



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E SCIENTIA HOMINIS SALUS "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**INTERFAZ GRÁFICA PARA EL MONITOREO DE LA
OPERACIÓN EN ESTADO ESTABLE DE LAS UNIDADES DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA DE LA CENTRAL COCA CODO
SINCLAIR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA ELÉCTRICA**

ANDREA PAOLA CHIMARRO ALOMOTO

andreachimarro@yahoo.es

DIRECTOR: DR. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA

jesus.jativa@epn.edu.ec

Quito, enero 2019

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Andrea Paola Chimarro Alomoto, bajo mi supervisión.

DR. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Andrea Paola Chimarro Alomoto, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

ANDREA PAOLA CHIMARRO ALOMOTO

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi familia Marcia, Fausto, Franklin, Carlos, Pamela, Blanca que forman parte de mi vida, porque siempre tuvieron las palabras necesarias para que me levante y siga adelante esto es para ustedes

Se lo dedico a mis abuelitos Olaria, Miguel y Segundo José que a pesar de que no están presenten en este momento, lo están en mi mente y en mi corazón; sé que de donde quiera que estén me están cuidando mucho.

Y también para una personita que algún día formara parte de mi vida y cuando lea esto sepa el esfuerzo que hice para dejar en alto a mi familia Chimarro Alomoto.

AGRADECIMIENTO

A mis padres Marcia y Fausto por confiar en mí y no dejar que desmaye en el camino siempre dándome ánimos y consejos para cumplir con este objetivo, porque son un gran ejemplo de superación en el cual siempre me base para conseguir lo que quiero y no rendirme, gracias padres por darme todo su amor, gracias por hacer que nunca me falte nada.

A Dios por darme fuerza, sabiduría y sobre todo darme la familia que tengo porque gracias a mi familia soy la persona que soy, gracias por poner en mi camino las personas y las circunstancias necesarias porque solo así aprendí a valorar lo que tengo y lo que quiero para mi vida.

A mi hermana Pamela que siempre me apoyo en los momentos más complicados de mi vida, gracias por escucharme, aconsejarme y seguir siendo mi respaldo durante todo este tiempo, hermanita eres la fuerza que necesito para seguir adelante, eres mi motivación para lograr grandes cosas en la vida y no rendirme hasta conseguirlo. Pamelita espero ser un buen ejemplo en tu vida para que sigas adelante y no te rindas, porque con tu carisma y forma de ser has sido mi ejemplo y mi orgullo, te amo hermanita.

A mi hermano Carlos por enseñarme a ver que la vida tiene muchos caminos unos fáciles y otros complicados, me enseñaste a escoger el más difícil, pero con la certeza de que al final tendré grandes recompensas por todo el esfuerzo y sacrificio que invertí, te doy las gracias porque por con las pequeñas conversaciones que teníamos me hiciste una mejor persona, me enseñaste a ver al mundo con sus pros y contras, a la distancia hermanito quiero darte las gracias por estar pendiente y no olvidarte de mí.

A mi hermano Franklin que por ser el mayor nos diste una guía para seguir nuestras vidas, gracias por los consejos en los momentos difíciles, gracias por enseñarme a soñar en grande eres un ejemplo de superación que siempre voy a tener en cuenta para mi vida profesional y personal. Eres mi orgullo porque has logrado alcanzar tus metas y aun así sigues siendo la misma persona humilde y carismática. Hermanito gracias por enseñarnos lo que somos capaces de lograr ahora es mi turno de demostrarlo.

A mis abuelas Blanca y Olaria, que con sus consejos y abrazos alegran mi vida, estoy muy orgullosa de ellas por todo lo que lograron conseguir en su vida son un ejemplo de humildad y lucha que llevare siempre en mi mente y mi corazón ambas me enseñaron a luchar por mis sueños y también me dieron la fuerza suficiente para no rendirme nunca.

A mi familia quienes han sido mi apoyo, mi motivación y mi ejemplo en la vida. Que siempre confiaron en mí y en mis capacidades.

A mis mejores amigos David T, Eduardo C, David V y Jenny T les doy las gracias por formar parte de esta etapa de mi vida, por ser siempre un apoyo en los buenos y malos momentos, espero que nuestra amistad siga como hasta ahora y por mucho tiempo más.

A ti mi vida JL, por todo el cariño y apoyo que me brindaste durante todo este tiempo, gracias por estar conmigo por creer en mí y en mis capacidades, por alegrarte con mis triunfos y preocuparte por mis problemas y más que nada por desear lo mejor para mi vida.

Al Dr. Jesús Játiva por estar pendiente de cada etapa de este trabajo, con su consejos y puntos de vista hicieron que este trabajo sea diferente, gracias doctor por ayudarme a culminar con esta etapa de mi vida por enseñarme a mirar las cosas desde otro punto de vista a pesar de las dificultades.

Al Ing. Daniel Correa por abrirme su apoyo y los recursos necesarios para que pueda realizar este trabajo sin inconvenientes, muchas gracias por la confianza y todo lo que hiciste, me diste la oportunidad de desarrollar un estudio de la central y de esa manera puse en práctica mis conocimientos.

Al Ing. Santiago Andocilla por ayudarme todo este tiempo en la central, gracias por brindarme tu ayuda, por preocuparte por mí, y sobre todo muchas gracias por brindarme lo necesario para que pueda terminar este trabajo.

A los operadores de la Central Coca Codo Sinclair por brindarme su amistad hacerme sentir una más de ellos muchas gracias por darme la oportunidad de conocerlos y poder aprender de ustedes.

Y en especial a la Escuela Politécnica Nacional por formarme como profesional y como persona, aprendí grandes cosas que me servirán a lo largo de mi vida, me brindaste conocimientos, amigos y experiencias que nunca olvidaré.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 Alcance.....	2
1.3 Descripción geográfica de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair	3
1.3.1 Estructuras principales	4
1.4 Equipos Existentes	9
1.4.1 Turbina	9
1.4.2 Generador	10
1.4.3 Regulador de velocidad	11
1.4.4 Sistema de excitación	14
1.4.5 Sistema de frenado	18
1.4.6 Servicios auxiliares	18
1.4.7 Transformador de elevación	22
1.4.8 Banco de baterías	23
1.4.9 Sistema de agua de enfriamiento	24
2. MARCO TEÓRICO.....	27
2.1 Generador sincrónico	27
2.1.1 Estructura del generador sincrónico	28
2.1.2 Análisis teórico de las curvas de capacidad	32
2.1.3 Curva de capacidad	35
2.2 Sistema de adquisición de datos	36

2.2.1	Symphony Plus de ABB	36
2.2.2	Creación de reportes	38
3.	METODOLOGÍA	65
3.1	Límites operativos de los generadores sincrónicos	65
3.1.1	Corriente de armadura máxima (calentamiento del estator)	65
3.1.2	Potencia máxima de la máquina motriz (turbina)	66
3.1.3	Potencia mínima de la máquina motriz	67
3.1.4	Límite por corriente de excitación (rotor)	72
3.1.5	Límite por corriente máxima de campo	74
3.1.6	Límite del margen de estabilidad en estado estable	75
3.1.7	Calentamiento localizado en el terminal del núcleo del hierro del estator 78	
3.1.8	Restricciones por servicios auxiliares	83
4.	INTERFAZ GRÁFICA Y MONITOREO	98
4.1	Desarrollo del diagrama funcional	98
4.1.1	Diagrama funcional del panel grupal	98
4.1.2	Diagrama funcional del panel individual	101
4.2	Descripción del GUIDE de MATLAB	102
4.2.1	Funcionamiento de la aplicación GUIDE	104
4.3	Detalle del programa	105
4.3.1	Interfaz gráfica del panel grupal	105
4.3.2	Interfaz gráfica del panel individual	107
4.3.3	Interfaz gráfica panel del operador	107
4.4	Resultados y Discusión	109
4.4.1	Zonas seguras de operación de las unidades	109
4.4.2	Relación entre las zonas seguras de operación y la curva de capacidad del fabricante	117
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
5.1	Conclusiones	120
5.2	Recomendaciones	123
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
7.	ANEXOS	127
	ANEXO I. Parámetros técnicos del generador de la central	127

ANEXO II. Consumo de los servicios auxiliares a diferentes valores de potencia	128
ANEXO III. Resumen de consumo de auxiliares de la unidad y de la central.....	138
ANEXO IV. Ecuaciones polinómicas para el análisis del límite de servicios auxiliares	141
ANEXO V. Código implementado en Matlab.....	143
ORDEN DE EMPASTADO	161

RESUMEN

En este proyecto se realiza una interfaz para presentar los lugares geométricos que definen las zonas seguras de operación de las unidades de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, con el fin de evaluar el estado de operación de las unidades de generación y así determinar si se encuentra dentro de las zonas seguras de operación. Para determinar estos límites se utilizan los parámetros eléctricos y mecánicos de las unidades.

La información se obtiene desde el sistema SCADA generando reportes de los cuales se importan los datos requeridos. Estos reportes se consiguen mediante el uso del Symphony Plus, WinSCP y AutoFTP y por medio de un código realizado en MATLAB se grafican las curvas. El código cuenta con tres tipos de escenarios donde el primer y segundo son de visualización, mientras que el tercero es de maniobra.

En el primer escenario se visualiza la zona segura de operación de las ocho unidades con sus respectivos puntos de operación, en el segundo escenario se visualiza la zona segura de operación de una unidad con mayor detalle, es decir que en este escenario se tiene información de corriente de excitación, voltaje de excitación, factor de potencia y voltaje en terminales; y, además del punto de operación de la unidad y un tercer escenario en el que se ingresan valores de potencia activa y reactiva para determinar si la maniobra de aumento o disminución de potencia solicitada al operador del centro de control se encuentra dentro de los rangos de operación de la unidad y de ser el caso proceder con la maniobra.

PALABRAS CLAVE: Coca Codo Sinclair, Zonas Seguras, Central Hidroeléctrica, Datos de SCADA, Aplicación en MATLAB.

ABSTRACT

In this project a graphical interface is carried out to present the geometric loci that define the secure zones of the units of the Coca Codo Sinclair hydroelectric power plant, in order to evaluate the operation status of the generation units and thus determine if it is within the safe area of operation. To determine these limits, the nominal parameters of the units are used.

The information is obtained from the SCADA system generating reports from which the required data are imported, these reports are obtained through the use of Symphony Plus, WinSCP, and AutoFTP software which through a code made in MATLAB the curves are plotted. The code has three scenarios where the first and second are visualization, while the third is maneuver.

In the first scenario shows the secure zones of the operation of the eight units with their respective operating points are displayed, in the second scenario shows the secure zones of the operation of a unit with specific information of excitation current, excitation voltage, power factor and voltage, in addition to the operation point of the unit and a third scenario in which values of active and reactive power are entered to determine if the maneuver of increase or decrease of power requested from the operator of the control center is within the operating ranges of the unit and, if applicable, proceed with the maneuver.

KEYWORDS: Coca Codo Sinclair, Safe Zones, Hydroelectric Plant, Data from SCADA, Application in MATLAB.

1. INTRODUCCIÓN

Las centrales hidroeléctricas cuentan con variedad de máquinas eléctricas y sistemas que permiten que cada central de generación opere dentro de valores establecidos. Sin embargo, se tiene un especial interés sobre los generadores que son los que proporcionan gran potencia, es por ello que debido a su importancia y costo las centrales de generación necesitan contar con una herramienta computacional que proporcione información en o fuera de línea de la máquina, ya que estas marcan las condiciones límites de operación.

La Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair cuenta con las protecciones necesarias para que en el caso de existir alguna falla en el sistema o en cualquiera de sus componentes actúen para regresar a sus valores límites pre establecidos, no obstante, esto no asegura la confiabilidad del aporte de potencia y energía que demandan las cargas eléctricas del Sistema Nacional Interconectado S.N.I, ni tampoco la seguridad de todos los componentes de cada una de las unidades de la central.

En tal sentido es necesario conocer las zonas seguras de operación de los generadores de la central, ya que de esa manera se puede conocer la influencia de los parámetros y condiciones de los componentes de la unidad en su operación; esta es una manera práctica y sencilla para determinar si el generador se encuentra funcionando dentro de sus límites. La curva de capacidad contribuye con información que a la larga permitirá mantener el tiempo de vida útil de la central así como de sus componentes.

Disponer de una herramienta computacional en la que se visualicen los límites de operación permitirá que el operador del centro de control tenga una intervención más adecuada de las unidades, del mismo modo podrá tomar decisiones importantes frente a cualquier contingencia o fallas del generador o del sistema.

Las zonas seguras de operación se encuentran delimitadas por: el límite de corriente de armadura, límite de corriente máxima y mínima de campo, límite de potencia activa máxima y mínima, límite de estabilidad en estado estable, límite por calentamiento localizado en el terminal del núcleo del hierro del estator, límites por servicios auxiliares. Las expresiones matemáticas de estos límites varían debido a su característica de fabricación y funcionamiento.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Realizar una interfaz gráfica en el software MATLAB, que asista en tiempo real al operador del centro de control de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, para mantener la seguridad de la central y de las unidades en su conjunto.

1.1.2 Objetivos específicos

Elaborar una interfaz gráfica que permita visualizar las restricciones mecánicas de potencia máxima y mínima de la turbina, las restricciones eléctricas de corrientes máximas y mínimas del rotor y del estator del generador, las restricciones en estado estable, así como las restricciones de sobre voltaje y bajo voltaje de los servicios auxiliares.

Presentar en tiempo real el punto de operación de potencia activa y reactiva en el plano cartesiano dentro de la curva de capacidad de la unidad de generación, mediante la extracción de las magnitudes pertinentes desde la base de datos del sistema SCADA, a través de una aplicación informática.

Alertar al operador mediante alarmas visibles o mensajes, en el caso de que el generador salga de sus límites operativos con el fin de que tome las medidas necesarias para mantener la seguridad de la unidad en particular y la central como conjunto.

1.2 Alcance

La interfaz gráfica para el monitoreo de la operación en estado estable de las unidades de generación eléctrica de la central Coca Codo Sinclair se realiza en el software MATLAB. Esta herramienta computacional despliega de manera gráfica los límites mecánicos y eléctricos de la unidad, central y sistema externo. Las restricciones mecánicas son mostradas como potencia máxima y mínima de la turbina, las restricciones eléctricas toman en cuenta a las corrientes máximas y mínimas del estator y rotor del generador, así como el límite de estabilidad en estado estable y los voltajes mínimo y máximo de los voltajes en las barras de los servicios auxiliares de las unidades de generación eléctrica.

El operador puede conocer en tiempo real la ubicación del punto de operación de potencia activa y reactiva en el plano cartesiano dentro de las zonas seguras de operación de la unidad en una computadora asociada a las consolas del centro de control de la central Coca Codo Sinclair.

Los datos operativos son descargados desde el sistema SCADA de la central mediante una aplicación informática en una hoja de cálculo, de donde son trasladados a la interfaz gráfica de monitoreo, para el cálculo de los límites operativos y el despliegue del punto (Q, P) en el plano cartesiano.

1.3 Descripción geográfica de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair

La Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair de 1500 MW se encuentra ubicada en las provincias de Napo y Sucumbíos, al noreste del Ecuador, en los cantones El Chaco y Gonzalo Pizarro, con su obra de captación ubicada en el río Coca, el cual aprovecha el potencial de los ríos Quijos y Salado [1].



Figura 1.1. Ubicación del proyecto [1]

La central inició su construcción en julio de 2010 y fue inaugurada el 18 de noviembre de 2016. Está compuesta por dos fases: la fase 1 conformada por las unidades 1 a la 4, mismas que fueron puestas en marcha en agosto de 2016, mientras que la fase 2 conformada por las unidades 5 a la 8, con su puesta en marcha en diciembre de 2016. La Central ha aportado al S.N.I. una energía neta de 13.613,50 GWh desde abril de 2016 hasta septiembre de 2018.

1.3.1 Estructuras principales

La central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair está clasificada como una central de pasada cuyo sistema hidráulico se muestra en la Figura 1.2. Las estructuras principales de la central hidroeléctrica incluyen la obra de captación, el túnel de conducción, el embalse compensador, dos tuberías de presión, la casa de máquinas subterránea, el patio de maniobras, el edificio de control, el teleférico, y un nuevo campamento permanente para el personal de operación y mantenimiento [2].

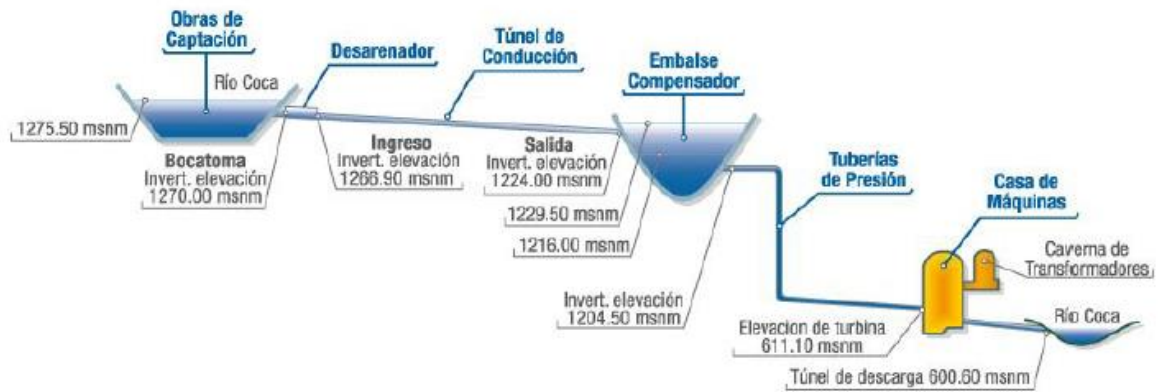


Figura 1.2. Esquema hidráulico de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair [2]

1.3.1.1 Obra de captación

La obra de captación está formada por un nivel de operación normal fijado en la cota 1.275,50 msnm y una altura sobre las cimentaciones aproximadamente de 13,5 m. Está conformada por un vertedero de ancho neto de 180 m, una capacidad máxima de descarga diseñada para 8.900 m³/s y una descarga catastrófica de 15.000 m³/s, una presa que posee un enrocamiento con pantalla de hormigón (CFRD) de 31,8 m de altura, cuyo objetivo es retener el agua del río.

Las principales estructuras de la obra de captación se describen a continuación:

Obra de toma (Bocatoma) está conformada por 16 canales de entrada y una toma ecológica que sirve también para limpieza de sedimentos, con un caudal de diseño de 222 m³/s, más un caudal necesario de 2,3 m³/s para la limpieza de los desarenadores.

Desarenador de tipo SEDICON, cuya función principal es controlar los sedimentos que ingresan desde la obra de toma hacia el túnel de conducción. Está constituido por ocho cámaras y compuertas de limpieza que permiten transportar el caudal captado hacia el embalse compensador.

Una estructura de aliviadero conformada por tres porciones: la porción de retención de agua que se encuentra en el estribo izquierdo, la estructura de descarga de excedencia

localizada en el centro del paleocauce y el canal de lavado de sedimentos que se encuentra en el estribo derecho; cuyo funcionamiento es el desfogue y limpieza de sedimentos, como se indica en la Figura 1.3.



Figura 1.3. Sistema SEDICON [2]

1.3.1.2 Túnel de conducción

El Túnel de Conducción de 24,83 km de longitud y un diámetro interior de 8,20 m, está totalmente revestido con dovelas de hormigón, diseñado para conducir a flujo libre, los caudales entrantes en la obra de captación hasta un máximo de 222 m³/s.

Se dispone de una compuerta de servicio en la salida del túnel de conducción, cuya operación de apertura/cierre es requerida cuando el embalse compensador o casa de máquinas tenga alguna falla o se produzca un rechazo de carga en casa de máquinas.

1.3.1.3 Presa y embalse compensador

La presa de retención de escombros está ubicada aguas arriba del embalse compensador cuya función principal es evitar el ingreso de escombros y sedimentos al embalse durante su operación.

El embalse, ubicado en el hecho de la quebrada Granadillas, es el reservorio que permite almacenar el agua proveniente de la obra de captación para la generación hidroeléctrica. Alimentada por un túnel de desvío, una presa de enrocado con cara de hormigón de 58 m de altura forma un volumen útil de 886.000 m³, cuando el espejo de agua está en la cota 1229,5 msnm. Este volumen contiene un incremento del 10% sobre el volumen real necesario de 802.000 m³, considerado como un volumen adicional de

seguridad para la operación adecuada. Por esta característica este es un embalse de regulación diaria.

1.3.1.4 Tubería de presión

Conformada por dos tuberías a presión desde el embalse compensador hasta la casa de máquinas. Cada túnel está revestido de hormigón en el tramo horizontal superior y vertical, en el tramo horizontal inferior revestido de hormigón con la particularidad de que el tramo final tiene revestimiento de una placa de acero. El caudal de diseño para cada tubería es de $139,20 \text{ m}^3/\text{s}$ [2].

Cada canal se bifurca en cuatro ramales revestidos de acero, en el extremo de cada ramal previo a la entrada del distribuidor de cada unidad están colocadas válvulas de seguridad tipo esférica. El caudal de diseño de cada ramal es de $34,8 \text{ m}^3/\text{s}$, la Figura 1.4 y la Tabla 1.1 muestran las dimensiones generales de los ramales y los canales.

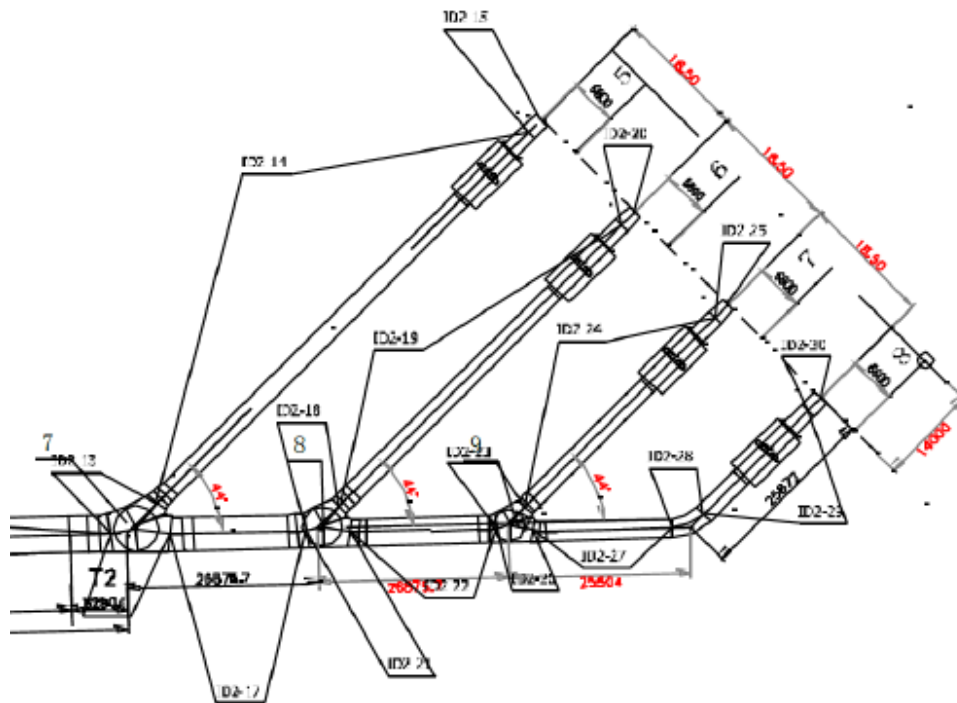


Figura 1.4. Dimensiones de ramales [2]

Tabla 1.1. Dimensiones de las tuberías de presión [3]

Descripción	Fase 1 unidad 1-4	Fase 2 unidad 5-8
Longitud del eje de la tubería [m]	1782,94	1856,34
Diámetros internos [m]	5,8	5,2
Tramo superior [m]	703,84	703,84
Codo superior [m]	47,12	47,12
Pozo vertical [m]	478,55	476,20
Codo inferior [m]	46,07	46,07
Tramo inferior [m]	507,049	583,11
Longitud del tramo blindado de acero [m]	326,15	406,15
Longitud total del tramo de bifurcación [m]	310,85	310,11
Tramo principal [m]	93,00	93,00
Tramo unidad 1 [m]	72,82	72,82
Tramo unidad 2 [m]	57,98	57,96
Tramo unidad 3 [m]	41,06	40,30
Tramo unidad 4 [m]	46,01	46,01

Cuando opera una sola unidad con caudal proveniente de una tubería de presión identificada como (1+1) para un caudal de 34,8 m³/s la pérdidas hidráulicas de altura no serán mayores a 1,66 m y si operan cuatro unidades en cada tubería se representa como (4+4) las pérdidas de altura no superan los 10,3 m para el caudal de 139,2 m³/s. Las caídas operativas para la operación de la central se indican en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Caídas operativas de la central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair [2]

Datos	Máximo	Nominal	Mínimo
Cotas Embalse (msnm)	1 229,5	1 225,5	1216
Caída Bruta (m)	618,40	614,4	604,9
Caída Neta (m) (1+1)	616,74	612,74	603,24
Caída Neta (m) (4+4)	608,10	604,1	594,27

1.3.1.5 Casa de máquinas

La casa de máquinas incluye la caverna de turbo-generadores, galería de barras, caverna de transformadores, subestación GIS, túnel de cables de 500 kV, túnel de descarga, túnel de drenaje y túnel de acceso.

En la casa de máquinas existen dos cavernas, la primera con 26 m de ancho, 46,8 m de altura y 212 m de longitud, para la instalación de las ocho unidades turbina generador de 187,5 MW y sus equipos auxiliares, mientras que, la segunda caverna con 19 m de ancho, 33,8 m de altura y 192 m de longitud tiene instalados los veinte y cuatro transformadores de unidad.

La caverna de transformadores es un túnel dividido en dos pisos. En el piso inferior se tienen instalados veinte y cuatro transformadores monofásicos de 69 MVA, $500/\sqrt{3}$ / 13,8 kV, más un transformador de reserva, en tanto que en el piso superior se localiza la subestación GIS.

El túnel de cables de 500 kV con una longitud de 520 m, va desde la caverna de transformadores hasta el patio de maniobras.

Las estructuras de servicios auxiliares de la casa de máquinas incluyen el patio de líneas de salida, edificio de control, cuartos de mantenimiento cuartos de generación diésel, tanque de diésel y centro de distribución de energía.

Túnel de drenaje

Los túneles de drenaje se distribuyen en dos pisos. El piso superior se conecta con el túnel de cables de alto voltaje. Las filtraciones de agua colectadas en este piso se extraen por medio de zanjas de drenaje, mientras que las colectadas en pisos inferiores se extraen hacia la descarga por medio de orificios de drenaje

Túnel de descarga

El objetivo principal del túnel de descarga es conducir el agua turbinada hacia el cauce del río, las ocho unidades convergen en el tramo principal, el cual se deriva finalmente al cauce del río. Se dispone de intercambiadores de calor en el tramo inicial, detrás de los condensadores de enfriamiento y en el techo se disponen de deflectores, por el cual fluye el aire cuando las cargas estén altas. Detrás de los deflectores se tienen instaladas las compuertas de cierre (stop log) para que funcione como vertedero de pared delgada, formando aguas arriba del mismo un colchón de agua de 1,80 m de altura, que impide el impacto del flujo sobre las unidades intercambiadoras de calor.

1.3.1.6 Patio de maniobras y edificio de control

En esta área está el patio de salida de líneas, el edificio de control y un área de talleres, el cual es el punto de interconexión con las dos líneas aéreas de transmisión de 500 kV.

En el patio de salida se tienen instalados dos posiciones para cada uno de los tres cables de 500 kV por circuito, con los bujes tipo exterior, seccionadores, transformadores de voltaje tipo capacitivo, pararrayos y los pórticos de arranque de las líneas aéreas. El pórtico constituye el límite de responsabilidad de la unidad de negocio Coca Codo Sinclair.

1.4 Equipos Existentes

1.4.1 Turbina

En la casa de máquinas de la central Coca Codo Sinclair se han instalado ocho turbinas Pelton de eje vertical, rodete simple con veinte y dos álabes en total, con seis inyectores y sus equipos asociados, que comprenden principalmente el regulador de velocidad y la válvula esférica de guardia como se muestra en la Figura 1.5 [2].

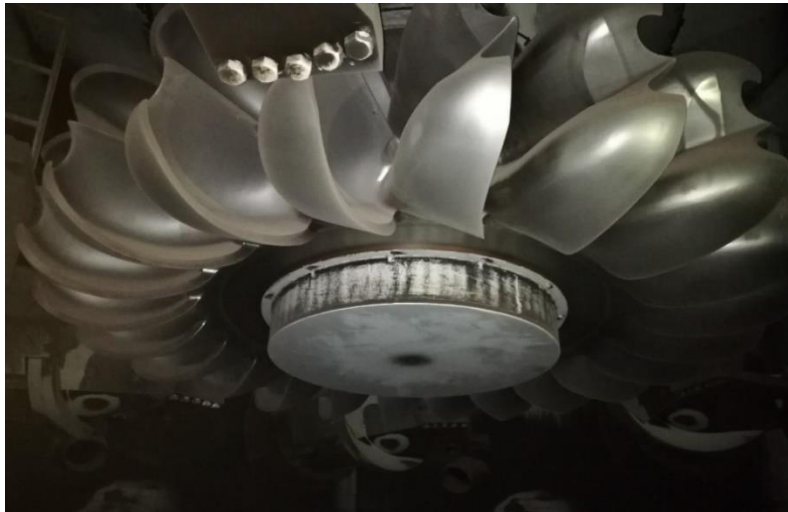


Figura 1.5. Turbina Pelton de eje vertical de la unidad 2

El eje principal de la turbina está conectado directamente al eje del generador, el sentido de rotación de la turbina es horaria. El peso combinado de las partes giratorias de la turbina y el generador más el empuje hidráulico axial sobre el rodete de la turbina es soportado por el cojinete de empuje del generador.

El sistema de cada turbina mostrado en la Figura 1.6, se compone principalmente de:

- Rodete
- Eje principal de la turbina
- Cojinete guía de la turbina
- Sello del eje principal
- Distribuidor
- Conjunto de inyectores
- Deflectores de chorro
- Rejillas de amortiguación

- Blindajes del pozo de la unidad generadora
- Sistema de tuberías embebidas

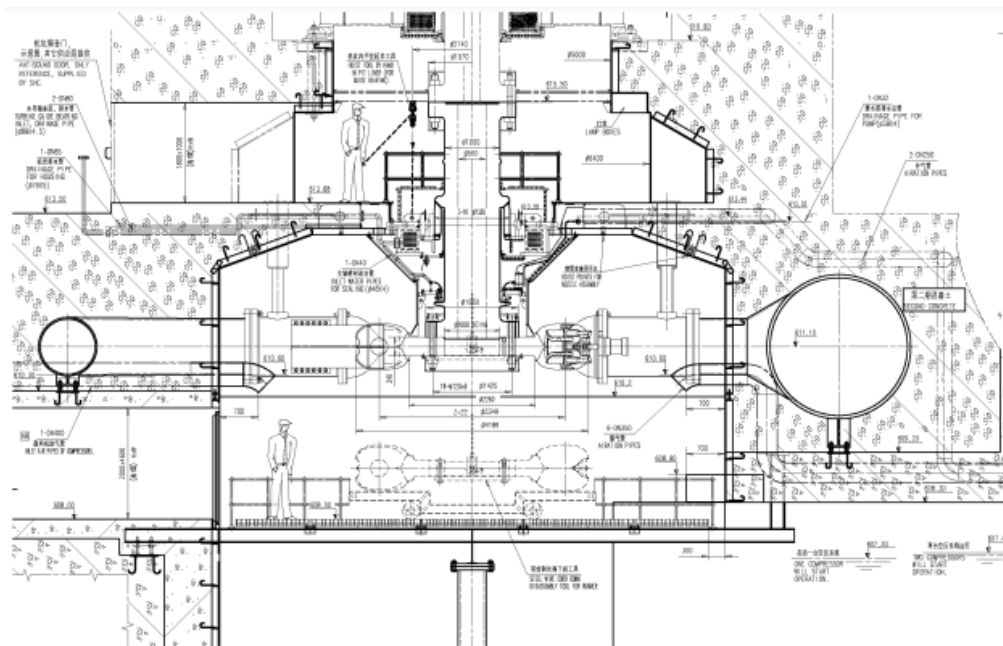


Figura 1.6. Disposición general de la turbina corte y planta

1.4.2 Generador

En la casa de máquinas de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair están instalados ocho generadores iguales de 205 MVA cada uno, como se indican en la Figura 1.7. El generador cuenta con las siguientes características: generador trifásico sincrónico, con eje vertical suspendido, refrigerado por circulación de aire de ciclo cerrado [2].

El generador instalado está compuesto por:

- Estator
- Rotor
- Cojinete guía superior
- Cojinete de empuje
- Cojinete guía inferior
- Ménsula superior e inferior
- Enfriadores de aire
- Sistema de frenos

- Sistema de excitación
- Dispositivo de conexión a tierra del neutro
- Sistema de protecciones contra incendios
- Equipos Auxiliares



Figura 1.7. Sala de generadores de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair

1.4.3 Regulador de velocidad

El sistema de regulación de velocidad permite regular y controlar de forma automática la unidad turbina-generador, bajo diferentes condiciones de trabajo, permitiendo realizar el arranque, parada y sincronización manual o automática de la unidad, además de regular la carga de la unidad y realizar la parada de emergencia debido a fallas, etc [4].

El sistema de regulación de velocidad comprende: gabinete digital, gabinete de control mecánico, dispositivos de presión de aceite (tanque colector de aceite, tanque colector aire-aceite, tanque de aceite de aire-aceite, tanque de aceite de fuga y aceite de turbina), dispositivo de ensamblado de parada de emergencia y tuberías como se muestra en la Figura 1.8.



Figura 1.8. Componentes del sistema del regulador de velocidad

El regulador de velocidad de la turbina hidráulica es uno de los equipos de control más importantes de la central cuyas funciones son:

- 1) Mantener constante las revoluciones de la unidad (regulación según la frecuencia)
- 2) Encargado del arranque, parada, sincronización, así como del aumento/disminución de la carga de la unidad. Durante la sincronización puede distribuir la carga a las distintas unidades con el fin de realizar los controles de potencia, nivel y frecuencia, es decir, control de velocidad y operación con la red aislada.
- 3) En caso de fallas/accidentes, es responsable de bajar rápidamente el deflector y cortar el flujo para parar las unidades con el fin de proteger la seguridad de las unidades y la central.

El regulador de velocidad tiene cuatro modos de control:

- Control de velocidad
- Control de caudal
- Control de potencia
- Control de nivel

Antes de la sincronización de la unidad al sistema eléctrico nacional, el regulador funciona bajo el modo de velocidad, luego el regulador puede elegir uno de los modos de control; y si usa el control de velocidad debe ser en el caso de operación con red aislada.

Modo de control de velocidad

El regulador ajusta automáticamente la apertura del inyector de acuerdo con la señal de control recibida de la unidad para que gire a velocidad nominal.

Modo de control de flujo

De acuerdo con el valor de ajuste de flujo, se calcula la cantidad de inyectores que requiera operar y la apertura requerida de los mismos según parámetros continuos de la turbina.

Modo de control de potencia

El regulador de velocidad ajusta el número de inyectores y la apertura que se requiere para su funcionamiento de acuerdo con la señal de realimentación entre la potencia real y la potencia ajustada.

Modo control de nivel

El regulador de velocidad ajusta el número de inyectores y su apertura requerida para su funcionamiento de acuerdo con la señal de realimentación entre el nivel real del embalse y el ajustado.

El gobernador tiene la capacidad de operar al mismo tiempo con dos, tres, cuatro y seis inyectores por lo cual se puede programar varias combinaciones de funcionamiento de acuerdo con la prioridad de operación de las unidades. En la Tabla 1.3 están las configuraciones posibles de funcionamiento de los inyectores.

El cambio de prioridad de funcionamiento de los inyectores permitirá tanto que las unidades como los inyectores tenga el mismo tiempo de funcionamiento y casi el mismo desgaste.

Tabla 1.3. Combinación de inyectores para el funcionamiento de la unidad [4]

Prioridad de funcionamiento	Dos inyectores	Tres inyectores	Cuatro inyectores
1	1-4	1-3-5	1-2-4-5
2	2-5	2-4-6	2-3-5-6
3	3-6	1-3-5	1-3-4-6
4	1-4	2-4-6	1-2-4-5
5	2-5	1-3-5	2-3-5-6
6	3-6	2-4-6	1-3-4-6

1.4.4 Sistema de excitación

El sistema de excitación de las unidades de la central Coca Codo Sinclair consiste en suministrar corriente de campo continua al rotor del generador sincrónico. La resistencia que ofrece el bobinado del rotor es fija por lo que variando su voltaje de alimentación se logra aumentar o disminuir la corriente que circula por el rotor de manera forzada. Con ello se logra variar la intensidad de campo magnético de acoplamiento, al igual que excita también desexcita la unidad [5], [6].

El sistema de regulador de voltaje tiene como objetivo mantener el voltaje en bornes del generador. Con la ayuda del transformador de excitación se maneja un voltaje de 13,8 kV a 512 V que alimenta los tiristores, posteriormente es rectificado con fuentes trifásicas de onda completa.

Un diagrama básico del sistema de excitación se muestra en la Figura 1.9.

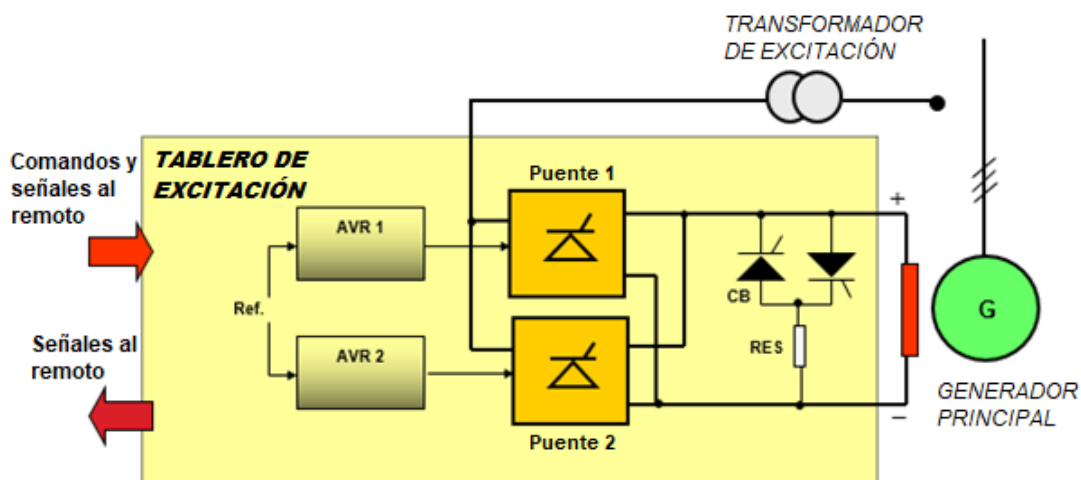


Figura 1.9. Diagrama unifilar sistema de excitación [5]

Es un sistema de autoexcitación estática, totalmente digital, conformado básicamente por los paneles del regulador, control, regulador de campo, de rectificación, y el transformador de excitación.

Estos conjuntos internamente están conformados por los transformadores de excitación, con frenado, de corriente y de potencial, el interruptor de campo, el conmutador de frenado eléctrico, el dispositivo protector de sobrevoltaje, un puente rectificador de seis tiristores (SCR) completamente controlado, (que puede forzar positiva o negativamente al voltaje de campo), la sección de control con las funciones de regulación de voltaje (AVR), el estabilizador de sistema de potencia (PSS) y corriente de campo (FCR).

En el proceso de arranque para generar un voltaje en el estator del generador se necesita excitar al rotor con una corriente débil debido a que el hierro del rotor tiene una magnetización residual empleando el circuito de suministro de potencia flashing el cual se alimenta con un voltaje continuo. En el caso de la central Coca Codo Sinclair la corriente necesaria del circuito de suministro de potencia (flashing) es menor de 20 A [5].

El regulador de voltaje está compuesto por tres canales, de los cuales dos son de regulación automática de voltaje (A,B) y uno de regulación manual de voltaje (C). Esta integración de modos aumenta la confiabilidad del sistema de excitación.

El canal A es el principal, mientras que el canal B funciona como seguidor en el caso de que el principal tenga algún problema y el C seguiría siendo reserva, si en el caso de que fallara el B entra en funcionamiento el C. Estos canales emplean las señales de medición provenientes del TC y TP.

Los principales datos del sistema de excitación son los de la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Datos sistema de excitación [2]

Descripción	Parámetros
Voltaje nominal	204,5 V
Voltaje máximo	613,5 V
Corriente nominal a $f_p = 0,9$	1953 A
Corriente máxima	3906 A
Corriente a circuito abierto	1093 A
Voltaje a circuito abierto	81,9 V
Rango del ángulo de disparo de los tiristores	14° - 140°

El modo de regulación automática de voltaje es el modo de operación principal. El estabilizador de potencia (PSS) trabaja con el AVR. La función de regulación de corriente de campo es el modo auxiliar de operación, el cual no puede operarse por largos períodos de tiempo.

El regulador cuenta con las siguientes funciones de limitación y protección [6] [7]:

- Límite de excitación forzada y de sobreexcitación de la corriente de campo.
- Protección contra desconexión del transformador de potencia
- Protección contra sobrevoltaje del rotor
- Sensor de voltaje y compensador de carga: mide el voltaje en los terminales del generador, rectifica, filtra y una vez convertido en una señal de corriente

continua, la compara con una referencia que representa el voltaje deseado. Además puede compensar la caída de voltaje en el circuito de salida, con el fin de controlar el voltaje en un punto distinto en los bornes del generador.

- Límite de la corriente de excitación máxima: evita el sobrecalentamiento en el devanado de campo.
- Límite de la corriente de excitación mínima: evita que la excitación descienda por debajo de un nivel que perjudique la estabilidad del generador, o que provoque el calentamiento en el borde de la estructura del devanado inducido.
- Límite de voltaje/frecuencia V/Hz: protege a la instalación contra un flujo magnético elevado, provocando el calentamiento del circuito magnético del generador. La relación entre voltaje y frecuencia, designada como V/Hz, es proporcional al flujo magnético. En el caso que salga de los rangos definidos muestra una señal, ya que el sistema no se dispara inmediatamente tratando de solucionar el problema y en el caso de que no volver a los valores nominales de operación, dispara la unidad.
- Estabilizador de potencia (Power System Stabilizer PSS): Proporciona una señal de control suplementario al sistema de excitación para amortiguar los efectos de las oscilaciones electromecánicas en el sistema eléctrico. Esta señal de control se construye típicamente a partir de la desviación de velocidad, la frecuencia eléctrica y/o la potencia activa.
- Protección contra sobrevoltaje del rotor (corto circuito del devanado de campo crowbar): se instala en algunos generadores para evitar una corriente negativa en el devanado de campo o un voltaje excesivo en el mismo proporcionando un paso alternativo a la corriente, actuando como un cortocircuito del devanado de campo. Este camino puede abrirse a través de un tiristor que permite el paso de corriente a través de una resistencia de descarga, resistencia no lineal o varistor. El cual se muestra en la Figura 1.10.

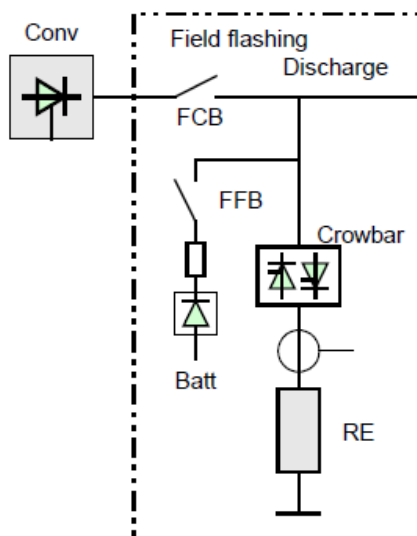


Figura 1.10. Interruptor de campo instalado en el lado de DC [7]

Cubículo de desexcitación

La desexcitación puede reducir el voltaje del estator a cero. Esta condición puede obtenerse con la descarga de flujo interno, disipando la corriente de campo a través del circuito de resistencias pasivas, compuesto por la resistencia del rotor y las resistencias de descarga auxiliares conectadas en serie.

