		6					1			7
			MOLLENDO D	MOLLENDO D	C.T. MOLLENDO DIESEL							1		1	
		MOLL123_GD1				2					1			3	
		EGEMSA	MACHUPICCHU	MACHUP_G1		1							1		
				MACHUP_G3		2					1			3	
				MACHUP_G4		3								3	
		EGESUR	ARICOTA II	ARICOTA2_G1		1							1		
		ENGIE	ILO 1	Caldero 4 (T. Vapor 4)		1							1		
				ILO 2		1								1	
		RESERVA FRIA PLANTA ILO	PLANTA ILO	PLANTAILO_TG1		1							1		
				PUERTO BRAVO	PUERTO BRAVO TG4		3				1			4	
		SAMAY I S.A.	SAN GABAN	SGAB2_G1		1							1		
				SGAB2_G2		1								1	
		STATKRAFT	MISAPUQUIO	C.H. MISAPUQUIO		5						1	6		
				C.H. SAN ANTONIO		10						1		11	
				SAN ANTONIO G1		1					1			2	
				SAN IGNACIO	C.H. SAN IGNACIO		11						1	12	
	TOTAL FALLAS EN UNIDADES DE GENERACIÓN				62	234	0	15	2	54	12	379			

ANEXO – V

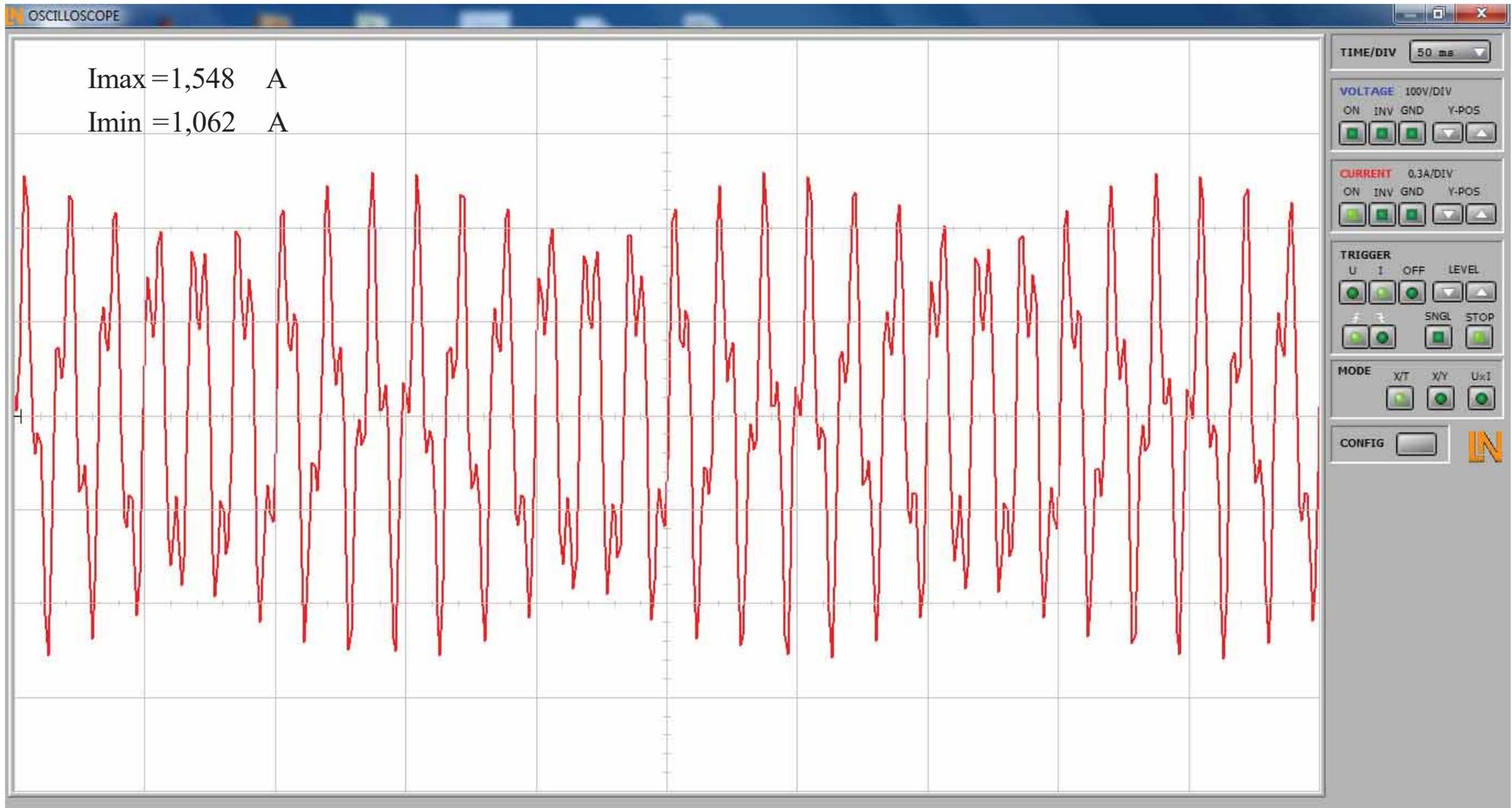
**PRUEBAS DE LABORATORIO EN GENERADOR
SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES**