1.4.4.1 Transformador de excitación

El transformador de excitación sirve para alimentar de energía al sistema de excitación. Este transformador se conecta a la salida del terminal del generador y se alimenta con el voltaje terminal del generador. Los datos del transformador se muestran en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Datos del transformador de excitación [2]

Descripción	Parámetros
Tipo	Trifásico- básico
Cantidad	8 unidades
Tipo de enfriamiento	AN
Potencia nominal	1 700 kVA
Relación de transformación	13,8 / 0,512 kV
Frecuencia	60 Hz
Grupo de conexión	Yd11
Cambiador de tomas	$\pm 2 \times 2,5\%$ (sin carga)
Impedancia	6%

1.4.5 Sistema de frenado

El generador está equipado con un sistema completo de freno eléctrico y mecánico, ambos métodos se pueden usar juntos o separados. Empleando los dos métodos de frenado en conjunto se deben cumplir los siguientes requisitos: el sistema de freno eléctrico se activa cuando la velocidad del generador se reduce al 80%, mientras que el freno mecánico se activa cuando la velocidad del generador se reduce al 10% de la velocidad nominal.

Trasformador de frenado

El transformador de frenado sirve de alimentación de energía de frenado durante la parada y el frenado de la unidad. Este transformador se alimenta con la electricidad de uso propio de 480 V_{AC}.

1.4.6 Servicios auxiliares

Los servicios auxiliares constan de: equipos electromecánicos de casa de máquinas, edificio de control, teleférico, obra de captación, embalse compensador, campamento permanente Coca Codo Sinclair, plataforma de descarga, tanque elevado y sistema de dragado (grupo de generadores, equipos auxiliares, equipos comunes, etc.), equipos de estructura mecánica e hidráulica incluidas las compuertas y el sistema de desarenadores, sistema de iluminación, sistema de bombas, sistema contra incendios y otros dispositivos [2].

Las cargas nominales de las diferentes localidades se muestran en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Cargas nominales de los servicios auxiliares [2]

Localización	Potencia	Factor de potencia
Casa de máquinas	3 500 kVA	0,85
Descarga	250 kVA	0,85
Campamento CCS	400 kVA	0,85
Edificio de control	400 kVA	0,85
Teleférico	400 kVA	0,85
Embalse compensador	400 kVA	0,85
Draga	400 kVA	0,85
Campamento San Rafael	400 kVA	0,85
Captación	400 kVA	0,85

La composición principal de los servicios auxiliares son:

- Transformadores de aislamiento de la estación de servicio
 - 6000 kVA, 13.8/13.8kV±4X2.5%, Dyn11
- Transformador de elevación monofásico

- 69 MVA, $500/\sqrt{3}\pm 2 \times 2.5\%$ /13.8kV, YNd11
- Subestación modular
- Gabinete de interruptor fusible de la carga
- Gabinete de seccionador fusible de carga
 - Fusible más seccionador de carga: 17.5 kV, $I_n=400$ A, $I_k=100$ kA
 - Transformador de corriente: 400/5A, 5P20/5P20, 30VA/30VA
 - Seccionador de aislamiento: 17.5 kV, $I_n=1250$ A, $I_k=25$ kA
 - Seccionador de puesta a tierra: 17.5 kV, $I_n=1250$ A, $I_k=25$ kA
- Equipamiento de 13,8 kV
 - Transformador de corriente del sistema primario de 13.8 kV
 - 400/5A, 0.2/5P20, 15/15VA
 - 400/1A, 5P20, 15 VA
 - 200/5A, 0.5/5P20, 15/15 VA
- Transformador de potencial del sistema primario de 13.8/0.1 kV, 0.5/50 VA
- Equipamiento de 0,48 kV
 - Transformador 3500 kVA, $13.8\pm 2 \times 2.5\%$ /0.48kV, $U_k=4\%$, Dyn11
 - Aire acondicionado
 - Transformador de frenado 0.48/0.1kV, $U_k=6\%$, Dy11
 - Bombas centrífugas
 - Transformador de excitación 63 kVA, 0.48/0.114 kV, $U_k=4\%$, Dyn11
- Equipamiento de 0,22 kV
 - Transformador 400 kVA, $0.48\pm 2 \times 2.5\%$ /0.22-0.127kV, $U_k=4\%$, Dyn11

También incluyen los siguientes componentes dentro de los equipamientos:

- Barra encapsulada- fase de metal-asilada
 - 17.5 kV, $I_n=10000$ A
 - 17.5 kV, $I_n= 6300$ A

- Barra SF6: 550 kV, In=4000 A
- Seccionador de aislamiento: 13.8 kV monopolar
- Pararrayos: 20 kA, 420 kV, 336 kV
- Transformador de puesta a tierra monofásico: 40 kVA 13.8/0.2 kV

Además, un generador de turbina Pelton de 1200 kW se utiliza como suministro de energía de respaldo de las estaciones de servicios en casa de máquinas y edificio de control, al igual de contar con seis grupos de generadores a diésel ubicados en:

- Edificio de control 1250 kVA
- Descarga 150 kVA
- Embalse compensador 350 kVA
- Obra de captación 300 kVA
- Campamento San Rafael 400 kVA
- Sistema de dragado 350 kVA

Los grupos de generadores a diésel suministran energía principalmente a los equipos locales en caso de emergencia, por lo que no se permite servir como alimentación de energía de respaldo del sistema auxiliar eléctrico.

Los paneles de distribución de 480 V y 220 V poseen cargas fundamentales que necesitan ser alimentadas obligatoriamente para que la unidad pueda funcionar correctamente. Estos elementos se describen en las Tablas 1.7 y 1.8 respectivamente.

Tabla 1.7. Panel de Distribución de 220 V de la Unidad 1

Nombre de la carga	Capacidad de la carga
Fuente de alimentación #1 para cubículo de circuito de interruptor de campo	5
Caja de distribución de 220V de la unidad 1	10
Cubículo de operación de la bomba de aceite de la válvula esférica #1	1 (A)
Cubículo del regulador digital #1	1,5 (B)
Cubículo del medidor de temperatura de la unidad 1	1 (C)
Fuente de alimentación número 1 del enfriador del transformador principal #1A	3
Fuente de alimentación número 1 del enfriador del transformador principal #1B	3
Fuente de alimentación número 1 del enfriador del transformador principal #1C	3
Gabinete del sistema de monitoreo de la unidad #1	2 (B)

Fuente de alimentación #1 para el panel LCU de la unidad 1	1
Terminal del transformador #1	2 (B)
Fuente de alimentación #2 del enfriador del transformador principal #1A	3
Fuente de alimentación #2 del enfriador del transformador principal #1B	3
Fuente de alimentación #2 del enfriador del transformador principal #1C	3
Fuente de alimentación #1 de panel de protección de la unidad 1	0,2 (C)
Fuente de alimentación #2 para el cubículo del campo de disyuntores	5
Gabinete de control de extinción de incendios	2 (A)
Gabinete del registrador de eventos de Fallos del generador de la unidad 1, 4, 5 y 8	0.5 (C)

Tabla 1.8. Panel de Distribución de 480 V de la Unidad 1

Nombre de la carga	Capacidad de la carga
Bomba de aceite #1 de la unidad de presión de aceite de la válvula esférica	127
Bomba aceite #1 de la unidad de presión de aceite del regulador #1	55
Fuente de alimentación #1 para el cubículo de control de potencia de la unidad 1	40
Fuente de alimentación para el cubículo de control de dispositivo elevador de alta presión	30
Cubículo de control de campo CGB #1	2
Bomba de aceite #2 de la unidad de presión de aceite de la válvula esférica #1	127
Bomba aceite #2 de la unidad de presión de aceite del regulador #1	55
Compresor de aire #2 de la turbina de la unidad 1	75
Equipo del neutro del generador de la unidad 1	1 (A)

1.4.6.1 Transformador de servicios auxiliares

El sistema de alimentación de la estación de servicios auxiliares proviene de dos barras de 13.8 kV, tomados de los generadores 1 y 8 respectivamente. A través de dos transformadores de aislamiento de 6 MVA con regulación de voltaje bajo carga de la Figura 1.11, cuyos datos se encuentran en la Tabla 1.9.



Figura 1.11. Transformador de aislamiento de la unidad 1

Tabla 1.9. Datos del transformador de aislamiento [2]

Descripción	Parámetros
Tipo	Trifásico - seco
Cantidad	2
Tipo de enfriamiento	ONAN
Potencia nominal	6 000 kVA
Relación de transformación	13,8/13,8 kV
Frecuencia	60 Hz
Grupo de conexión	Dyn11
Cambiador de tomas	$\pm 4 \times 2,5\%$ (con carga)
Impedancia	10%

1.4.7 Transformador de elevación

El transformador elevador aumenta el voltaje de 13,8 kV a 500 kV, por lo que tiene incluido más espiras en el secundario que en el primario.

Los datos técnicos de los transformadores monofásicos que conforman los bancos de transformadores asociados a cada unidad de generación se detallan en la Tabla 1.10.

Tabla 1.10. Datos de los transformadores de elevación [2]

Descripción	Parámetros
Tipo	Monofásico
Cantidad	25 unidades
Tipo de enfriamiento	OFWF
Potencia nominal	69 000 kVA
Relación de transformación	13,8 / 500/ $\sqrt{3}$ kV
Frecuencia	60 Hz
Grupo de conexión del banco	dYN11
Cambiador de tomas	$\pm 2 \times 2,5$ % (sin carga)
Eficiencia promedio	99,642%
impedancia	14,01%

1.4.8 Banco de baterías

El banco de baterías se utiliza para suministrar la alimentación de corriente continua segura para los equipos de señalización, protección, dispositivos de automatismo, operaciones de apertura o cierre de los interruptores y sistema de iluminación de emergencia.

Los bancos de baterías se emplean en casa de máquinas, edificio de control, embalse, captación, túnel de descarga y campamento Coca Codo Sinclair. Sin embargo, en cada una de estas áreas de trabajo, no emplean el mismo nivel de voltaje continuo, debido a sus diferentes funcionalidades [8].

Los niveles de voltaje más empleados son 125 Vdc y 48 Vdc entre los cuales el sistema de 125 Vdc es utilizado para el sistema de control, protección, SCADA y el sistema de 48 Vdc que se emplea en equipos de control, sistemas de comunicación de la central, cada uno de los bancos se encuentran conectados en serie y cada batería proporciona 2 Vdc, el detalle de cada área se muestra en la Tabla 1.11 [8].

Tabla 1.11. Sistema de corriente continua de los diferentes frentes de trabajo [8]

Descripción	Banco de Baterías			
	125 Vdc		48 Vdc	
	Conjunto	Número de Baterías	Conjunto	Número de Baterías
Obra de Captación	1	58	2	24
Embalse Compensador	1	58	2	24
Túnel de Descarga	1	58	-	-
Campamento permanente de Operación	-	-	2	24
Edificio de Control	2	58	2	24
Casa de Máquinas	2	58	-	-

En el caso que la central se quede sin energía, el banco de baterías funciona principalmente para proporcionar iluminación a la central garantizando que la alimentación desde el banco de baterías siga proporcionando la alimentación de corriente continua.

En el caso de un apagón el banco de baterías proporcionar energía con el fin de energizar la unidad 1 u 8, unidades de las cuales están conectado los servicios auxiliares, garantizando que la alimentación desde el banco de baterías siga proporcionando corriente continua a los diferentes sistemas.

El banco de baterías de la casa de máquinas se indica en la Figura 1.12.



Figura 1.12. Banco de baterías casa de máquinas

1.4.9 Sistema de agua de enfriamiento

El sistema de agua de enfriamiento de la central está diseñado de tal manera que cada unidad turbogeneradora cuente con su propio sistema de agua de enfriamiento de circulación cerrada [9].

Presenta dos sistemas de bombas que funcionan con una diferencia de seis horas, es decir, que cuando una bomba funciona la otra permanece en reposo. Cada uno de estos sistemas incluye un depósito de reposición de agua, dos bombas centrífugas horizontales (una de servicio y otra de reserva), una bomba centrífuga vertical (que opera cuando el transformador de potencia está en operación sin carga), un intercambiador de calor (que está ubicado en el interior del túnel de ramal de descarga), componentes de monitoreo y control automatizado, así como válvulas.

El sistema de agua de enfriamiento suministra agua a los enfriadores de aire de los generadores, cojinetes guías superior e inferior, cojinetes de empuje, cojinetes guía de las turbinas y transformadores de potencia.

1.4.9.1 Bombas centrífugas

El sistema de agua de enfriamiento cuenta con dos tipos de bombas centrífugas horizontal y vertical, ambas con la finalidad de presurizar el agua de enfriamiento que se emplea en la circulación cerrada y garantizar un buen funcionamiento de los equipos que ocupan el agua. Los parámetros técnicos principales se muestran en la Tabla 1.12.

Tabla 1.12. Parámetros técnicos principales de la bomba centrífuga horizontal [9]

Descripción	Parámetros
Tipo	Centrífuga, horizontal
Marca	XYMEL
Modelo	VSX-VSH 8*10*13.5-132KW4P
Cantidad	16
Caudal nominal	915 m ³ /h
Altura nominal	38 m
Potencia nominal	132 kW
Velocidad nominal	1780 rpm
Eficiencia máxima	85%
Voltaje/posición de fase	480 Vca/3-phase
Frecuencia	60 Hz

Bomba centrífuga horizontal

Proporciona el agua de enfriamiento a los enfriadores de aceite de los cojinetes guía superior e inferior, cojinete guía de empuje y cojinetes guía de la turbina, a los enfriadores de aire de los generadores y a los tres transformadores de potencia.

El impulso que rota a alta velocidad obliga al agua en movimiento giratorio a ser vertida y conducida hacia la tubería de salida. Las bombas centrífugas horizontales están caracterizadas por su estructura sencilla, fácil mantenimiento, instalación y fijación sin vibración, buen sellado, bajo ruido y bajo costo.

Bomba centrífuga vertical

Opera cuando la unidad de generación No. 8 está fuera de servicio y sus tres transformadores de potencia se encuentran energizados sin carga. En comparación con la bomba horizontal, ocupa menos espacio y tiene mejor condición de estanqueidad. Los parámetros técnicos se indican en la Tabla 1.12.

En la Figura 1.13 se puede observar las bombas de agua de enfriamiento.



Figura 1.13. Bombas sistema de agua de enfriamiento

Tabla 1.13. Parámetros técnicos principales de la bomba centrífuga vertical [9]

Descripción	Parámetros
Tipo	Centrífuga, vertical
Marca	XYMEL
Modelo	GLC80-160-3kW/4
Cantidad	8
Caudal nominal	60 m ³ /h
Altura nominal	8 m
Potencia nominal	3 kW
Velocidad nominal	1780 rpm
Eficiencia máxima	72%
Voltaje/posición de fase	480Vca/3-phase
Frecuencia	60 Hz

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generador sincrónico

La máquina sincrónica, ya sea generador o motor, opera a velocidad sincrónica debido a que tanto la frecuencia eléctrica como la frecuencia angular son las mismas, es decir que el generador gira a la velocidad que gira el campo magnético creado por las bobinas del campo. Este fenómeno responde a la Ecuación 2.1 [10].

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P}$$

Ecuación 2.1. Velocidad sincrónica en rpm

Donde f es la frecuencia en Hertz (Hz) y P es el número de polos en la máquina. Como generador sincrónico transforma la energía mecánica en energía eléctrica alterna. La característica principal es la relación directa entre la velocidad de giro del rotor ω , la frecuencia del voltaje y las corrientes generadas. La Figura 2.1 ilustra una máquina simple.

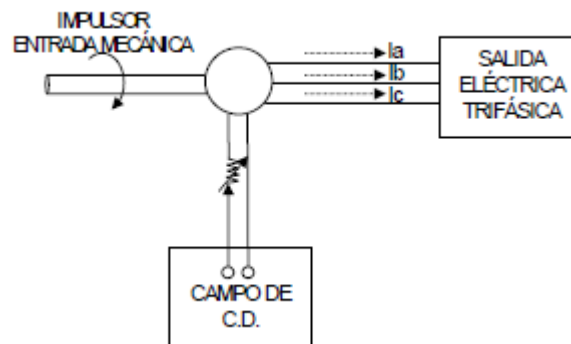


Figura 2.1. Generador sincrónico básico

El generador sincrónico es uno de los componentes más importantes de un sistema de potencia, ya que es el encargado de generar energía eléctrica bajo el principio en el cual un conductor es expuesto a un campo magnético variable en el tiempo, la variación de campo magnético en el núcleo produce una fuerza electromotriz fem a los terminales de los devanados que dependen del número de vueltas del conductor que conforman las bobinas y del valor del flujo generado. Este fenómeno se representa en la Ecuación 2.2.

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

Ecuación 2.2. Fuerza electromotriz

Donde N es el número de espiras en el devanado y φ es el flujo magnético variable en el tiempo que circula a través de la bobina. En el generador sincrónico, el voltaje inducido se produce en grupos de bobinas denominados devanados y el flujo magnético variable se consigue a través de la rotación de un campo magnético constante ubicado en el rotor que atraviesa a los devanados dando lugar al principio de inducción [10].

El principio de funcionamiento del generador sincrónico se basa en la ley de Faraday en la cual se crea un voltaje inducido en el circuito de la armadura (estator) mediante la creación de un circuito magnético en el rotor o circuito de campo. Para ello se alimenta al rotor con una fuente DC que producirá un campo magnético induciendo un voltaje en el devanado de armadura, teniendo como resultado una corriente alterna que fluye a través de él [11].

Para que la máquina sincrónica sea capaz de convertir la energía mecánica es necesario que el enrollamiento de campo localizado en el rotor de la máquina sea alimentado por una fuente de voltaje continuo, de forma que al girar el campo magnético generado por los polos del rotor tenga un movimiento relativo a los conductores de los enrollamientos del estator; debido a este movimiento relativo entre el campo magnético de los polos del rotor, la intensidad de campo magnético que atraviesa los conductores de las arrollamientos del estator variará en el tiempo.

2.1.1 Estructura del generador sincrónico

La estructura del generador sincrónico se la puede analizar desde el punto de vista eléctrico y desde el punto de vista mecánico.

Desde el punto de vista mecánico los componentes básicos de una máquina síncrona son el estator, en el que se encuentran los conductores de armadura, y un rotor en el que se encuentra el devanado de campo [12].

Desde el punto de vista eléctrico, los componentes son el devanado de campo que está constituido en forma de arrollamientos distribuidos en las ranuras, alimentado por corriente continua. En este devanado se produce el campo magnético principal de la máquina. El devanado de armadura corresponde a las bobinas o grupo de bobinas interconectadas donde se induce el voltaje alterno [12].

La razón de ubicar el devanado de armadura en el estator y el devanado de campo en el rotor es debido al calor producido por la generación de energía eléctrica. Con un estator fijo este fenómeno se puede eliminar fácilmente a través de distintos sistemas de ventilación e intercambiadores de calor. Otra razón es que ocurren graves problemas al tratar de conducir grandes corrientes eléctricas mediante anillos rozantes y escobillas.

- **Estator**

La armadura de la máquina síncrona es la parte fija donde generalmente se encuentra el devanado del estator; está formado por laminaciones delgadas de acero sumamente permeable con el fin de reducir las pérdidas en el núcleo [10].

Las bobinas se encuentran alojadas en núcleos de acero, con la finalidad de aprovechar la mayor cantidad de flujo magnético. El flujo que circula a través del núcleo de acero induce corrientes parásitas o corrientes de Eddy, mismas que producen pérdidas. Para reducir este efecto se debe laminar el núcleo al igual que se hace con el transformador.

El estator del generador está compuesto por: cáscara, núcleo estatórico, devanados y otros componentes auxiliares, ver Figura 2.2.



Figura 2.2. Estator del generador síncrono de Coca Codo Sinclair

Devanado estatórico

Los estatores (armaduras) de casi todos los generadores síncronos están devanados con tres arrollamientos distintos e independientes para generar energía trifásica, que por lo general se encuentran conectados en estrella con el neutro sólidamente puesto a tierra o a través de una impedancia. En el caso de la central Coca Codo Sinclair se emplea el neutro sólidamente puesto a tierra cuya resistencia de puesta a tierra tiene un valor de 0.13Ω .

- **Rotor**

El rotor es la parte móvil del generador y es donde comúnmente se encuentra el devanado de campo, el cual necesita la circulación de corriente continua para producir campo magnético. Debido a que el rotor se encuentra en movimiento resulta complicado alimentar con corriente su devanado, es por ello que es necesario un sistema de anillos rozantes y escobillas que permiten el ingreso de corriente desde una fuente externa [10].

En los generadores con excitación estática, la corriente continua se obtiene de un generador extra ubicado en el mismo eje del generador principal, el cual produce corriente alterna que por medio de rectificadores se convierte en corriente continua hacia el rotor.

Los generadores sincrónicos tienen dos tipos de rotores: cilíndrico y de polos salientes. El rotor de polos salientes característico de generadores hidráulicos que generalmente operan a velocidades bajas y por lo tanto un gran número de polos es requerido para generar un voltaje a 50 o 60 Hz. A estas velocidades las pérdidas en el devanado son pequeñas.

El rotor de polos salientes se utiliza en generadores de velocidad baja y media porque la pérdida en el devanado es pequeña a estas velocidades. Consta de un par de polos laminados que se proyectan hacia afuera. Cada polo tiene un extremo que se sujeta con tornillos a una rueda magnética llamada araña. El devanado de campo se dispone alrededor de cada polo como se indica en la Figura 2.3.

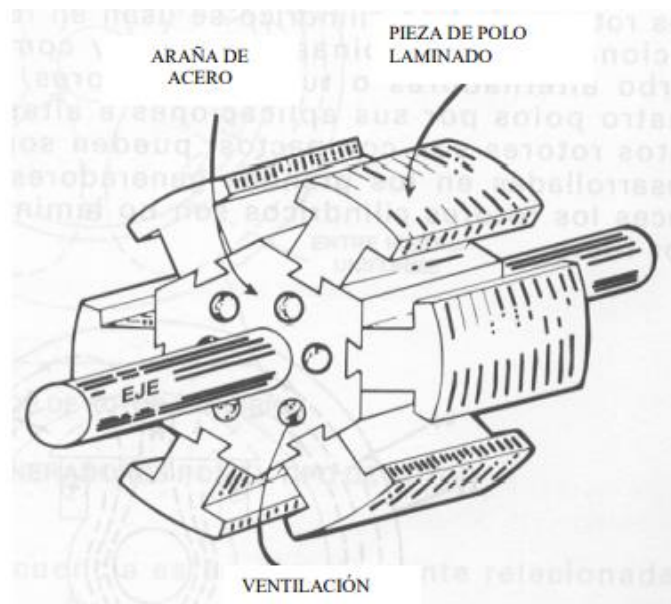


Figura 2.3. Rotor de polos salientes [13]

El rotor cilíndrico característico de las turbinas a gas y vapor, empleadas para operaciones silenciosas a altas velocidades, está formado por un cilindro liso y sólido de acero forjado con cierto número de ranuras sobre su periferia exterior, las cuales se diseñan para alojar las bobinas del campo, como se ilustra en la Figura 2.4.

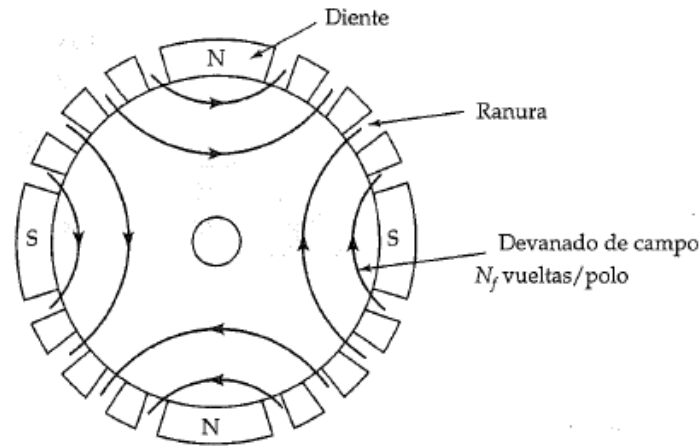


Figura 2.4. Rotor de polos lisos [9]

El rotor está constituido por polo magnético, yugo magnético (anillo magnético).

- **Polo Magnético**

Los polos están formados por chapas de acero magnético, fijadas por medio de tirantes de acero y fuertemente comprimidas en los extremos por placas de presión de acero, para garantizar la presión entre chapas. El polo magnético está suspendido sobre las ranuras del yugo magnético. Con el fin de mejorar la integridad de la bobina del polo magnético, la bandeja de aislamiento y la bobina están integradas por laminado en caliente.

- **Yugo magnético o anillo magnético**

El anillo magnético está fabricado con chapas estampadas y laminadas de acero estructural de baja aleación y alta resistencia, los canales de ventilación están dispuestos axial y uniformemente en el anillo magnético.

El anillo magnético del generador es un componente importante de todo el sistema de ventilación y puede suministrar suficiente aire para la ventilación y refrigeración del generador.

En la Figura 2.5 se puede observar el rotor y el estator, del generador de una unidad de la central Coca Codo Sinclair.



Figura 2.5. Estructura rotor y estator acoplados

2.1.2 Análisis teórico de las curvas de capacidad

Dentro del análisis de las curvas de capacidad se debe tomar en cuenta el diagrama fasorial del generador de polos salientes que refiere a la representación de los fasores de voltaje y de corriente originados en una máquina síncrona. Del diagrama se obtienen las relaciones necesarias para lograr definir los límites de capacidad de cada una de las unidades de generación.

2.1.2.1 Diagrama fasorial

Las curvas de capacidad se basan en el análisis fasorial del generador síncrono de polos salientes, detalladas en la Figura 2.6, donde:

I_d : corriente de eje directo

I_q : corriente de eje en cuadratura

X_d : reactancia de eje directo

X_q : reactancia de eje en cuadratura

δ : ángulo de transferencia de potencia

θ : ángulo de desfase entre voltaje y corriente

E : voltaje interno de la máquina

I : corriente

V: voltaje en terminales del generador

Para simplificar el diagrama, la resistencia de armadura se considera despreciable.

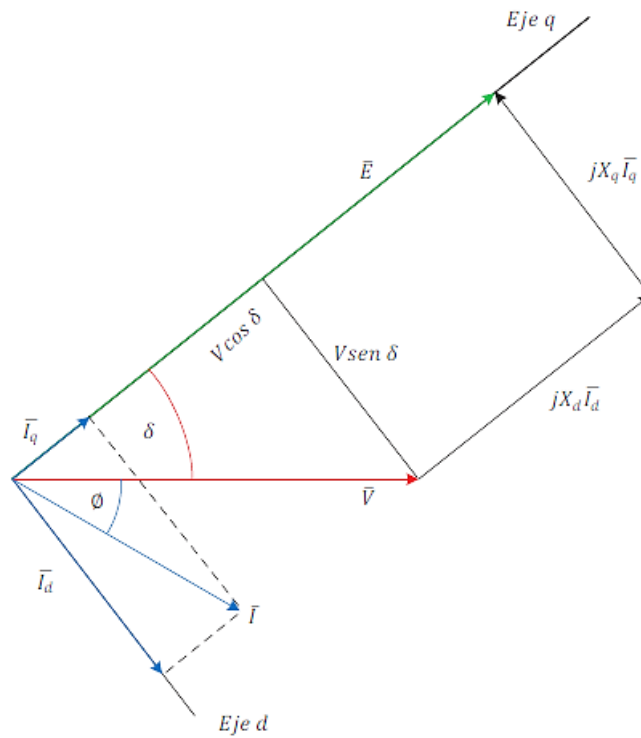


Figura 2.6. Diagrama fasorial de polos salientes despreciando la resistencia estática [14]

Partiendo de la Figura 2.6, se descompone la corriente I en corriente de eje directo I_d y corriente de eje en cuadratura I_q . En este diagrama el fasor de referencia es el voltaje terminal. Entre el voltaje terminal y la fuerza electromotriz existe el ángulo de transferencia de potencia δ desde el generador sincrónico hasta la barra que conecta a la red. Este ángulo es directamente proporcional a la carga aplicada al generador [14].

Por lo tanto, la Ecuación 2.3 describe la capacidad del voltaje interno E .

$$E = Vt + j \cdot \bar{I}_q X_q + j \cdot \bar{I}_d X_d$$

Ecuación 2.3. Voltaje interno de la máquina de polos salientes

El diagrama se encuentra formado de dos componentes: eje directo y eje en cuadratura. Esta descomposición facilita el análisis debido a que los dos ejes se encuentran formando un ángulo de 90° entre sí; por lo tanto, es posible analizar lo que sucede en cada uno de los ejes independientemente, como se detalla en la Figura 2.7 [15].

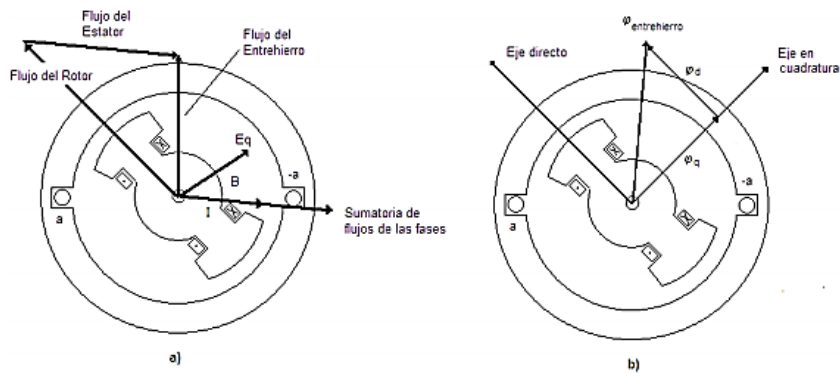


Figura 2.7. a) Flujo del rotor, estator y entrehierro b) descomposición del flujo del entrehierro en eje directo y en eje en cuadratura [15]

El diagrama fasorial para un generador de polos salientes toma en cuenta que existe una dirección preferente de magnetización determinada por la saliencia polar ya que la reluctancia del entrehierro es apreciablemente menor en el sentido longitudinal de los polos.

2.1.2.2 Potencias del generador sincrónico

El estudio de las curvas de capacidad realiza un análisis previo de las expresiones que rigen los límites operativos del generador sincrónico. Se trata de las potencias activa y reactiva entregadas por el generador sincrónico de polos salientes al sistema eléctrico de potencia [16], [17].

La potencia compleja entregada al sistema en las terminales del generador está dada por la Ecuación 2.4.

$$S = P + jQ = \bar{V} \cdot \bar{I}^*$$

Ecuación 2.4. Potencia aparente

A partir del diagrama fasorial de la Figura 2.6, se obtienen las Ecuaciones 2.5 y 2.6

$$\bar{I}_d = \frac{E - V \cdot \cos \delta}{jX_d} \angle \delta - 90$$

$$\bar{I}_q = \frac{V \cdot \sen \delta}{jX_q} \angle \delta$$

Ecuación 2.5. Descomposición de la corriente de armadura en los ejes directo y cuadratura

$$I = \bar{I}_d + \bar{I}_q = \frac{E - V \cdot \cos \delta}{jX_d} \angle \delta - 90 + \frac{V \cdot \sin \delta}{jX_q} \angle \delta$$

Ecuación 2.6. Corriente de armadura

Reemplazando la Ecuación 2.6 en la Ecuación 2.4 y descomponiendo en sus partes real e imaginaria, se obtienen las expresiones de las potencias activa y reactiva correspondientes al generador sincrónico de polos salientes. Como se indican en la Ecuación 2.7.

La potencia activa del generador se divide en dos términos, el primero hace referencia al torque electromecánico generado en la máquina sincrónica y el segundo resalta el efecto de los polos salientes [18].

$$P = \frac{E \cdot V}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\delta$$

Ecuación 2.7. Potencia activa del generador de polos salientes

Según la ecuación de la potencia reactiva, el generador sincrónico puede absorber o suministrar una cantidad variable de potencia reactiva modificando la corriente de campo inyectada al generador como se indica en la Ecuación 2.8.

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

Ecuación 2.8. Potencia reactiva generador de polos salientes

Previo al desarrollo de las zonas seguras de operación, se deben conocer los parámetros de la unidad de generación los datos de la unidad de la central Coca Codo Sinclair se detallan en el Anexo I.

2.1.3 Curva de capacidad

Las curvas de capacidad pueden mostrar todas las condiciones de operación normal de una unidad de generación. Por lo general estas curvas son proporcionadas por el fabricante o desarrolladas con los parámetros eléctricos y mecánicos del generador. El principal objetivo de las curvas de capacidad es conocer las restricciones y de esa manera contar con una generación segura de potencia en diferentes escenarios de operación.

La curva de capacidad se describen en el plano cartesiano potencia reactiva vs potencia activa de la unidad de generación. En el plano se describen las restricciones que limitan la operación del generador, gracias a estas curvas se pueden establecer las diferentes combinaciones de MVA_r y MW que pueden ser producidos por el generador a diferentes factores de potencia [11], [19].

La curva de capacidad del generador sincrónico se encuentra dividida en las zonas de subexcitación y sobreexcitación definidos por límites de operación en función de la temperatura de los devanados del estator, en la región de sobreexcitación (factor de potencia en atraso) y subexcitación (factor de potencia en adelanto) [16].

La potencia reactiva suministrada por el generador se encuentra en la zona de sobreexcitación, donde el generador trabaja con factor de potencia inductivo, mientras que la potencia reactiva absorbida por el generador es dada por el sistema de potencia, llevando a operar en la zona de subexcitación, donde el generador trabaja con factor de potencia capacitivo.

El diagrama de capacidad se construye en condiciones nominales de operación del generador, cuyas zonas seguras de operación se muestran en la Figura 2.8.

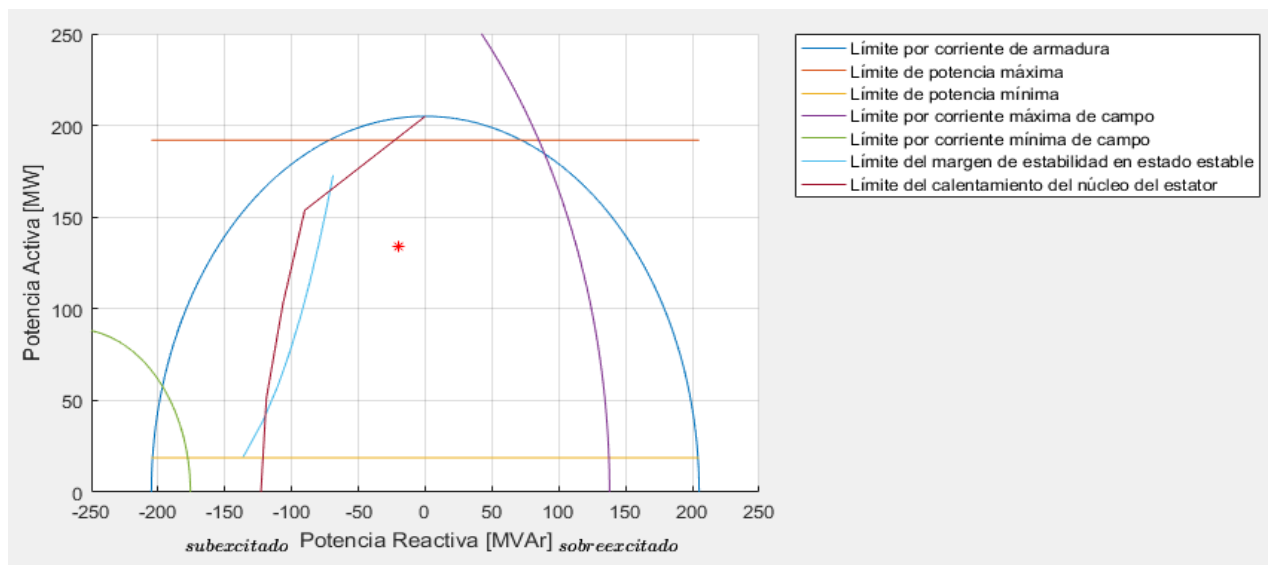


Figura 2.8. Zonas seguras de operación del generador

2.2 Sistema de adquisición de datos

2.2.1 Symphony Plus de ABB

La adquisición de datos se realiza desde el sistema SCADA, mediante el software Symphony Plus de ABB. Este software usa los siguientes protocolos de comunicación

estándar, conectando diversos procesos de la planta en un ambiente de operación común [20].

- OPC DA, AE, HDA
- Modbus TCP
- DNP 3.0
- IEC 61850
- IEC 870-5-101/103/104

La adquisición de datos se realiza a partir de los datos históricos de Symphony Plus Operations History el cual escanea y recoge la información de los eventos.

S+ Operations History es una evolución de la aplicación de la gestión de información de generación de energía.

Para una tarea específica de la gestión de la planta, un sistema de gestión de información de procesos (PIMS) es la herramienta para adquirir y evaluar de forma centralizada todos los datos de procesos utilizando un solo sistema con una interfaz de usuario. En la Figura 2.9 se presenta un esquema funcional del S+ Operations History.

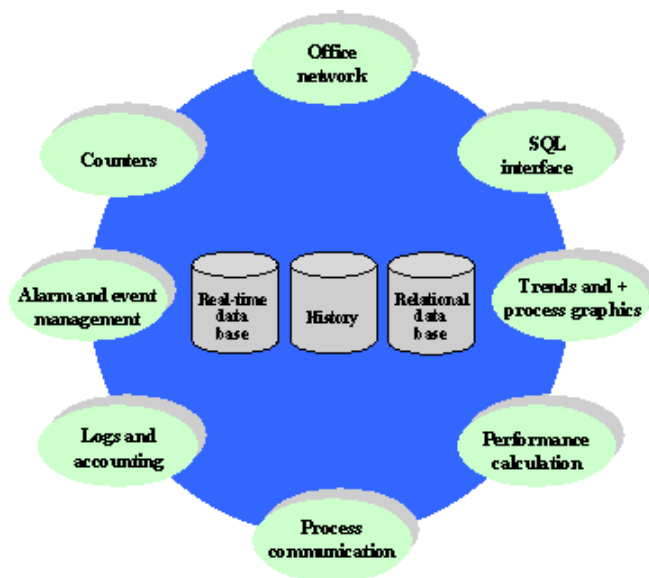


Figura 2.9. Alcance funcional del S+ Operations History [20]

S+ Operations History es una (PIMS) que opera en el sistema operativo MS Windows, tomando ventaja de la experiencia ganada de sistemas precedentes. Utiliza las últimas herramientas desarrolladas y los entornos de sistemas más actuales (fast PCs, Win 32, software estándar probado y conocidos), es por ello que S+ Operations History provee un manejo eficiente de la información de los procesos de toda la planta.

S+ Operations History funciona como servidor y cliente, como servidor almacena los datos de procesos en una base de datos de procesos. Cuando existe algún cambio hecho en el proceso de datos, los escáneres transfieren los datos de los procesos actualizados a la base de datos de S+ Operations History.

Se almacenan en la base de datos de procesos, no solo las descripciones de las señales, sino también que en tiempo real los valores y eventos históricos.

Como cliente recupera el proceso de datos de la base de datos, al igual que el estado de las señales puede ser evaluado por el S+ Operations History client. Tanto el servidor como el cliente proporcionan amplias funciones para evaluar los datos procesados, en formato análogo, binario y valores de acumulación.

La información es transferida desde S+ Operations a S+ Operations History. El servidor de datos procesados es el elemento central del cual todas las otras funciones obtienen sus datos, proveyendo un alto grado de seguridad y rapidez de procesamiento.

2.2.2 Creación de reportes

La obtención de reporte consta de tres etapas importantes.

La primera etapa consta de los procedimientos para crear el reporte con las variables necesarias a implementarse en el programa además de especificar el lugar de almacenamiento, la extensión del archivo y el tiempo de duración del mismo.

La segunda etapa emplea el ReportSchedule, el cual programa el reporte realizado para que se generen los demás reportes automáticamente en intervalos de tiempo fijados por el usuario. Los reportes se almacenan en el servidor, mediante el software WinSCP pasa el firewall y se almacenan en una carpeta específica del servidor FTP.

La tercera etapa crea un perfil de transferencia de archivos con el software Auto FTP Manager. Este perfil se ejecuta a cada minuto de forma automática, copiando los documentos del servidor FTP a la carpeta C:\Users\Paola Chimarro\Desktop\CodigoTesis del computador donde se encuentra el código del programa, debido a que en MATLAB se direcciona la carpeta donde se encuentran los archivos a ser importados.

2.2.2.1 Primera Etapa – Etapa de recopilación de datos

Primero se deben definir todas las variables a ser utilizadas en el programa, las cuales son potencia activa, potencia reactiva, voltaje en terminales, factor de potencia, voltaje de excitación y corriente de excitación de cada unidad. Posteriormente, se deben realizar los siguientes pasos para crear el reporte respectivo [21].

1. El reporte a realizarse se debe generar ya sea en el servidor HDS1 o HDS2, para ello en el escritorio principal se da un clic en inicio, se busca *Remote Desktop Connection* y se elige el servidor, se ingresa el usuario y la clave. Clic en OK hasta que abra el servidor.
2. Una vez abierto el servidor se abre una hoja vacía de Excel. Se da un clic derecho en cualquier celda se selecciona S+ Operations, en la opción History Access, como se muestra en la Figura 2.10.

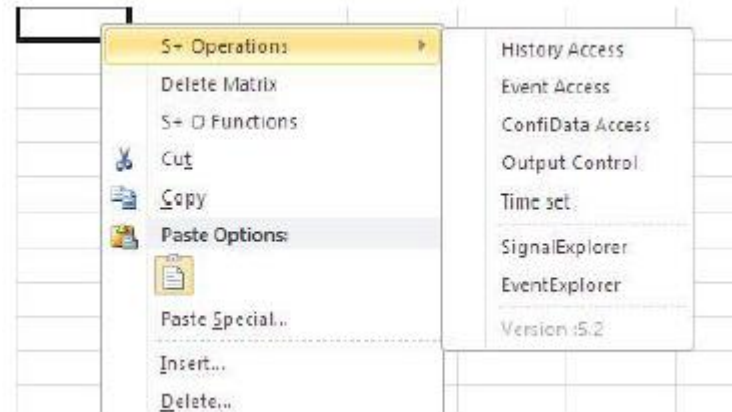


Figura 2.10. Forma de acceder a los datos históricos [20]


De manera que se crea una nueva hoja con una configuración del planificador predeterminado que se añadirá en el libro de Excel con el nombre \$PGIM_CONFI, como se muestra en la Figura 2.11 y a la vez abrirá una nueva ventana History Access Wizard.

1	A	B	C	D	E	F
2	Scheduler Input Variables					
3						
4	SCHEDULER_VARIABLE	VALUE				
5	PGIM_REPORT_START_TIME	9/31/2011				
6	PGIM_REPORT_END_TIME	4/1/2011				
7	PGIM_REPORT_ACTIVATION TIME	4/25/2011 14:40				
8	PGIM_REPORT_EVENT_TIME	4/25/2011 14:40				
9	PGIM_REPORT_EVENT_SIGNAL					
10	PGIM_REPORT_USER	Administrator				
11						
12	Output Control					
13		Test Output Control		show log		
14						
15	RESOURCE_NAME	Type	Lifetime	Range	Timezone	
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						

Figura 2.11. Variables de entrada del planificador [20]

En esta hoja se ingresa únicamente la etiqueta (tag) de la variable a utilizar, la carpeta donde se almacena los reportes, la extensión del archivo, el tiempo de duración del archivo, además del tiempo de inicio del reporte. El campo del tiempo de fin del reporte no se cambia debido a que es una fórmula, en el ejemplo B5+1/24 que es exactamente una hora más a la del inicio del reporte.

3. La ventana History Access Wizard que se muestra en la Figura 2.11 tiene siete pasos a realizar, antes de crear el reporte.

3.1. Selecciona la celda con el Tag name de la variable del S+ Operations History como se muestra en la Figura 2.12 Dando clic en el selector , la ventana se minimiza para tener mayor facilidad de encontrar dicha celda como se muestra en la Figura 2.13.

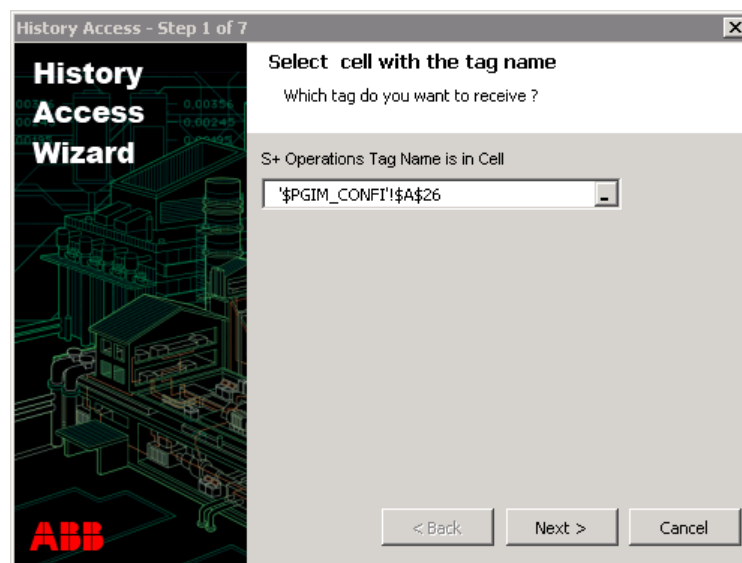



Figura 2.12. Ventana History Access Wizard nombre de la variable [20]

Después de seleccionar la celda se presiona el botón  para retornar a la ventana History Access Wizard. Clic en siguiente **Next** para continuar.