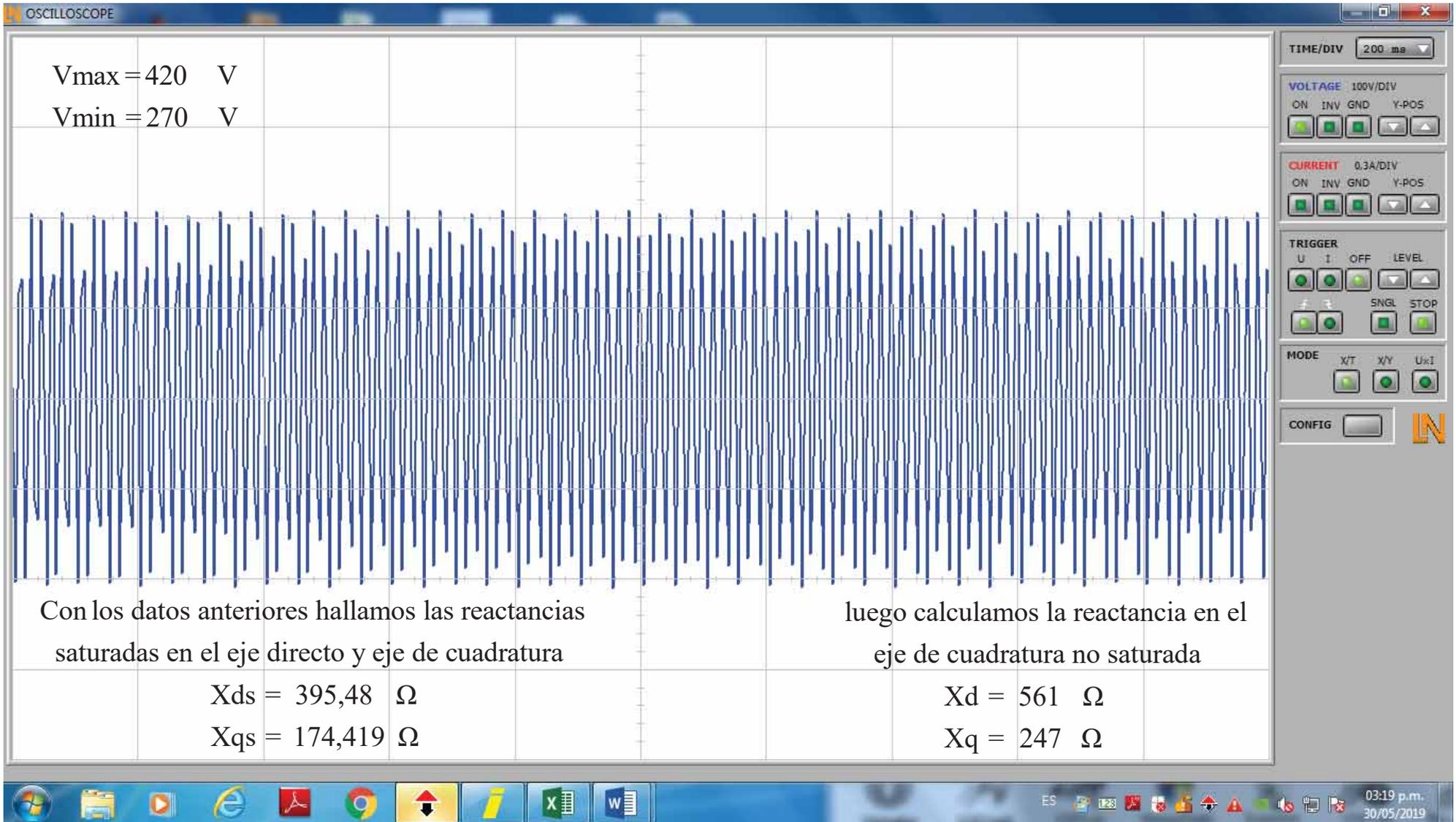
PRUEBA EXPERIMENTAL EN GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES

If	Va fase	Icc	Xs
0.06	5	0.01	
0.08	45	0.035	1286
0.1	76	0.06	1267
0.12	98	0.1	980
0.14	123	0.15	820
0.16	147	0.18	817
0.18	174	0.21	829
0.2	200	0.25	800
0.22	219	0.27	811
0.24	230	0.31	742
0.26	250	0.33	758
0.28	257	0.37	695
0.3	273	0.39	700
0.32	281	0.442	636
0.34	285	0.46	620
0.36	297	0.51	582
0.38	302	0.53	570
0.39	303	0.54	561
0.4	306	0.58	528



PRUEBA DE DESLIZAMIENTO DE GENERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES