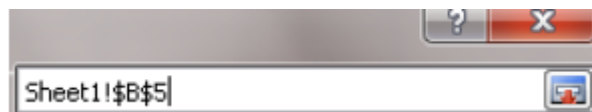


Figura 2.13. Ventana History Access Wizard con el nombre del tag [20]

3.2. La ventana de la Figura 2.14 presenta dos tipos de opciones para el formato de valores: el de valores sin formato (raw values) en que los datos se almacenan como se encuentran en el servidor del S+ Operations History y otro con valores

agregados (aggregated value) que toma un promedio de los mismos. Los valores se calculan cuando se ejecute el reporte.

En el ejemplo se selecciona valores agregados (aggregated value) y continuar (**Next**).

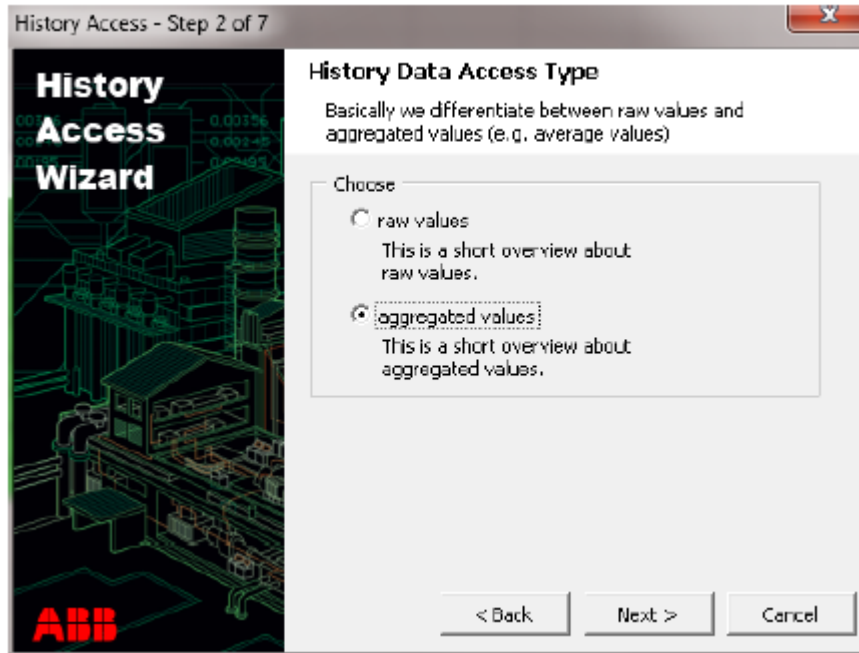



Figura 2.14. Tipo de acceso a los datos [20]

3.3. En la siguiente ventana el usuario especifica que campos de la base de datos serán mostrados en la hoja de Excel, para ello se selecciona el campo del lado izquierdo (Possible Fields) y se presiona  para cambiar a campo seleccionado (Selected Fields).

En la sección Orden de la parte inferior de la ventana el usuario puede organizar el orden de los valores cuando se inserten en la hoja. Se puede ordenar tanto ascendente como descendente, así como también la organización de la colección a través de Ordenar por campo (Sort by field).

En este ejemplo se selecciona el tiempo y el valor de la variable, el orden ascendente y el campo el tiempo, como se indica en la Figura 2.15. Luego debe darse un clic en siguiente para continuar con la configuración.

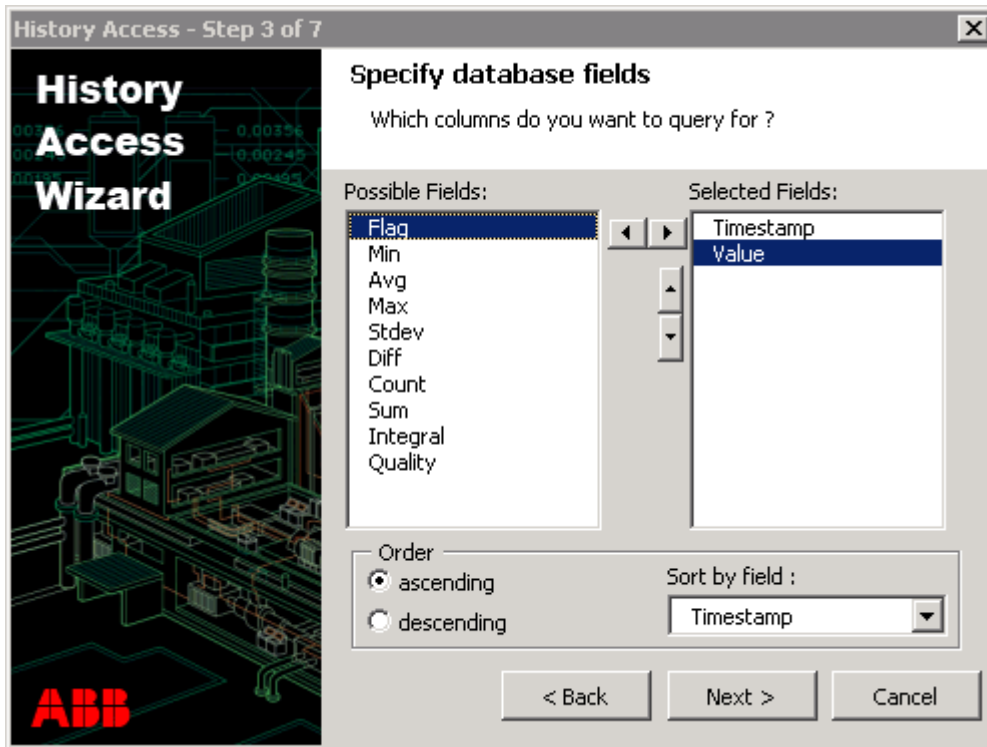




Figura 2.15. Campos específicos de la base de datos [20]

Los posibles campos tienen las abreviaciones cuyos significados están en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Abreviaturas y sus significados [20]

Abreviatura	Descripción
Timestamp	Se aplica al valor que regresa de la base de datos, es decir que proporciona la fecha y hora en el intervalo requerido.
Min	Retorna el valor mínimo en el intervalo requerido.
Max	Retorna el valor máximo en el intervalo requerido.
Avg	Retorna el valor promedio en el intervalo requerido.
Value	Retorna el valor del Timestamp.
Flag	Retorna el estado del intervalo de respuesta, si un valor es diferente de cero, entonces el estado de este valor aplica a todo el intervalo.
Diff	Retorna el valor diferencial entre el final y el principio en el intervalo requerido.
Count	Retorna el número de valores grabados en el intervalo requerido.
Sum	Retorno el valor de la suma en el intervalo requerido.
Integral	Retorna el valor de la integral en el intervalo requerido (producto de valor y tiempo).
Quality	Retorna un porcentaje donde el estado de los valores era 0: buena calidad. Por ejemplo, para 15 minutos durante 1 hora el estado de la señal tuvo un disturbio, entonces esta función retornará 75% para el intervalo de 1 hora
StDev	Desviación estándar del intervalo

3.4. En este paso se establece el intervalo específico para la obtención de datos, con clic en el botón  se escoge la celda B5 de la hoja de la Figura 1.16 donde está la información del tiempo de inicio PGIM_REPORT_START_TIME, una vez seleccionada la celda se regresa con el botón  al cuadro de diálogo, y se realiza el mismo procedimiento para escoger la celda B6 que contiene la información de tiempo final PGIM_REPORT_END_TIME.

El siguiente campo de zona horario (Timezone) define como los datos del Timestamp serán mostrados, las opciones se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Abreviaturas y sus significados [20]

Abreviatura	Descripción
GMT=UT=UTC	Todos los nombres tienen el mismo efecto
PCLT	Tiempo local PC's
PCST	Tiempo local en verano
PCWT	Tiempo local en invierno

En el ejemplo, se selección PCLT.

Mientras que en el intervalo de tiempo (Time interval) se selecciona cada cuanto tiempo se obtienen los datos. El intervalo puede ser en horas, minutos, segundos, días, meses, años.

En el ejemplo, se selecciona el intervalo de 1 hora como se muestra en la Figura 2.16.

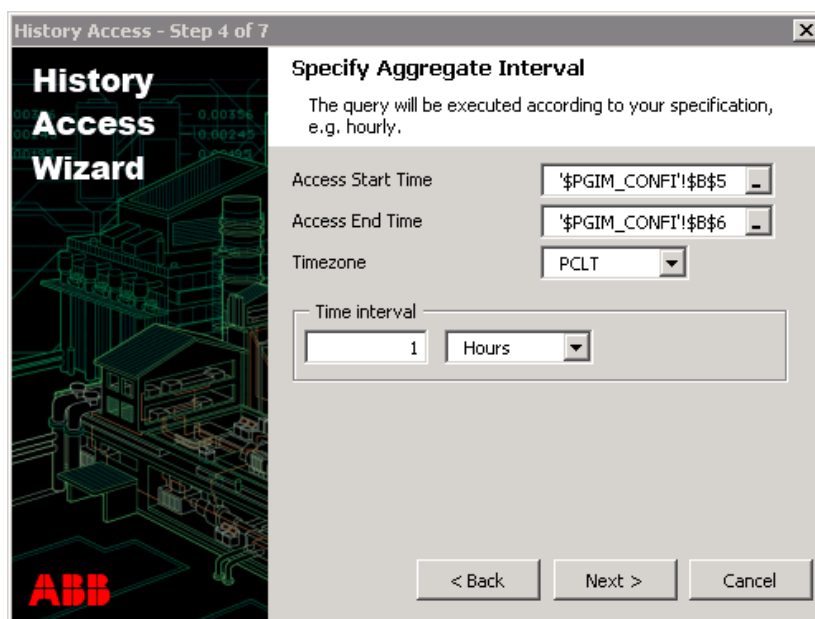


Figura 2.16. Especificaciones de los intervalos de tiempo [20]

Clic en *Siguiente* (Next) para continuar con la configuración.

3.5. En este paso, se prepara la dimensión de la matriz en Excel, en el cual automáticamente el programa define el tamaño de la matriz a generarse en base a la configuración realizada en el paso anterior, sin embargo, el usuario puede modificar la cantidad de filas a obtenerse en el reporte según el tiempo que necesite.

En el ejemplo, un día con intervalos de una hora el programa calcula que se requieren veinte y cinco filas para desplegar la información, como se muestra en la Figura 2.17.

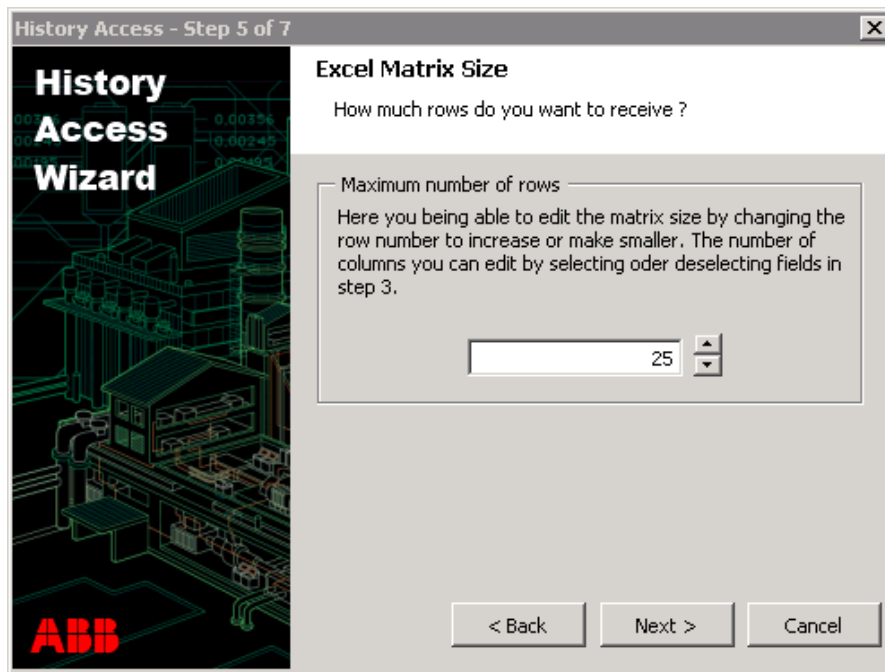


Figura 2.17. Dimensión de la matriz de Excel [20]

Para continuar dar clic en *Siguiente* (Next).

3.6. En este paso se especifica que caracteres se deben llenar en el campo, en el caso de que en los históricos no se encuentre un valor determinado, por ejemplo, una celda vacía puede llenarse con asteriscos (****), como se indica en la Figura 2.18.

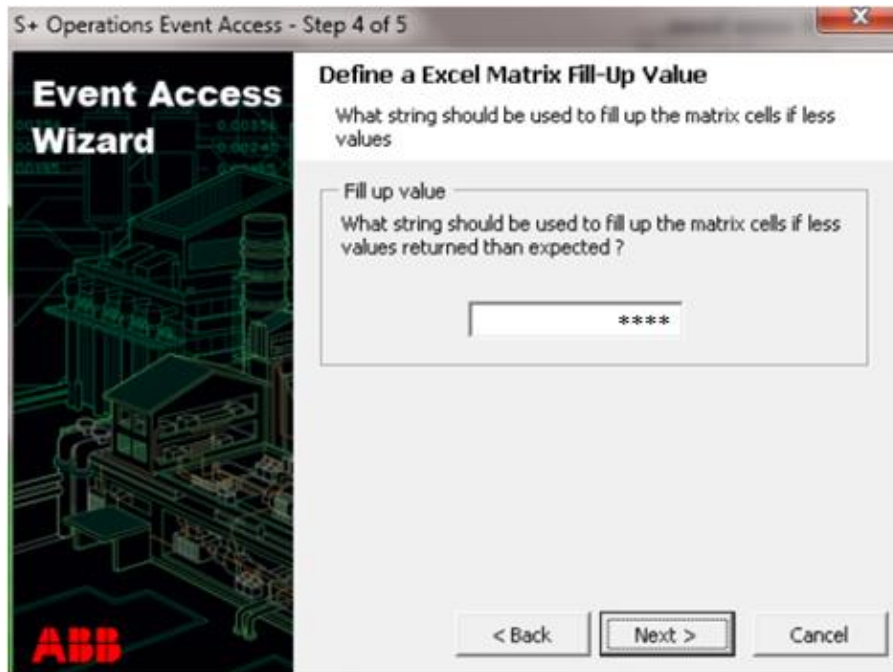




Figura 2.18. Valor de una celda vacía

3.7. Como último paso se selecciona la celda donde la matriz desarrollada se va a instalar, como se realizado anteriormente dar un clic en  para escoger la celda en la hoja que se desee, es preferible hacerlo en una nueva hoja del documento y para regresar a la ventana principal dar un clic en , como se indica en la Figura 2.19.

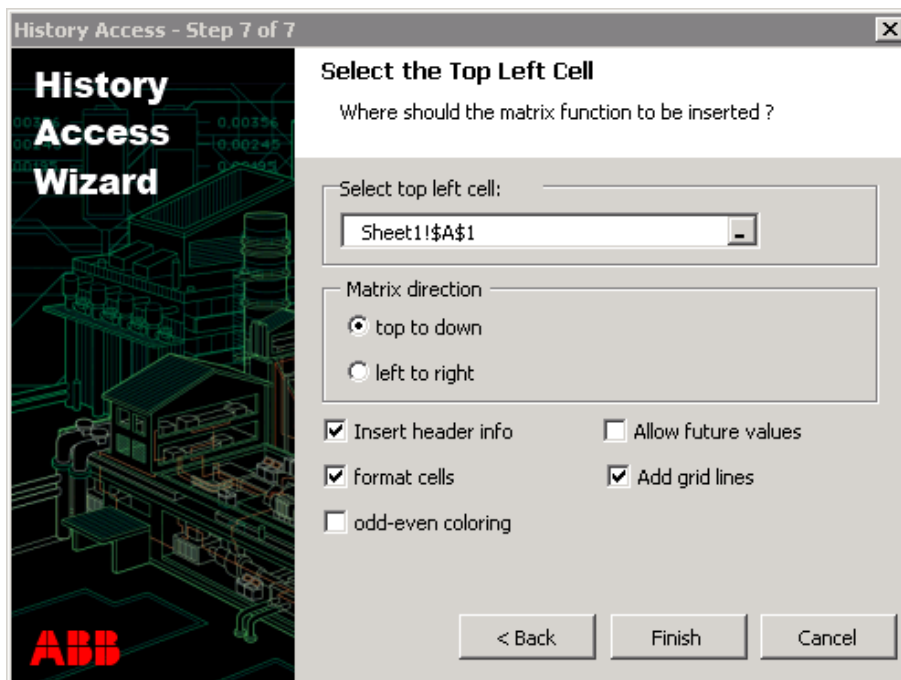


Figura 2.19. Selección de la celda donde la matriz será instalada

La dirección de la matriz selecciona y organiza el resultado ya sea de arriba hacia abajo o de izquierda a derecha. En esta opción se escoge de arriba hacia abajo.

Existen 5 selectores adicional para mejorar el formato del reporte, estos son los que se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Opciones de formato [20]

Parámetros	Descripción
Insert header info	Inserta la descripción en el encabezado, de las propiedades del asistente del paso 3.3
Format cells	Ajusta el formato de Excel para mostrar el tipo de datos que van a ser insertados, por ejemplo la fecha y hora en su formato correspondiente
Odd-even coloring	Alterna el sombreado de las filas (gris/blanco).
Allow future values	Añade futuros valores en el campo fecha/tiempo, disponible en la base de datos. Normalmente, la ejecución de un informe se basa en los datos históricos existentes. Algunas veces, el tiempo de inicio a fin puede incluir tiempo en el futuro. (Ejemplo: al mediodía, un informe se visualiza para un informe de 24 horas a partir de la medianoche, esto deja 12 horas de datos futuros. El informe normalmente espera que haya filas abiertas ya que el Historial de operaciones de S+ ya no puede tener datos para este lapso). Pero considera que este es un informe especial que mira hacia el futuro para un informe de pronóstico y alguna simulación ya ha creado valores; luego, con esta opción, puede indicarle a S + Operations History que el asistente de informes también muestra estos datos.
Add grid lines	Añade líneas de cuadrícula a la tabla.

Por último, dar un clic en **Finish** para ejecutar la matriz.

4. Los tags se obtienen del explorador de señales (Signal Explorer). En el escritorio se abre la aplicación de *explorador de señales*. El explorador de señales cuenta con todas las variables implementadas en el SCADA, como se observa en la Figura 2.20, es por ello que por facilidad se aplica el filtro para encontrar dicha variable como se muestra en la Figura 2.21.

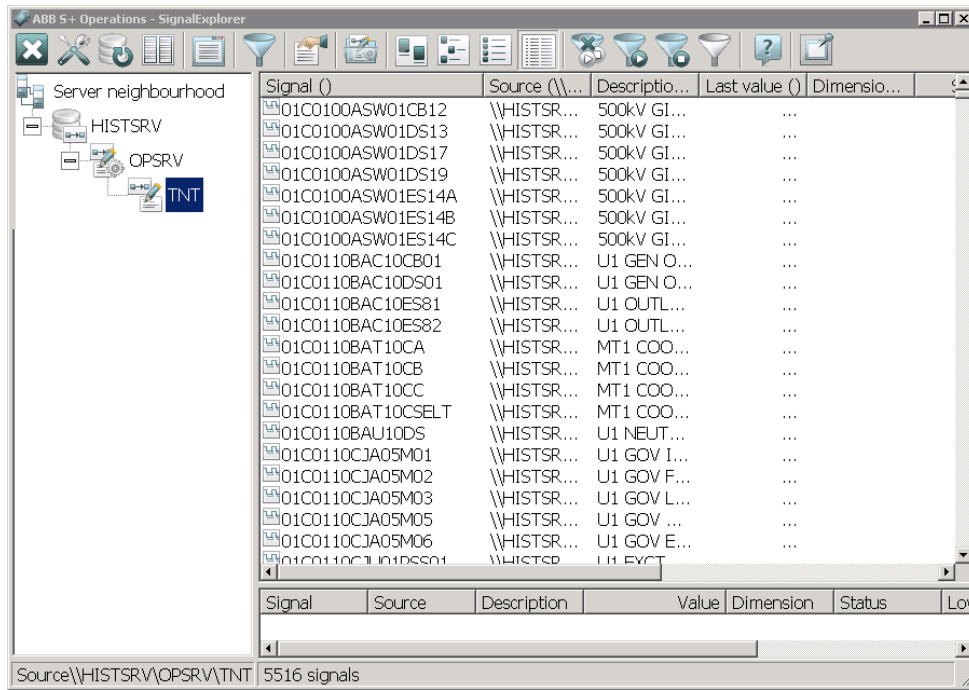


Figura 2.20. Ventana del Signal Explorer [20]

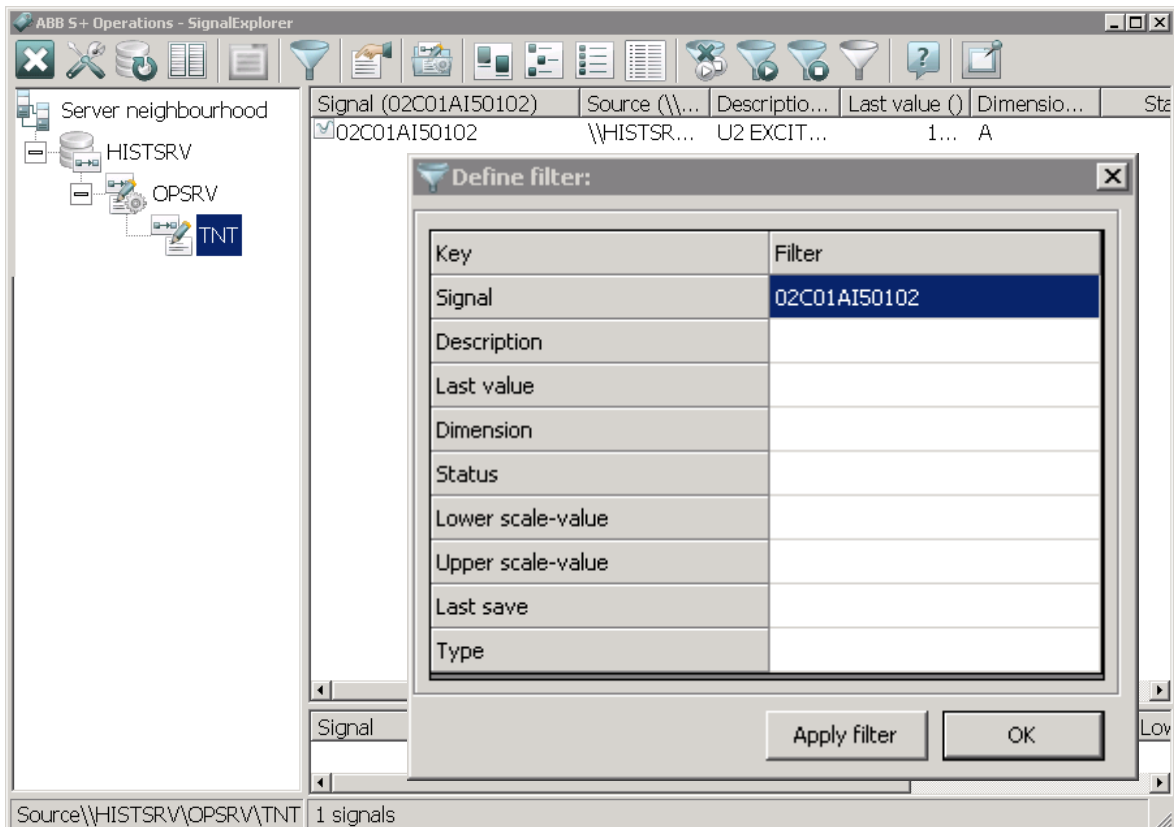


Figura 2.21. Filtro de señales del Signal Explorer [20]

Por ejemplo, para conocer el tag de la potencia activa de la unidad 1 sobre el Operation Explorer y dar un clic derecho; en el menú emergente se escoge *Copy Tagname*, tal como se observa en la Figura 2.22.

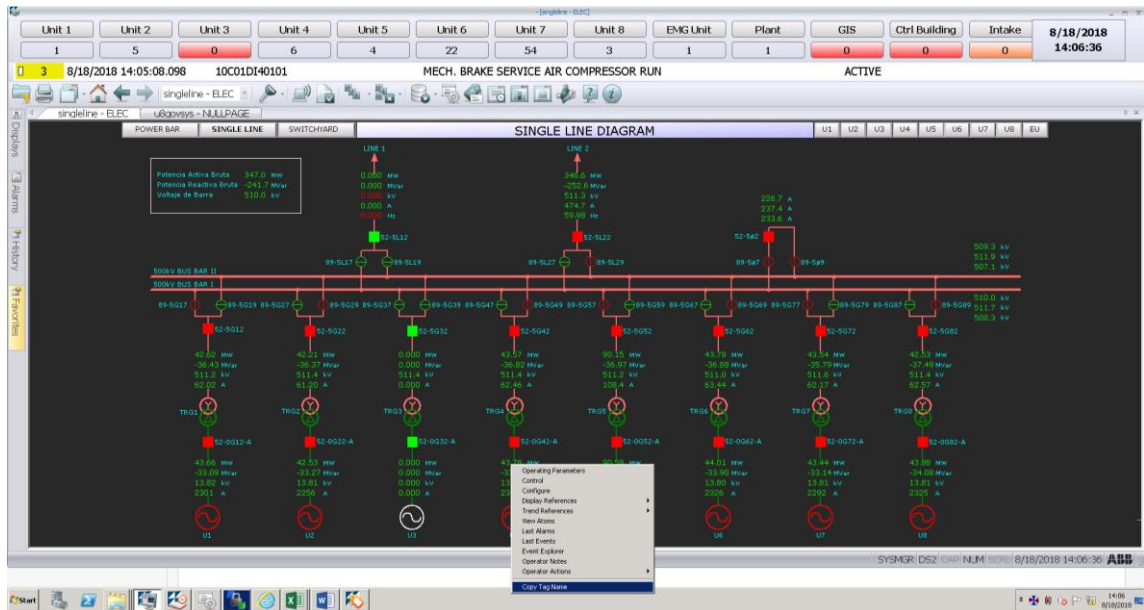


Figura 2.22. Selección del tag a implementar

En *Signal Explorer* se busca todas las señales y se arrastra el Tagname hacia la celda de la hoja de Excel, de la manera que se indica en la Figura 2.23.

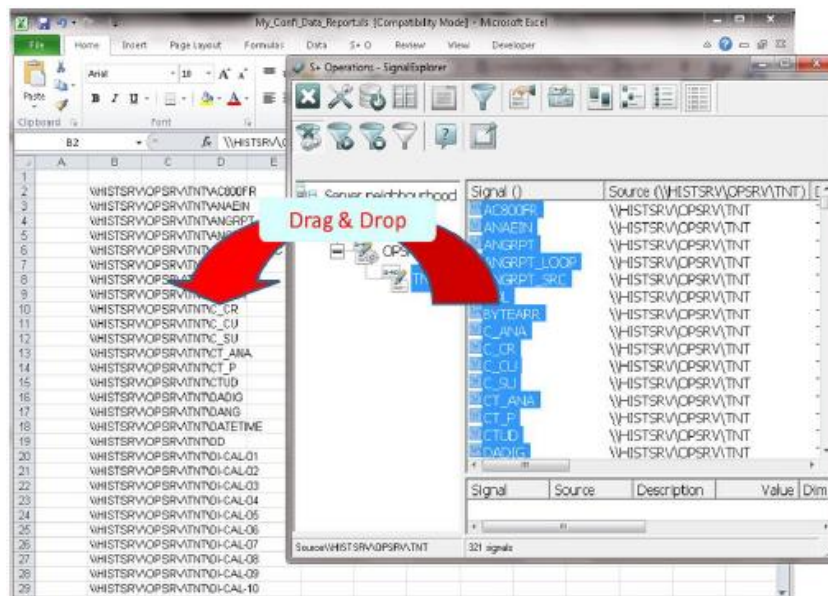


Figura 2.23. Arrastrar y soltar los Tags del S+ Signal Explorers [20]

Los Tagnames se colocan uno tras otro en la misma columna que se puso el primer tag, en la Figura 2.24 se encuentran algunos tags de las variables a implementar.

	A	B	C	D	E
29	Signal			Langtext	Dimension
30	WHISTSRV1OPSRVITNT101C01W11PM1REG09			U1 GEN OUTLET ACTIVE	MW
31	WHISTSRV1OPSRVITNT101C01W11PM1REG10			U1 GEN OUTLET REACTIVE	MVar
32	WHISTSRV1OPSRVITNT101C01W11PM1REG03			U1 GEN OUTLET VOLTAGE	kV
33	WHISTSRV1OPSRVITNT101C01W11PM1REG12			U1 GEN OUTLET POWER	
34	WHISTSRV1OPSRVITNT101C01A150101			U1 EXCITATION VOLTAGE	V
35	WHISTSRV1OPSRVITNT101C01A150102			U1 EXCITATION CURRENT	A
36	WHISTSRV1OPSRVITNT101C01A150202			U1 GOV TURBINE DISCHARGE	m ³ /s
37	WHISTSRV1OPSRVITNT102C01W11PM1REG09			U2 GEN OUTLET ACTIVE	MW
38	WHISTSRV1OPSRVITNT102C01W11PM1REG10			U2 GEN OUTLET REACTIVE	MVar
39	WHISTSRV1OPSRVITNT102C01W11PM1REG03			U2 GEN OUTLET VOLTAGE	U _{ab}
40	WHISTSRV1OPSRVITNT102C01W11PM1REG12			U2 GEN OUTLET POWER FACTOR	
41	WHISTSRV1OPSRVITNT102C01A150101			U2 EXCITATION VOLTAGE	
42	WHISTSRV1OPSRVITNT102C01A150102			U2 EXCITATION CURRENT	
43	WHISTSRV1OPSRVITNT102C01A150202			U2 GOV TURBINE DISCHARGE FLOW	
44	WHISTSRV1OPSRVITNT103C01W11PM1REG09			U3 GEN OUTLET ACTIVE POWER	
45	WHISTSRV1OPSRVITNT103C01W11PM1REG10			U3 GEN OUTLET REACTIVE POWER	
46	WHISTSRV1OPSRVITNT103C01W11PM1REG03			U3 GEN OUTLET VOLTAGE	U _{ab}
47	WHISTSRV1OPSRVITNT103C01W11PM1REG12			U3 GEN OUTLET POWER FACTOR	
48	WHISTSRV1OPSRVITNT103C01A150101			U3 EXCITATION VOLTAGE	
49	WHISTSRV1OPSRVITNT103C01A150102			U3 EXCITATION CURRENT	
50	WHISTSRV1OPSRVITNT103C01A150202			U3 GOV TURBINE DISCHARGE FLOW	
51	WHISTSRV1OPSRVITNT104C01W11PM1REG09			U4 GEN OUTLET ACTIVE POWER	
52	WHISTSRV1OPSRVITNT104C01W11PM1REG10			U4 GEN OUTLET REACTIVE POWER	
53	WHISTSRV1OPSRVITNT104C01W11PM1REG03			U4 GEN OUTLET VOLTAGE	U _{ab}
54	WHISTSRV1OPSRVITNT104C01W11PM1REG12			U4 GEN OUTLET POWER FACTOR	
55	WHISTSRV1OPSRVITNT104C01A150101			U4 EXCITATION VOLTAGE	
56	WHISTSRV1OPSRVITNT104C01A150102			U4 EXCITATION CURRENT	
57	WHISTSRV1OPSRVITNT104C01A150202			U4 GOV TURBINE DISCHARGE FLOW	
58	WHISTSRV1OPSRVITNT105C01W11PM1REG09			U5 GEN OUTLET ACTIVE POWER	
59	WHISTSRV1OPSRVITNT105C01W11PM1REG10			U5 GEN OUTLET REACTIVE POWER	
60	WHISTSRV1OPSRVITNT105C01W11PM1REG03			U5 GEN OUTLET VOLTAGE	U _{ab}
61	WHISTSRV1OPSRVITNT105C01W11PM1REG12			U5 GEN OUTLET POWER FACTOR	
62	WHISTSRV1OPSRVITNT105C01A150101			U5 EXCITATION VOLTAGE	
63	WHISTSRV1OPSRVITNT105C01A150102			U5 EXCITATION CURRENT	
64	WHISTSRV1OPSRVITNT105C01A150202			U5 GOV TURBINE DISCHARGE FLOW	
65	WHISTSRV1OPSRVITNT106C01W11PM1REG09			U6 GEN OUTLET ACTIVE POWER	
66	WHISTSRV1OPSRVITNT106C01W11PM1REG10			U6 GEN OUTLET REACTIVE POWER	

Figura 2.24. Tags de las variables a implementar [20]

- Para generar el reporte dar un clic en Test Output Control y se crea el reporte para la variable definida en dicha celda; sin embargo, el programa no realiza automáticamente para las demás variables seleccionadas; por ello se deben modificar manualmente.

Se debe copiar toda la columna con los datos generados y pegar en la columna adyacente, para obtener el nombre de la siguiente variable se modifica la fórmula de la Figura 2.25, variando la celda donde se encuentra el siguiente Tagname, es decir si en la configuración del paso 3.1 la celda era la A26, la siguiente fórmula será con la celda A27; para guardar ese cambio se presionan a la vez las teclas: Shift+Mayus+Enter.

Este procedimiento se realiza sucesivamente con todas las variables.

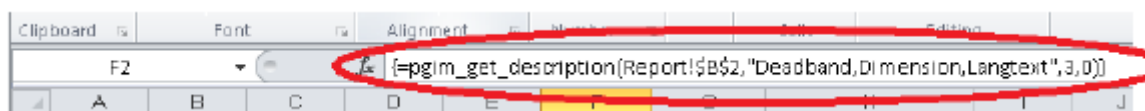


Figura 2.25. Función de la matriz a modificar

6. Finalmente se debe configurar la extensión al igual que la carpeta en la cual se generará el archivo.

En la celda A16 de la hoja de la Figura 2.11 dar un clic derecho S+ Operations-Output Control, como se indica en la Figura 2.26 y se abre la ventana de la Figura 2.27.

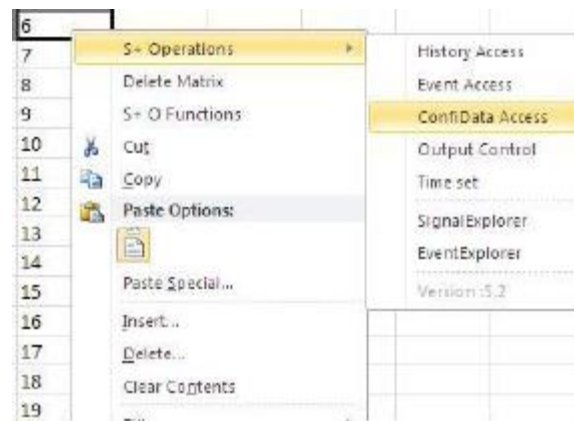


Figura 2.26. Menú S+ Operations History

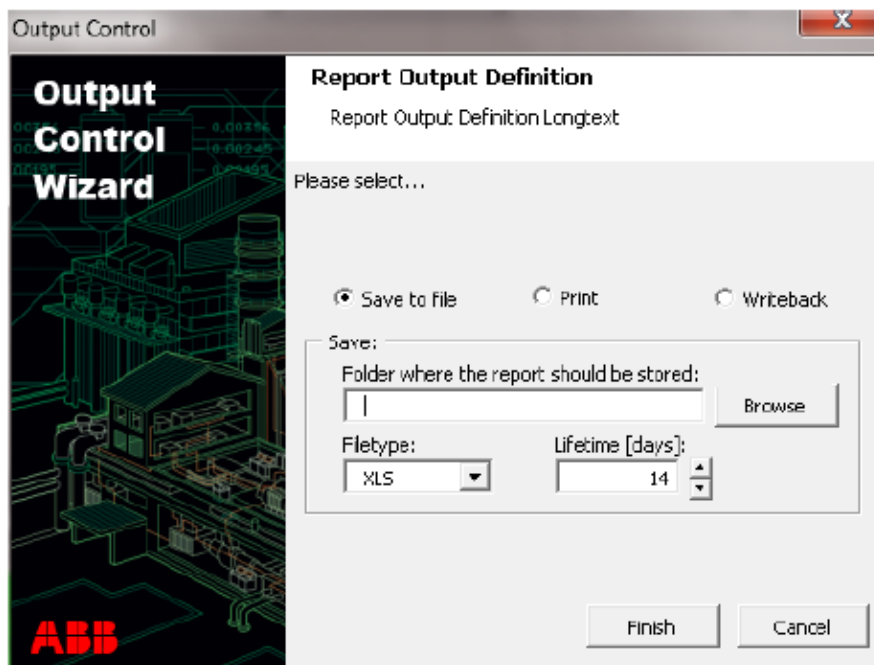


Figura 2.27. Definición de parámetros para la salida del reporte [20]

En esta ventana existen tres tipos de salidas, cada una con diferentes configuraciones:

- Save to file
- Print
- Writeback

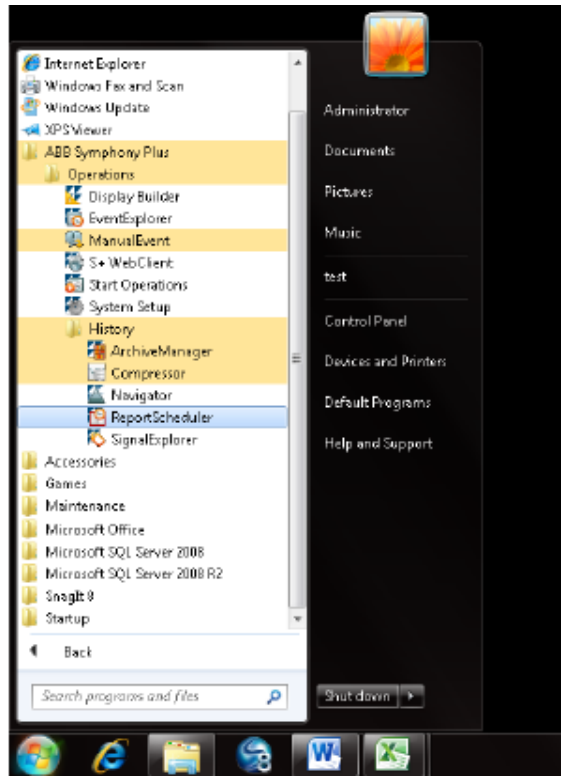


Figura 2.29. Abrir ReportSchedule

2. En la ventana de la Figura 2.30, se añade el reporte de Excel que se realizó anteriormente, esta interfaz cuenta con una barra de herramientas cuyo funcionamiento se detalla en la Tabla 2.4.

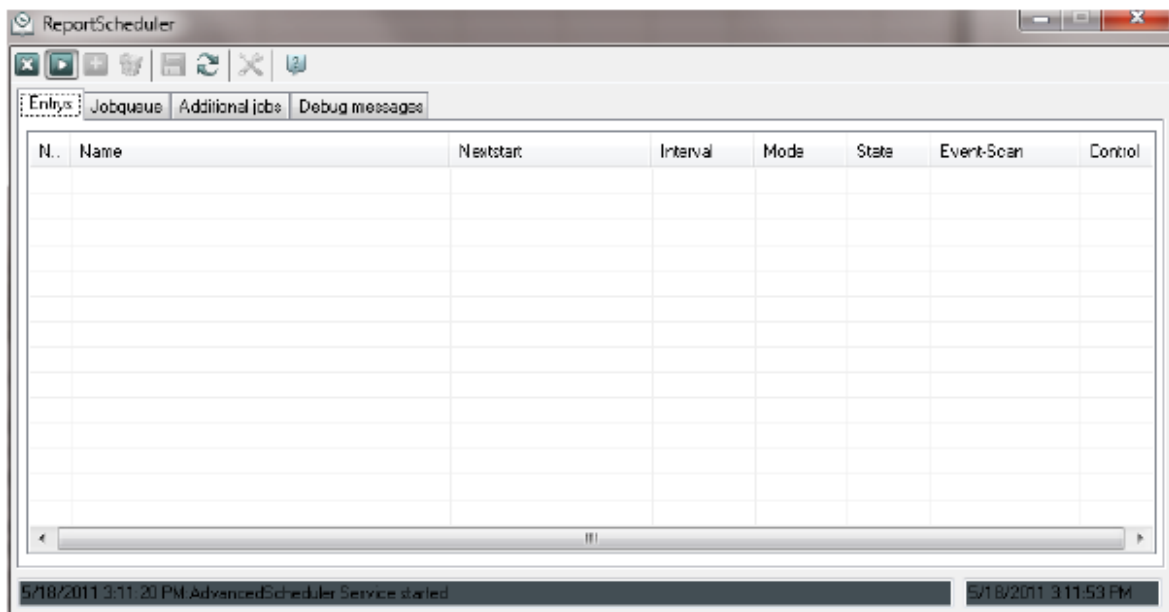









Figura 2.30. Interfaz del cronograma de reportes

Tabla 2.4. Íconos en la interfaz de usuario del programa de reportes [20]

Iconos	Descripción
	Este botón controla si el planificador está en funcionamiento o si todos los trabajos están detenidos. Para que el reporte se genere este botón debe estar presionado hacia abajo (significa que está en línea), y para detener el proceso este botón debe estar hacia arriba (significa que esta fuera de línea). Nota: La configuración del documento se lo realiza en modo detenido
	Este botón se utiliza para añadir un nuevo trabajo al cronograma de trabajos.
	Marca una entrada en la lista de trabajos y luego presionando este botón se elimina el trabajo del cronograma de trabajo.
	Presionando este botón los cambios son hechos en el cronograma de lista de trabajos.
	Presionando este botón el dialogo de configuración se puede abrir.

- Para empezar un nuevo cronograma de trabajo, el usuario debe asegurarse de que antes de realizarlo el software ReportSchedule esté en el modo fuera de línea, significa que el botón de la barra de herramientas sea  y se procede a agregar el archivo creado mediante  del cual se despliega la ventana de la Figura 2.31.

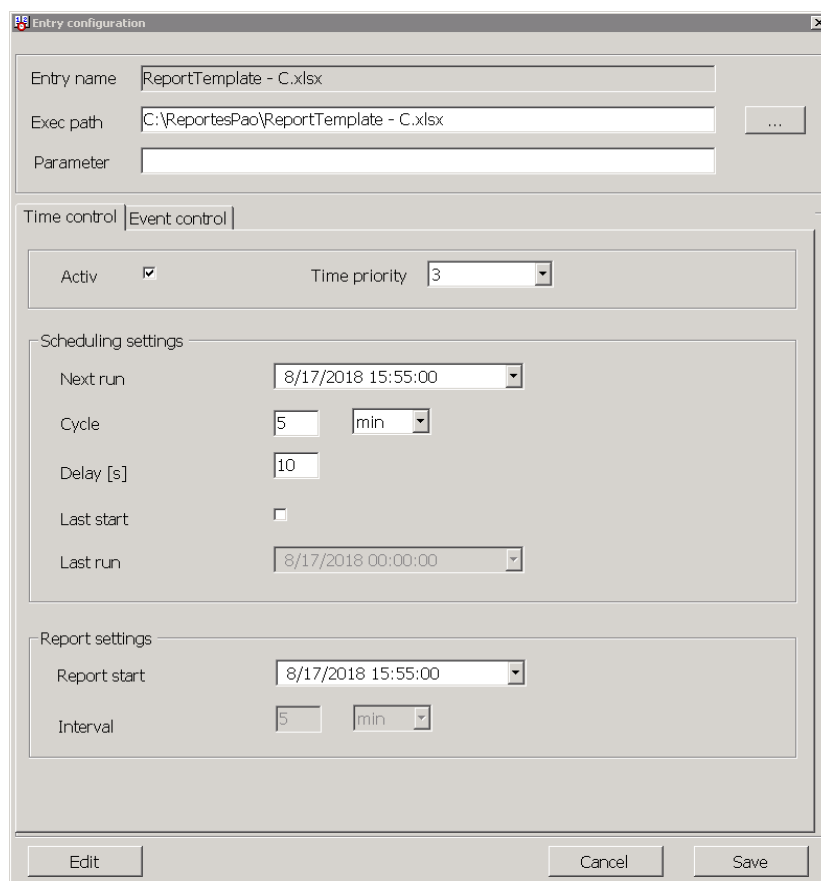


Figura 2.31. Configuración del cronograma de trabajo [20]

2.2.2.3 Tercera Etapa – Transferencia de archivos

Debido a la configuración del sistema SCADA, la manipulación de archivos se debe realizar mediante dos programas que accede a la información y los importan de forma segura al usuario y al el sistema SCADA.