ANEXO – VI

**PROGRAMA EN MATLAB DE CAPABILIDAD PARA
GENERADORES SÍNCRONOS**

```

function capavilidad012
SS.f=figure('Resize','off','WindowStyle','normal','Name','CURVA DE
CAPABILIDAD',...
    'NumberTitle','off','units','pixels','Position',[80 80 1250 600]);
SS.ax=axes('units','pixels','Position',[410 60 600 510]);
ar=110;
SS.bg1 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[10
320+80+ar 150 60]);
SS.bg2 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[10
240+80+ar 150 80]);
SS.bg3 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[10
180+80+ar 150 60]);
SS.bg4 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[160
240+80+ar 190 140]);
SS.bg5 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[160
180+80+ar 190 60]);
SS.bg6 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[10 120+ar
340 140]);
SS.bg7 = uibuttongroup('Visible','on','units','pixels','Position',[870+180
210+ar 170 250]);
%-----
SS.pb1=icontrol(SS.bg5,'Style','pushbutton','string','Trazar
carta','position',[100 10 80 40],'Callback',{@TrazarCarta,SS});
%-----
SS.rb1=icontrol(SS.bg1,'Style','radiobutton','string','Polos
Lisos','position',[20 40-20 100 25],'Callback',{@PL,SS});
SS.rb2=icontrol(SS.bg1,'Style','radiobutton','string','Polos
Salientes','position',[20 20-20 100 25],'Callback',{@PS,SS});
SS.rb3=icontrol(SS.bg2,'Style','radiobutton','string','Europea','position',[2
0 60-20 100 25]);
SS.rb4=icontrol(SS.bg2,'Style','radiobutton','string','Americana','position',
[20 40-20 100 25]);
SS.rb5=icontrol(SS.bg2,'Style','radiobutton','string','Motor','position',[20
20-20 100 25]);
SS.rb6=icontrol(SS.bg3,'Style','radiobutton','string','ohm/fase','position',[
20 40-20 200 25]);
SS.rb7=icontrol(SS.bg3,'Style','radiobutton','string','P.U.','position',[20
20-20 200 25]);
SS.rb8=icontrol(SS.bg5,'Style','radiobutton','string','VA','position',[20 40-
20 50 25],'Callback',{@VA,SS});
SS.rb9=icontrol(SS.bg5,'Style','radiobutton','string','P.U.','position',[20
20-20 50 25],'Callback',{@PU,SS});
%-----
SS.rb10=icontrol(SS.bg7,'Style','checkbox','string','Limite del
Estator','position',[10 240-20 140 25],'Callback',{@UNITARIO,SS},'Value',1);
SS.rb11=icontrol(SS.bg7,'Style','checkbox','string','Factor de
Potencia','position',[10 220-20 140 25],'Callback',{@FPO,SS},'Value',1);
SS.rb12=icontrol(SS.bg7,'Style','checkbox','string','Puntos de
Intersección','position',[10 200-20 140 25],'Callback',{@hc,SS},'Value',1);
%-----
texto01=icontrol(SS.bg1,'Style','text','string','Generador','position',[20
60-18 60 15],'ForegroundColor','b');
texto02=icontrol(SS.bg2,'Style','text','string','Convención ','position',[20
80-18 60 15],'ForegroundColor','b');
texto03=icontrol(SS.bg3,'Style','text','string','Graficas','position',[20 60-
18 60 15],'ForegroundColor','b');
texto04=icontrol(SS.bg4,'Style','text','string','Ingreso
Datos','position',[20 122 70 15],'ForegroundColor','b');
texto05=icontrol(SS.bg5,'Style','text','string','Tipo Datos','position',[20
60-18 60 15],'ForegroundColor','b');
texto06=icontrol('Style','text','FontWeight','bold','string','Ingreso de
Datos','position',[90 460+110 200 25],'ForegroundColor','k','FontSize',12);
%-----
mv=-201;
mh=-160;
SS.ed1=icontrol(SS.bg4,'Style','edit','string','','position',[260+mh 300+mv
80 20]);
SS.ed2=icontrol(SS.bg4,'Style','edit','string','','position',[260+mh 280+mv
80 20]);
SS.ed3=icontrol(SS.bg4,'Style','edit','string','','position',[260+mh 260+mv
80 20]);
SS.ed4=icontrol(SS.bg4,'Style','edit','string','','position',[260+mh 240+mv
80 20]);
SS.ed5=icontrol(SS.bg4,'Style','edit','string','','position',[260+mh 220+mv
80 20]);
%-----

```

```

SS.edt1=icontrol(SS.bg4,'Style','text','string','Potencia(VA)','position',[16
0+mh 300+mv 100 20]);
SS.edt2=icontrol(SS.bg4,'Style','text','string','Tensión.fase(V)','position',
[160+mh 280+mv 100 20]);
SS.edt3=icontrol(SS.bg4,'Style','text','string','factor.potencia','position',
[160+mh 260+mv 100 20]);
SS.edt4=icontrol(SS.bg4,'Style','text','string','Xd(ohm/fase)','position',[16
0+mh 240+mv 100 20]);
SS.edt5=icontrol(SS.bg4,'Style','text','string','Xq(ohm/fase)','position',[16
0+mh 220+mv 100 20]);
%-----
%RESULTADOS
SS.ed6= uicontrol(SS.bg6,'Style','edit','string','','position',[260+mh-30
300+mv 120 20]);
SS.ed7= uicontrol(SS.bg6,'Style','edit','string','','position',[260+mh-30
280+mv 120 20]);
SS.ed8= uicontrol(SS.bg6,'Style','edit','string','','position',[260+mh-30
260+mv 120 20]);
SS.ed9= uicontrol(SS.bg6,'Style','edit','string','','position',[260+mh-30
240+mv 120 20]);
SS.ed10=icontrol(SS.bg6,'Style','edit','string','','position',[260+mh-30
220+mv 120 20]);
%-----
SS.edt6 =icontrol(SS.bg6,'Style','text','string','Ia','position',[160+mh-10
300+mv 80 20]);
SS.edt7
=icontrol(SS.bg6,'Style','text','string','angulo.Ia','position',[160+mh-10
280+mv 80 20]);
SS.edt8 =icontrol(SS.bg6,'Style','text','string','E','position',[160+mh-10
260+mv 80 20]);
SS.edt9
=icontrol(SS.bg6,'Style','text','string','angulo.E','position',[160+mh-10
240+mv 80 20]);
SS.edt10=icontrol(SS.bg6,'Style','text','string','Vx','position',[160+mh-10
220+mv 80 20]);
SS.co=1;
%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
function []=PL(varargin)
SS.rb13.Visible='off';
SS.rb14.Visible='off';
SS.rb15.Visible='off';
SS.rb16.Visible='off';
SS.rb17.Visible='off';
SS.rb18.Visible='off';
SS.rb19.Visible='off';
SS.rb20.Visible='off';
SS.rb21.Visible='off';
%-----
SS.rb22=icontrol(SS.bg7,'Style','check','string','CO','position',[10 180-
20 50 25],'Callback',{@CO,SS},'Value',1);
SS.rb23=icontrol(SS.bg7,'Style','check','string','CA','position',[10 160-
20 50 25],'Callback',{@CA,SS},'Value',1);
SS.rb24=icontrol(SS.bg7,'Style','check','string','OA','position',[10 140-
20 50 25],'Callback',{@OA,SS},'Value',1);
%SS.hCO=
%SS.hCA=
%SS.hOA=
SS.co=1;
end
%-----
function []=PS(varargin)
if SS.co==1

SS.rb13=icontrol(SS.bg7,'Style','check','string','CD:Corriente.CC.en.vacio','
position',[10 180-20 160 25],'Callback',{@CD,SS},'Value',1);

SS.rb14=icontrol(SS.bg7,'Style','check','string','OD:Corriente.Campo','positi
on',[10 160-20 140 25],'Callback',{@OD,SS},'Value',1);

SS.rb15=icontrol(SS.bg7,'Style','check','string','DB:Corriente.CC.plena.carga
','position',[10 140-20 160 25],'Callback',{@DB,SS},'Value',1);
SS.rb16=icontrol(SS.bg7,'Style','check','string','OG:DB','position',[10
120-20 140 25],'Callback',{@OG,SS},'Value',1);

SS.rb17=icontrol(SS.bg7,'Style','check','string','AB:Corriente.Armadura','pos
ition',[10 100-20 160 25],'Callback',{@AB,SS},'Value',1);

```

```

SS.rb18=icontrol(SS.bg7,'Style','check','string','AH:Id','position',[10
80-20 160 25],'Callback',{@AH,SS},'Value',1);

SS.rb19=icontrol(SS.bg7,'Style','check','string','HG:Iq.Xq','position',[10
60-20 160 25],'Callback',{@HG,SS},'Value',1);

SS.rb20=icontrol(SS.bg7,'Style','check','string','GB:Iq.Xd','position',[10
40-20 160 25],'Callback',{@GB,SS},'Value',1);

SS.rb21=icontrol(SS.bg7,'Style','check','string','SemiCirculo','position',[10
20-20 160 25],'Callback',{@hcp,SS},'Value',1);
SS.co=SS.co+1;
end
end
%-----
function []=VA(varargin)
SS.edt1.String='Potencia(VA)';
SS.edt2.String='Tensión.fase(V)';
SS.edt3.String='factor.potencia';
SS.edt4.String='Xd(ohm/fase)';
SS.edt5.String='Xq(ohm/fase)';
SS.rb6.Value=1;
end
%-----
function []=PU(varargin)
SS.edt1.String='Potencia(P.U)';
SS.edt2.String='Tensión.fase(P.U)';
SS.edt3.String='factor.potencia';
SS.edt4.String='Xd(P.U)';
SS.edt5.String='Xq(P.U)';
SS.rb7.Value=1;
end
%-----
function []=UNITARIO(varargin)
V=get(SS.rb10,'Value');
for kp=1:length(SS.hu)
if V==1
SS.hu(kp).Visible='on';
else
SS.hu(kp).Visible='off';
end
end
end
%-----
function []=FPO(varargin)
V=get(SS.rb11,'Value');
for kp=1:length(SS.hfpp)
if V==1
SS.hfpp(kp).Visible='on';
SS.hfpn(kp).Visible='on';
SS.hfppt(kp).Visible='on';
SS.hfppnt(kp).Visible='on';
else
SS.hfpp(kp).Visible='off';
SS.hfpn(kp).Visible='off';
SS.hfppt(kp).Visible='off';
SS.hfppnt(kp).Visible='off';
end
end
end
%-----
function []=hc(varargin)
V=get(SS.rb12,'Value');
for kp=1:length(SS.hc)
if V==1
SS.hc(kp).Visible='on';
else
SS.hc(kp).Visible='off';
end
end
end
%-----
function []=CD(varargin)
V=get(SS.rb13,'Value');
if V==1
SS.hCD.Visible='on';

```

```

else
SS.hCD.Visible='off';
end
end
%-----
function []=OD(varargin)
V=get(SS.rb14,'Value');
if V==1
SS.hOD.Visible='on';
else
SS.hOD.Visible='off';
end
end
%-----
function []=DB(varargin)
V=get(SS.rb15,'Value');
if V==1
SS.hDB.Visible='on';
else
SS.hDB.Visible='off';
end
end
%-----
function []=OG(varargin)
V=get(SS.rb16,'Value');
if V==1
SS.hOG.Visible='on';
else
SS.hOG.Visible='off';
end
end
%-----
function []=AB(varargin)
V=get(SS.rb17,'Value');
if V==1
SS.hAB.Visible='on';
else
SS.hAB.Visible='off';
end
end
%-----
function []=AH(varargin)
V=get(SS.rb18,'Value');
if V==1
SS.hAH.Visible='on';
else
SS.hAH.Visible='off';
end
end
%-----
function []=HG(varargin)
V=get(SS.rb19,'Value');
if V==1
SS.hHG.Visible='on';
else
SS.hHG.Visible='off';
end
end
%-----
function []=GB(varargin)
V=get(SS.rb20,'Value');
if V==1
SS.hGB.Visible='on';
else
SS.hGB.Visible='off';
end
end
%-----
function []=hcp(varargin)
V=get(SS.rb21,'Value');
if V==1
SS.hcp.Visible='on';
else
SS.hcp.Visible='off';
end
end
end