La Figura 2.33 muestra como se accede a la información de los diferentes servidores; es importante mencionar que el sistema se encuentra configurado de tal forma que solamente se pueda recibir información de los servidores y no enviar información a los servidores, es decir que realiza una conexión con la red interna de forma segura. Esto permite que los equipos de la DMZ puedan dar servicio a la red externa a la vez que proteger la red interna en el caso de que unos intrusos comprometan la seguridad de los equipos.

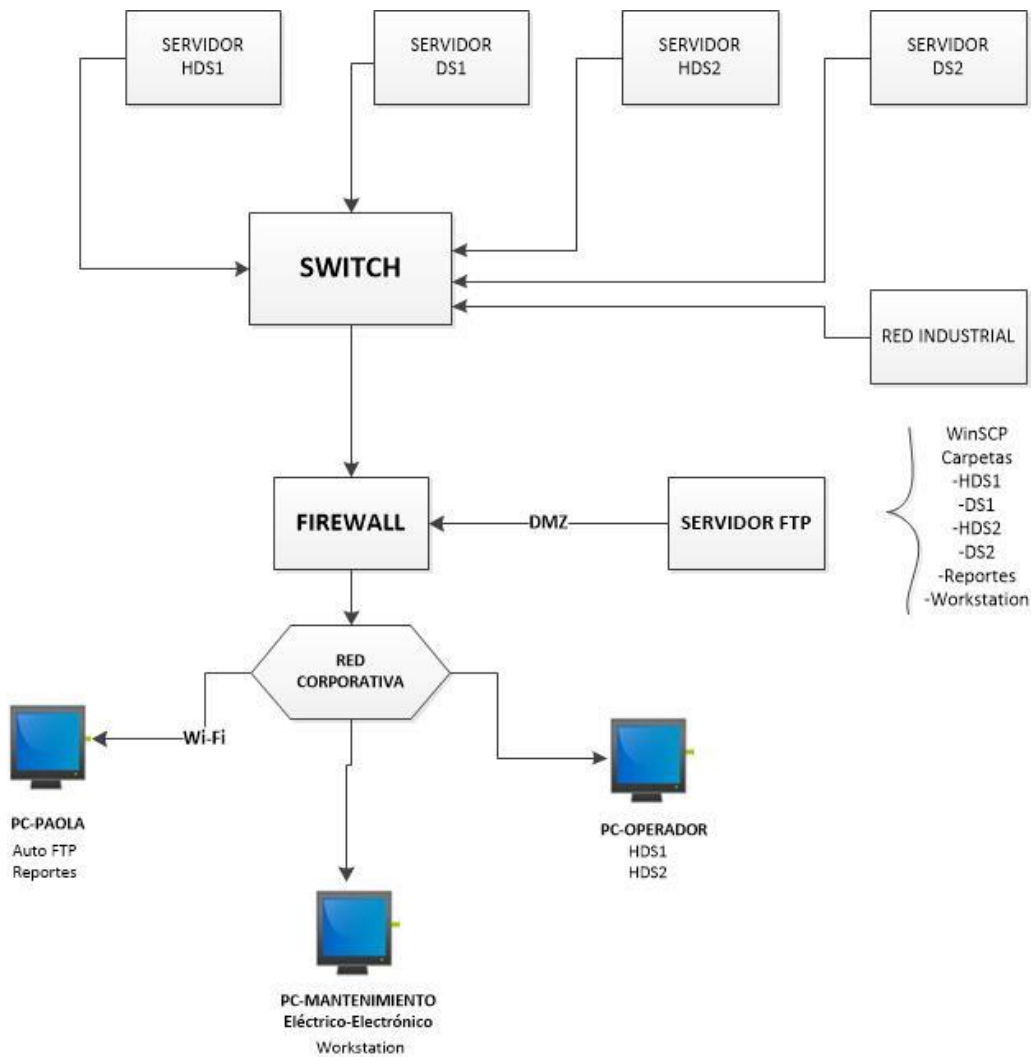


Figura 2.33. Diagrama de la configuración de la Red

Los archivos se obtienen a través de dos programas, el primero llamado WinSCP que envía los archivos desde la carpeta creada en alguno de los servidores HDS1 o HDS2 hacia una nueva carpeta externa disponible en el servidor FTP y el segundo llamado AutoFTP Manager, en el cual se definen los parámetros descarga de los reportes y así tener disponibilidad de la información.

2.2.2.3.1 WinSCP

WinSCP es una aplicación de software libre cuya función principal es facilitar la transferencia de archivos de forma segura entre dos sistemas informáticos, el local y el remoto, el cual permite efectuar operaciones básicas como descargar o subir documentos [22], [23].

El acceso a la información del sistema SCADA es restringido debido a la seguridad del mismo, por esta razón se requiere de un programa adicional para su obtención. El programa WinSCP para transferir los archivos desde el servidor sobre el cual se esté trabajando en el ejemplo se usa el servidor HDS2 y la carpeta ReportesPruebas del servidor FTP. En la Figura 2.34 se observa como la aplicación WinSCP envía los documentos de un servidor a otro.

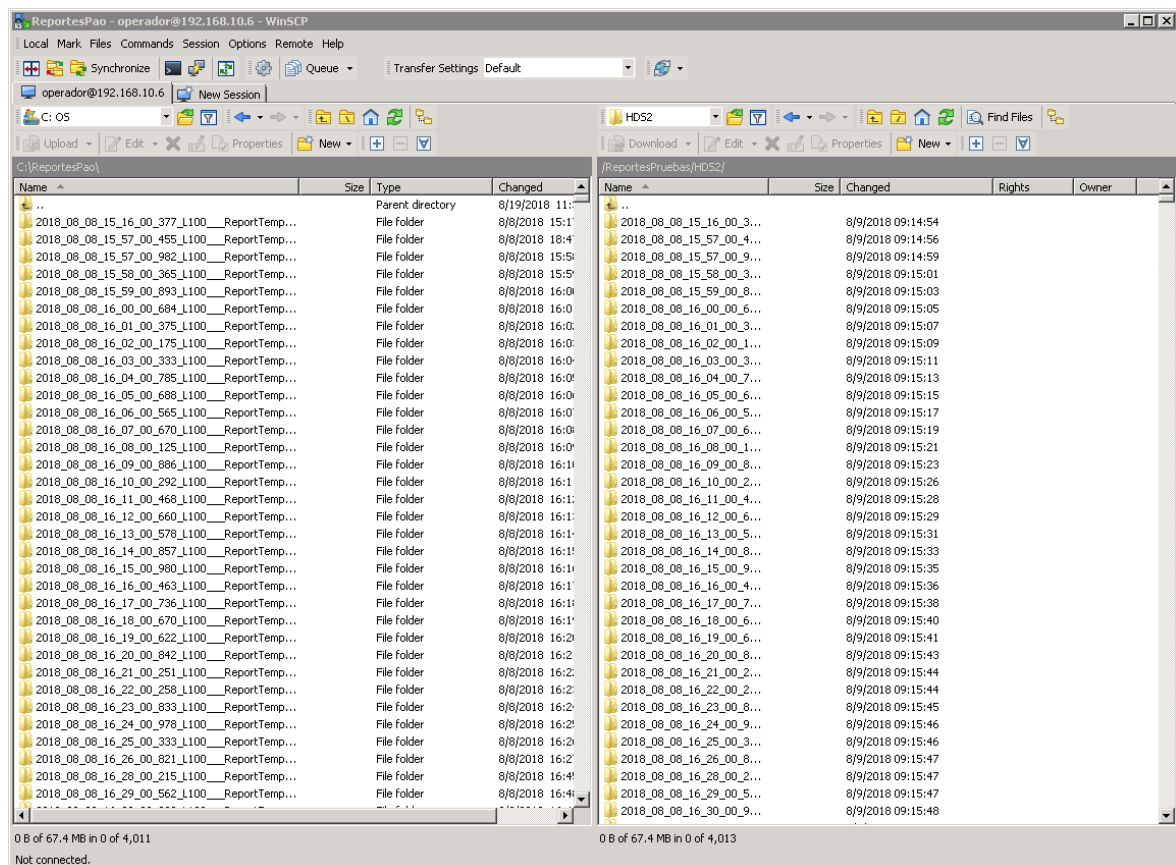


Figura 2.34. Software WinSCP empleado en la unidad de negocio Coca Codo Sinclair

Al contar con más de un servidor, es necesario configurar WinSCP con los servidores específicos para que se copien los archivos correctos en la carpeta del servidor FTP, para ello en la barra de opciones clic en Commands de la manera que se indica en la Figura 2.35 se selecciona *Mantener actualizado el directorio remoto* que abre la pantalla de la Figura 2.36 misma que se configura para que el momento que detecte un cambio éste se manifieste en la carpeta del servidor FTP.

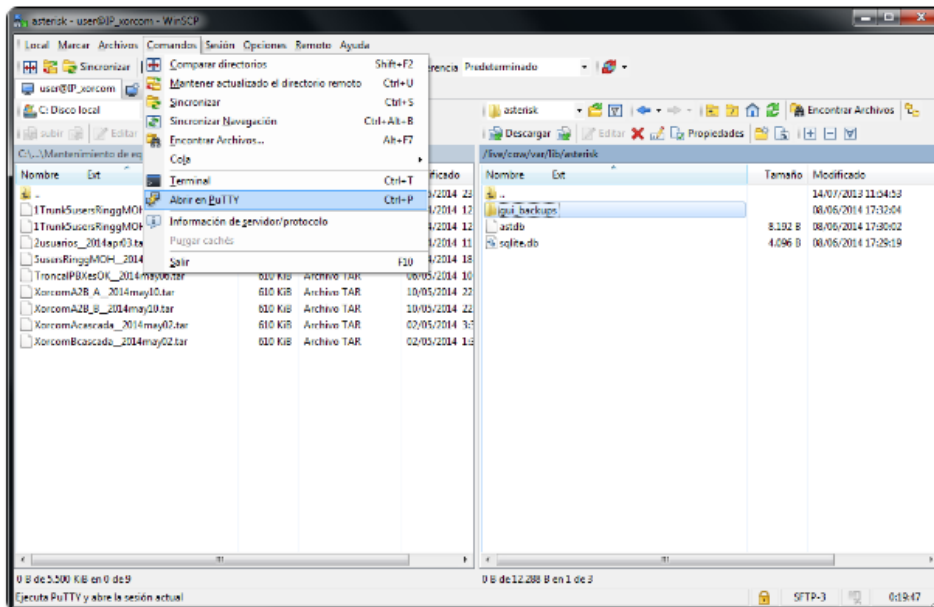


Figura 2.35. Configuración para la sincronización de WinSCP

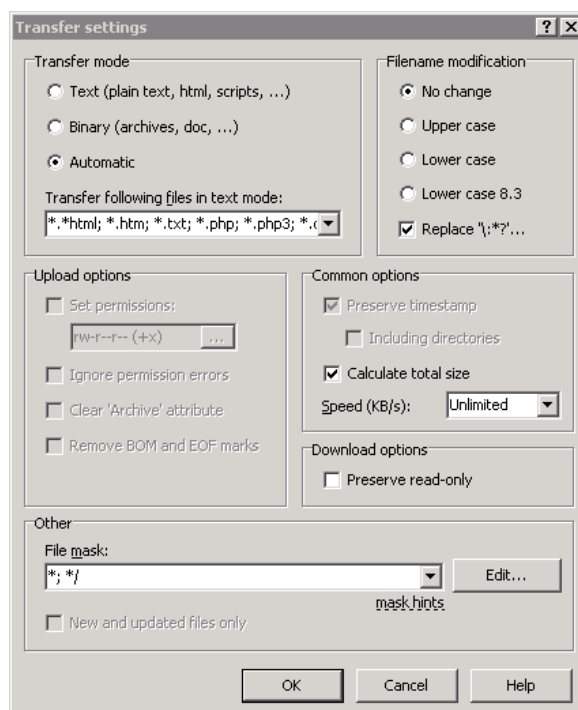


Figura 2.36. Programación del WinSCP de forma automática

Para configurar la pestaña de la Figura 2.36, clic en **OK**. Los archivos del escritorio sobre el cual se trabaja se almacenan en el servidor FTP, como se indica en la Figura 2.37, los cuales posteriormente serán copiados del servidor FTP a la carpeta de la PC.

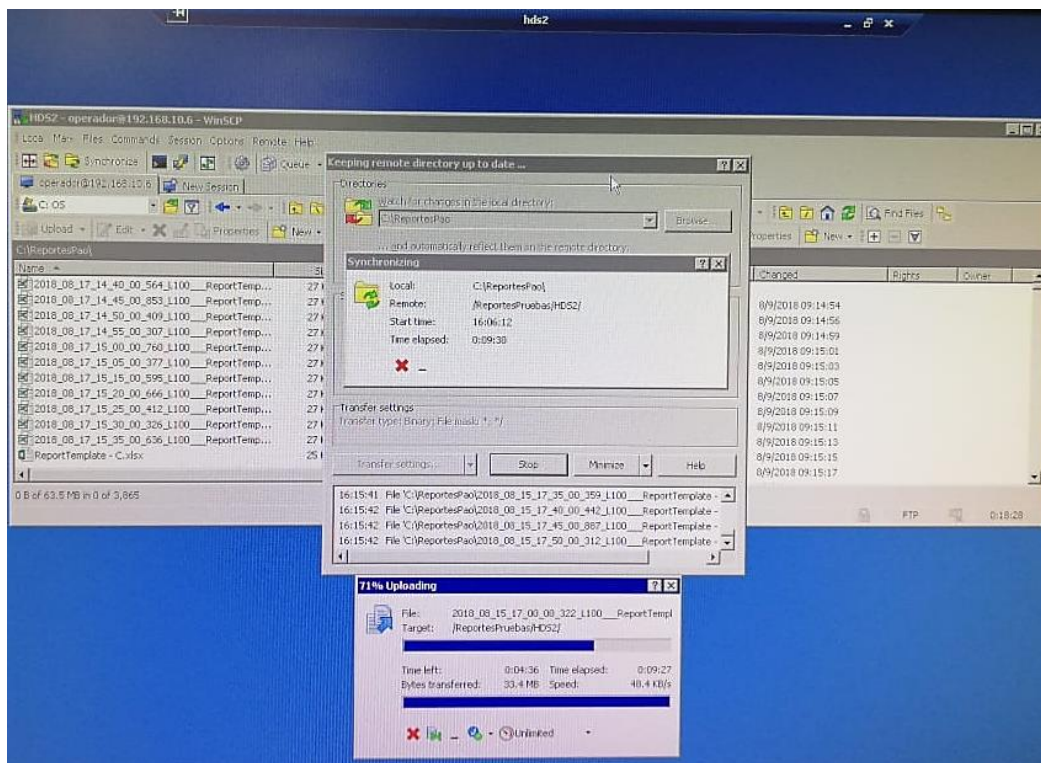


Figura 2.37. Sincronización de archivos con WinSCP

2.2.2.3.2 Protocolo FTP

El protocolo de red FTP (File Transfer Protocol) sirve para la transferencia de archivos entre sistemas conectados a una red TCP (Transmission Control Protocol), basado en la arquitectura cliente-servidor. Desde un equipo cliente se puede conectar a un servidor para descargar archivos desde él o para enviar archivos, independientemente del sistema operativo utilizado en cada equipo [24].

El servicio FTP es ofrecido por la capa de aplicación del modelo de capas de red TCP/IP al usuario, utilizando normalmente los puertos de red 20 y 21. Un problema básico de FTP es que está pensado para ofrecer la máxima velocidad en la conexión, pero no la máxima seguridad, ya que se realiza en texto plano sin ningún tipo de cifrado, con lo que un posible atacante puede capturar este tráfico, acceder al servidor y/o apropiarse de los archivos transferidos. La Figura 2.38 representa un diagrama de un servidor FTP.

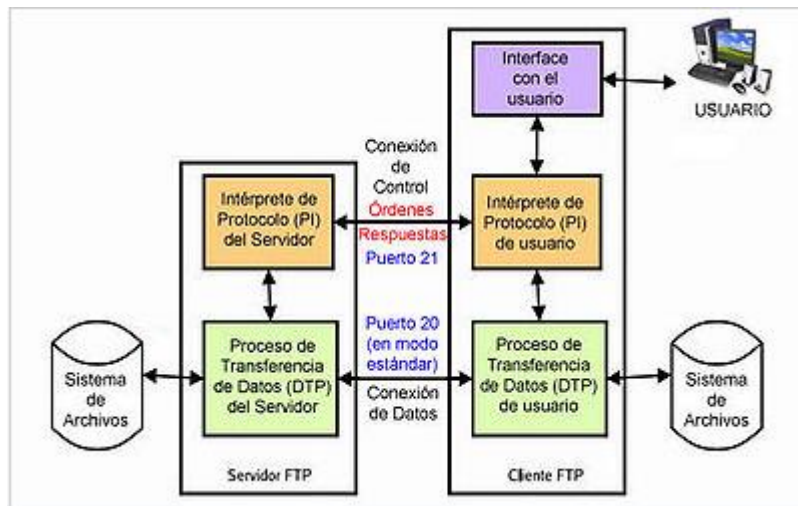


Figura 2.38. Diagrama de un servicio FTP [24]

El protocolo FTP está incluido dentro del modelo cliente-servidor, es decir, un equipo envía órdenes (el cliente) y el otro espera solicitudes para llevar a cabo acciones (el servidor).

Servidor FTP

Un servidor FTP es un programa especial que se ejecuta en un equipo servidor normalmente conectado a Internet (aunque puede estar conectado a otros tipos de redes, LAN, MAN, etc.). Su función es permitir el intercambio de datos entre diferentes servidores/ordenadores.

Por lo general, los programas servidores FTP no suelen encontrarse en los ordenadores personales, por lo que un usuario normalmente utilizará el FTP para conectarse remotamente a uno y así intercambiar información con él.

Cliente FTP

Cuando un navegador no está equipado con la función FTP, o si se quiere cargar archivos en un ordenador remoto, se necesitará utilizar un programa cliente FTP. Un cliente FTP es un programa que se instala en el ordenador del usuario, y que emplea el protocolo FTP para conectarse a un servidor FTP y transferir archivos, ya sea para descargarlos o para subirlos.

Para utilizar un cliente FTP se necesita conocer el nombre del archivo, el ordenador en que reside (servidor, en el caso de descarga de archivos), el ordenador al que se quiere transferir el archivo (en caso de querer subirlo al servidor), y la carpeta en la que se encuentra.

El usuario debe tener un nombre y un password para acceder a ficheros y a directorios. El usuario que inicia la conexión asume la función de cliente, mientras que el host remoto adopta la función de servidor.

2.2.2.3.3 Software Auto FTP Manager

Auto FTP Manager hace más fácil programar y automatizar la transferencia de archivos. Cuenta con la facilidad de mover archivos entre servidores FTP con carpetas de la PC, y dispositivos móviles con la PC [23].

Auto FTP Manager es más que una herramienta de transferencia de archivos, en la que se crean perfiles de transferencia de archivos definiendo que archivos y carpetas se van a transferir. Los perfiles de transferencia automatizados pueden cargar, descargar o sincronizar directorios. Los filtros avanzados controlan los archivos que se transfieren o eliminan en función del tipo de archivo, nombre, tamaño o fecha de modificación.

Principalmente dentro del software Auto FTP se pueden realizar las siguientes acciones:

- Transferencia automática de documentos
- Transferencia segura de documentos
- Fácil manejo de documentos
- Control completo sobre la transferencia
- Realiza un seguimiento de los archivos con un registro detallado

2.2.2.3.4 Creación de un perfil en Auto FTP Manager

Auto FTP Manager es un software libre que se puede instalar fácilmente, una vez descargada la aplicación se configura el perfil con la información necesaria para conectarse al servidor siguiendo los pasos [25].

1. Hacer clic en Archivos y seleccionar *Nuevo perfil de conexión* como se muestra en la Figura 2.39.

En esta ventana se selecciona como será la transferencia de archivos y el tipo de perfil de conexión que puede ser de conexión rápida o automatizada, ya que transfiere los archivos automáticamente entre el servidor FTP y una carpeta de la PC. Configurado esto dar un clic en *Siguiente*.

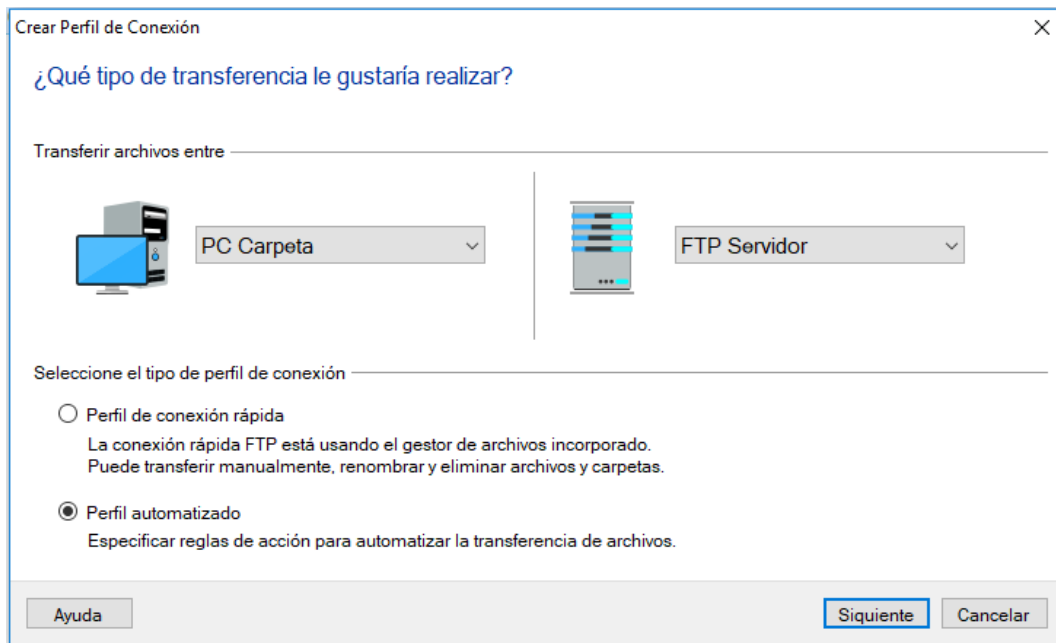


Figura 2.39. Creación del perfil de conexión [25]

2. Se configura la conexión del servidor FTP con:

- Dirección de FTP: Ingresar el nombre del host
- Ingrese el nombre de usuario y la contraseña para conectarse a su servidor FTP
- Anónimo: se marca en el caso que se desee conectarse al servidor FTP como un usuario anónimo, es decir sin un usuario y contraseña
- Puerto: El puerto del servidor es el puerto en el que Auto FTP Manager intentará conectarse al servidor FTP. Esto es normalmente 21
- Protocolo FTP: Auto FTP Manager admite diferentes protocolos FTP, FTPS y SFTP

La configuración realiza y procede a comprobar la conexión, hasta que sea exitosa y se da clic en *Siguiente* como se muestra en la Figura 2.40.

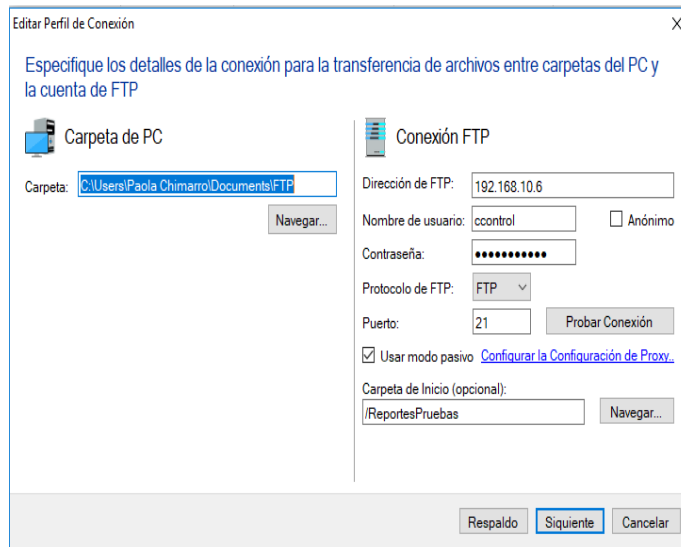


Figura 2.40. Especificación de transferencia y prueba de conexión [25]

3. En la ventana de la Figura 2.41 se especifican los ajustes de transferencia de archivos seleccionando transferir archivos de FTP:192.168.10.6 hacia la carpeta C:\Users\Paola Chimarro\Desktop\CodigoTesis, además se debe configurar la sección en la que se establece la planificación para comenzar la transferencia a la hora especificada; dar un clic en configurar.

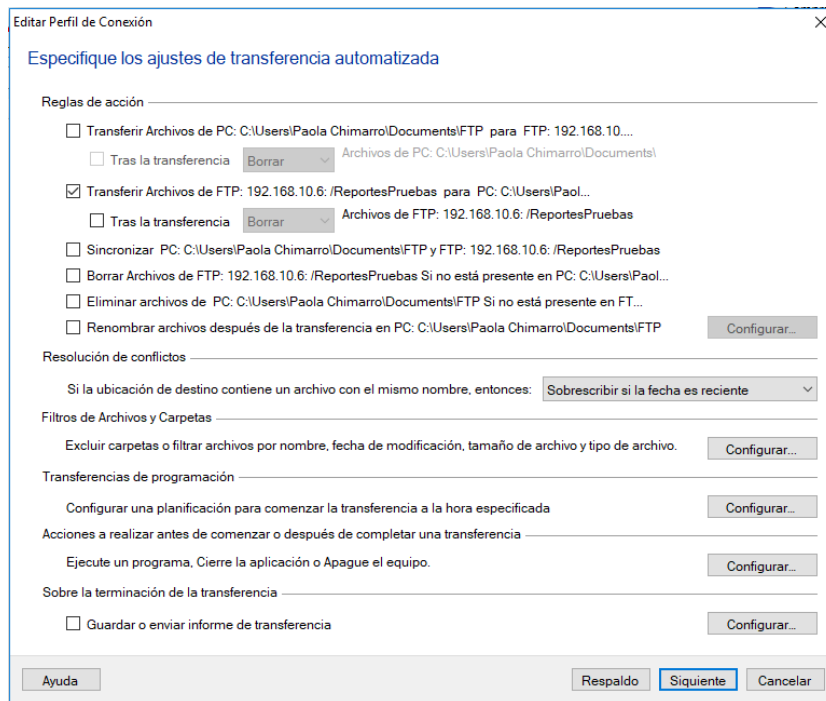


Figura 2.41. Ajustes de transferencia automática [25]

En la ventana de la Figura 2.42 se escoge que la transferencia automática sea diaria y cada minuto. Especificada esta ventana se da un clic en *OK*. Y con ello queda configurada la ventana de la Figura 2.41, luego dar un clic en *Siguiente*.

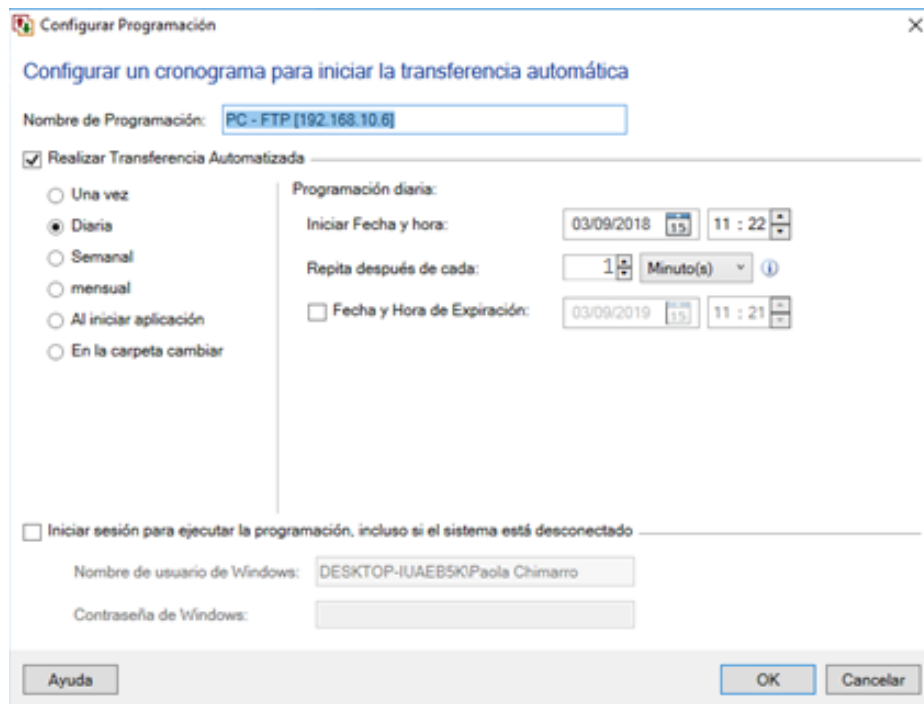


Figura 2.42. Configuración del cronograma para la transferencia automática [25]

4. Se especifica la acción que realiza el perfil de conexión creado, entre las opciones que se indican en la Figura 2.43, se escoge la opción de abrir la conexión para este perfil y por último se da un clic en *Finalizar*.

Editar Perfil de Conexión

Especifique el nombre del perfil y seleccione tarea para ejecutar el siguiente

Nombre de perfil: PC-FTP [192.168.10.6]

Después de crear un nuevo perfil de conexión, ¿qué le gustaría hacer a continuación?

- Abrir conexión para este perfil
- Crear otro perfil de conexión
- Mostrar información de perfil
- Ejecutar las Reglas de Transferencia Automatizadas para este perfil ahora

Respaldo Finalizar Cancelar

Figura 2.43. Forma de ejecución del perfil creado [25]

3. METODOLOGÍA

Para la construcción de las zonas seguras de operación de las unidades de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, se consideran los límites operativos del generador sincrónico y de la turbina hidráulica. Se crea una interfaz gráfica en la que el operador pueda observar el punto de operación. La curva de capacidad es una herramienta que sirve de apoyo al operador. Se calcula cada uno de los límites mediante un código realizado en el software MATLAB.

Al tratarse de una aplicación que interactúa constantemente con la base de datos requiere que los archivos tengan la de extensión .xls, es decir que sean archivos Excel. MATLAB cuenta con los comandos necesarios para importar la información de estos archivos, de manera que los reportes creados en la sección 2.2 sean de utilidad en el cálculo de los límites de operación.

3.1 Límites operativos de los generadores sincrónicos

La demanda de energía es impredecible, es decir no se puede saber con certeza los requerimientos de potencia activa y reactiva a producir. Por esta razón, el punto de operación de la central de generación varía constantemente. La potencia activa está relacionada directamente con el control de frecuencia, mientras que la potencia reactiva con el control de voltaje [15].

Los límites para la operación segura se clasifican en función de sus características:

- Límites mecánicos: potencias mecánicas máxima y mínima
- Límites eléctricos internos: corriente de armadura, corrientes de campo máxima y mínima, calentamiento del núcleo y servicios auxiliares
- Límites eléctricos externos: margen de estabilidad en estado estable

3.1.1 Corriente de armadura (calentamiento del estator)

El límite de calentamiento del estator está definido por la corriente nominal de armadura que puede soportar el devanado de armadura sin exceder la temperatura permitida. Es importante señalar que este límite eléctrico se encarga de evitar el sobrecalentamiento de los conductores de la armadura y la reducción de la vida útil del aislamiento [14].

La forma de obtener el lugar geométrico de este límite es dando valores de potencia reactiva (Q) desde un factor de potencia 0 en atraso hasta un factor de potencia 0 en adelanto y calcular la potencia activa en la Ecuación 3.1 para la potencia aparente nominal del generador.

$$P = \sqrt{S_n^2 - Q^2}$$

Ecuación 3.1. Potencia activa

Este lugar geométrico es representado por una semicircunferencia de radio igual a la potencia aparente. Este valor viene dado por el producto del voltaje nominal y la corriente nominal de armadura. Este límite se muestra en la Figura 3.1 [19], [26].

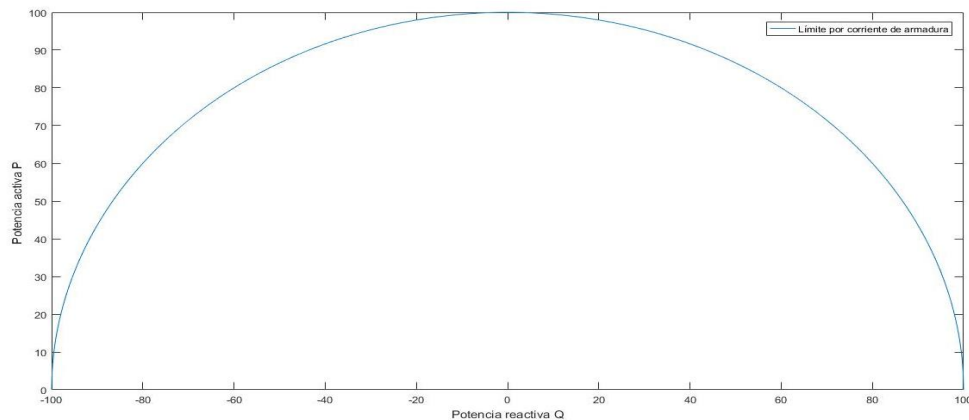


Figura 3.1. Lugar geométrico de la corriente de armadura

3.1.2 Potencia máxima de la máquina motriz (turbina)

El límite de potencia máxima está dado por la potencia nominal de la turbina. Este valor considera el esfuerzo mecánico que puede soportar las partes mecánicas de la máquina motriz en condiciones nominales. Este límite es independiente de la potencia reactiva que puede entregar el generador [14].

La capacidad de potencias activas máximas y mínimas de la central están definidas por el diseño propio de la turbina aunque también depende de la disponibilidad del caudal, en este caso se analiza si opera una sola unidad en la tubería (1+1) o si operan cuatro unidades en cada tubería (4+4), como se indica en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Potencias máximas y mínimas garantizadas para diferentes caídas [27]

Caída neta m	Caudal máximo m ³ /s	P _{max} MW	P _{min} MW
616,74 (1+1)	35,04	192,850	18,750
608,10 (4+4)	35,27	191,330	18,750
604,10 (4+4)	34,93	188,266	18,750
594,27 (4+4)	35,40	187,550	18,750

3.1.3 Potencia mínima de la máquina motriz

La potencia mínima de la unidad está relacionada con la eficiencia del grupo turbina-generador, cuando el generador entrega poca potencia provoca vibraciones en la máquina [28].

En el caso de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, el valor de potencia mínima con la que puede operar cada turbina es 18,75 MW, ya que la eficiencia es prácticamente constante en el tiempo de operación de la turbina. Este valor considera principalmente el consumo de los servicios auxiliares de la unidad.

Las pruebas de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair fueron realizadas por la compañía proveedora Andritz, bajo la norma IEC 60193:1999, con el objetivo de estudiar el comportamiento hidráulico de la turbina.

Los resultados de eficiencia consideran la operación de 1, 2, 3, 4 y 6 inyectores a distintas caídas netas. Estas gráficas se consiguen trasponiendo las colinas de cada inyector, dando como resultado gráficas de caudal versus eficiencia y adicionalmente el desplazamiento de la aguja con relación a la potencia de salida, como se observa en las Figuras 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 [27].

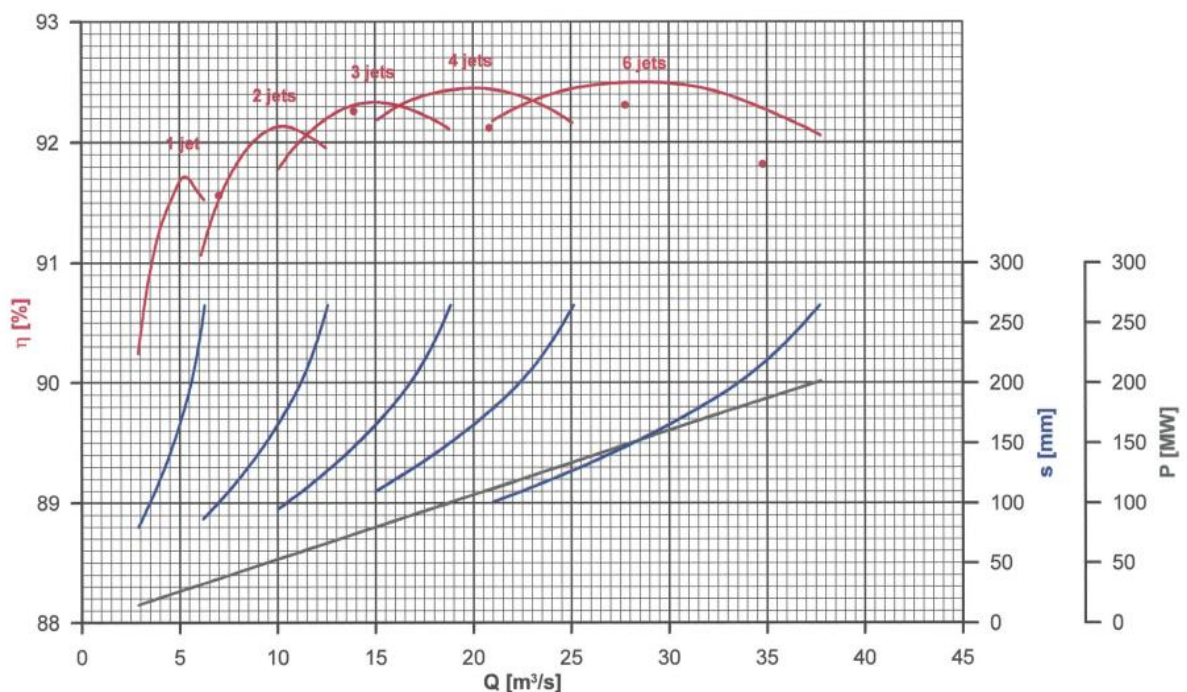


Figura 3.2. Curvas de caudal versus eficiencia, desplazamiento de la aguja y potencia para una altura mínima de 594,27 m (4+4) [27]

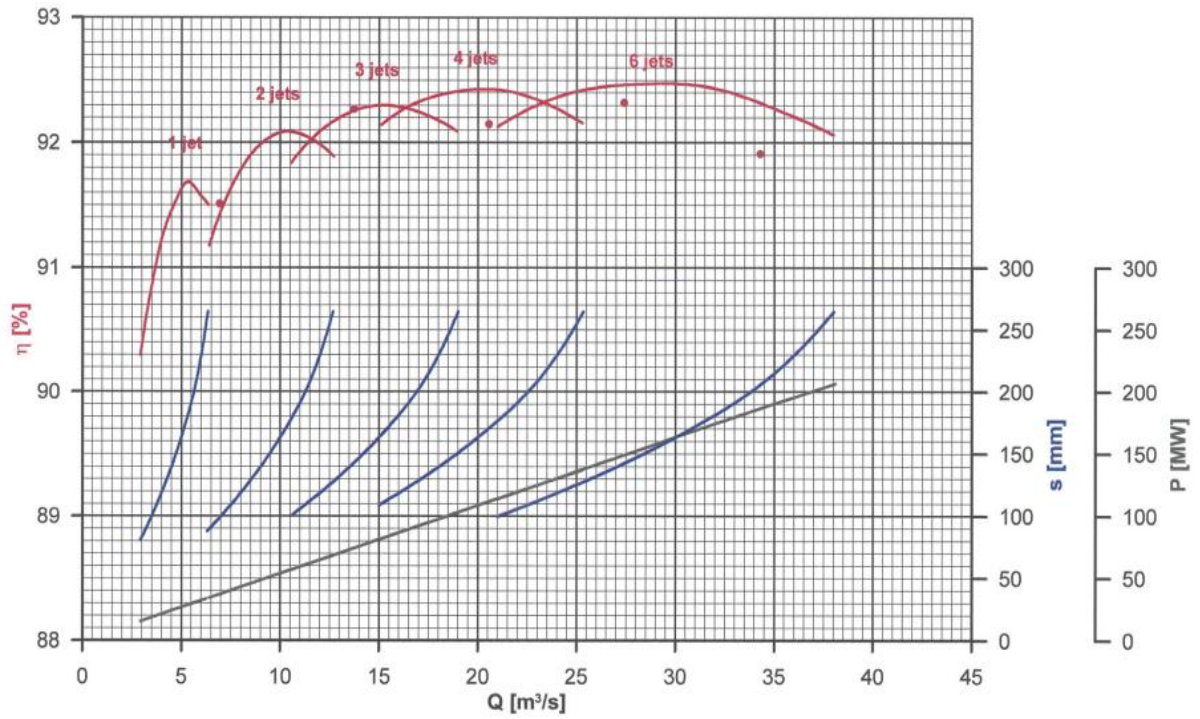


Figura 3.3. Curvas de caudal versus eficiencia, desplazamiento de la aguja y potencia para una altura nominal de 604,10 m (4+4) [27]

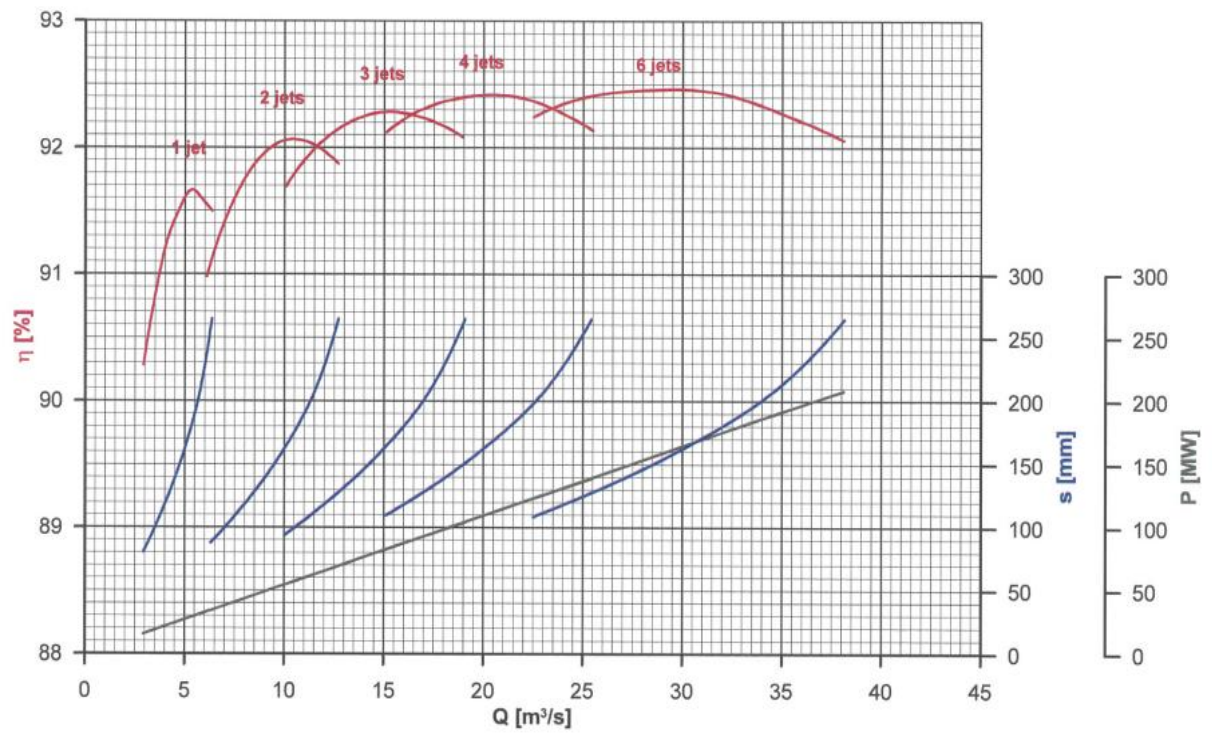


Figura 3.4. Curvas de caudal versus eficiencia, desplazamiento de la aguja y potencia para una altura máxima de 608,10 m (4+4) [27]

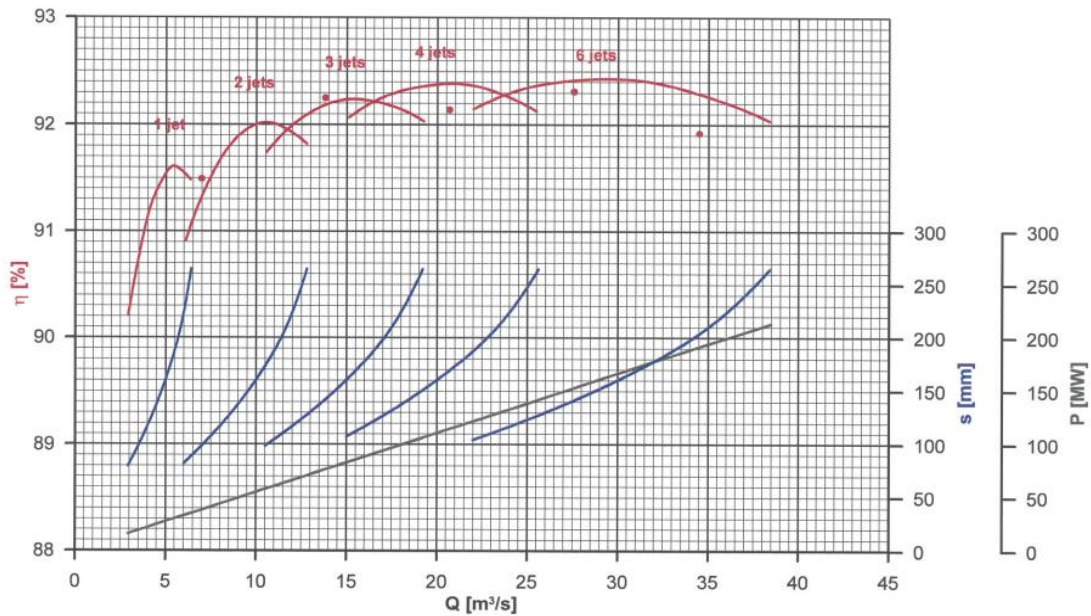


Figura 3.5. Curvas de caudal versus eficiencia, desplazamiento de la aguja y potencia para una altura máxima de 616,74 m (1+1) [27]

De la misma forma, en base a pruebas se determina la eficiencia de la unidad a distintos porcentajes de potencia nominal, cuyos resultados se detalla en la Tabla 3.2. Las pruebas determinan que el generador tiene una eficiencia ponderada de 98,067% [29].

Tabla 3.2. Pruebas de eficiencia del generador [29]

Unidad	Potencia Nominal				
	100%	80%	60%	40%	20%
Potencia Aparente MVA	205	164	123	82	41
Potencia Activa MW	184,5	147,6	110,7	73,8	36,9
Potencia Reactiva MVA _r	89,3	71,44	53,58	35,72	17,86
Factor de potencia	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Voltaje del estator kV	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8
Corriente del estator A	8576,6	6861,28	5145,96	3430,64	1715,32
Corriente de excitación A	2275,3	2041,1	1808,3	1591,7	1393,3
Medición de eficiencia %	98,567	98,421	98,13	97,464	95,37
Medición de eficiencia ponderada %	98,067				

La apertura de cada inyector se basa en los requerimientos de operación del generador, haciendo que los inyectores funcionen bajo aperturas establecidas, tanto en el aumento como en la disminución de potencia.

Como estándar, la unidad se pone en marcha con dos inyectores diametralmente opuestos para poder controlar la velocidad de sincronización en base a la disponibilidad de caudal.

El número de inyectores está programado con la Tabla 3.3; es decir, si se necesita que una unidad genere 80 MW, ese valor se multiplica por un factor de conversión de 0,1878, dando como resultado un caudal requerido de 15,024 m³/s [4].

Tabla 3.3. Inyectores operativos para el aumento de potencia

Inyectores	Caudal m ³ /s	Potencia de salida aproximada MW
2	< 11,6	< 62
3	11,6 – 16,3	62 - 86
4	16,3 – 23,3	86 - 124
6	> 23,3	> 124

En base a las Tablas 3.2 y 3.3 se realiza la gráfica de la Figura 3.6, en la cual se puede observar la curva de eficiencia del generador a distintos porcentajes de potencia nominal así como de los intervalos en que los inyectores operan para un nivel de potencia.

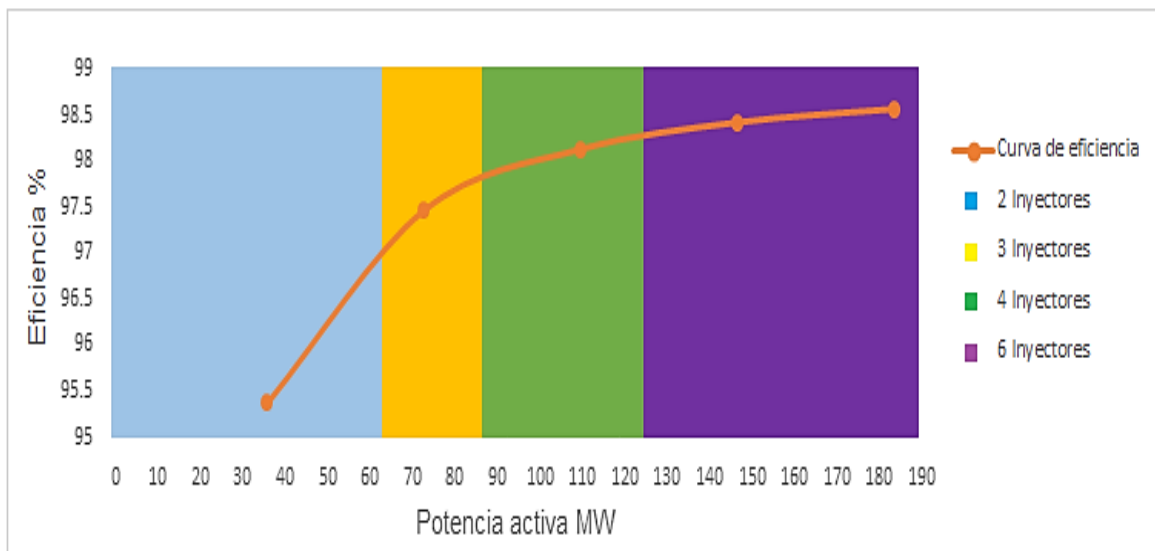


Figura 3.6. Curva de eficiencia en base al número de inyectores en el aumento de potencia

En caso de que se requiera disminuir la potencia en una unidad, se toman los datos de las Tablas 3.2 y 3.4 que indica la cantidad óptima de inyectores dependiendo del punto de operación del generador como se observa en la Figura 3.7. El intervalo en el que operan los inyectores es distinto al intervalo de incremento de potencia.

Tabla 3.4. Inyectores operativos para la disminución de potencia

Inyectores	Caudal m ³ /s	Potencia de salida aproximada MW
6	>22,1	> 118
4	22,1 – 15,1	118 – 81
3	15,1- 10,6	81 – 54
2	< 10,6	< 54

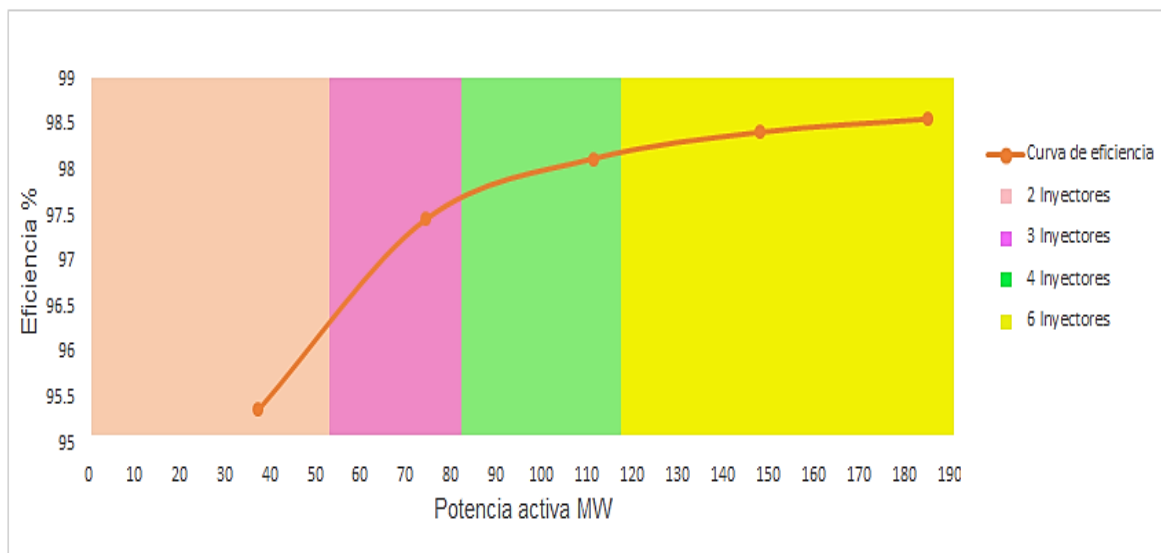


Figura 3.7 Curva de eficiencia en base al número de inyectores en la disminución de potencia

Estos cambios de aumento o disminución de potencia podrían causar problemas en la unidad; por esta razón, existe una banda muerta usada para satisfacer los requerimientos del sistema en cualquier modo de operación del gobernador electrónico.

En el regulador de velocidad está programada la cantidad de inyectores que se requieren para operar según los parámetros característicos de la turbina, haciendo que los inyectores funcionen bajo condiciones establecidas.

Los lugares geométricos de las potencias máximas y mínimas son líneas rectas, tal como se observa en la Figura 3.8.

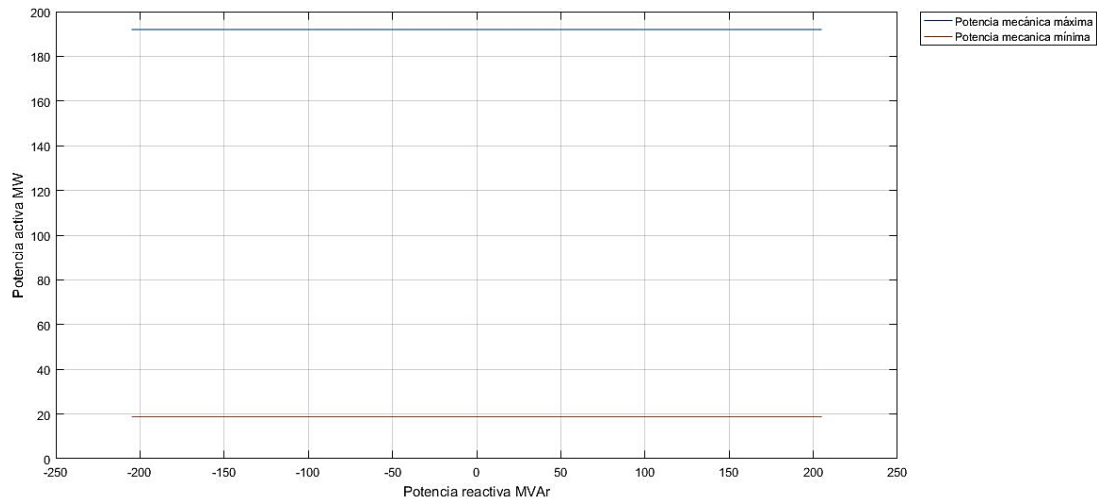


Figura 3.8. Lugares geométricos de los límites de potencias activa máxima y mínima

3.1.4 Límite por corriente de excitación (rotor)

Está definido por el calentamiento permitido en el devanado de campo, expresado en términos de la máxima corriente de excitación [16].

Las máquinas sincrónicas están equipadas con una protección de sobreexcitación (OEL) para prevenir la sobrecarga en el devanado de campo y una protección de subexcitación (UEL) evitando una excesiva baja excitación de la máquina.

Los límites por corrientes de campo se clasifican en:

- Límite de corriente máxima de campo
- Límite de corriente mínima de campo

3.1.4.1 Límite por corriente mínima de campo

El lugar geométrico de la corriente mínima de campo limita la operación en la zona de subexcitación de la unidad. En caso de que el generador opere en esta zona, se debe tomar en cuenta que si la corriente de excitación es muy pequeña provocaría que la máquina no tenga el suficiente torque magnético para mantener el sincronismo, dando como resultado una posible pérdida de estabilidad [16].

El cálculo de este límite se determina con la Ecuación 2.7, de la que se despeja E_{nom} obteniendo la Ecuación 3.2 y de la que también se deriva respecto a δ_{nom} , como se muestra en la Ecuación 3.3.

$$P = \frac{V_t E_{nom}}{X_d} \text{sen } \delta_{nom} + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \text{sen } 2\delta_{nom}$$

$$E_{nom} = \frac{\left(P - \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sen 2\delta_{nom} \right) \cdot X_d}{V_t \sen \delta_{nom}}$$

Ecuación 3.2. Despeje de E_{nom} a partir de la potencia activa

Donde:

E_{nom} : voltaje interno nominal

δ_{nom} : ángulo de torque nominal

$$\frac{\partial P}{\partial \delta_{nom}} = \frac{V_t E_{nom}}{X_d} \cos \delta_{nom} + V_t^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta_{nom} = 0$$

Ecuación 3.3. Derivada de la potencia activa con respecto a δ_{nom}

Se reemplaza la Ecuación 3.2 en la Ecuación 3.3, obteniendo la Ecuación 3.4, que es una expresión de la potencia activa donde no se involucra el voltaje interno del generador.

$$\frac{V_t \cdot \left(P - \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sen 2\delta_{nom} \right) \cdot X_d}{V_t \cdot \sen \delta_{nom} \cdot X_d} \cos \delta_{nom} + V_t^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta_{nom} = 0$$

$$\frac{\left(P - \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot (2\sen \delta_{nom} \cos \delta_{nom}) \right)}{\sen \delta_{nom}} \cos \delta_{nom} + V_t^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta_{nom} = 0$$

$$\frac{P}{\tan \delta_{nom}} - \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot (2 \cos^2 \delta_{nom}) + V_t^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta_{nom} = 0$$

$$\frac{P}{\tan \delta_{nom}} - V_t^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot (\cos 2\delta_{nom} + \sen^2 \delta_{nom} - \cos 2\delta_{nom}) = 0$$

$$\frac{P}{\tan \delta_{nom}} - \left[V_t^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sen^2 \delta_{nom} \right] = 0$$

Ecuación 3.4. Expresión de potencia activa

Aplicando las Ecuaciones 3.2 y 3.4, se hallan los valores nominales de δ y E para el generador. Es importante destacar que para un generador de polos salientes, a

diferencia de un generador de polos lisos, la potencia activa máxima no se produce con un $\delta=90^\circ$, debido a la potencia adicional por la saliencia polar.

A partir del voltaje interno nominal E_{nom} calculado, se obtiene el voltaje interno mínimo E_{min} que generalmente toma valores de 5 al 20% y reemplazando δ_{nom} por δ_{max} y E_{nom} por E_{min} en la Ecuación 3.3, se obtiene la Ecuación 3.5, de la cual se consigue el valor del ángulo de torque máximo δ_{max} .

$$\frac{\partial P}{\partial \delta_{max}} = \frac{V_t E_{min}}{X_d} \cos \delta_{max} + V_t^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta_{max} = 0$$

Ecuación 3.5. Derivada de la potencia activa con respecto a δ_{max} y E_{min}

Para obtener la gráfica de este límite, se procede a calcular distintos valores de potencias activa y reactiva, dando valores a δ desde cero hasta el δ_{max} calculado, reemplazando dichos valores en las Ecuaciones 2.7 y 2.8. Tomando en cuenta que V_t es el voltaje nominal.

3.1.5 Límite por corriente máxima de campo

La corriente máxima de campo está dada por la capacidad máxima de corriente del devanado de excitación. En caso que un generador opere sobre esta corriente se produce sobrecalentamiento en los devanados de excitación [14].

La curva limitante de la corriente máxima de campo de los generadores se obtiene para condiciones nominales, calculando el voltaje interno máximo, que por lo general es el voltaje interno nominal.

Una vez calculado el E_{nom} se procede a obtener el δ_{max} , mediante la Ecuación 3.6 [16].

$$\frac{\partial P}{\partial \delta_{max}} = \frac{V_t E_{nom}}{X_d} \cos \delta_{max} + V_t^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta_{max} = 0$$

Ecuación 3.6. Derivada de la potencia activa con respecto a δ_{max}

Finalmente, para obtener el lugar geométrico de este límite se procede de la misma forma como se obtuvo el límite de corriente mínima de campo, con la diferencia de que en este caso se emplea la Ecuación 3.6 en lugar de la Ecuación 3.5. En la Figura 3.9 se observan los límites mínimo y máximo de la corriente de campo.

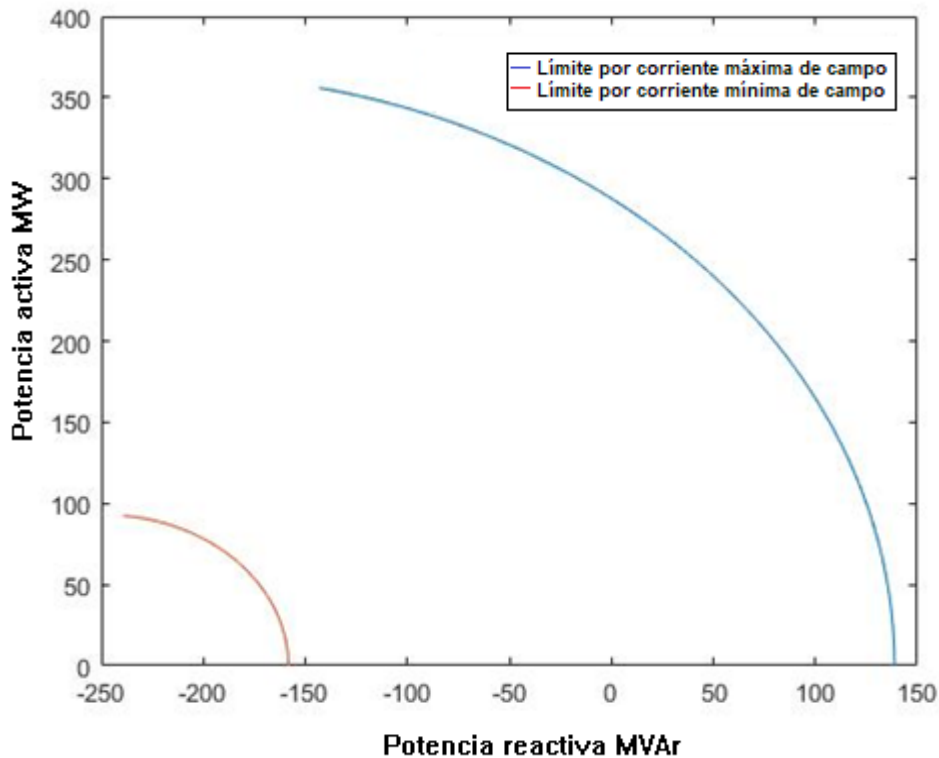


Figura 3.9. Límites del generador por corriente de campo máxima y mínima

3.1.6 Límite del margen de estabilidad en estado estable

Este límite también conocido como ángulo de torque máximo, representa una provisión de potencia necesaria que deben tener los generadores sincrónicos al entregar su máxima capacidad de potencia activa cuando se encuentra en la condición de subexcitación. Con el fin de proteger al generador de la inestabilidad y pérdida del sincronismo, se considera justamente un porcentaje como margen de seguridad entre el 10% y 20%, lo cual permite entregar potencia de manera confiable con bajas corrientes de campo.

Los cambios aleatorios de carga e incluso de configuraciones del sistema, hacen que constantemente se presenten pequeñas perturbaciones en el sistema de potencia, por lo que los generadores pueden ingresar en una zona de inestabilidad. La inestabilidad en un generador se refiere a la posible pérdida de sincronismo con el sistema eléctrico de potencia al cual se encuentra conectado [30].

El voltaje referencial de entrega a la barra de alto voltaje es determinado por las condiciones y requerimientos del sistema, de esta manera la unidad aporta potencia reactiva en unos casos o recibe en otros. Un factor importante en el establecimiento del rango de voltaje en la barra del sistema es la posición del tap de su transformador de

unidad, por esta razón en el cálculo del límite del margen de estabilidad en estado estable se debe considerar el transformador de unidad [31].

Los distintos valores de potencia con margen de estabilidad en estado estable (MEEE) se calculan con la Ecuación 3.7, en la que el valor de $P_{\max 1}$ es el valor de P_{i1} calculado anteriormente [16].

$$P_{i1} = P_{\max 1} - MEEE * P_{\max}$$

Ecuación 3.7. Potencia de operación para el MEEE

Donde:

P_{i1} : Potencia de operación

$P_{\max 1}$: Potencia máxima para un determinado valor de E

MEEE: Margen de estabilidad en estado estable (%)

Esta potencia P_{i1} se constituye en el primer punto del par ordenado (Q_i, P_i) , que forman la gráfica del límite por margen de estabilidad en estado estable.

El lugar geométrico de este límite está representado por un semi paraboloides en la condición de subexcitación, para lo cual se requiere conocer el máximo ángulo δ o ángulo de torque que la máquina puede alcanzar. Por esta razón es necesario conocer el tipo de generador con el cual se va a trabajar, debido a que un generador cilíndrico alcanza su máximo ángulo a los 90° , mientras que el generador de polos salientes alcanza su máximo ángulo antes de los 90° , como se observa en la Figura 3.10.

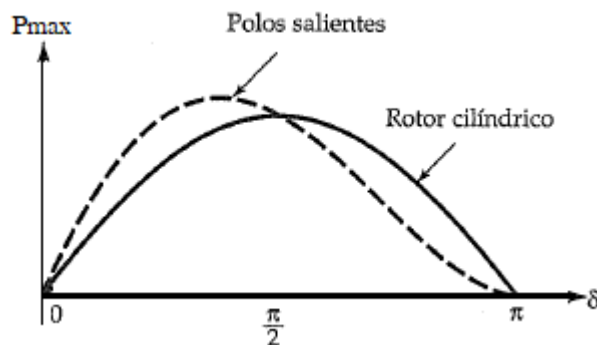


Figura 3.10. Potencia desarrollada por un generador sincrónico como función del ángulo de par [10]

Para calcular el margen de estabilidad en estado estable, se deben encontrar para diferentes ángulos los valores de voltaje interno máximos en varias condiciones de transferencia de potencia, siguiendo el procedimiento que se detalla a continuación:

Se plantea un sistema no lineal de dos ecuaciones que permita obtener E_{max} y δ_{max} , partiendo de la Ecuación 3.8, derivando en función de δ_{max} y despejando E_{max} [16].

$$P_{max} = \frac{V_t \cdot E_{max1}}{X_d + X_t} \text{sen } \delta_{max} + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q + X_t} - \frac{1}{X_d + X_t} \right) \text{sen } 2\delta_{max}$$

Ecuación 3.8. Potencia activa máxima considerando el transformador de unidad

$$\frac{\partial P_o}{\partial \delta_o} = \frac{V_t \cdot E_{max1}}{X_d + X_t} \cos \delta_{max} + V_t^2 \left(\frac{1}{X_q + X_t} - \frac{1}{X_d + X_t} \right) \cos 2\delta_{max} = 0$$

Ecuación 3.9. Derivada de la potencia activa máxima

Con la Ecuación 3.8 y la Ecuación 3.9 se calcula el valor de E_{max} y δ_{max} . El valor de E_{max} calculado se reemplaza en la Ecuación 3.10, en el que el valor de P_i se lo calcula con la Ecuación 3.7, de esta forma se tienen varios valores de ángulos δ_{maxME} , los cuales son reemplazados en la Ecuación 3.11.

$$P_i = \frac{V_t \cdot E_{max1}}{X_d + X_t} \text{sen } \delta_{maxME} + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q + X_t} - \frac{1}{X_d + X_t} \right) \text{sen } 2\delta_{maxME}$$

Ecuación 3.10. Potencia activa para hallar δ_{maxME}

$$Q_i = \frac{V_t \cdot E_{max1}}{X_d + X_t} \cos \delta_{maxME} + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q + X_t} - \frac{1}{X_d + X_t} \right) \cos 2\delta_{maxME} - \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q + X_t} - \frac{1}{X_d + X_t} \right)$$

Ecuación 3.11. Potencia reactiva para el margen de estabilidad en estado estable

Tanto los valores de P_i como los valores Q_i calculados se grafican en el plano (Q,P), obteniendo el lugar geométrico del margen de estabilidad en estado estable mostrado en la Figura 3.11.

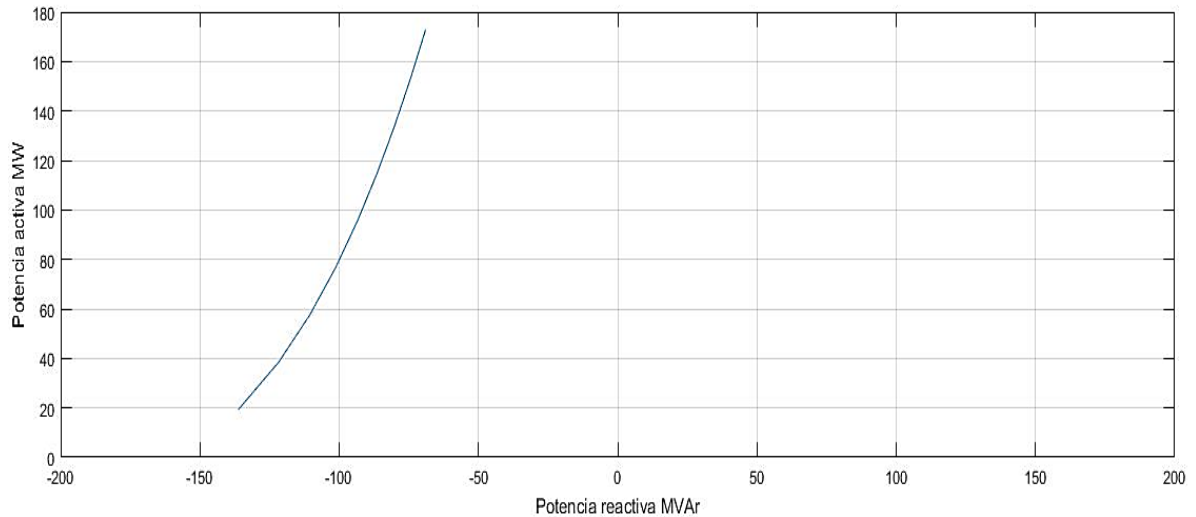


Figura 3.11. Límite del margen de estabilidad en estado estable

3.1.7 Calentamiento localizado en el terminal del núcleo del hierro del estator

El calentamiento localizado en la región terminal de la armadura impone un límite térmico a la capacidad del generador en la condición de subexcitación. El flujo de dispersión en los terminales de los devanados entra y sale en una dirección perpendicular (axial) a las laminaciones del estator como se observa en la Figura 3.12, donde se puede apreciar la disposición del flujo en la región final del hierro del estator [32].

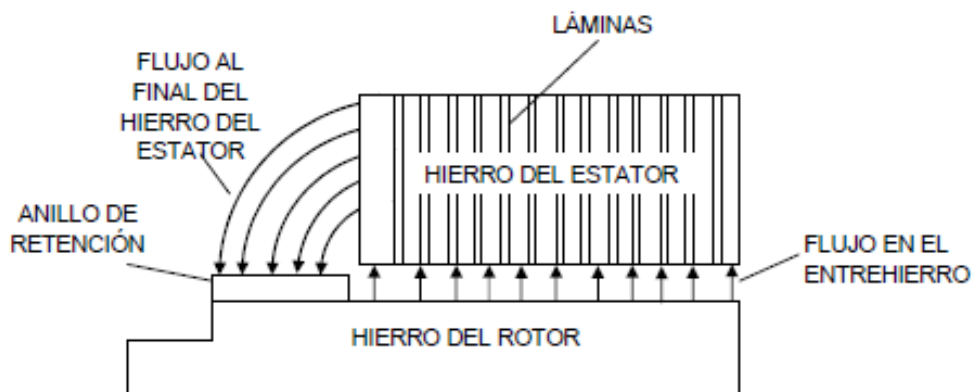


Figura 3.12. Disposición del flujo magnético en el terminal del hierro del estator [15]

Este calentamiento no es una condición normal, dado que se produce únicamente cuando el generador se encuentra trabajando en la zona de subexcitación, esto es

operando bajo la condición de factor de potencia en adelanto, lo que está relacionado con el hecho de que el generador esté absorbiendo potencia reactiva del sistema.

En un generador el flujo magnético que circula por el entrehierro es resultado de la suma vectorial del flujo proveniente del devanado de campo y el flujo de reacción de armadura. La mayoría del flujo del entrehierro circula directamente desde el rotor hacia el estator; sin embargo, al final del hierro del estator parte de este flujo magnético induce corrientes parásitas o de Eddy en el hierro del estator, cosa que no ocurre en el rotor, porque para este, la velocidad relativa del flujo magnético que gira a velocidad sincrónica en el entrehierro es cero [31].

Las altas corrientes de campo correspondientes a la condición de sobreexcitación mantienen el anillo de retención saturado, lo cual provoca que el flujo de dispersión terminal sea pequeño. Cuando el anillo de retención se encuentra saturado, produce una alta reluctancia debido a que el flujo magnético que circula a través de este es bajo. Por otro lado, si el generador trabaja en la zona de subexcitación donde las corrientes de campo son bajas y los anillos de retención no llegan a saturarse haciendo que el flujo de dispersión terminal de armadura aumente, como resultado del calentamiento en la región terminal se producen corrientes de Eddy en las láminas del estator. Este efecto de calentamiento resultante limita la salida del generador [32].

El estudio de este límite se realiza considerando un generador cilíndrico, ya que realizarlo para un generador de polos salientes, requiere de un estudio más detallado, debido a la saliencia polar y a las consideraciones que se deben tomar en cuenta. Por esta razón, se emplean las fórmulas de un generador cilíndrico obteniendo información aproximada de este límite y a su vez se compara con los valores de la Tabla 3.5 que están definidos actualmente en las protecciones de las LCU (unidades de control local) de las unidades.

Tabla 3.5. Valores de potencia activa y reactiva definidos en las LCU

Potencia activa P [p.u]	Potencia Reactiva Q [p.u]
0,00	-0,60
0,25	-0,58
0,50	-0,52
0,75	-0,44
1,00	0,00

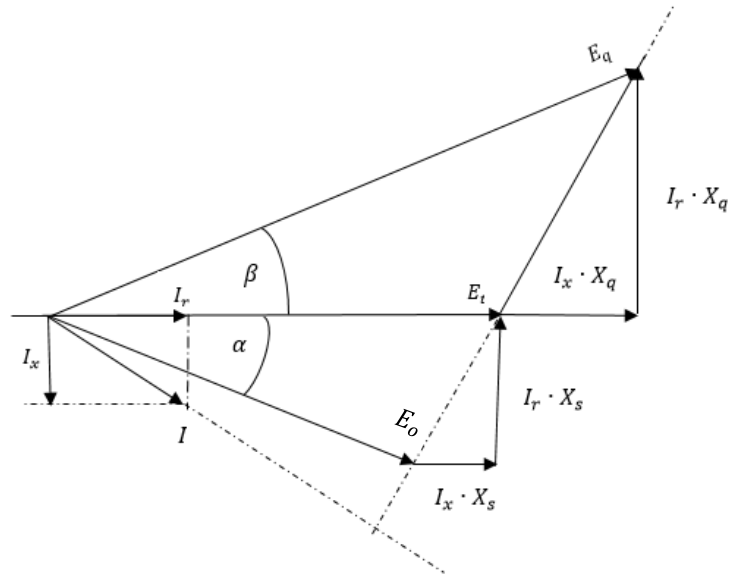


Figura 3.13. Diagrama fasorial del generador cilíndrico [33]

Partiendo del diagrama fasorial del generador cilíndrico de la Figura 3.13 se define el sistema y el voltaje interno del generador en términos del voltaje terminal y de las componentes en cuadratura de la corriente del generador. Estas componentes de corriente están relacionadas directamente con la potencia activa y reactiva del generador en terminales, en función de las componentes real e imaginaria de la corriente, como se indica en las Ecuaciones 3.12 y 3.13 [33].

$$I_r = \frac{P}{V_t}$$

Ecuación 3.12. Componente real de la corriente de armadura

$$I_x = \frac{Q}{V_t}$$

Ecuación 3.13. Componente imaginaria de la corriente de armadura

Una vez despreciada la saliencia de los polos, se conoce que el límite de estabilidad ocurre cuando el ángulo entre los dos voltajes es igual a 90° ; es decir, $\alpha + \beta = 90^\circ$ expresándolo mediante la relación trigonométrica de la Ecuación 3.14.

$$\tan(\alpha + \beta) = \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \beta}$$

Ecuación 3.14. Relación trigonométrica de la suma de dos ángulos

De la Ecuación 3.14 se toma la relación que hace que el ángulo entre los dos voltajes sea igual a 90° , obteniendo la Ecuación 3.15.

$$0 = 1 - \tan \alpha \cdot \tan \beta$$

Ecuación 3.15. Expresión matemática del ángulo entre dos voltajes igual a 90°

Las expresiones de $\tan \alpha$ y $\tan \beta$ para la Ecuación 3.15 se obtienen de la Figura 3.12.

$$\tan \alpha = \frac{I_r X_q}{V_t + I_x X_q}$$

$$\tan \beta = \frac{I_r X_s}{V_t - I_x X_s}$$

Sustituyendo las expresiones de las $\tan \alpha$ y $\tan \beta$ en la Ecuación 3.15.

$$0 = 1 - \left(\frac{I_r X_q}{V_t + I_x X_q} \right) \cdot \left(\frac{I_r X_s}{V_t - I_x X_s} \right)$$

Arreglando la expresión.

$$\frac{V_t^2}{X_q X_s} V_t^2 = Q^2 + \frac{(X_q + X_s) \cdot Q \cdot V_t^2}{X_s X_q} + P^2$$

Completando el cuadrado se tiene como resultado la Ecuación 3.16.

$$\left[\frac{V_t^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_s} \right) \right]^2 = \left[\frac{V_t^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_s} - \frac{1}{X_q} \right) + Q \right]^2 + P^2$$

Ecuación 3.16. Lugar geométrico del calentamiento en la región terminal del estator

Mediante la Ecuación 3.16 se calculan los distintos valores de potencia reactiva Q, en la cual los valores de potencia activa son tomados de la Tabla 3.5 para comparar los resultados obtenidos, dichos valores se encuentran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Valores de potencia activa y reactiva del lugar geométrico del calentamiento del núcleo del estator

Potencia activa P [p.u]	Potencia Reactiva Q [p.u]
0,00	-1,644
0,25	-1,625
0,50	-1,566
0,75	-1,463
1,00	-1,305

Haciendo una comparación se puede observar como los valores de potencia reactiva calculados de la Tabla 3.5 se alejan considerablemente de los valores de potencia reactiva de la Tabla 3.6. En la Figura 3.14 se observa que el lugar geométrico del núcleo del estator calculado está apartado del lugar geométrico establecido en las LCU (unidades de control local) restringiendo más la operación en la zona de subexcitación.

Es por ello que es necesario realizar un estudio más detallado de este límite, porque a pesar de ser un generador cilíndrico, este límite queda fuera del límite de corriente de armadura y al tomar en cuenta la presencia de las reactancias del generador de polos salientes, este límite tiende a ingresar más en la curva de corriente de armadura.

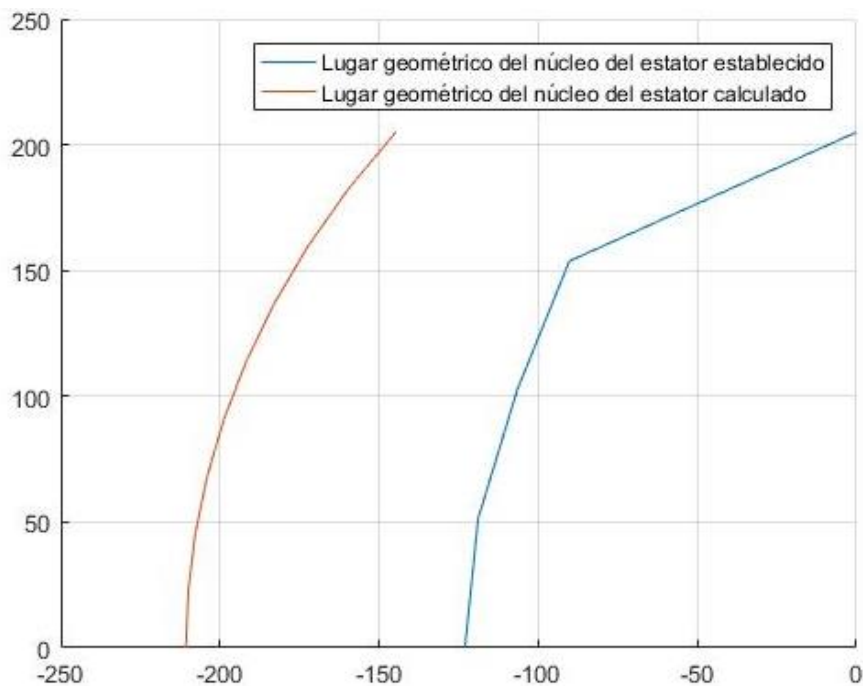


Figura 3.14. Comparación de las curvas del calentamiento del núcleo del estator calculada y establecida

Con el objetivo de minimizar el calentamiento en la región terminal del núcleo del estator, se pueden aplicar dos técnicas:

- **Ductos de enfriamiento adicionales proporcionados en el terminal del núcleo**

Estos ductos permiten que el hidrógeno remueva el calentamiento adicional en el hierro.

- **Pantallas de cobre**

Las pantallas tienen corriente inducida debido al paso del flujo que salen del terminal del núcleo según la ley de Lenz. En gran medida, el flujo fuga desde el terminal del núcleo, mismo que es forzado a tomar un camino que proporcione un mejor patrón de flujo a través del hierro del terminal del núcleo. La pérdida del flujo del terminal del núcleo es forzada a tomar un mejor camino a través del terminal del núcleo, como resultado presenta menor calentamiento al extremo del núcleo.

En general, para asegurar la vida útil del aislamiento del generador, es necesario que los puntos calientes de la máquina no excedan los límites de temperatura del sistema de aislamiento según lo establecido por la norma IEEE Std 99-1972, guía para la preparación de procedimientos de prueba para la evaluación térmica del sistema de aislamiento de equipos eléctricos [34].

3.1.8 Restricciones por servicios auxiliares

Las centrales de generación poseen servicios auxiliares de gran importancia, debido a que alimentan cargas fundamentales como: sistemas de control de voltaje y velocidad, sistemas de enfriamiento y suministros de otras cargas de la central, los cuales son indispensables para que el generador y la turbina puedan trabajar llevando a cabo el proceso de conversión de energía. Parte de la potencia producida de la central está destinada a cubrir la potencia de demanda los servicios auxiliares [15].

Las restricciones impuestas por las cargas de servicios auxiliares permiten establecer lugares geométricos de potencia activa y reactiva de generación en función de sus voltajes máximos y mínimos. Por lo tanto, se deben considerar zonas seguras de operación del generador con la finalidad de evitar que colapsen estos servicios [17].

La magnitud de la demanda de los servicios auxiliares depende del tipo de central de generación eléctrica. Los requerimientos internos de las centrales hidráulicas son generalmente menores al 1% de su potencia de salida. Debido a que la fuente primaria desciende por gravedad y el enfriamiento de la turbina y generador se realiza usando intercambiadores de calor por agua circulante en un lazo cerrado.

En las centrales térmicas a diésel el porcentaje de potencia consumida por sus servicios auxiliares se encuentra entre el 1 y el 2%, la mayor parte destinada al sistema de enfriamiento y lubricación. Las plantas de mayor consumo en auxiliares son las centrales térmicas a vapor, cuyos sistemas de alimentación de agua destilada y enfriamiento de turbina y generador demandan potencias en el rango del 4 al 10% de la potencia producida [31].

A pesar de que la Central Coca Codo Sinclair es hidráulica, se decide realizar el estudio para ratificar los porcentajes de consumo por concepto de servicios auxiliares y determinar la necesidad de la incorporación de los servicios auxiliares dentro de las zonas seguras de operación.

La central en estudio obtiene la alimentación para consumo de sus auxiliares desde dos fuentes: unidades 1 y 8, mediante transformadores de aislamiento TA1 y TA8 13,8/13,8 kV. Este análisis se realiza en dos partes: la primera toma en cuenta principalmente los sistemas auxiliares propios de unidad entre ellos: el sistema de excitación, el regulador de velocidad y el sistema de agua de enfriamiento que son los sistemas de consumo de auxiliares elementales. Se realiza un análisis incluyendo los sistemas auxiliares, mediante la recopilación de datos de los transformadores de auxiliares TA1 y TA8 que proporcionan energía a los equipos mencionados.

Para determinar este límite, se resuelve el sistema eléctrico de potencia interno de la central de generación mostrado en la Figura 3.15.

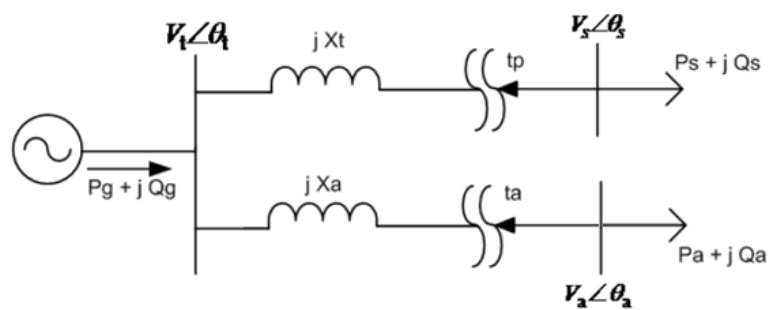


Figura 3.15. Sistema eléctrico de potencia interno de la central

1. Se realizan los flujos de potencia desde el transformador de servicios auxiliares hasta la barra del generador, tomando en cuenta el modelo pi del transformador de servicios auxiliares que se indica en la Figura 3.16.