```



```

Xq=str2double(get(SS.ed5,'String'));
if S<=5
    SS.rb9.Value=1;
    SS.rb7.Value=1;
end
if get(SS.rb9,'Value')==1
    Xd=3*Vf^2*Xd/S;%pu
    Xq=3*Vf^2*Xq/S;%pu
end
result=1;%get(SS.ch,'Value');
if get(SS.rb6,'Value')==1
    val=S;
else
    val=1;
end
if isnan(S) || isnan(Vf) || isnan(Xd) || isnan(Xq) || isnan(fp)
    errordlg('Se deben introducir valores numéricos');
return
end
if S<=0 || Vf<=0 || Xd<=0 || Xq<=0 || fp<=0
    errordlg('Los Valores introducidos deben ser positivos y mayores a
0');
return
end
if fp>1
    errordlg('El factor de potencia debe ser igual o menor a uno');
return
end
if Xq>Xd
    errdlg('Xd debe ser mayor a Xq');
return
end
pol_sal_basic(S,Vf,Xd,Xq,fp,result,p,direc,val)
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function pol_lis_basic(S,Vf,fp,Xs,result,p,direc,val)
[Vx E]=CalcIni_pol_lis(S,Vf,Xs,fp);
u=pu(Vx);
[Vx E Cx Cy Ox Oy Ax Ay Dx]=Coordenadas_pol_lis(Vf,E,Vx,u);
[x y]=fig_cart_lis(Vx,E,Cx,Cy,Ox,Oy,Ax,Ay,Dx,fp,S,result,p,direc,val);
%limites_pol_lis(Vx,E,Cx,Cy,Ox,Oy,Ax,Ay,Dx,x,y);
%limites_pol_sal(Vx,E,Cx,Cy,Ox,Oy,Ax,Ay,Dx,x,y);
%Limit_Ia_pol_lis(Ox,Oy,Vx,px,Jx,val)
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [Vx E]=CalcIni_pol_lis(S,Vf,Xs,fp)
Ia=S/(3*Vf);
Ia=Ia*exp(-1j*acos(fp));
Vx=Xs*1j*Ia;
E=Vf+Vx;
set(SS.ed6,'String',num2str(round(Ia,3)));
set(SS.ed7,'String',round(angle(Ia)*180/pi,3));
set(SS.ed8,'String',num2str(round(E,3)));
set(SS.ed9,'String',round(angle(E)*180/pi,3));
set(SS.ed10,'String',num2str(round(Vx,3)));
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function u=pu(Vx)
u=1/abs(Vx);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [Vx E Cx Cy Ox Oy Ax Ay Dx]=Coordenadas_pol_lis(Vf,E,Vx,u)
Vf=Vf*u;
Vx=Vx*u;
E=E*u;
Cx=-Vf; % tension eficaz
Cy=0;
Ox=0;
Oy=0;
Ax=real(E)+Cx; %real de E + tension eficaz
Ay=imag(E);
Dx=abs(E)-abs(Vf); %absoluto de E + absoluto tension eficaz
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [x
y]=fig_cart_lis(Vx,E,Cx,Cy,Ox,Oy,Ax,Ay,Dx,fp,S,result,p,direc,val)