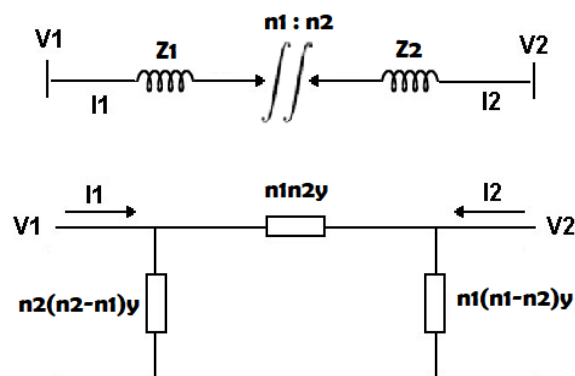


Figura 3.16. Modelo pi del transformador

Los valores para el modelo pi del flujo de potencia son:

$$n1 = 1$$

$$n2 = t_a$$

$$Z_1 = x_a$$

$$Z_2 = 0$$

$$y = \frac{1}{n2^2 \cdot Z_1 + n1^2 \cdot Z_2} = \frac{1}{jX_{eq}} = -jY_{eq}$$

$$y = -j \frac{1}{t_a^2 x_a}$$

Las equivalencias de cada uno de los ramales de la Figura 3.10, se indican a continuación:

$$n1n2y = n1n2(-jY_{eq}) = jt_a \cdot \frac{-1}{t_a^2 x_a}$$

$$n1n2y = j \frac{-1}{t_a x_a}$$

$$n2(n2 - n1)y = n2 \cdot (n2 - n1) \cdot (-jY_{eq}) = jt_a \cdot (t_a - 1) \cdot \frac{-1}{t_a^2 x_a}$$

$$n2(n2 - n1)y = -j \frac{t_a - 1}{t_a x_a}$$

$$n1(n1 - n2)y = n1 \cdot (n1 - n2) \cdot (-jY_{eq}) = -j(1 - t_a) \cdot \frac{1}{t_a^2 x_a}$$

$$n1(n1 - n2)y = -j \frac{1 - t_a}{t_a^2 x_a}$$

Con los valores de los ramales se procede a calcular las potencias activa y reactiva con la Ecuación 3.17, obteniendo como resultado la Ecuación 3.18.

$$S_{at} = -P_a - jQ_a = V_a \angle \theta_a \cdot \left((V_a \angle \theta_a - V_t \angle \theta_t) \cdot n1n2(-jY_{eq}) + V_a \angle \theta_a \cdot (n2 \cdot (n2 - n1) \cdot (-jY_{eq})) \right)^*$$

Ecuación 3.17. Flujo de potencia desde el transformador de servicios auxiliares hasta la barra del generador

$$S_{at} = -P_a - jQ_a = V_a \cdot \left((V_a - V_t \angle \theta_{at}) \cdot n1n2(-jY_{eq}) + V_a \cdot (n2 \cdot (n2 - n1) \cdot (-jY_{eq})) \right)^*$$

$$S_{at} = -P_a - jQ_a = V_a \cdot \left(V_a n1n2(-jY_{eq}) - V_t n1n2(-jY_{eq}) \angle \theta_{at} + V_a n2^2(-jY_{eq}) - V_a n1n2(-jY_{eq}) \right)^*$$

$$S_{at} = -P_a - jQ_a = V_a \cdot (V_a n_1 n_2 (-jY_{eq})^* - V_t n_1 n_2 (-jY_{eq})^* \angle \theta_{at} + V_a n_2^2 (-jY_{eq})^* - V_a n_1 n_2 (-jY_{eq})^*)$$

$$S_{at} = -P_a - jQ_a = V_a \cdot (-jV_t n_1 n_2 Y_{eq} \cdot (\cos \theta_{at} + j \sin \theta_{at}) + jV_a n_2^2 Y_{eq})^*$$

Ecuación 3.18. Resultado del flujo de potencia

De la Ecuación 3.18 se obtiene la expresión de potencia activa P_a como se indica en la Ecuación 3.19 y de potencia reactiva Q_a como se muestra en la Ecuación 3.20.

$$-P_a = V_a V_t n_1 n_2 Y_{eq} \sin \theta_{at}$$

$$P_a = -\frac{V_a V_t}{t_a x_a} \sin \theta_{at}$$

Ecuación 3.19. Potencia activa desde la barra de auxiliares hacia el generador

$$-Q_a = V_a V_t n_1 n_2 Y_{eq} \cos \theta_{at} + V_a^2 n_2^2 Y_{eq}$$

$$Q_a = \frac{V_a V_t}{t_a x_a} \cos \theta_{at} - \frac{V_a^2}{x_a t_a^2}$$

Ecuación 3.20. Potencia reactiva desde la barra de auxiliares hacia el generador

2. Elevar al cuadrado y aplicar identidades trigonométricas a las Ecuaciones 3.19 y 3.20, las cuales se suman con el fin de despejar el voltaje en los terminales en función de la potencia activa y reactiva de los auxiliares, obteniendo la Ecuación 3.21.

$$P_a^2 + \left(Q_a + \frac{V_a^2}{x_a}\right)^2 = \left(-\frac{V_a V_t}{t_a x_a}\right)^2$$

$$V_t = \frac{t_a x_a}{V_a} \sqrt{P_a^2 + \left(Q_a + \frac{V_a^2}{x_a}\right)^2}$$

Ecuación 3.21. Voltaje en terminales

3. Se calcula el flujo de potencia desde el generador hacia la barra infinita con la Ecuación 3.22.

Los valores para el modelo pi del flujo de potencia son:

$$n1 = 1$$

$$n2 = t_p$$

$$Z_1 = x_p$$

$$Z_2 = 0$$

$$y = \frac{1}{n2^2 \cdot Z_1 + n1^2 \cdot Z_2} = \frac{1}{jX_{eq}} = -jY_{eq}$$

$$y = -j \frac{1}{t_p^2 x_p}$$

$$S_{ts} = V_t \angle \theta_t \cdot \left((V_t \angle \theta_t - V_s \angle \theta_s) \cdot n1 n2 (-jY_{eq}) + V_t \angle \theta_t \cdot (n2 \cdot (n2 - n1)) \cdot (-jY_{eq}) \right)^*$$

Ecuación 3.22. Flujo de potencia desde el generador hacia la barra infinita

$$S_{ts} = V_t \cdot \left((V_t - V_s \angle \theta_{ts}) \cdot n1 n2 (-jY_{eq}) + V_t \cdot (n2 \cdot (n2 - n1)) \cdot (-jY_{eq}) \right)^*$$

$$S_{ts} = V_t \cdot \left(V_t n1 n2 (-jY_{eq}) - V_s n1 n2 (-jY_{eq}) \angle \theta_{ts} + V_t n2^2 (-jY_{eq}) - V_t n1 n2 (-jY_{eq}) \right)^*$$

$$S_{ts} = V_t \cdot \left(V_t n1 n2 (-jY_{eq})^* - V_s n1 n2 (-jY_{eq})^* \angle \theta_{ts} + V_t n2^2 (-jY_{eq})^* - V_t n1 n2 (-jY_{eq})^* \right)$$

$$S_{ts} = V_t \cdot \left(-jV_s n1 n2 Y_{eq} \cdot (\cos \theta_{ts} + j \sen \theta_{ts}) + jV_t n2^2 Y_{eq} \right)^*$$

Ecuación 3.23. Resultado del flujo de potencia

Se separa la Ecuación 3.23 en expresiones de potencia activa como se indica en la Ecuación 3.24 y potencia reactiva como se muestra en la Ecuación 3.25.

$$P_{ts} = \frac{V_t V_s}{t_p x_p} \sen \theta_{ts}$$

Ecuación 3.24. Potencia activa del generador a la barra infinita

$$Q_{ts} = -\frac{V_t V_s}{t_p x_p} \cos \theta_{ts} + \frac{V_t^2}{x_p}$$

Ecuación 3.25. Potencia reactiva del generador a la barra infinita

La potencia activa de generación se determina aplicando la Ecuación 3.26, en este caso P_{ta} no es necesario calcular ya que no existen pérdidas de potencia activa desde el

generador hacia los servicios auxiliares, es por ello que se puede asumir $P_{ta} = P_a$, mientras que el valor de P_{ts} se reemplaza con el resultado de la Ecuación 3.24.

$$P_g = P_{ts} + P_{ta}$$

$$P_g = \frac{V_t V_s}{t_p x_p} \text{sen } \theta_{ts} + P_a$$

Ecuación 3.26. Potencia activa entregada por el generador

4. Determinar Q_g de la Ecuación 3.27, sin embargo, en este caso no se puede asumir que $Q_{ta} = Q_a$ como se hizo anteriormente, ya que en potencia reactiva existen pérdidas en el transformador, es por ello que se requiere realizar otro flujo de potencia ahora desde el generador hacia los servicios auxiliares para determinar el valor de Q_{ta} , con la Ecuación 3.28.

$$Q_g = Q_{ts} + Q_{ta}$$

Ecuación 3.27. Potencia reactiva entregada por el generador

Los valores para el modelo pi del flujo de potencia son:

$$n1 = 1$$

$$n2 = t_a$$

$$Z_1 = x_a$$

$$Z_2 = 0$$

$$y = \frac{1}{n2^2 \cdot Z_1 + n1^2 \cdot Z_2} = \frac{1}{jX_{eq}} = -jY_{eq}$$

$$y = -j \frac{1}{t_a^2 x_a}$$

$$S_{ta} = V_t \angle \theta_t \cdot \left((V_t \angle \theta_t - V_a \angle \theta_a) \cdot n1 n2 (-jY_{eq}) + V_t \angle \theta_t \cdot n1 \cdot (n1 - n2) \cdot (-jY_{eq}) \right)^*$$

Ecuación 3.28. Flujo de potencia desde el generador hacia los auxiliares

$$S_{ta} = V_t \cdot \left((V_t - V_a \angle \theta_{ta}) \cdot n1 n2 (-jY_{eq}) + V_t \cdot n1 \cdot (n1 - n2) \cdot (-jY_{eq}) \right)^*$$

$$S_{ta} = V_t \cdot \left(V_t n1 n2 (-jY_{eq}) - V_a n1 n2 (-jY_{eq}) \angle \theta_{ta} + V_t n1^2 (-jY_{eq}) - V_t n1 n2 (-jY_{eq}) \right)^*$$

$$S_{ta} = V_t \cdot (V_t n_1 n_2 (-jY_{eq})^* - V_a n_1 n_2 (-jY_{eq})^* \angle \theta_{ta} + V_t n_1^2 (-jY_{eq})^* - V_t n_1 n_2 (-jY_{eq})^*)$$

$$S_{ta} = V_t \cdot (-jV_a n_1 n_2 Y_{eq} \cdot (\cos \theta_{ta} + j \operatorname{sen} \theta_{ta}) + jV_t n_1^2 Y_{eq})^*$$

Ecuación 3.29. Resultado del flujo de potencia

De la Ecuación 3.29 se escoge la expresión de potencia activa P_{ta} como se indica en la Ecuación 3.30 y en potencia reactiva Q_{ta} Ecuación 3.31.

$$P_{ta} = \frac{V_t V_a}{t_a x_a} \operatorname{sen} \theta_{ta}$$

Ecuación 3.30. Potencia activa del generador hacia los auxiliares

$$Q_{ta} = -\frac{V_t V_a}{t_a x_a} \cos \theta_{ta} + \frac{V_t^2}{t_a^2 x_a}$$

Ecuación 3.31. Potencia reactiva del generador hacia los auxiliares

5. Reemplazar la Ecuación 3.25 de Q_{ts} y la Ecuación 3.31 de Q_{ta} obtenidas en la Ecuación 3.27, se despeja Q_g .

$$Q_g = -\frac{V_t V_s}{t_p x_p} \cos \theta_{ts} + \frac{V_t^2}{x_p} - \frac{V_t V_a}{t_a x_a} \cos \theta_{ta} + \frac{V_t^2}{t_a^2 x_a}$$

$$Q_g = -\frac{V_t V_s}{t_p x_p} \cos \theta_{ts} + \frac{V_t^2}{x_p} - \frac{V_t V_a}{t_a x_a} \left(\frac{t_a x_a}{V_a V_t} \left(Q_a + \frac{V_a^2}{x_a} \right) \right) + \frac{V_t^2}{t_a^2 x_a}$$

$$Q_g = -\frac{V_t V_s}{t_p x_p} \cos \theta_{ts} + \frac{V_t^2}{x_p} - Q_a - \frac{V_a^2}{x_a} + \frac{V_t^2}{t_a^2 x_a}$$

Ecuación 3.32. Potencia reactiva entregada por el generador

6. La Ecuación 3.32 determina el valor de Q_g , sin embargo, está no se la puede aplicar por su dependencia con el ángulo θ_{ts} que no se conoce, es por ello que se debe elevar al cuadrado y aplicar identidades trigonométricas a las Ecuaciones 3.26 y 3.32, para determinar el valor de Q_g .

Despejando la potencia Q_g del generador para un valor dado de potencia activa P_g , considerando un valor dado del voltaje de servicios auxiliares y potencia P_a y Q_a de servicios auxiliares se tiene la Ecuación 3.33.

$$\left(Q_g + Q_a + \frac{V_a^2}{x_a} - \frac{V_t^2}{t_a^2 x_a} - \frac{V_t^2}{x_p} \right)^2 = \left(\frac{V_t V_s}{t_p x_p} \right)^2 \cos^2 \theta_{ts}$$

$$(P_g - P_a)^2 = \left(\frac{V_t V_s}{t_p x_p} \right)^2 \text{sen}^2 \theta_{ts}$$

$$Q_g = V_t^2 \cdot \left(\frac{1}{x_p} + \frac{1}{t_a^2 x_a} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{V_t V_s}{t_p x_p} \right)^2 - (P_g - P_a)^2} - Q_a - \frac{V_a^2}{x_a}$$

Ecuación 3.33. Potencia reactiva del generador para un valor dado de P_g

Para determinar las restricciones ligadas a los servicios auxiliares se reemplaza los voltajes máximos V_{\max} y mínimos V_{\min} por el término V_a en la Ecuación 3.33. En el caso de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair los voltajes permitidos para los equipos auxiliares instalados en la barra de 13,8 kV son de $V_{\max} = 1,05$ y $V_{\min} = 0,95$ p.u.

Para determinar las potencias P_a y Q_a de las cargas de auxiliares se realiza un estudio de los polinomios que deberán estar en función de la potencia de generación P_g . El tap t_p del transformador principal 1 y el tap t_a del transformador de auxiliares en 1,025 p.u.

3.1.8.1 Análisis de los sistemas propios de unidad

Se consideran tres sistemas esenciales para el funcionamiento de la unidad. Se recopilan los datos históricos de cada una de las unidades de potencia activa, potencia reactiva, voltaje de excitación, corriente de excitación y los datos de potencia activa y reactiva del regulador de velocidad en 480 V y 220 V. Además de potencias activa y reactiva del sistema de agua de enfriamiento se recopilan directamente del sitio en el que se encuentran ubicados estos equipos, debido a que actualmente estas señales no se encuentran registradas en el sistema SCADA.

En el Anexo II se presenta la información del consumo de los servicios auxiliares a diferentes valores de potencia desde 80 MW hasta 190 MW, en pasos de 5 MW para cada unidad, tanto para potencia reactiva en adelanto como para potencia reactiva en atraso.

Dicha tabla cuenta con la siguiente información:

Muestras: cantidad de datos analizados

P_g : potencia activa generada por la unidad en MW

Q_g : potencia reactiva generada por la unidad en MVAR

P_{aux} : potencia activa promedio del consumo de auxiliares de los tres sistemas en MW

Q_{aux} : potencia reactiva promedio del consumo de auxiliares de los tres sistemas en MVAR

Para llenar esta tabla primero se busca la información del sistema de excitación que coincida con la potencia requerida, es decir que para una potencia de 80 MW existen 37 muestras, de las cuales 8 son para potencia reactiva en adelanto y 29 son para potencia reactiva en atraso.

Las ocho muestras se promedian y la información de potencia promedio se añade a la tabla en la columna de potencia activa de auxiliares Paux. La información para la columna de potencia reactiva de auxiliares Qaux no se pudo obtener de la misma manera debido a que el sistema de excitación es un sistema de corriente continua y por ende no tiene consumo de reactivos; sin embargo, debido a la presencia de rectificadores del sistema se puede considerar cierto consumo de reactivos el cual es muy pequeño. Por esta razón el consumo de reactivos del sistema de excitación se toma del transformador de excitación, determinando las pérdidas aproximadas de reactivos del sistema de excitación por medio de cálculos.

El voltaje interno se determina para condiciones nominales y para condiciones con factor de potencia igual a 1.

En condiciones nominales se emplean las Ecuaciones 3.34, 3.35, 3.36 y 3.37 para determinar el valor del voltaje interno E.

$$E_q = V_t + jX_q \cdot I$$

Ecuación 3.34. Voltaje ficticio en la dirección del eje en cuadratura

$$E_q = 1 \angle 0 + 0,608 \cdot 1 \angle (90 - 25,84)$$

$$E_q = 1,378 \angle 23,392 \text{ p. u.}$$

$$I_q = \frac{V_t \cdot \text{sen } \delta}{X_q}$$

Ecuación 3.35. Corriente de eje en cuadratura

$$I_q = \frac{1 \cdot \text{sen } (-25,84)}{0,608}$$

$$I_q = 0,653 \angle 23,392 \text{ p. u.}$$

$$I_d = \sqrt{I^2 - I_q^2}$$

Ecuación 3.36. Corriente de eje directo

$$I_d = \sqrt{1^2 - 0,653^2}$$

$$I_d = 0,7574 \angle 23,392 - 90 \text{ p.u.}$$

$$E = V_t + jX_d \cdot I_d + jX_q \cdot I_q$$

Ecuación 3.37. Voltaje generado en condiciones nominales

$$E = 1 + 0,973 \cdot (0,7574 \angle 90 - 23,392 - 90) + 0,608 \cdot (0,653 \angle 90 - 23,392)$$

$$E = 1,6548 \angle 23,392 \text{ p.u.}$$

De igual manera se calcula el valor del voltaje interno para la condición de $P=0,9$ y $Q=0$, aplicando la Ecuación 2.7 y Ecuación 2.8.

$$P = \frac{EV_t}{X_d} \sin \delta + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta = 0,9$$

$$Q = \frac{EV_t}{X_d} \cos \delta + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\delta - \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) = 0$$

Utilizando las dos expresiones y despejando de ellas E y δ se tiene que:

$$E = 1,2976 \text{ p.u.}$$

$$\delta = 28,6875^\circ$$

Los valores nominales del sistema de excitación son la corriente de 1947,5 A y el voltaje de 204,3 V. Además, tomando como referencia los datos de la sección 1.4.4.1 del transformador de excitación de la Tabla 1.4 se determina que:

Si para una corriente nominal de 1947,5 A el voltaje interno es de 1,6548 p.u., y la nueva condición factor de potencia igual a 1, con un voltaje de 1,2976 p.u., entonces la corriente es de 1527,17 A, que para efectos del cálculo se aproxima a 1500 A.

Aplicando la Ecuación 3.38, se obtienen las pérdidas del transformador de excitación, en valores reales.

$$Q_{texc} = 3 \cdot I^2 \cdot x_{texc}$$

Ecuación 3.38. Pérdidas del transformador de excitación

$$Q_{texc} = 3 \cdot 1500^2 \cdot \left(0,06 \cdot \frac{0,512^2}{1,7} \right)$$

$$Q_{texc} = 62,452 \text{ kVAr}$$

Estas pérdidas se asumen constantes a diferentes valores de potencia activa de generación.

Para el sistema del regulador de velocidad la información se obtuvo de diferente manera, debido a que existen paneles en 480 V y 220 V, como se muestra en las Figuras 3.17 y 3.18, que muestran la información ya sea en voltaje, corriente o en potencia. Para mayor facilidad se toman los valores de potencias activa y reactiva necesarias para este análisis.



Figura 3.17. Sistema del regulador de velocidad (derecha 480 V e izquierda 220 V)



Figura 3.18. Paneles en 480 V y 220 V

Esta información se toma de todas las unidades por un período de tres meses cada media hora. Con los valores medidos se llega a la conclusión que no varían

considerablemente; sin embargo, se toma un valor promedio y se agregó a la columna de Paux y Qaux. Al ser valores prácticamente constantes, se considera como una cantidad fija para los demás valores de potencia activa de la unidad.

De la misma forma, se realiza para el sistema de enfriamiento. El panel del que se extrae la información es el de la Figura 3.19, del medidor de la Figura 3.20. Como se menciona en la sección 1.4.9 existen dos bombas y la información comprende a la bomba en funcionamiento.



Figura 3.19. Paneles de las bombas de agua de enfriamiento en 120 V



Figura 3.20. Medidor de potencia de la bomba #1 en 120 V

3.1.8.2 Análisis de los auxiliares incorporando las potencias del TA1 y TA8

En este análisis se añaden las potencias activa y reactiva que consumen los servicios auxiliares, así como también el consumo de potencias activa y reactiva del transformador de aislamiento de las unidades 1 y 8. Estos valores se extraen del sistema SCADA. Se realiza el mismo procedimiento para obtener los valores de potencias activa y reactiva que se añaden a los valores antes obtenidos, dando como resultado el resumen de la información detallada en el Anexo III.

A partir de esta información se procede a realizar gráficas en función de la potencia generada por la unidad, con el fin de obtener la línea de tendencia que mejor se ajuste a los datos. Se conoce que la línea de tendencia debería ser una recta; sin embargo, debido a que los datos son cambiantes la regresión de Paux es polinómica de tercer orden, mientras que para Qaux es una línea recta ya que los datos presentan el mismo valor a diferentes salidas de potencia.

Las Figuras 3.21 y 3.22 muestran las líneas de tendencia que mejor se ajustan a los datos, tanto para Paux con potencia reactiva en adelanto como para Paux con potencia reactiva en atraso obteniendo un coeficiente de correlación R^2 de 0,7605 y 0,818 respectivamente. El consumo de los servicios auxiliares son funciones no lineales de la potencia total de salida.

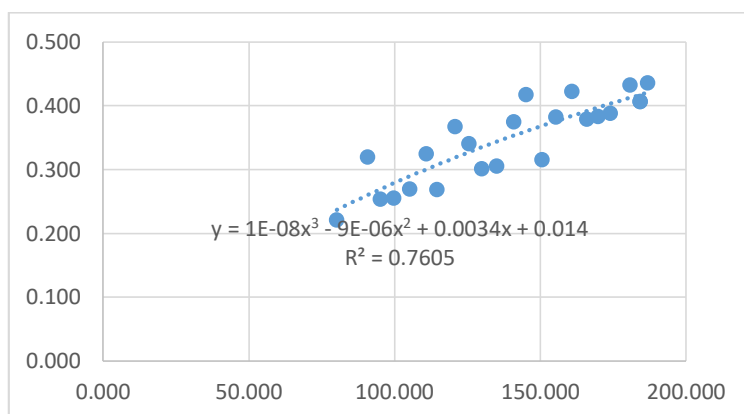


Figura 3.21. Potencia activa de auxiliares propios de la Unidad N°6, con factor de potencia del generador en adelanto

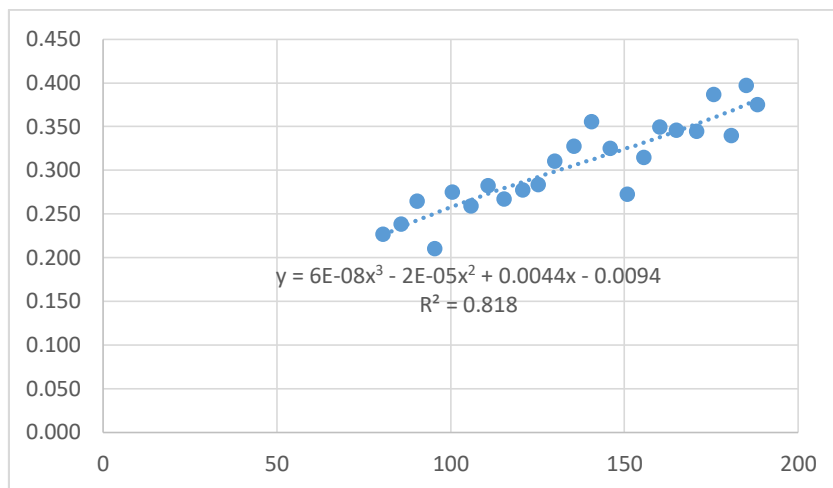


Figura 3.22. Potencia activa de auxiliares propios de la Unidad N°6 con factor de potencia del generador en atraso

La Figura 3.23 muestra una regresión lineal de los datos de consumo de potencia reactiva de auxiliares, que al ser prácticamente constante para todos los valores de potencia de generación, con coeficiente de correlación R^2 prácticamente cero, es decir no existe correlación entre los datos.

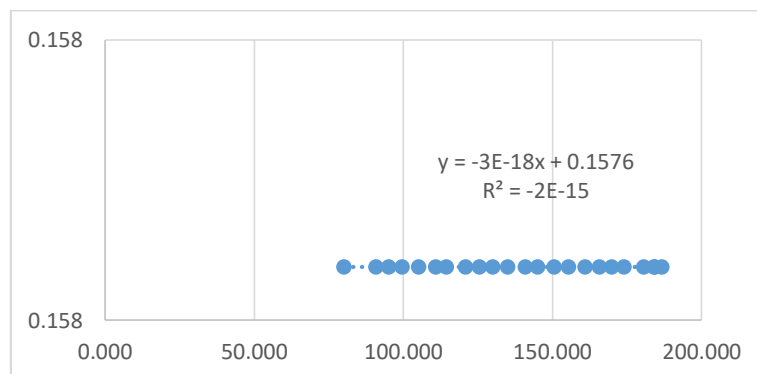


Figura 3.23. Potencia reactiva de auxiliares propios de la Unidad N°6 para cualquier factor de potencia

El análisis realizado se aplica para todas las unidades, obteniendo como resultado las ecuaciones dadas en el Anexo IV.

Con los polinomios del Anexo IV se determina este límite por servicios auxiliares, el cual se muestra en la Figura 3.24.

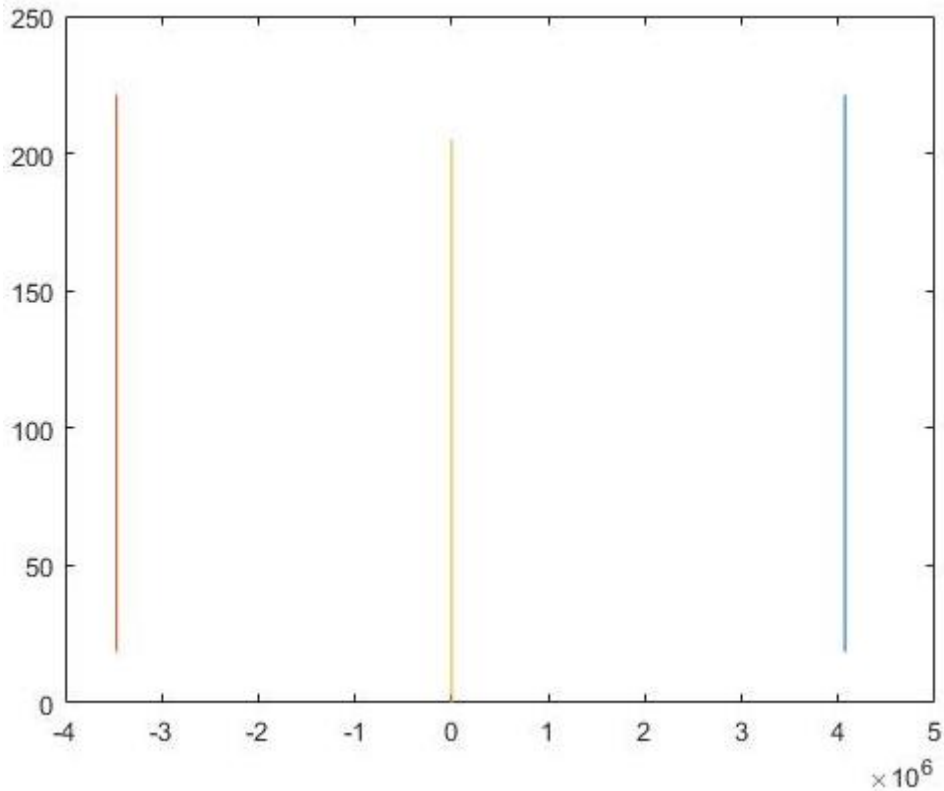


Figura 3.24. Incorporación de los servicios auxiliares a las zonas seguras de operación

Como se puede observar en la Figura 3.24, las restricciones por consumo de servicios auxiliares de las unidades de generación se encuentran muy alejadas de los límites de las otras zonas seguras de operación, de manera que los límites por servicios auxiliares de todas las unidades se muestran como líneas limitadas fuera de las zonas seguras de operación.

De esta manera se corrobora que los servicios auxiliares en centrales de generación hidráulicas no son relevantes para determinar las zonas seguras de operación. Por esta razón los límites por consumo de servicios auxiliares se omiten de las zonas seguras de operación.

4. INTERFAZ GRÁFICA Y MONITOREO

La interfaz gráfica realizada para el monitoreo de las unidades mediante zonas seguras de operación requiere de los valores nominales de la máquina: potencia nominal, voltaje en los terminales, factor de potencia, potencias mecánica máxima y mínima. Una vez graficada las zonas seguras de operación, se debe simular el par ordenado (Q,P) de la unidad de generación, para comprobar si el generador se encuentra operando dentro de sus zonas seguras.

4.1 Desarrollo del diagrama funcional

El diagrama funcional se realiza con el objetivo de comprender el desarrollo del código de programa y las variables empleadas para su funcionamiento de manera organizada, facilitando la comprensión del usuario; es decir, explica de forma concreta y detallada cada uno de los procesos que debe ejecutar la aplicación. Cada proceso tiene un bloque asignado, cuyo conjunto se conecta entre sí mediante flechas que representan el flujo del proceso.

4.1.1 Diagrama funcional del panel grupal

El diagrama de bloques del panel grupal se muestra en la Figura 4.1, donde se indica el proceso que realiza el código para graficar las zonas seguras de operación de cada una de las unidades en pantalla.

El proceso inicia con la importación de los reportes generados en la sección 2.2.2, luego se crean tres marcas que sirven de referencia para los contadores y la inicialización del programa, las cuales en cada iteración se incrementan siempre y cuando sean documentos diferentes, con la finalidad de que el programa únicamente lea el último reporte.

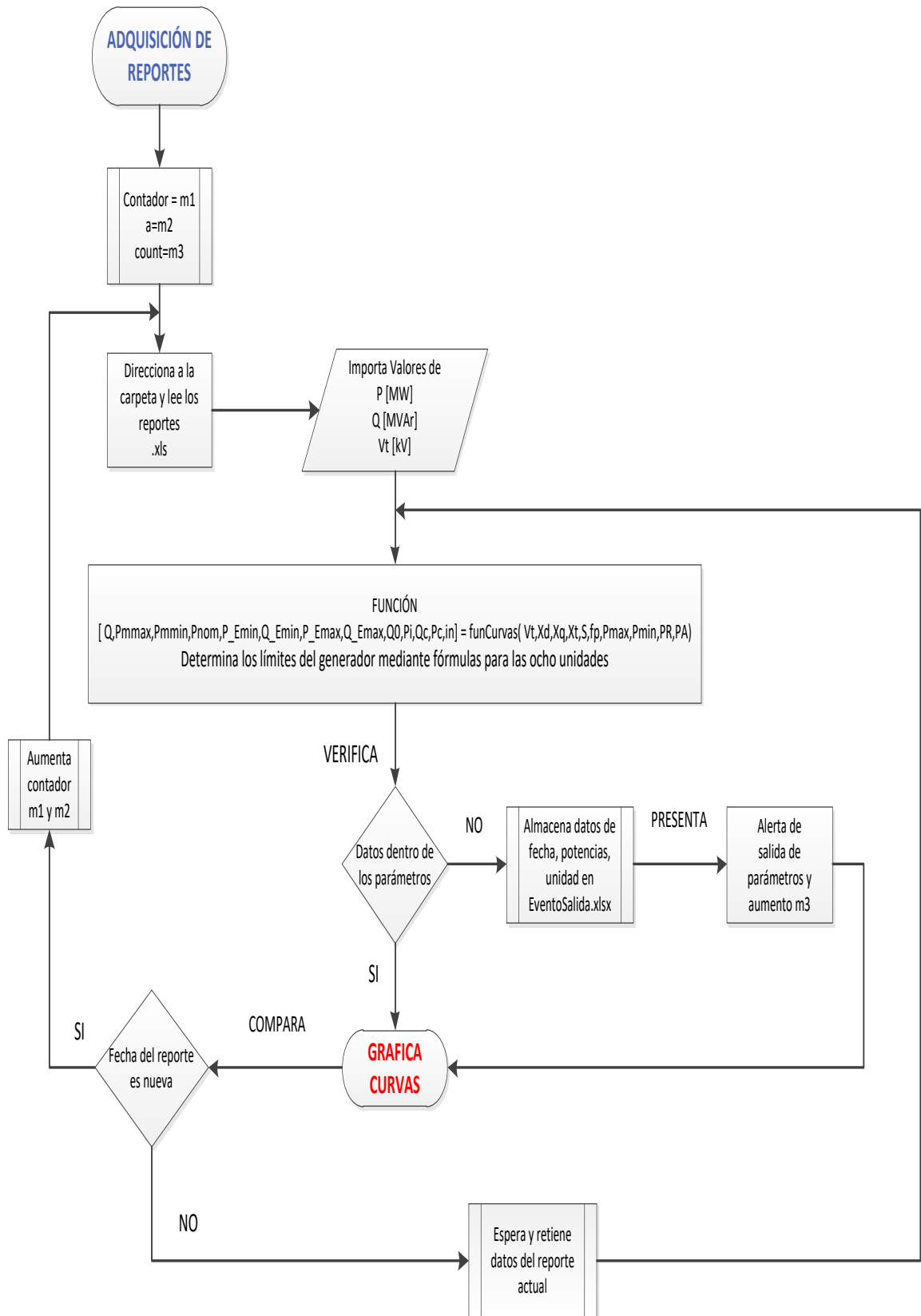


Figura 4.1. Diagrama funcional del panel grupal

El código se encuentra dentro de un lazo infinito, el cual continuamente direcciona a la carpeta C:\Users\Paola Chimarro\Desktop\CodigoTesis, donde se copian los archivos de los servidores, y lee únicamente los archivos Excel con extensión xls, almacenando los valores de potencia activa, potencia reactiva y voltaje en terminales de cada unidad.

La función **funCurvas** contiene a su vez otras funciones que determinan los valores de cada uno de los límites antes mencionados. Dentro de esta función se utilizan los siguientes parámetros:

Parámetros de entrada

Voltaje en terminales V_t , reactancia de eje directo X_d , reactancia de eje en cuadratura X_q , reactancia del transformador de unidad X_t , potencia nominal S , factor de potencia f_p , potencia máxima P_{max} , potencia mínima P_{min} , potencia activa de operación de la unidad PA , potencia reactiva de operación de la unidad PR .

Parámetros de salida

Vector de potencia reactiva Q , vector para el límite de potencia mecánica máxima P_{mmax} , vector para el límite de potencia mecánica mínima P_{mmin} , vector para el límite por corriente de armadura P_{nom} , vector para el límite de corriente mínima de campo (Q_{Emin}, P_{Emin}) , vector para el límite de corriente máxima de campo (Q_{Emax}, P_{Emax}) , vector para el límite del MEEE (Q_0, P_i) , vector para el límite de calentamiento en los terminales (Q_c, P_c) , variable que determina si el punto de operación se encuentra dentro o fuera de las zonas seguras de operación in .

En el caso de que el punto de operación se encuentre fuera de las zonas seguras de operación, aparece un aviso en la pantalla indicando que la unidad está fuera; además, se realiza un proceso adicional, en el cual se almacenan en un archivo Excel llamado **EventoSalida**, los siguientes datos: fecha, potencia activa, potencia reactiva y número de la unidad.

En el caso que llegue un nuevo reporte a la carpeta C:\Users\Paola Chimarro\Desktop\CodigoTesis, se realiza el mismo procedimiento, caso contrario se mantiene con los valores leídos del último documento. Esto se realiza con el fin de evitar que se vuelva a leer el documento, provocaría que el proceso sea lento e ineficiente.

4.1.2 Diagrama funcional del panel individual

El diagrama funcional del panel individual indicado en la Figura 4.2, muestra el proceso que realiza el código en MATLAB para graficar las zonas seguras de operación de cada unidad con mayor detalle.

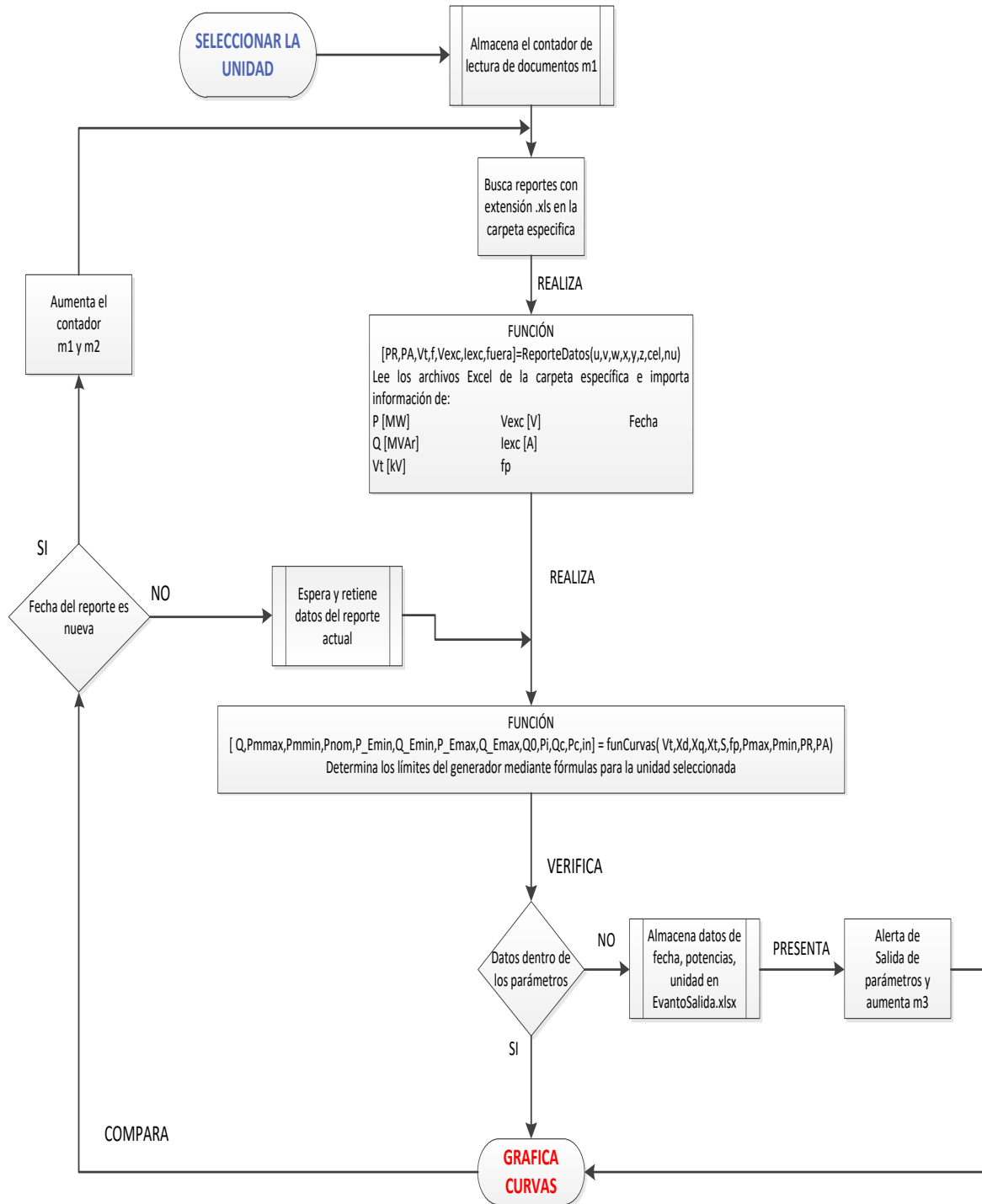


Figura 4.2. Diagrama funcional del panel individual

El código implementado para obtener las zonas seguras de operación de una unidad es específico y similar al código efectuado en la sección 4.1.1, con la diferencia de que en el diagrama se añade la función **ReporteDatos**, la cual realiza la importación de la información requerida. Dentro de esta función las variables utilizadas son:

Variables de entrada

Los números de las columnas donde se encuentra la información, dependen de la unidad que se desee observar en pantalla; es decir, que los valores de u , v , w , x , y , z toman los datos dependiendo de la unidad, como se detalla a continuación:

- Unidad 1 donde: $u = 1, v = 2, w = 3, x = 4, y = 5, z = 6$
- Unidad 2 donde: $u = 8, v = 9, w = 10, x = 11, y = 12, z = 13$
- Unidad 3 donde: $u = 15, v = 16, w = 17, x = 18, y = 19, z = 20$
- Unidad 4 donde: $u = 22, v = 23, w = 24, x = 25, y = 26, z = 27$
- Unidad 5 donde: $u = 29, v = 30, w = 31, x = 32, y = 33, z = 34$
- Unidad 6 donde: $u = 36, v = 37, w = 38, x = 39, y = 40, z = 41$
- Unidad 7 donde: $u = 43, v = 44, w = 45, x = 46, y = 47, z = 48$
- Unidad 8 donde: $u = 50, v = 51, w = 52, x = 53, y = 54, z = 55$

La variable **cel** tiene una estructura con información de todos los archivos leídos y la variable **nu** es el contador que lee el mismo archivo o un archivo nuevo.

Variables de salida

Potencia activa de operación de la unidad **PA**, potencia reactiva de operación de la unidad **PR**, voltaje en terminales **Vt**, voltaje de excitación **V_{exc}**, corriente de excitación **I_{exc}**, fecha del reporte leído **fuera**.

4.2 Descripción del GUIDE de MATLAB

El GUIDE es un entorno de programación visual disponible en MATLAB para realizar y ejecutar programas que necesiten ingreso continuo de datos. Tiene las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o Visual C++ [35], [36].

Para iniciar el proyecto se puede realizar escribiendo el comando **>>guide** en el Command Window.

Se presenta un cuadro de diálogo como el de la Figura 4.3, en el que se puede seleccionar plantillas o abrir GUIs existentes.

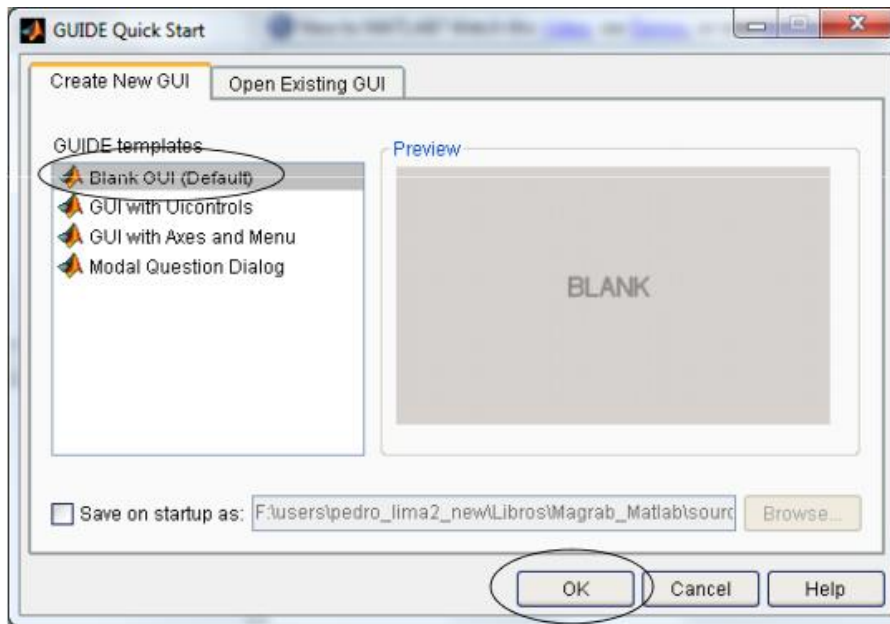


Figura 4.3. Ventana de inicio de GUI [35]

En la Figura 4.3 se selecciona Blank GUI (Default), que lleva a la Figura 4.4, que es la opción de interfaz gráfica vacía, en la que el usuario puede crear la interfaz gráfica en base a sus necesidades.

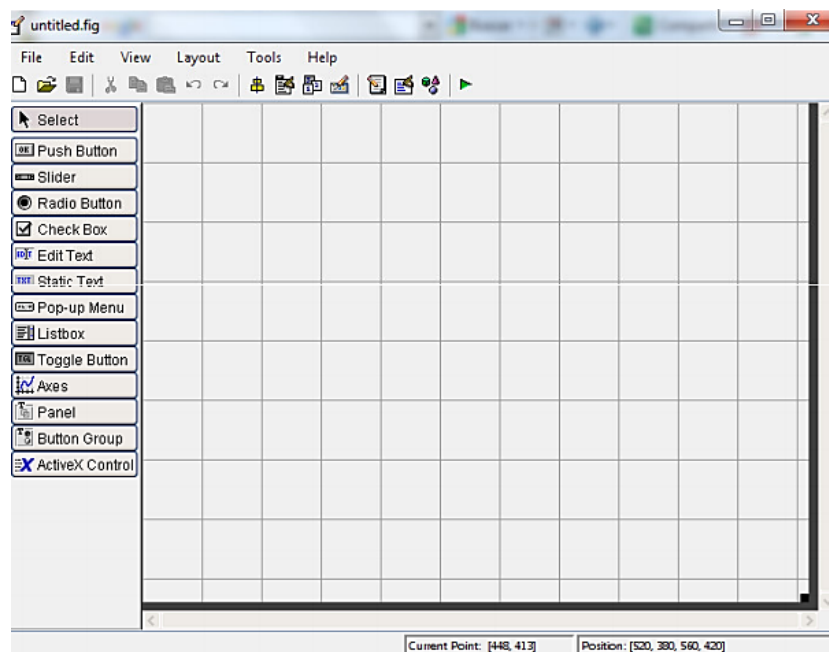


Figura 4.4. Entorno de diseño de GUI [35]

El entorno de diseño de la Figura 4.4 presenta las herramientas de la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Herramientas de la interfaz gráfica [35]

Control	Descripción
Push Button	Botón que invoca un evento inmediatamente
Slider	Usado para representar un rango de valores
Radio Button	Indica una opción que puede ser seleccionada
Check Box	Selector de opción
Edit Text	Cajo de editor de texto
Static Text	Muestra un texto en una caja
Pop-up Menu	Provee una lista de opciones
Listbox	Muestra una lista deslizable
Toggle Button	Botón que presenta dos estados "on" y "off"
Axes	Cuadro de ejes en el que se grafica lo programado
Panel	Contenedor de objetos ejes o controles
Button Group	Contenedor de botones

4.2.1 Funcionamiento de la aplicación GUIDE

Una aplicación en GUIDE de MATLAB consta de dos archivos: el *.m* y el *.fig*. El archivo *.m* contiene el código con la correspondencia de los botones de control de la interfaz y el archivo *.fig* contiene los elementos gráficos [36].

Cada vez que se adicione un nuevo elemento en la interfaz gráfica automáticamente se genera el código de llamada de dicho botón en el archivo *.m*; Además, cada elemento al adicionarse a la interfaz tiene su propio *tag*, es decir su propio nombre de variable, el mismo que puede ser modificado.

Para ejecutar la interfaz se da clic en la opción **RUN** de la pestaña editor de la Figura 4.5.

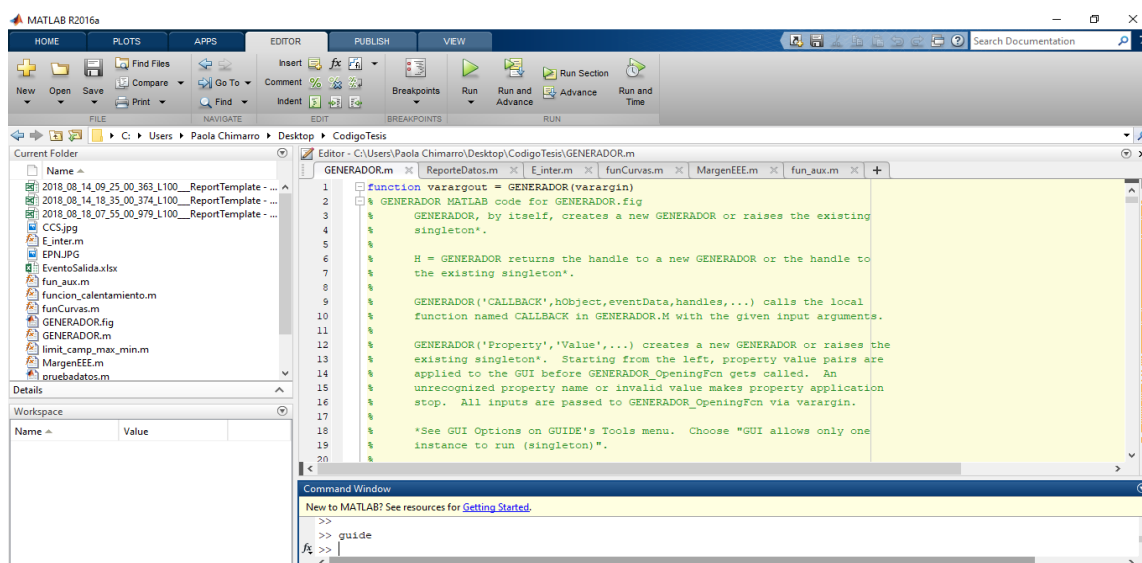


Figura 4.5. Entorno de MATLAB R2016a

4.3 Detalle del programa

El código para obtener las zonas seguras de operación se realiza en MATLAB con un código fuente en el script GENERADOR.m detallado en el Anexo V y su respectiva interfaz gráfica GENERADOR.fig, ambos archivos deben estar en la misma carpeta caso contrario el programa no funciona.

La interfaz gráfica consta de tres paneles. El panel principal donde se visualizan las ocho unidades con su punto específico de operación, el panel individual en el que el usuario escoge la unidad que desea observar, incluyendo valores de voltaje en terminales, corriente de excitación, voltaje de excitación y factor de potencia, por último el panel de maniobra, en el que el usuario ingresa un punto de operación para comprobar si dicho punto se encuentra dentro de las zonas seguras de operación.

Si el punto de operación se encuentra dentro de las zonas seguras de operación, éste se presenta de color rojo, caso contrario de color verde, y si en el proceso de lectura de datos no se cuenta con información para realizar las curvas, es decir los valores son cero, la curva no se gráfica y el punto de operación se muestra de color azul en el centro (0,0).

En el caso de que una unidad salga de las zonas seguras de operación, los valores de la unidad se almacenan en una tabla, detallando la información de potencia, fecha y unidad, la cual se visualiza dando clic en el botón EVENTO SALIDA. Esta información se archiva en un archivo de Excel con el mismo nombre.

En la pantalla existe un espacio con FECHA Y HORA, en el cual se observa la fecha y hora del archivo que está leyendo.

4.3.1 Interfaz gráfica del panel grupal

La aplicación inicia dando clic en **RUN**, aparece en pantalla la interfaz del panel grupal con ocho "Axes" para graficar cada una de las unidades con su respectivo "Button Group" donde se mostrará la información del punto de operación. Para que el programa grafique los límites dando clic en el botón **GRUPAL** y así se observará la curva y el punto de operación.

Con el programa en ejecución, el código realiza el diagrama funcional de la Figura 4.1, dando como resultado las gráficas de la Figura 4.6.

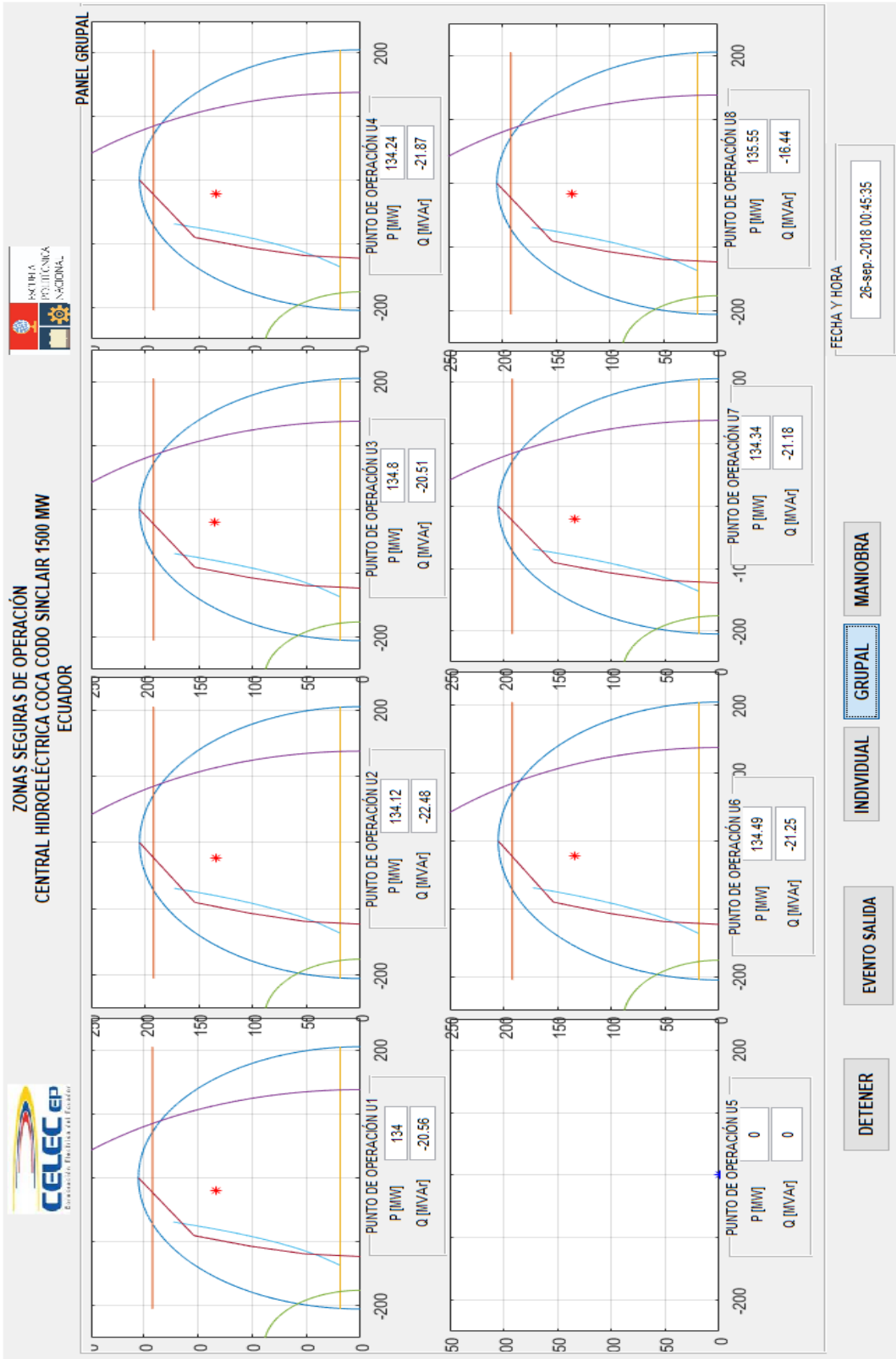


Figura 4.6. Interfaz gráfica del panel grupal

4.3.2 Interfaz gráfica del panel individual

La visualización de la interfaz gráfica del panel individual se obtiene dando clic en el botón **INDIVIDUAL**, y marcando la unidad que se quiere observar, de igual manera se observan las curvas pero con mayor información de dicha unidad, para ello se emplea el diagrama funcional de la Figura 4.2.

En este caso la interfaz se repite para cada unidad, la diferencia es la obtención de datos que utiliza para graficar las curvas como se indica anteriormente. En la Figura 4.7 se observa la curva las zonas seguras de operación de la unidad 1.

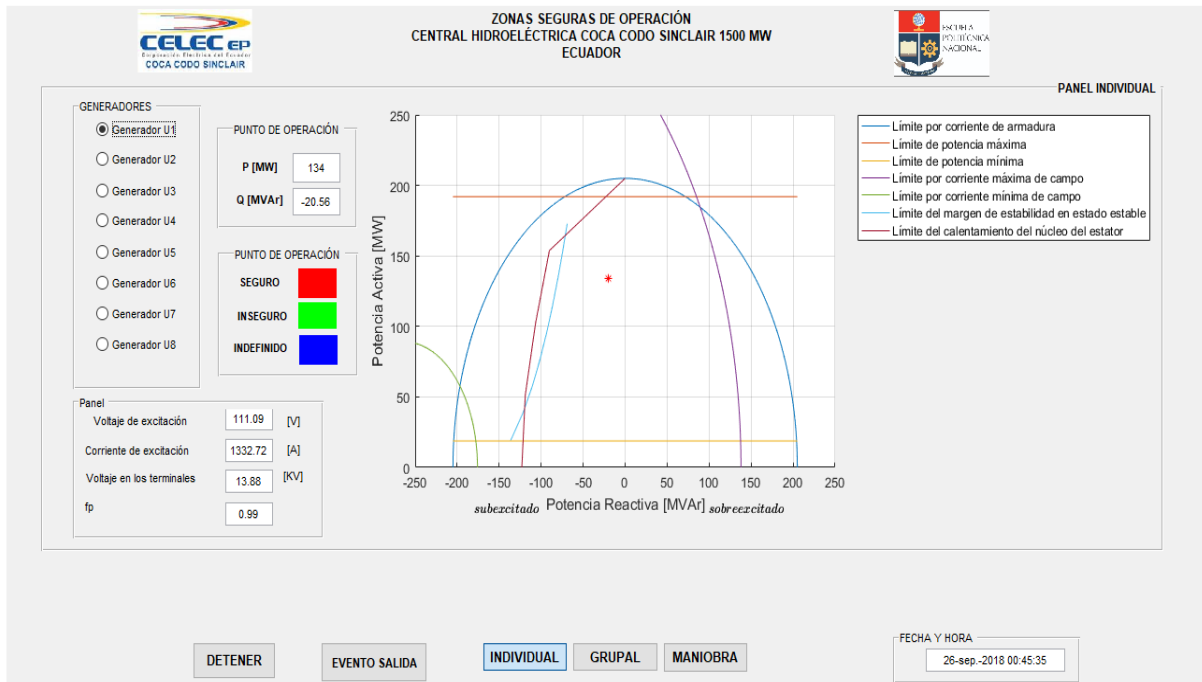


Figura 4.7. Zona Segura de operación de la Unidad 1

4.3.3 Interfaz gráfica panel del operador

La interfaz gráfica panel del operador, a diferencia de las interfaces mencionadas anteriormente, presenta una curva de zonas seguras de operación utilizando únicamente valores nominales del generador, obteniendo una curva estática, a este panel se accede al dar clic en **MANIOBRA**.

En esta interfaz se debe ingresar el punto de operación de potencia activa y reactiva. Dando clic en **VERIFICAR**, el programa determina si el punto de operación ingresado está dentro de las zonas seguras de operación de la unidad de generación. Esta interfaz se observa en la Figura 4.8.

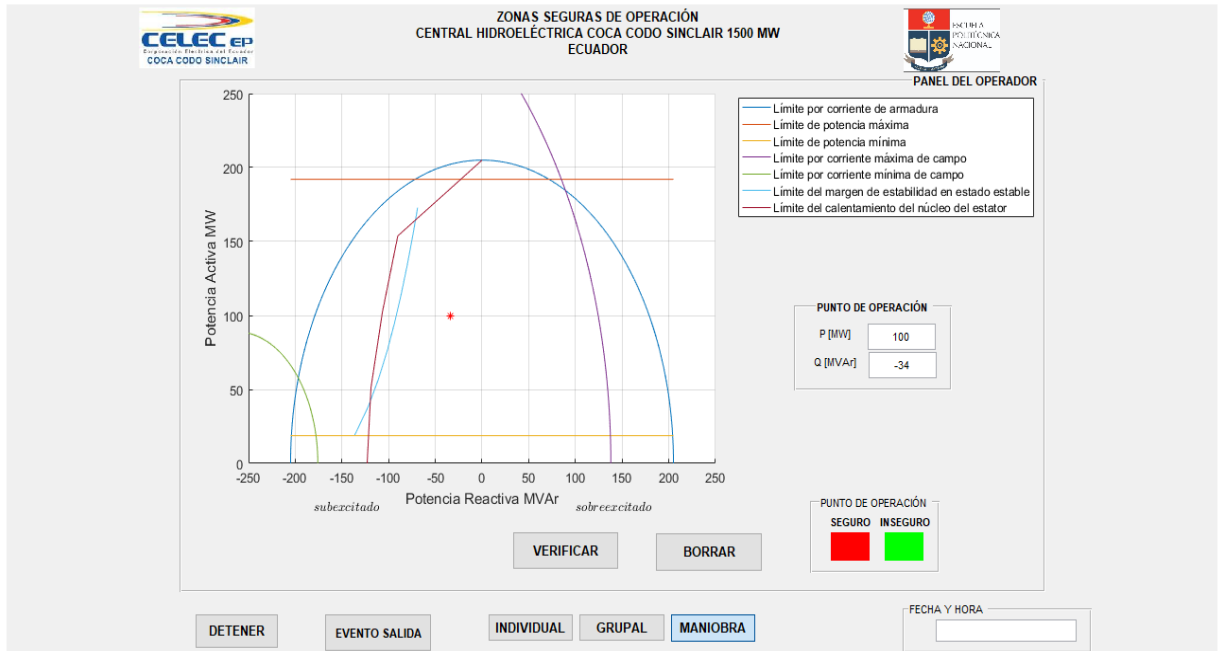


Figura 4.8. Punto de operación dentro de las zonas seguras de operación

Para comprobar un nuevo punto se da clic en **BORRAR** y se ingresa un nuevo punto de operación. De igual manera el programa está condicionado para que en el caso de que de punto de operación ingresado esté fuera de las zonas seguras de operación aparezca en pantalla una alerta, al igual que en la Figura 4.9.

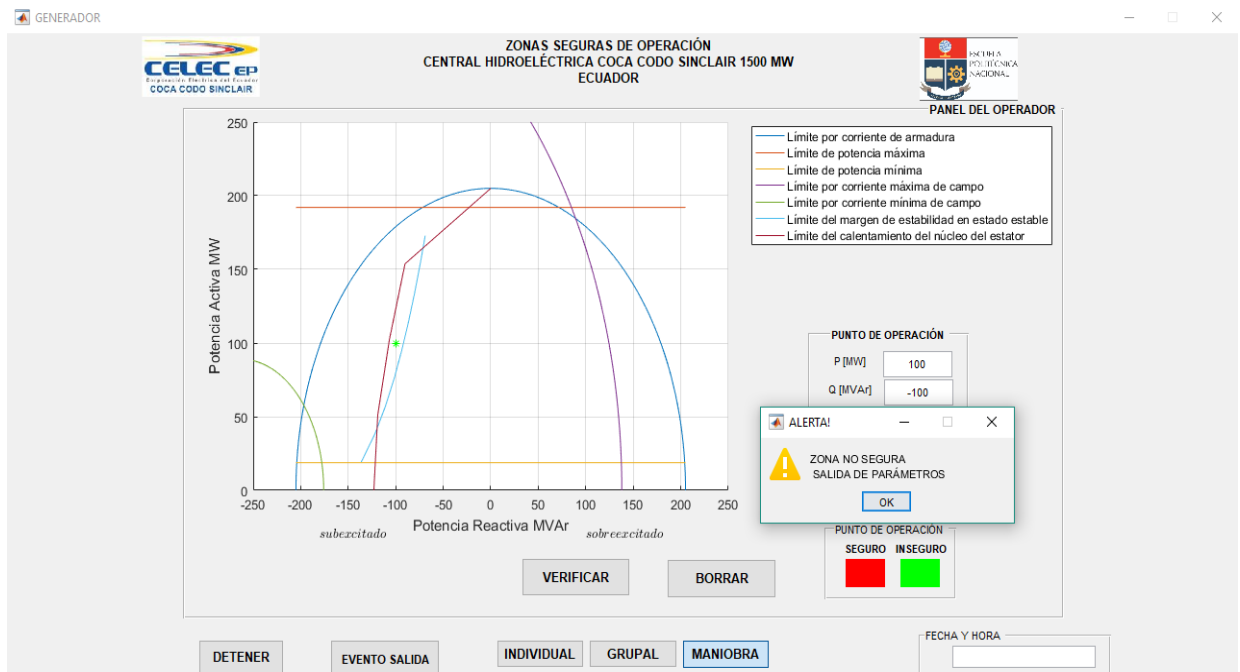


Figura 4.9. Punto de operación fuera de las zonas seguras de operación

Para salir del programa existen dos opciones cerrando desde el programa principal o dando clic en el botón **DETENER**.

4.4 Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados más relevantes obtenidos del código realizado en MATLAB, además se analizan las semejanzas y diferencias existentes entre las curvas de zonas seguras de operación, la curva de capacidad del fabricante y la curva de capacidad establecida en la unidad de control local LCU.

4.4.1 Zonas seguras de operación de las unidades

La interfaz gráfica del panel individual es la misma para todas las unidades, la diferencia es la toma de datos, como se especifica en la sección 4.3.2. Estas gráficas se exponen en las Figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18.

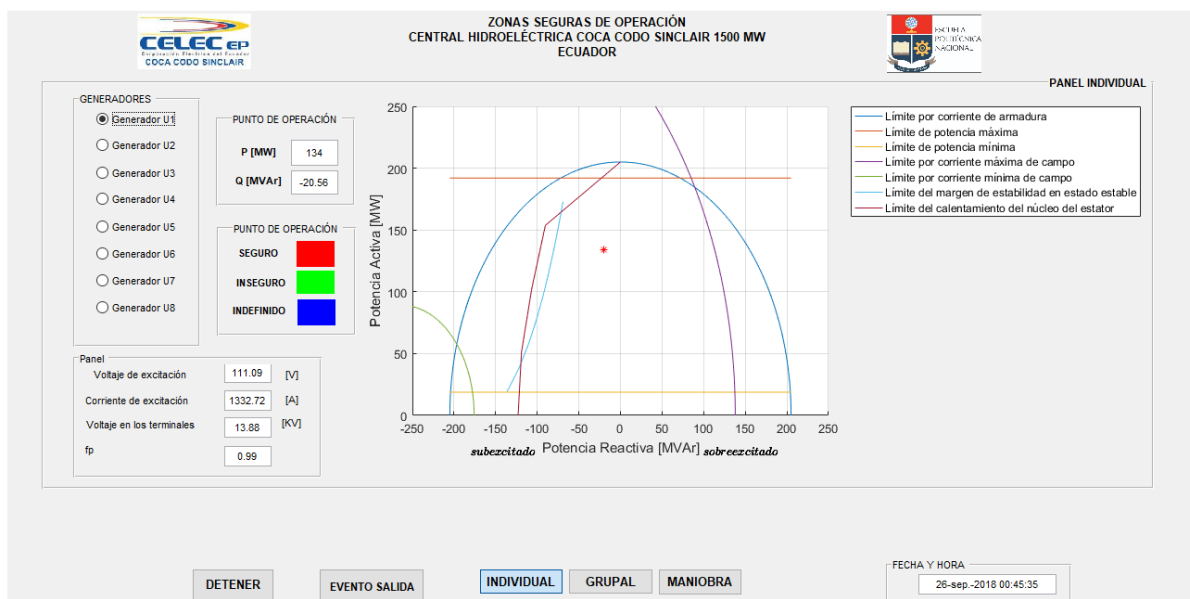


Figura 4.10. Curva de Zona Segura de operación del Panel Individual para la Unidad 1

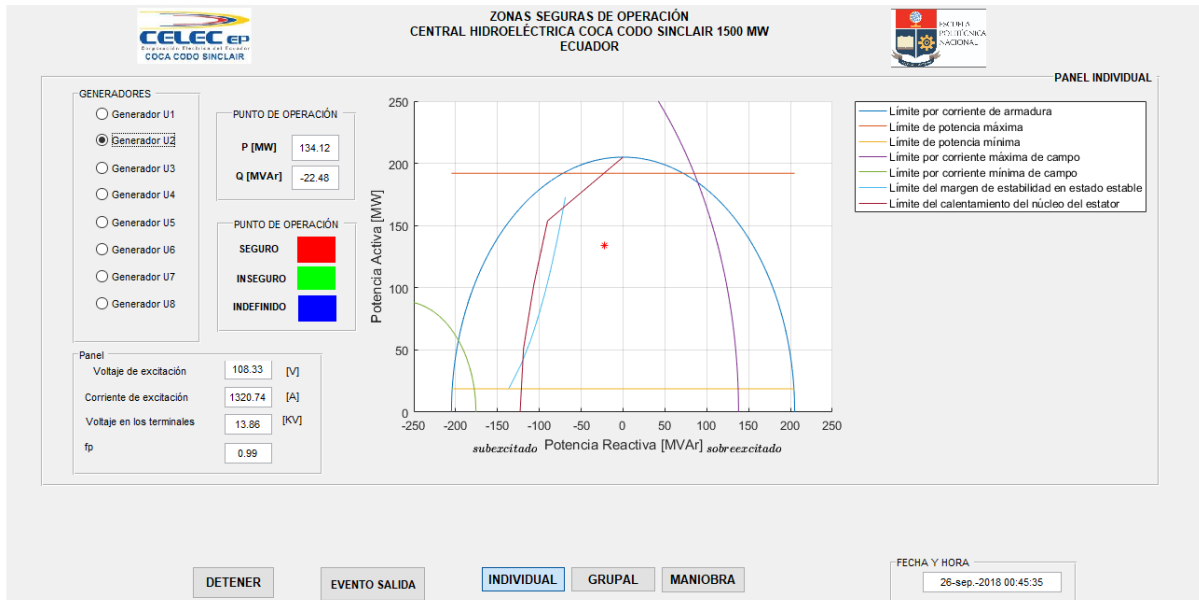


Figura 4.11. Curva de Zona Segura de operación del Panel Individual para la Unidad 2

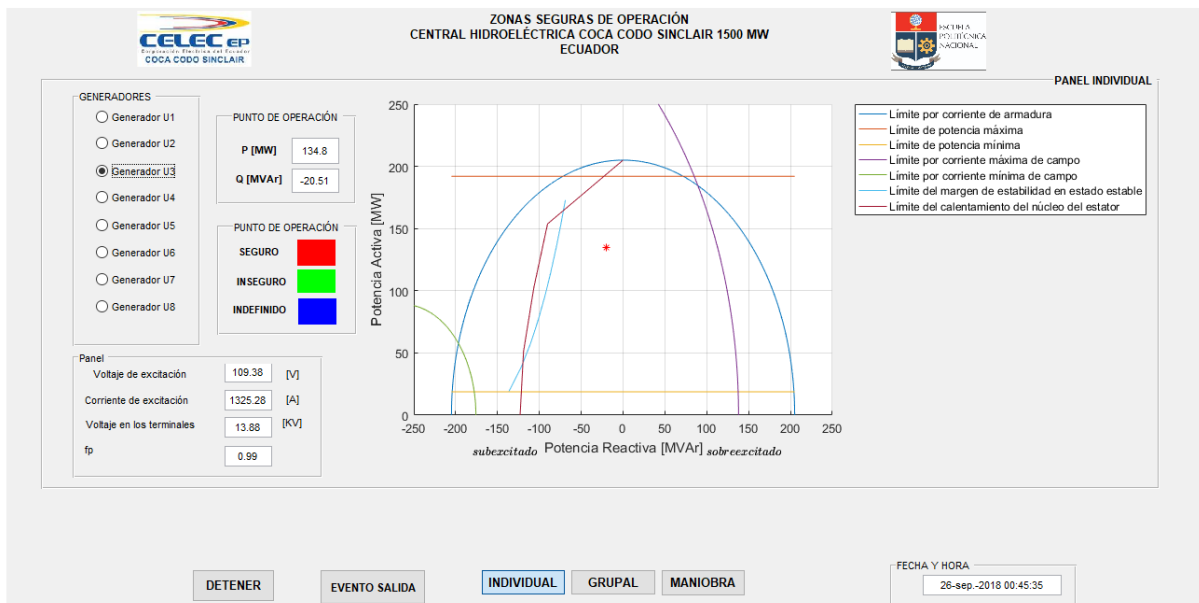


Figura 4.12. Curva de Zona Segura de operación del Panel Individual para la Unidad 3

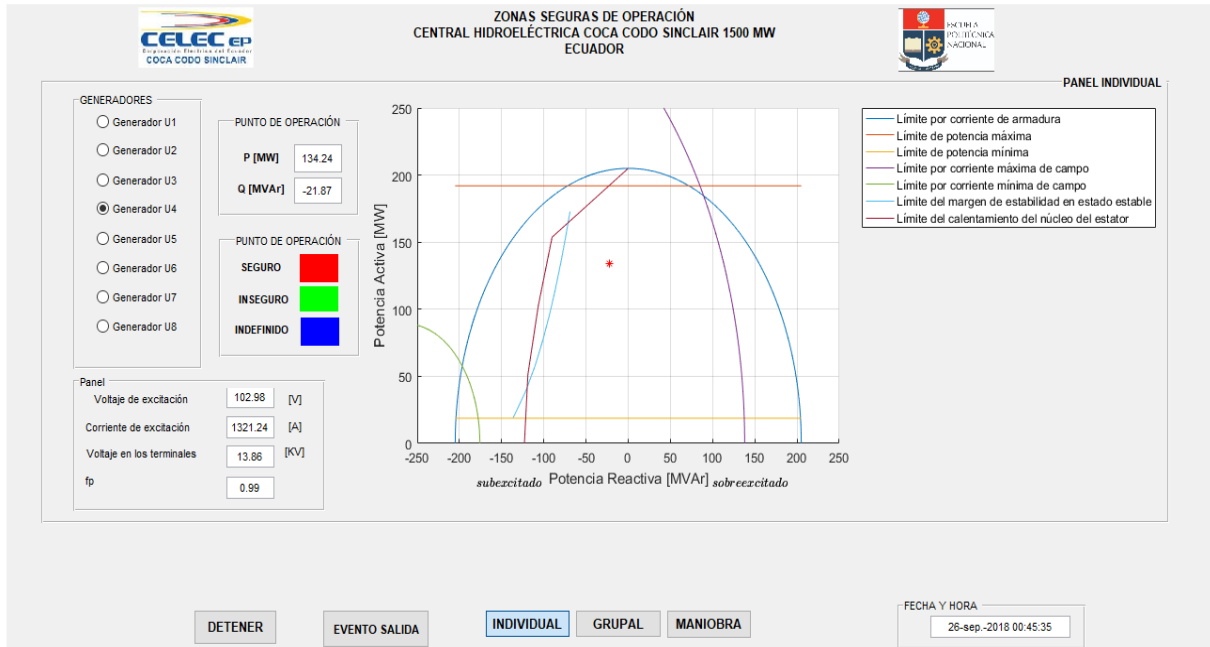


Figura 4.13. Curva de Zona Segura de operación del Panel Individual para la Unidad 4

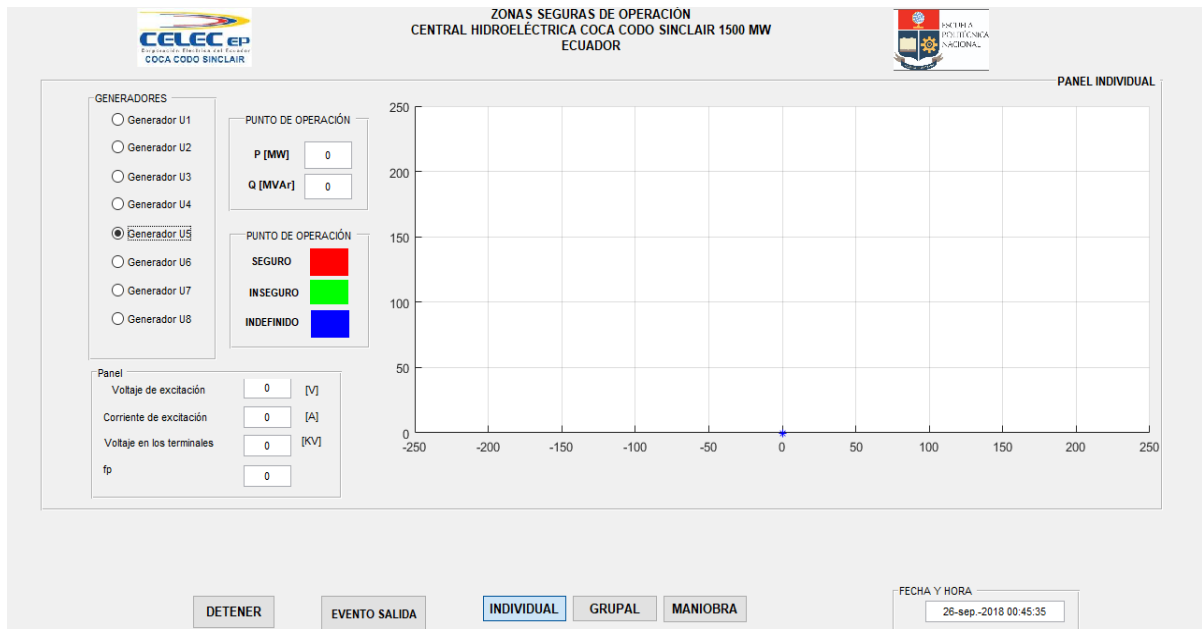


Figura 4.14. Curva de Zona Segura de operación del Panel Individual para la Unidad 5

En la Figura 4.14 no se visualizan las zonas seguras de operación del generador de dicha unidad debido a que se encuentra fuera de servicio, es decir que se encuentra en mantenimiento y por ende no existe información suficiente para el programa realice las gráficas.

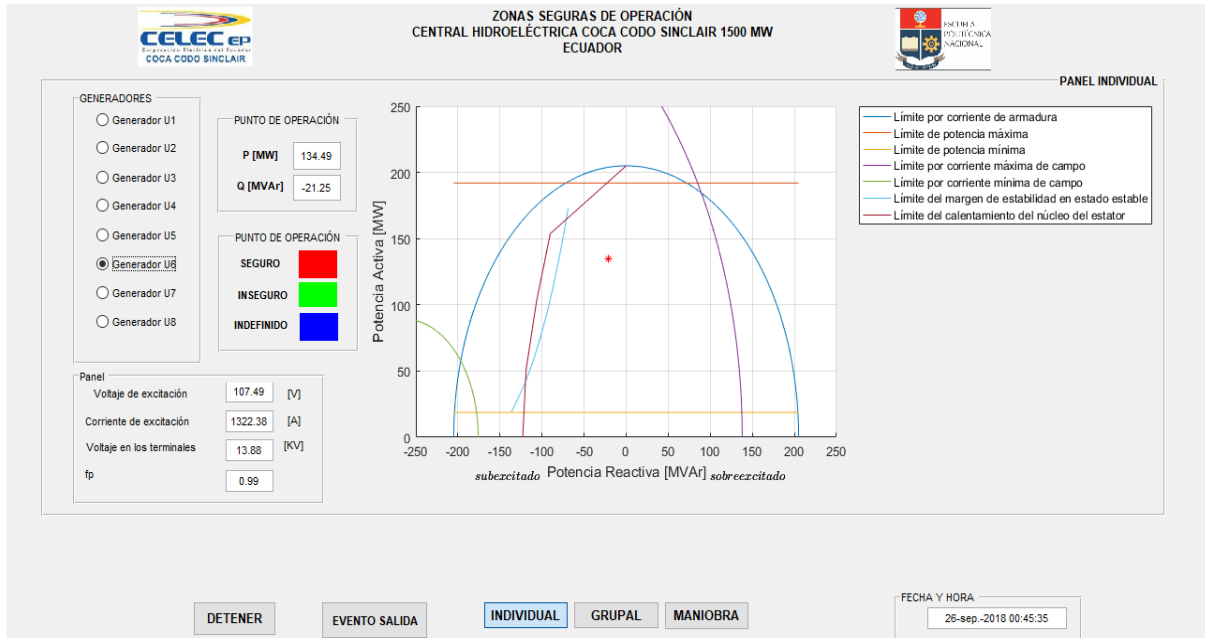


Figura 4.15. Curva de Zona Segura de operación del Panel Individual para la Unidad 6

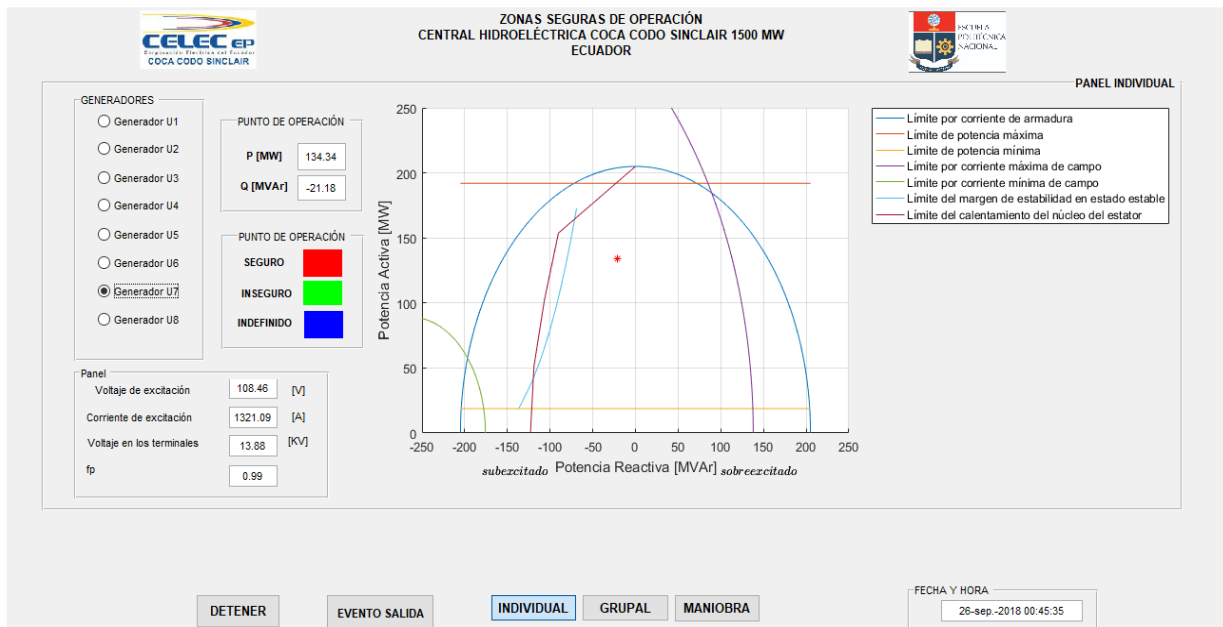


Figura 4.16. Curva de Zona Segura de operación del Panel Individual para la Unidad 7

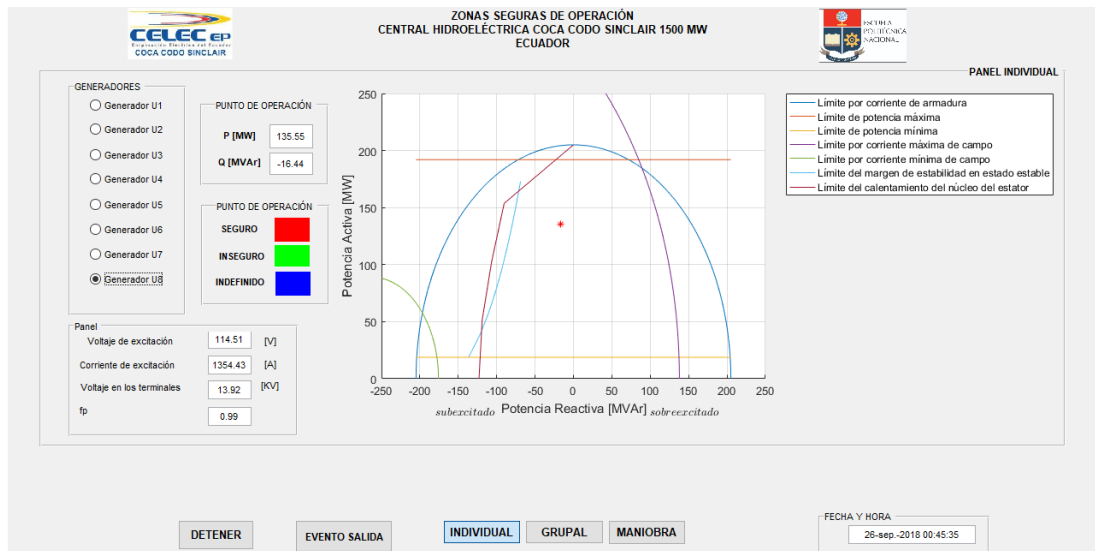


Figura 4.17. Curva de Zona Segura de operación del Panel Individual para la Unidad 8

Para comprobar el procedimiento mencionando en los diagramas funcionales de la sección 4.1.1 y la sección 4.1.2, se crean archivos con información falsa en los cuales tanto las unidades 1 como 2 salen de las zonas seguras de operación.

En el caso del panel grupal, en el momento que detecta que el punto de operación de alguna de las unidades está fuera de las zonas seguras de operación, aparece un diálogo de advertencia en la pantalla como se muestra en las Figuras 4.18 y 4.19.

Este aviso aparece por un momento; sin embargo, permanece como pantalla en segundo plano, de esta manera se continúan observando las zonas seguras de operación de todas las unidades.

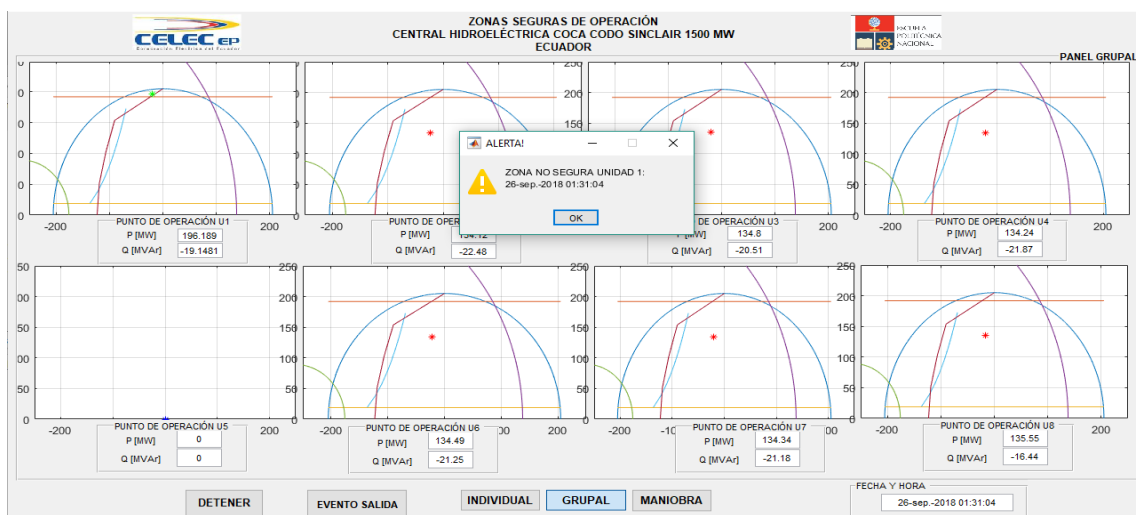


Figura 4.18. Punto de operación fuera de la zona segura de operación de la Unidad 1
Panel Grupal

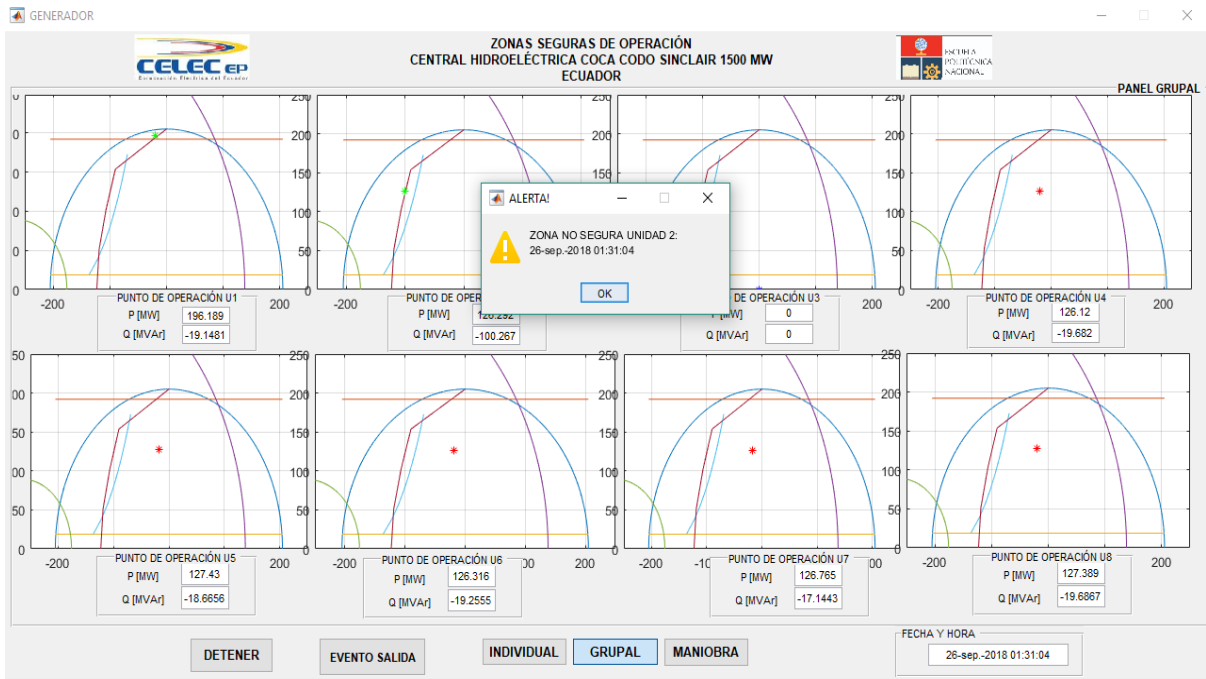


Figura 4.19. Punto de operación fuera de la zona segura de operación de la Unidad 2
Panel Grupal

Al observar el panel individual de las unidades 1 y 2 en las que sale de sus zonas seguras de operación aparece una advertencia igual a la del panel grupal, como se observa en las Figuras 4.20 y 4.21.