```

```

hold(SS.ax, 'off');
h1=Limit_If_pol_lis(Cx,Cy,E,Dx,Ax,val);% limite del estator
hold(SS.ax, 'on');
grid(SS.ax, 'on');
%-----
if direc==2
    rotate(h1,[0 0 1],90,[0 0 0]);
    rotate(h1,[0 1 0],180,[0 0 0]);
elseif direc==3
    rotate(h1,[0 0 1],90,[0 0 0])
end
%-----
if abs(Cx*.9)<=1
    [x y j Jx]=coord_est_pol_lis(Cx);
    if y(j)>fp
        k=xpact(fp,y)
        px=x(k);
    end
    h2=Limit_Est_pol_lis(x,y,k,val); %limite estabilidad
    %.....
    if direc==2
        rotate(h2,[0 0 1],90,[0 0 0]);
        rotate(h2,[0 1 0],180,[0 0 0])
    elseif direc==3
        rotate(h2,[0 0 1],90,[0 0 0]);
    end
    %.....
    if y(j)<fp
        %load('xy_pol_lis')
        tt=linspace(0,2*pi,1001);
        xl=sin(tt);
        yl=cos(tt);
        k=xpact(fp,k,yl);
        px=xl(k);
        h3=Limit_Ia_pol_lis(Ox,Oy,Vx,px,Jx,val); %limite
    %-----
    if direc==2
        rotate(h3,[0 0 1],90,[0 0 0])
        rotate(h3,[0 1 0],180,[0 0 0])
    elseif direc==3
        rotate(h3,[0 0 1],90,[0 0 0])
    end
    end
else
    [x y]=coord_est_pol_lis(Cx);
    k=xpact(fp,1,yl);
    px=xl(k);
    h3=Limit_Ia_pol_lis(Ox,Oy,Vx,px,-1,val);
    if direc==2
        rotate(h3,[0 0 1],90,[0 0 0])
        rotate(h3,[0 1 0],180,[0 0 0])
    elseif direc==3
        h3=Limit_Ia_pol_lis(Ox,Oy,Vx,px,-1,val);
        rotate(h3,[0 0 1],90,[0 0 0])
    end
    end
    Cx=-1/.9;
end
%.....
h4=plot(SS.ax,[px Ax]*val,[fp fp]*val,'b','LineWidth',3);
if direc==2
    rotate(h4,[0 0 1],90,[0 0 0])
    rotate(h4,[0 1 0],180,[0 0 0])
elseif direc==3
    rotate(h4,[0 0 1],90,[0 0 0])
end
h5=plot(SS.ax,[0 0]*val,[-0.02 fp+0.02]*val,'--k','LineWidth',1.5);
if direc==2% aumentado
    rotate(h5,[0 0 1],90,[0 0 0])
    rotate(h5,[0 1 0],180,[0 0 0])
elseif direc==3
    rotate(h5,[0 0 1],90,[0 0 0])
end
h6=plot(SS.ax,[Cx+0.1 Dx]*val,[0 0]*val,'k','linewidth',3);
if direc==2
    rotate(h6,[0 0 1],90,[0 0 0])
    rotate(h6,[0 1 0],180,[0 0 0])
end

```

```

elseif direc==3
rotate(h6,[0 0 1],90,[0 0 0])
end
title('Carta de Operación','fontsize',14);
if direc==1
if val==S
ylabel('Potencia Activa (Watts)','fontsize',12');
xlabel('Potencia Reactiva (VAR''s)','fontsize',12);
elseif val==1
ylabel('Potencia Activa (p.u.)','fontsize',12');
xlabel('Potencia Reactiva (p.u.)','fontsize',12);
end
elseif direc==2||direc==3
if val==S
xlabel('Potencia Activa (Watts)','fontsize',12');
ylabel('Potencia Reactiva (VAR''s)','fontsize',12);
elseif val==1
xlabel('Potencia Activa (p.u.)','fontsize',12');
ylabel('Potencia Reactiva (p.u.)','fontsize',12);
end
end
if result==1
p=sortrows(p,2);
p=p/S;
h7=plot(SS.ax,p(:,2)*val,p(:,1)*val,'k-
.o','linewidth',2.5,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','y');
if direc==2
rotate(h7,[0 0 1],90,[0 0 0]);
rotate(h7,[0 1 0],180,[0 0 0]);
elseif direc==3
rotate(h7,[0 0 1],90,[0 0 0]);
end
end
%graficas-----
P=[0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1];
Q=sin(acos(P));
tu=-pi/2:pi/16:pi/2;
for kp=1:length(P)
SS.hfpp(kp,1)=plot(SS.ax,[0 Q(kp)*val],[0 P(kp)*val],'--
','Color','k');
SS.hfpn(kp,1)=plot(SS.ax,[0 -Q(kp)*val],[0 P(kp)*val],'--
','Color','k');
xu=P(kp)*val*sin(tu);
yu=P(kp)*val*cos(tu);
SS.hu(kp,1)=plot(SS.ax,xu,yu,'--','Color','r');
SS.hfppt(kp,1)=text(Q(kp)*val,P(kp)*val,num2str(P(kp)));
SS.hfpnt(kp,1)=text(-Q(kp)*val,P(kp)*val,num2str(P(kp)));
if kp==length(P)
%SS.hfppnt(kp,1)=text(SS.ax,-Q(kp)*val,P(kp)*val,'');
SS.hfppnt(kp).String='';
end
end
if direc==2
rotate(SS.hfpp,[0 0 1],90,[0 0 0]);
rotate(SS.hfpp,[0 1 0],180,[0 0 0]);
rotate(SS.hfpn,[0 0 1],90,[0 0 0]);
rotate(SS.hfpn,[0 1 0],180,[0 0 0]);
rotate(SS.hu,[0 0 1],90,[0 0 0]);
rotate(SS.hu,[0 1 0],180,[0 0 0]);
elseif direc==3
rotate(SS.hfpp,[0 0 1],90,[0 0 0]);
rotate(SS.hfpn,[0 0 1],90,[0 0 0]);
rotate(SS.hu,[0 0 1],90,[0 0 0]);
else
SS.hc=plot(SS.ax,0,0);
SS.hc(1)=plot(SS.ax,Ox*val,Oy*val,'o','Color','k');%hO
SS.hc(2)=plot(SS.ax,Cx*val,Cy*val,'o','Color','k');%hA
SS.hc(3)=plot(SS.ax,Dx*val,0*val,'o','Color','k');%hA
SS.hc(4)=plot(SS.ax,Ax*val,Ay*val,'o','Color','k');%hA
SS.hCO=plot(SS.ax,[Cx Ox]*val,[Cy Oy]*val,'-
','Color','b','LineWidth',1.2);%hCD
SS.hCA=plot(SS.ax,[Cx Ax]*val,[Cy Ay]*val,'-
','Color','b','LineWidth',1.2);%hCD
SS.hOA=plot(SS.ax,[Ox Ax]*val,[Oy Ay]*val,'-
','Color','b','LineWidth',1.2);%hCD
end
end

```



```

angE=angle(E);
Id=Ia*sin(angfp+angE);
angId=pi/2-angE;
Iq=Ia*cos(angfp+angE);
angIq=angE;
Id=Id*exp(-1j*angId);
Iq=Iq*exp(1j*angIq);
Ia=Ia*exp(-1j*angfp);
Vx=Ia*1j*Xd;
E=Vf+1j*Xd*Id+1j*Xq*Iq;
set(SS.ed6, 'String', num2str(round(Ia,3)));
set(SS.ed7, 'String', round(angfp*180/pi,3));
set(SS.ed8, 'String', num2str(round(E,3)));
set(SS.ed9, 'String', round(angE*180/pi,3));
set(SS.ed10, 'String', num2str(round(Vx,3)));
end
%-----
function [Ox Oy Ax Ay Hx Hy Gx Gy Dx Dy Bx By Cx
Cy]=Coordenadas_pol_sal(Vf,E,Ia,Id,Xd,u)
Vf=Vf*u;
Ox=-Vf;
Oy=0;
Ax=0;
Ay=0;
Vd=Id*1j*Xd*u;
Hx=real(Vd)+Ax;
Hy=imag(Vd);
Vxd=Ia*1j*Xd*u;
Bx=real(Vxd)+Ax;
By=imag(Vxd);
E=E*u;
Gx=real(E)+Ox;
Gy=imag(E);
Dx=Ox-(Gx-Bx);
Dy=Oy+(By-Gy);
m=(By-Dy)/(Bx-Dx);
Cx=Dx-Dy/m;
Cy=0;
end
%-----
function
fig_cart_sal(E,Vx,Ox,Oy,Dx,Dy,Bx,By,Gx,Gy,Hx,Hy,Ax,Ay,Cx,Cy,u,fp,S,result,p,di
rec,val)
hold(SS.ax, 'off');
h1=plot(SS.ax,[0 0]*val,[-0.02 fp+0.02]*val,'--k','linewidth',1.5);%linea
en las abscisas
hold(SS.ax, 'on');
grid(SS.ax, 'on');
%-----
if direc==2
rotate(h1,[0 0 1]*val,90,[0 0 0]*val)
rotate(h1,[0 1 0]*val,180,[0 0 0]*val)
elseif direc==3
rotate(h1,[0 0 1]*val,90,[0 0 0]*val)
end
%-----
ang=atan((Dy-Cy)/(Dx-Cx));
E=E*u;
[x y]=limacon(Cx,Ox,Oy,E,ang);
a=x(1);
h2=Limit_If_pol_sal(x,y,val);%grafica limite estator
if direc==2
rotate(h2,[0 0 1],90,[0 0 0])
rotate(h2,[0 1 0],180,[0 0 0])
elseif direc==3
rotate(h2,[0 0 1],90,[0 0 0])
end
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
% if abs(Ox)<=1
[x y j Jx t p]=cord_est_pol_sal(Cx,Ox,Oy,E);
k=j;
if y(j)>fp
k=xpact(fp,y);
px=x(k);
end
[h31 h32]=Limit_Est_pol_sal(x,y,k,t,Cx,Ox,Oy,val);

```

```

if direc==2
    rotate(h31,[0 0 1],90,[0 0 0])
    rotate(h31,[0 1 0],180,[0 0 0])
    rotate(h32,[0 0 1],90,[0 0 0])
    rotate(h32,[0 1 0],180,[0 0 0])
elseif direc==3
    rotate(h31,[0 0 1],90,[0 0 0])
    rotate(h32,[0 0 1],90,[0 0 0])
end
b=Ox-Cx*0.05;
if y(j)<fp
    %-----
    %load('xy_pol_lis')
    tt=linspace(-pi/2,pi/2,1001);
    xl=sin(tt);
    yl=cos(tt);
    %-----
    k=xpact(fp,yl);%
    px=xl(k);
    h4=Limit_Ia_pol_sal(Vx,px,Jx,u,val);
if direc==2
    rotate(h4,[0 0 1],90,[0 0 0])
    rotate(h4,[0 1 0],180,[0 0 0])
elseif direc==3
    rotate(h4,[0 0 1],90,[0 0 0])
end
end
% else
% load('xy_pol_lis')
% tt=linspace(0,2*pi,1001);
% xl=sin(tt);
% yl=cos(tt);
% b=xl(1);
% k=xpact(fp,1,yl);
% k=xpact(1,yl);
% px=xl(k);
% h4=Limit_Ia_pol_sal(Vx,px,-1,u,val);
% if direc==2
%     rotate(h4,[0 0 1],90,[0 0 0])
%     rotate(h4,[0 1 0],180,[0 0 0])
% elseif direc==3
%     rotate(h4,[0 0 1],90,[0 0 0])
% end
% end
h5=plot(SS.ax,[px Bx]*val,[fp fp]*val,'b','LineWidth',3);
%.....
if direc==2
    rotate(h5,[0 0 1],90,[0 0 0])
    rotate(h5,[0 1 0],180,[0 0 0])
elseif direc==3
    rotate(h5,[0 0 1],90,[0 0 0])
end
%.....
h6=plot(SS.ax,[b a]*val,[0 0],'k','linewidth',3);
%.....
if direc==2
    rotate(h6,[0 0 1],90,[0 0 0])
    rotate(h6,[0 1 0],180,[0 0 0])
elseif direc==3
    rotate(h6,[0 0 1],90,[0 0 0])
end
%.....
title('Carta de Operación','fontsize',14)
if direc==1
    if val==s
        ylabel('Potencia Activa (Watts)','fontsize',12')
        xlabel('Potencia Reactiva (VAr''s)','fontsize',12)
    elseif val==1
        ylabel('Potencia Activa (p.u.)','fontsize',12')
        xlabel('Potencia Reactiva (p.u.)','fontsize',12)
    end
elseif direc==2||direc==3
    if val==s
        xlabel('Potencia Activa (Watts)','fontsize',12')
        ylabel('Potencia Reactiva (VAr''s)','fontsize',12)
    elseif val==1

```



```

        SS.hAH=plot(SS.ax,[Ax Hx]*val,[Ay Hy]*val,'-
','Color','b','LineWidth',1.2);%hCD
        SS.hHG=plot(SS.ax,[Hx Gx]*val,[Hy Gy]*val,'-
','Color','b','LineWidth',1.2);%hCD
        SS.hGB=plot(SS.ax,[Gx Bx]*val,[Gy By]*val,'-
','Color','b','LineWidth',1.2);%hCD
        SS.hOG=plot(SS.ax,[Ox Gx]*val,[Oy Gy]*val,'-
','Color','b','LineWidth',1.2);%hCD
        %rotate(SS.hh,[0 0 1],90,[0 0 0]);
        rcp=abs(Cx-Ox)/2;
        tcp=-pi/2:pi/16:pi/2;
        xcp=rcp*sin(tcp)+Cx+rcp;
        ycp=rcp*cos(tcp);
        SS.hcp=plot(xcp*val,ycp*val,'Color','g');
    end
    axis(SS.ax,'equal');
    hold(SS.ax,'off');
    clear p;
    %SS.co=1;
end
%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
function h=Limit_If_pol_sal(xl,y1,val)
h=plot(SS.ax,xl*val,y1*val,'r','linewidth',3);
end
%-----
function [x y j Jx t p]=cord_est_pol_sal(Cx,Ox,Oy,E)
dx=-0.1;
R=0:abs(E)/1000:abs(E);
y=zeros(1,1001);
for i=1:1:1001
    [a b]=limacon(Cx,Ox,Oy,R(i),pi*.6);
    c=max(b)+dx
for j=1:1:1001
    if c<=b(j)
        x(i)=a(j);
        y(i)=b(j);
    break
end
end
end
p=polyfit(x,y,3)
x=min(x):abs(max(x)-min(x))/1000:max(x);
y=polyval(p,x);
dx=Cx*0.05;
a=real(Oy+(Cx+Ox)/2+(abs(Cx-Ox)/2)-dx-Ox)^(1/2)*((abs(Cx-Ox)/2)-dx-
(Cx+Ox)/2+Ox)^(1/2));
for i=1:1:1001
    if a-y(i)<0.
    break
end
end
t=i;
dx=Ox-x(i);
x=x+dx;
%load('xy_pol_lis')
tt=linspace(0,2*pi,1001);
xl=sin(tt);
yl=cos(tt);
a=0;
for i=1:1:1001
    for j=1:1:1001
        if abs(xl(i)-x(j))<0.001 && abs(yl(i)-y(j))<0.0008
            a=1;
            break
        end
    end
    if a~=0
        break
    end
end
if i==1001
    i=1;
end
Jx=xl(i);
end
%.....

```

```

function [h1 h2]=Limit_Est_pol_sal(x,y,j,t,Cx,Ox,Oy,val)
h1=plot(SS.ax,x(t:j)*val,y(t:j)*val,'g','linewidth',3);%limite de
estabilidad
clear x y
dx=Cx*0.05;
%[x y]=arco(a,b,r,x1,x2);
[x y]=arco((Cx+Ox)/2,Oy,(abs(Cx-Ox)/2)-dx,Ox,Ox-dx);
h2=plot(SS.ax,x*val,y*val,'g','Linewidth',3);
end
%.....
function h=Limit_Ia_pol_sal(Vx,px,Jx,u,val)
Vx=Vx*u;
[x y]=arco(0,0,abs(Vx),Jx,px);
h=plot(SS.ax,x*val,y*val,'m','LineWidth',3);
end
%.....
function [x y]=limacon(Cx,Ox,Oy,E,ang)
t=0:(ang*2)/500:ang*2;
A=((Cx+Ox)/2+cos(t)*(abs(Cx-Ox)/2));
B=(Oy+sin(t)*(abs(Cx-Ox)/2));
%A=((Cx+Ox)/2+(abs(Cx-Ox)/2));
%B=(Oy+(abs(Cx-Ox)/2));
E=abs(E);
%t=linspace(0,ang,length(t));%0:0.005:ang;
t=linspace(0,ang,length(t));%0:0.005:ang;
%t=0:0.005:ang;
a=E*cos(t);
b=E*sin(t);
x=A+a;
y=B+b;
end
%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
function [x y]=arco(a,b,r,x1,x2)
x=x1:(x2-x1)/1000:x2;
y=zeros([1 1001]);
for i=1:1:1001
    y(i)=real(b+(a+r-x(i))^(1/2)*(r-a+x(i))^(1/2));
end
end
%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
function k=xpact(fp,y)
for k=1:1:1001
    if abs(fp-y(k))<=0.001
        break
    end
end
end
end
%xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
end
end

```