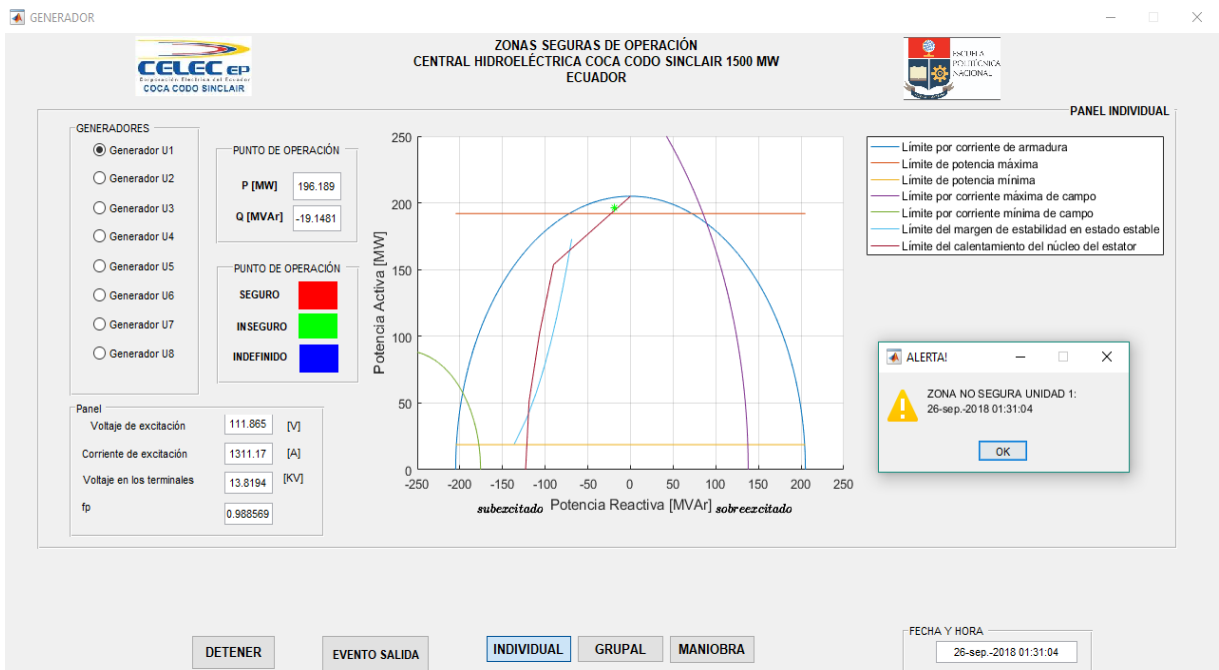


Figura 4.20. Punto de operación fuera de las zonas seguras de operación Unidad 1
Panel Individual

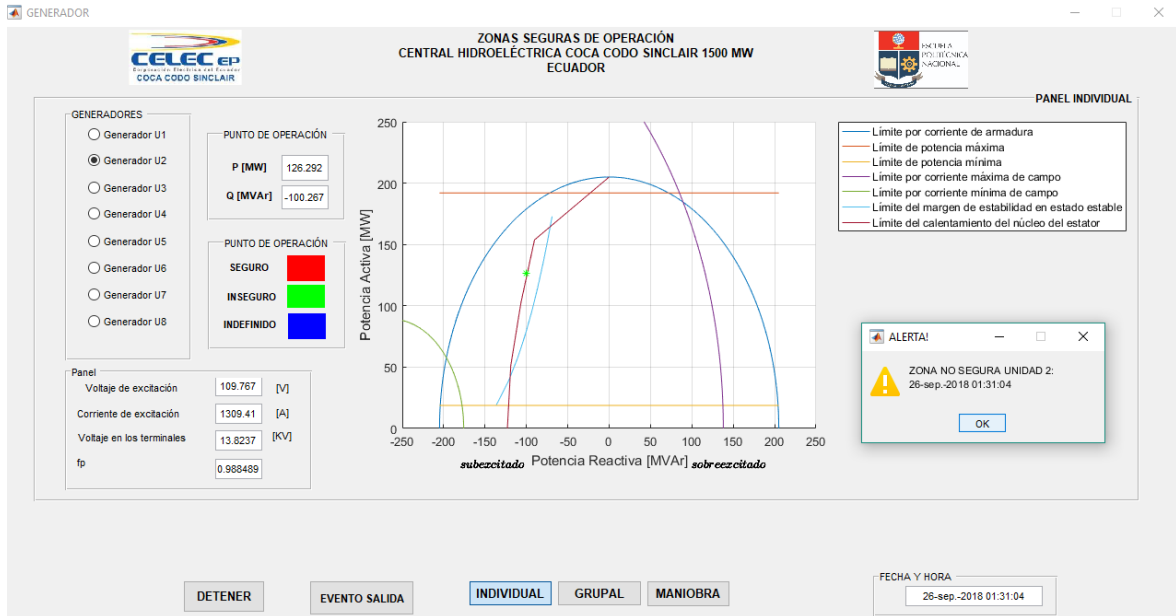


Figura 4.21. Punto de operación fuera de las zonas seguras de operación de la Unidad 2 Panel Individual

La sección 4.3 indica que en el caso que el punto de operación se encuentre fuera de las zonas seguras de operación se almacenan los datos en un archivo de Excel. En el programa se accede a esta información dando clic en el botón **EVENTO SALIDA**.

La información del evento de falla se observa en la Figura 4.22. Cabe mencionar que esta ventana se habilita independientemente del panel que este en ejecución.

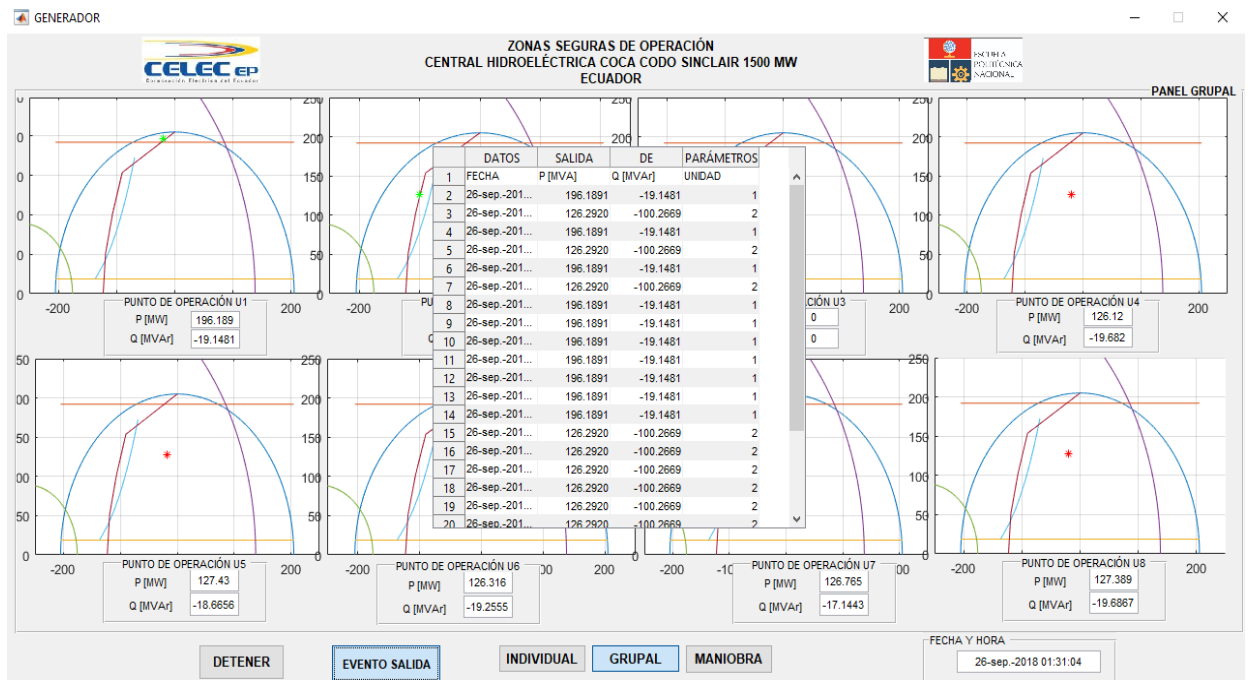


Figura 4.22. Información de unidades fuera de las zonas seguras de operación

De igual manera esta información se almacena en la hoja de Excel como se muestra en la Figura 4.23.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	FECHA	P [MVA]	Q [MVAR]	UNIDAD														
2	01-sep.-2018 15:40:14	196.1891	-19.2852	1														
3	01-sep.-2018 15:40:14	126.2062	-100.2	2														
4	01-sep.-2018 15:40:14	196.1891	-19.2852	1														
5	01-sep.-2018 15:40:14	126.2062	-100.2	2														
6	01-sep.-2018 15:40:14	196.1891	-19.2852	1														
7	01-sep.-2018 15:40:14	126.2062	-100.2	2														
8	01-sep.-2018 15:40:14	196.1891	-19.2852	1														
9	01-sep.-2018 15:40:14	126.2062	-100.2	2														
10	01-sep.-2018 15:40:14	196.1891	-19.2852	1														
11	01-sep.-2018 15:40:14	126.2062	-100.2	2														
12	01-sep.-2018 15:40:14	196.1891	-19.2852	1														
13	01-sep.-2018 15:40:14	126.2062	-100.2	2														
14	01-sep.-2018 15:40:14	196.1891	-19.2852	1														
15	01-sep.-2018 15:40:14	126.2062	-100.2	2														
16	01-sep.-2018 15:40:14	196.1891	-19.2852	1														
17	01-sep.-2018 15:40:14	126.2062	-100.2	2														
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		

Figura 4.23. Archivo de Excel EventoSalida con información del evento

En el caso de que no exista salida de los parámetros nominales de las unidades, tanto la tabla EVENTO SALIDA con el documento de Excel, permanecerán vacíos como se muestra en la Figura 4.24.

	DATOS	SALIDA	DE	PARÁMETROS
1				

Figura 4.24. Información del evento de salida sin eventos registrados

4.4.2 Relación entre las zonas seguras de operación y la curva de capacidad del fabricante

En esta sección se realiza una comparación entre las zonas seguras de operación y la curva de capacidad dada por el fabricante y la curva de capacidad definida en las LCU (unidad de control local).

4.4.2.1 Curva de capacidad del fabricante

Las características de la curva de capacidad proporcionada por el fabricante está basada en las condiciones nominales del generador de la central Coca Codo Sinclair, dicha curva se muestra en la Figura 4.25 [37].

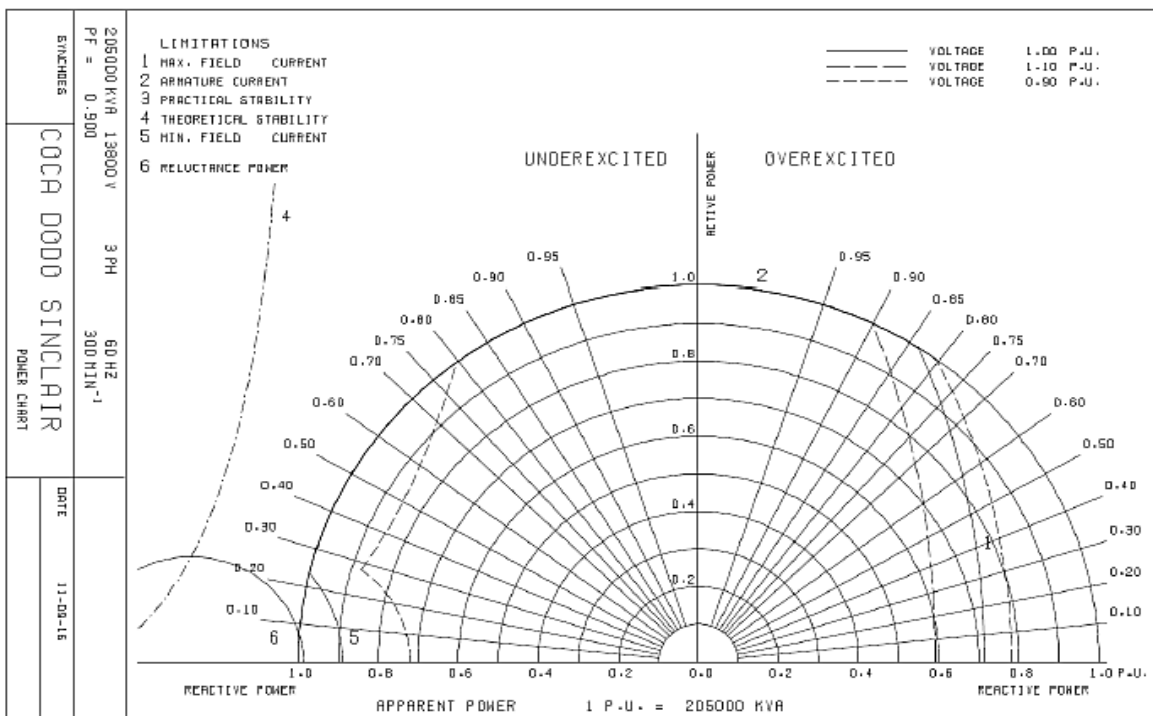


Figura 4.25. Curva de capacidad del fabricante [2]

Como se puede observar en la Figura 4.25 la curva de capacidad proporcionada por el fabricante consta básicamente del límite de corriente de armadura, límite por corriente máxima de campo, límite por calentamiento en los devanados y el límite del margen de estabilidad en estado estable, mientras que los demás límites no se establecen dentro de la curva.

Una de las razones es debido a que se basa en la curva de capacidad típica definida en la norma ANSI-IEEE 62-1972, en la que el límite por calentamiento en el campo, el límite por calentamiento en la armadura, y el calentamiento en los terminales del núcleo del estator aseguran la vida óptima del aislamiento del generador [34].

4.4.2.2 Curva de capacidad establecida en las unidades de control local

Para determinar esta curva se realiza pruebas con el fin de garantizar las condiciones de diseño y de esa manera determinar si cumple con los requisitos de funcionamiento.

En la Tabla 4.1 se observan las condiciones bajo las cuales se realiza las pruebas [38].

Tabla 4.1. Pruebas realizadas al generador

Condición	Generador			Voltaje del estator del generador			Corriente del estator del generador			If(A) Corriente de excitación
	P (MW)	Q (MVar)	Cos φ	Uab (kV)	Ubc (kV)	Uca (kV)	Ia (kA)	Ib (kA)	Ic (kA)	
10 MW	9,38	-117,9	0,079	13,29	13,19	13,31	5,23	5,12	5,09	399,74
	10,24	111,79	0,091	14,78	14,67	14,77	4,34	4,40	4,46	2163,21
74 MW	73,70	-112,0	0,549	13,28	13,18	13,30	5,93	5,84	5,77	576,44
110 MW	109,4	98,66	0,742	14,63	14,51	14,64	5,78	5,90	5,81	2156,9
184,5 MW	183,1	-79,08	0,918	13,21	13,11	13,24	8,81	8,75	8,63	1220,8
	183,7	88,64	0,901	14,61	14,51	14,65	8,06	8,14	7,98	2275,35

En la Figura 4.26 se muestran refleja la curva obtenida en base a pruebas, y con las cuales se establecen los parámetros en las protecciones de las unidades.

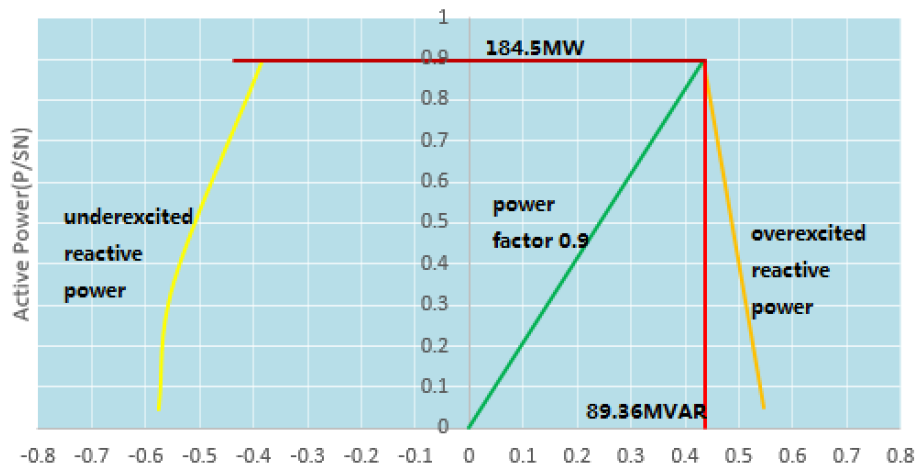


Figura 4.26. Curva Q-P del generador [38]

Esta curva de capacidad se usa como guía en la operación del generador basada en los límites temperatura detallados a continuación [34]:

- Devanado del estator: establece límites para la salida de potencia aparente (kVA).
- Devanado del rotor: fija el límite en la región de sobreexcitación, factor de potencia en atraso.

- Terminales del núcleo del estator: determina el límite en la región de subexcitación, factor de potencia en adelanto, misma que indica los límites de carga establecidos por el calentamiento de la estructura terminal del núcleo del estator.

Tanto la curva del fabricante como la curva utilizada para el ajuste de las protecciones se asemejan a las zonas seguras de operación obtenida en el programa con la diferencia de que en estas curvas no se toma en cuenta las condiciones de funcionamiento de la turbina; es decir, las potencias mecánicas máxima y mínima.

Como se puede observar tanto en las Figuras 4.25 y 4.26, las curvas de capacidad, se basan en los límites que mantienen la temperatura de los devanados dentro de su funcionamiento normal, como se manifestó en la sección 3.1.7 la curva del límite del calentamiento en los terminales del núcleo del estator requiere de un enfoque particular debido a que es más restrictiva para su funcionamiento.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El proyecto cumple con el objetivo de realizar una interfaz gráfica que permita visualizar las restricciones mecánicas de la turbina y eléctricas del generador, con el fin de que el operador pueda conocer si los generadores se encuentran operando dentro de sus condiciones nominales. En el caso de que exista un evento de contingencia en el sistema y alguna unidad salga de sus zonas seguras de operación, el código implementado almacena esta información con el fin de que el operador pueda realizar un análisis posterior del evento y tome las medidas preventivas.
- La interfaz gráfica permite la visualización de las zonas seguras de operación, las cuales constan de tres paneles dos son paneles dinámicos que toman información del sistema para sus gráficas y un tercero estático, para presentar una curva de capacidad en base a los valores nominales del generador.
- La curva que restringe la condición de carga en atraso está dada por el límite de calentamiento del devanado de campo, por el contrario la curva que restringe la condición de carga en adelante es el límite de calentamiento en los terminales del núcleo del estator mientras que, el límite del calentamiento en el devanado del estator abarca ambas regiones de operación.
- El generador siempre debe trabajar dentro de los límites establecidos por de la curva de capacidad a fin de que la máquina conserve sus características constructivas y al mismo tiempo, evita daños por sobrecalentamiento en los devanados, y de esta manera se mantenga su tiempo de vida útil.
- La curva de capacidad debe ser proporcionada por el fabricante, con el fin de que los operadores puedan guiarse y en base a ello realizar pruebas y estudios, enfocados a presentar los límites de la curva de capacidad que se ajuste a las restricciones impuestas por el estado de las unidades de la central.
- La comparación de la curva de capacidad obtenida, con la proporcionada por el fabricante y aquella programada en las unidades de control local (LCU), son distintas. La curva del fabricante se basa en los límites definidos en la norma ANSI-IEEE 62-1972; sin embargo, las otras dos curvas consideran los límites mecánicos definidos por la turbina hidráulica.

- El límite del margen de estabilidad en estado estable de la curva de capacidad proporcionada por el fabricante difiere de la curva de capacidad obtenida en este proyecto. Debido a que en el análisis del MEEE se toma en cuenta la reactancia del transformador de unidad con el fin de establecer el rango del voltaje en la barra del sistema.
- La obtención de los datos del sistema SCADA y Symphony Plus desde que genera el reporte hasta que llega a la carpeta específica de la carpeta en el centro de control tarda aproximadamente siete minutos. Este tiempo se puede mejorar con la configuración del almacenamiento del reporte ya que al ser en formato xls, tarda más tiempo en generarse.
- La información obtenida a través del sistema SCADA y Symphony Plus, no es sincronizada con la hora de generación del reporte. En este sentido la aplicación desarrollada proporciona un apoyo al operador del centro de control. No obstante, esta información puede ser empleada en análisis post operativo a fin de determinar las causas de un evento y sus posibles soluciones preventivas por parte del operador.
- En el generador puede darse el caso de que este se motorice lo que significa una pérdida de potencia mecánica produciendo que el torque en el eje del generador disminuya, pasando así de generador a motor ocasiona daños en el mismo debido a las corrientes que circulan por él y a la vez afectando la estabilidad del sistema.
- El estudio de los límites por servicios auxiliares demuestra que efectivamente en centrales hidroeléctricas su consumo se encuentra en un rango del uno al tres por ciento en virtud de ello este límite se encuentra por fuera de la curva de capacidad.
- Los generadores de la central operan en su mayoría de tiempo en la región de subexcitación, es decir trabaja con factor de potencia en adelanto y puede absorber reactivos del sistema. Las ocasiones en las que opera en la región de sobreexcitación son pocas es decir, que su operación con factor de potencia en atraso en la que entrega potencia reactiva al sistema eléctrico, no es una condición predominante.
- En la mayoría de puntos de operación, los generadores tienen factores de potencia cercanos a la unidad siendo predominante su funcionamiento en la zona de subexcitación. Esta condición de absorción de reactivos se debe a que

el sistema de transmisión de 500 kV tiene excedentes de potencia reactiva que fuerza a las unidades a trabajar ligeramente subexcitadas.

5.2 Recomendaciones

- De las zonas seguras de operación obtenidas en base a las restricciones del estator, rotor, turbina y servicios auxiliares, se determina que el límite por calentamiento de la región terminal del núcleo de la armadura en la región de subexcitación es uno de los más restrictivos razón por la que se recomienda realizar un estudio a profundidad para constatar los valores que se han fijado como protecciones en las unidades de control local (LCU).
- El proceso de obtención de reportes desde que se generan en la aplicación Symphony Plus hasta que llegan a la carpeta en la PC toma demasiado tiempo, es por ello que se deben realizar modificaciones en el sistema SCADA, para que los reportes con extensión .xls se generen en menor tiempo.
- Los tiempos de graficación de las curvas en MATLAB, también dependen del tipo de procesador disponible el computador es por ello que se recomienda que las aplicaciones sean instaladas en equipos modernos con mayor capacidad de procesamiento a fin de que el programa tome menos tiempo en presentar la gráfica de las zonas seguras de operación de las unidades.
- En el caso de que la información almacenada en el archivo EventoSalida.xlsx haya sido evaluada y determinada la razón de su causa, se puede eliminar con el fin de no tener información irrelevante en el documento, a elección del usuario.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]"Coca Codo Sinclair", *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.energia.gob.ec/coca-codo-sinclair/>. [Accedido: 24- Sep- 2018].
- [2]Coca Codo Sinclair, "Procedimientos de operación y mantenimiento - Información Técnica de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair", 2018.
- [3] VOL 04 Obra Hidráulica Manual de operación y mantenimiento, Quito-Ecuador: Coca Codo Sinclair, ene-2017.
- [4]VOL 06C Sistema regulación velocidad generador Manual O&M-A2 MCN. Quito, Ecuador: Coca Codo Sinclair, feb-2017.
- [5]"Sistema de excitación y freno eléctrico", Coca Codo Sinclair, Quito, Ecuador, 2017.
- [6]P. Ledesma, "Sistemas de excitación — OCW - UC3M", *Ocw.uc3m.es*, 2018. [En línea]. Disponible en: http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemas-electricos/II_OCSE_RT/node16.html. [Accedido: 24-Sep- 2018].
- [7] VOL 08B Sistema de excitación estática. Quito - Ecuador, Coca Codo Sinclair EP, 2016.
- [8]VOL 13C Sistemas Corriente Continua Manual O&M-A2. Quito, Ecuador, Coca Codo Sinclair EP, 2017.
- [9]adj1_10D Sistema de agua de enfriamiento A3. Quito, Ecuador: Coca Codo Sinclair EP, 2018.
- [10]B. Guru and H. Hiziroglu, *Electric machinery and transformers*, 3rd ed. Filadelfia (Pensilvania, Estados Unidos): Saunders College Publishing, 1995, pp. 403 - 407.
- [11]T. Fernández, "Curvas de capacidad", *Academia.edu*, 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/8654873/Curvas_de_capacidad. [Accedido: 24- Sep- 2018].
- [12]A. Marino, "ResearchGate", *Máquinas Síncronas*. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Marino_Pernia/publication/235752001_Maquinas_Sincronicas_Conceptos_basicos/links/09e415131e6d3ca3e100000/Maquinas-Sincronicas-Conceptos-basicos.pdf. [Accedido: 24- Sep- 2018].
- [13]R. Domínguez, "Máquinas Generadoras De Energía Eléctrica." Universidad Autónoma Metropolitana, 2005.
- [14]G. Cabrera, "Estudio de colapso de voltaje del Sistema Nacional Interconectado para el año 2014 mediante una aplicación desarrollada en MATLAB", Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [15]I. Calero, "Protección de generadores eléctricos mediante relés microprocesados multifuncionales", Escuela Politécnica Nacional, 2008.

- [16]J. Calvopiña y S. Maita, "Adquisición de datos e implementación de una interfaz gráfica para la evaluación del estado de operación de la central Illuchi 2 a través de registros de perturbaciones en estándar COMTRADE", Escuela Politécnica Nacional, 2016.
- [17]D. Rodríguez, " Graficación en tiempo real de curvas de capacidad de generadores sincrónicos en sistemas de potencia ", Escuela Politécnica Nacional, 2008.
- [18]M. Rodríguez, "Potencias activa y reactiva", *Máquinas Síncronas*, 2018. [En línea]. Disponible en: http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Potencia_Estabilidad%20sincronas.pdf. [Accedido: 24- Sep- 2018].
- [19]M. Martínez, "Guía para la determinación de límites de operación, curva de capacidad, pruebas y mantenimiento preventivo de generadores sincrónicos", Universidad Juan Carlos de Guatemala, 2003.
- [20]ABB, «S+ Operations 2.0.4 History Reference Guide», Marzo, 2016.
- [21]ABB, «S+ Operations 2.0.4 History User Guide». Marzo, 2016.
- [22] "WinSCP," *Wikipedia*, 02-Junio-2018. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/WinSCP>. [Accedido: 24-Sep-2018].
- [23] "Introducción WinSCP," *FTP Connection Modes*, 17-Sep-2014. [En línea]. Disponible en: <https://winscp.net/eng/docs/lang:es>. [Accedido: 24-Sep-2018].
- [24] "Protocolo de transferencia de archivos," K, 21-Dec-2018. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_transferencia_de_archivos. [Accedido: 24-Sep-2018].
- [25] "Auto FTP Manager," *¿Cómo crear o editar un nuevo perfil de conexión?* [En línea]. Disponible en: <https://www.deskshare.com/lang/sp/help/afm/what-is-a-profile.aspx>. [Accedido: 24-Sep-2018].
- [26]D. Ramírez, "Análisis de colapso de voltaje por el método de continuación de flujos de potencia considerando zonas seguras de operación de generadores sincrónicos", Escuela Politécnica Nacional, 2008.
- [27]E. Parkinson y A. Perusset, "Turbine Final Model Test Report, ANDRITZ Hydro." Coca Codo Sinclair, Quito, Ecuador, Jul-2012.
- [28]A. Valenzuela, " Sincronoscopio virtual para un sistema multimáquina del laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia", Escuela Politécnica Nacional, 2013.
- [29] Harbid Electric Machinery Co, "Reporte de prueba de eficiencia y pérdida de generador de unidad 1 de proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair." Coca Codo Sinclair, Quito, Ecuador, Jul-2016.

- [30] V. López, "Determinación de la carta de operación de un generador síncrono mediante pruebas de campo y diseño asistido por computadora", Lima-Perú, 2011.
- [31] J. Játiva, "Incorporación de límites por restricción de servicios auxiliares en las curvas de capacidad de generadores de centrales eléctricas," Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2013.
- [32] J. Aliaga, "Análisis del defecto de la pérdida de excitación en sistemas de generación de energía eléctrica", Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2010.
- [33] D. Reimert, *Protective relaying for power generation systems*. CRC Press, 2017.
- [34] *IEEE Guide for Operation and Maintenance of Turbine Generators*, IEEE 67-1972, p. 48, 1971, 1972.
- [35] P. Corcuera, *Creación de interfaces de usuario con MATLAB*. [En línea]. Disponible en: http://www.utm.mx/~vero0304/HCPM/GUI_Matlab.pdf. [Accedido: 10-Aug-2018].
- [36] D. Barragán, "Matpic," *Manual de interfaz gráfica de usuario en MATLAB*. [En línea]. Disponible en: http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/10740/MATLAB_GUIDE.pdf?sequence=11&isAllowed=y. [Accedido: 19-Aug-2018].
- [37] Coca Codo Sinclair, "Parámetros principales del generador proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair," Quito, Ecuador, 2014.
- [38] Sinohydro, "Curva de capacidad de las unidades de generación de Coca Codo Sinclair, Pruebas realizadas", 2016.

7. ANEXOS

ANEXO I. Parámetros técnicos del generador de la central

Descripción	Parámetros		Unidades
Potencia nominal	184,5		MW
Voltaje nominal	13,8		kV
Corriente nominal	8576,6		A
Factor de potencia nominal	0,9		atraso
Frecuencia nominal	60		Hz
Velocidad nominal	300		rpm
Corriente de excitación sin carga	1092.3		A
Corriente de excitación nominal	1947.5		A
Corriente de excitación máxima	2050.4		A
Voltaje de excitación sin carga	81.3		V
Voltaje de excitación nominal	204.3		V
Voltaje de excitación máxima	215		V
Eficiencia nominal calculada	98,5		%
Número de polos	24		
Relación de cortocircuito calculado	1,028		p.u.
Momento de inercia generador garantizado (GD^2)	$\geq 6,600$		tm^2
Constante de inercia garantizada	$\geq 3,972$		MW·s/MWA
Capacidad trifásica de la armadura calculada	3,323		μF
Conexión	Y conectado a neutro con transformador		
Transformador monofásico de puesta a tierra	40		kVA
Relación de transformación	13,8 / 0,2		kV
Resistencia de puesta a tierra (lado secundario)	0,13		Ω
Reactancias del generador			
Sincrónica – saturada	$X_d=0,973$	$X_q=0,608$	p.u.
Sincrónica – no saturada	$X_d=1,012$	$X_q=0,647$	p.u.
Transitoria – saturada	$X_d'=0,279$	$X_q'=N/A$	p.u.
Transitoria – no saturada	$X_d'=0,297$	$X_q'=N/A$	p.u.
Subtransitoria – saturada	$X_d''=0,195$	$X_q''=0,219$	p.u.
Subtransitoria – no saturada	$X_d''=0,244$	$X_q''=0,232$	p.u.
Negativa saturada X_{2s}	0,002954		Ω
Negativa no saturada X_{2u}	N/I		
Cero saturada X_{0s}	0,108		p.u.
Cero no saturada X_{0u}	0,135		p.u.
Resistencia de armadura r_a (75°C)	0,001751		Ω
Resistencia de campo r_f (75°C)	0,00882		Ω
Dispersión estator X_l	0,12		p.u.
Dispersión rotor X_{fd}	N/I ¹		
De amortiguamiento eje directo	$r_{1d}=0,0235$	$x_{1d}=1,192$	Ω
De amortiguamiento eje cuadratura	$r_{1q}=0,0051$	$x_{1q}=0,135$	Ω
Constantes de tiempo			
Transitoria circuito abierto	$T_{d0}'=2,397$	$T_{q0}'=N/A^2$	s
Subtransitoria circuito abierto	$T_{d0}''=0,123$	$T_{q0}''=0,114$	s
Transitoria corto circuito	$T_d'=2,314$	$T_q'=N/I$	s
Subtransitoria corto circuito	$T_d''=0,121$	$T_q''=0,109$	s

¹ N/I: No Indica el fabricante.

² N/A significa No Aplica.

ANEXO II. Consumo de los servicios auxiliares a diferentes valores de potencia

Unidad de generación N° 1

Unidad N°1							
Muestras	Pg MW	Qg MVAr (+)		Muestras	Pg MW	Qg MVAr (-)	
		Paux	Qaux			Paux	Qaux
8	80.7714	18.985947		29	80.7489	-29.187431	
		0.30	0.16			0.21211	0.16067
11	85.0975	14.352845		22	85.1299	-28.113621	
		0.27968	0.16067			0.27852	0.16067
18	89.528	20.046242		47	90.9883	-30.074837	
		0.28	0.16067			0.22132	0.16067
7	94.2563	15.41129		7	95.064	-21.003599	
		0.29027	0.16067			0.08194	0.16067
24	100.841	13.365597		184	100.762	-21.609938	
		0.27677	0.16067			0.27719	0.16067
4	104.764	16.732985		17	105.447	-29.404781	
		0.28339	0.16067			0.27129	0.16067
1	110.41	5.815474		39	110.271	-22.032669	
		0.3286	0.16067			0.23184	0.16067
5	114.983	12.96669		33	115.093	-31.040943	
		0.31159	0.16067			0.27632	0.16067
4	120.569	12.765539		22	120.858	-28.802542	
		0.3261	0.16067			0.32899	0.16067
15	126.262	3.71526		45	125.249	-32.508705	
		0.325	0.16067			0.35327	0.16067
6	130.064	14.190012		26	130.85	-25.729778	
		0.34734	0.16067			0.28384	0.16067
9	136.799	12.435687		19	135.224	-26.817495	
		0.32902	0.16067			0.28514	0.16067
8	140	26.259998		28	140.166	-32.673225	
		0.31846	0.16067			0.30116	0.16067
3	145	8.068898		24	145.237	-32.275291	
		0.32533	0.16067			0.36043	0.16067
7	150.655	17.740862		27	150.791	-31.799295	
		0.38716	0.16067			0.29403	0.16067
3	154.007	20.836922		2	155.206	-14.698212	
		0.35114	0.16067			0.33837	0.16067
2	160.371	6.490072		9	160.919	-25.724386	
		0.36167	0.16067			0.3566	0.16067
7	165.053	16.775732		17	165.053	-24.834934	
		0.35652	0.16067			0.38858	0.16067
2	170.195	12.259762		17	170.711	-30.431372	

		0.37894	0.16067			0.39602	0.16067
2	174.179	5.086012		3	175.875	-22.838245	
		0.40568	0.16067			0.363	0.16067
12	181.979	13.037598		3	180.651	-32.059448	
		0.37824	0.16067			0.48957	0.16067
1	183.542	1.624104		9	185.016	-14.513868	
		0.37045	0.16067			0.39709	0.16067
				1	190.446	-42.193283	
						0.41984	0.16067

Unidad de generación N°2

Unidad N° 2							
Muestras	Pg MW	Qg MVar (+)		Muestras	Pg MW	Qg MVar (-)	
		Paux	Qaux			Paux	Qaux
6	80.886238	7.9443		12	80.821152	-37.3348	
		0.2489	0.1487			0.2334	0.1487
11	85.094185	18.7028		36	85.367065	-30.1139	
		0.3061	0.1487			0.2836	0.1487
33	90.565727	22.2631		39	90.704086	-39.8139	
		0.3247	0.1487			0.2780	0.1487
13	95.807114	22.2148		67	95.184837	-32.3212	
		0.3113	0.1487			0.2782	0.1487
6	100.403671	10.8233		28	100.385216	-31.5469	
		0.2529	0.1487			0.2526	0.1487
15	105.780235	23.9800		105	105.650703	-30.5181	
		0.3262	0.1487			0.2658	0.1487
6	110.83844	17.4575		11	110.691185	-25.7431	
		0.3181	0.1487			0.2552	0.1487
4	115.558609	21.3188		9	115.317818	-21.9129	
		0.2495	0.1487			0.2886	0.1487
2	120.587761	8.7846		7	120.342041	-32.9333	
		0.2671	0.1487			0.2632	0.1487
2	125.132736	35.8072		13	125.923401	-28.4016	
		0.2979	0.1487			0.2629	0.1487
4	130.392761	12.1791		6	130.955093	-21.1232	
		0.2960	0.1487			0.3044	0.1487
3	135.981949	24.8049		1	135.774261	-5.2896	
		0.3090	0.1487			0.2812	0.1487
1	140.977158	15.3776		7	140.555222	-24.9945	
		0.3071	0.1487			0.2861	0.1487
2	147.138565	26.4821		1	145.52829	-45.2985	
		0.371	0.1487			0.2894	0.1487
2	150.107788	9.0665		7	150.323135	-29.3911	

		0.3243	0.1487			0.3118	0.1487
1	155.278961	15.9998		1	155.828369	-2.3814	
		0.3332	0.1487			0.3159	0.1487
1	160.079575	16.5100		4	160.395187	-30.1035	
		0.3613	0.1487			0.3158	0.1487
2	165.581924	7.6431		13	165.618896	-28.1065	
		0.3701	0.1487			0.3656	0.1487
1	170.153427	15.9998		8	170.987366	-25.7154	
		0.3546	0.1487			0.3439	0.1487
1	178.614059	4.0328		3	175.75267	-36.8236	
		0.3956	0.1487			0.3068	0.1487
2	180.997742	8.6662		1	180.66481	-1.0524	
		0.3429	0.1487			0.1418	0.1487
				12	185.946548	-20.8507	
						0.1418	0.1487
				1	190.78952	-5.2900	
						0.4168	0.1487

Unidad de generación N°3

Unidad N° 3							
Muestras	Pg MW	Qg MVAr (+)		Muestras	Pg MW	Qg MVAr (-)	
		Paux	Qaux			Paux	Qaux
1	80.084045	22.9810		26	80.356583	-33.7264	
		0.2091	0.1598			0.2208	0.1598
15	85.565247	20.2606		62	85.035072	-31.3982	
		0.2681	0.1598			0.2624	0.1598
6	90.334099	20.2235		52	90.242439	-33.6198	
		0.2214	0.1598			0.2115	0.1598
12	95.166557	16.6024		49	95.842484	-37.9511	
		0.2168	0.1598			0.2773	0.1598
3	100.510544	17.6428		32	100.680992	-30.6708	
		0.3095	0.1598			0.2788	0.1598
11	105.663544	27.1772		154	105.416283	-31.4381	
		0.3329	0.1598			0.3277	0.1598
4	110.941078	29.9828		37	110.79174	-30.7129	
		0.3473	0.1598			0.2967	0.1598
9	115.339722	10.1997		35	115.055481	-32.5365	
		0.3448	0.1598			0.2855	0.1598
4	120.702423	12.3356		17	120.96859	-33.0798	
		0.2894	0.1598			0.2764	0.1598
3	125.641869	20.2235		37	125.266403	-33.3631	
		0.3325	0.1598			0.2808	0.1598
1	130.384384	27.7464		29	130.447174	-29.7323	

		0.2903	0.1598			0.3284	0.1598
1	135.330612	1.9626		23	135.52919	-34.6769	
		0.3387	0.1598			0.2745	0.1598
1	140.763	17.9084		22	140.174454	-30.6880	
		0.2868	0.1598			0.3068	0.1598
2	144.42041	29.5956		19	145.94809	-32.9258	
		0.3545	0.1598			0.3275	0.1598
1	150.069931	9.5134		9	150.934372	-22.5155	
		0.2702	0.1598			0.3373	0.1598
1	155.679886	1.6554		4	155.474228	-20.8920	
		0.4241	0.1598			0.3595	0.1598
2	160.392807	9.1932		12	160.360748	-29.4317	
		0.3863	0.1598			0.3611	0.1598
3	165.776505	30.0802		12	165.984085	-30.9207	
		0.3762	0.1598			0.3934	0.1598
3	170.748764	19.0683		20	170.921875	-27.8027	
		0.3790	0.1598			0.4095	0.1598
2	175.572144	16.1596		2	175.450806	-20.3441	
		0.3041	0.1598			0.3824	0.1598
1	180.045944	8.8636		4	180.286377	-28.9984	
		0.4108	0.1598			0.3473	0.1598
				17	185.010468	-30.5365	
						0.4798	0.1598
				1	188.898682	-37.3905	
						0.3897	0.1598

Unidad de generación N°4

La base de datos de la cual se toman los valores de potencias activa y reactiva con factor de potencia en adelanto son insuficientes para realizar el análisis de esta unidad; sin embargo, se realiza el estudio con los valores disponibles a fin de determinar las características de consumo.

Unidad N° 4							
Muestras	Pg MW	Qg MVar (+)		Muestras	Pg MW	Qg MVar (-)	
		Paux	Qaux			Paux	Qaux
				2	80.91024	-36.0580	
						0.2120	0.1515
				10	84.443405	-39.5724	
						0.2286	0.1515
				1	90.410065	-29.8866	
						0.2133	0.1515

				3	96.7397	-41.9999	
						0.2794	0.1515
				1	100.90116 1	-29.5359	
						0.2560	0.1515
				3	104.50604 2	-19.2014	
						0.2739	0.1515
				9	111.91240 7	-44.5222	
						0.2584	0.1515
				1	115.45667 3	-27.5825	
						0.2511	0.1515
				2	120.94747 2	-30.5036	
						0.2536	0.1515
				9	124.54877 5	-13.5250	
						0.2651	0.1515
				8	128.63310 2	-27.5468	
						0.2988	0.1515
				4	137.68289 2	-22.0474	
						0.3403	0.1515
				4	140.63879 4	-19.6808	
						0.2719	0.1515
				2	144.40741	-26.9743	
						0.2747	0.1515
				7	150.66192 6	-14.4399	
						0.2904	0.1515
				2	153.39109 8	-46.7917	
						0.3304	0.1515
				1	161.65376 3	-29.2158	
						0.3206	0.1515
1	165.83937 1	1.987779		1	165.95602 4	-16.553452	
		0.1434 7	0.1515 4			0.2989 3	0.1515 5
				4	170.02185 1	-6.7090	
						0.3138	0.1515
				1		-12.203367	

					174.91824 3	0.3131 7	0.151 5
3	183.76506	6.9929		26	183.14869 7	-21.5505	
		0.3462	0.0891			0.3378	0.151 5
				2	186.33616 6	-16.6091	
						0.3509	0.151 5
				3	189.59663 4	-10.4856	
						0.4062	0.151 5

Unidad de generación N°5

Unidad N° 5							
Muestras	Pg MW	Qg MVAr (+)		Muestras	Pg MW	Qg MVAr (-)	
		Paux	Qaux			Paux	Qaux
				25	80.426758	-41.9943	
						0.2240	0.1614
				44	85.278099	-42.2323	
						0.2245	0.1614
1	90.97419	15.7981		66	90.046768	-40.3096	
		0.2516	0.1614			0.2316	0.1614
3	95.621078	8.7897		35	95.325974	-39.3011	
		0.2439	0.1614			0.2411	0.1614
4	100.78315	16.7319		291	100.651253	-35.9706	
		0.2557	0.1614			0.2445	0.1614
1	107.159698	6.2776		31	105.501862	-40.1925	
		0.3196	0.1614			0.2384	0.1614
4	110.688721	22.5998		136	110.617485	-31.9575	
		0.2251	0.1614			0.2754	0.1614
1	116.765182	21.4104		33	115.750008	-28.9638	
		0.3491	0.1614			0.2694	0.1614
3	120.446869	23.2776		89	120.237312	-30.3015	
		0.2822	0.1614			0.2644	0.1614
1	125.081345	36.8308		116	125.131569	-29.9587	
		0.2563	0.1614			0.2651	0.1614
3	130.815369	10.8960		104	130.399277	-29.8510	
		0.3097	0.1614			0.2714	0.1614
1	135.500916	4.1756		53	135.650665	-25.5850	
		0.2731	0.1614			0.3344	0.1614
3	140.37738	13.7380		65	140.342987	-31.3273	
		0.3082	0.1614			0.2877	0.1614
1	145.44632	3.9829		43	145.014053	-26.5103	
		0.2833	0.1614			0.3053	0.1614
15	150.096069	9.8381		54	150.206955	-29.0855	

		0.3422	0.1614			0.3705	0.1614
1	155.851135	17.5461		11	155.815659	-17.5602	
		0.3572	0.1614			0.3467	0.1614
5	160.842636	5.4176		32	160.745743	-26.5274	
		0.3804	0.1614			0.3360	0.1614
12	165.284882	16.9176		6	165.620621	-20.8675	
		0.3955	0.1614			0.3116	0.1614
5	170.752319	20.5112		22	170.687027	-17.8178	
		0.3989	0.1614			0.3241	0.1614
2	175.841644	25.3084		4	175.423233	-20.5179	
		0.4014	0.1614			0.3108	0.1614
2	180.019714	33.1206		15	180.833603	-22.0692	
		0.4310	0.1614			0.3380	0.1614
9	185.673935	24.1895		9	185.420074	-23.3611	
		0.4839	0.1614			0.3231	0.1614
1	189.138657	30.8888		2	189.059311	-54.0524	
		0.4560	0.1614			0.4225	0.1614

Unidad de generación N°6

Unidad N° 6							
Muestras	Pg MW	Qg MVar (+)		Muestras	Pg MW	Qg MVar (-)	
		Paux	Qaux			Paux	Qaux
1	80,194008	6,2850		36	80,591064	-38,4832	
		0,2210	0,0948			0,2263	0,0948
3	184,236984	10,1084		38	85,862877	-35,6054	
		0,4062	0,0948			0,2380	0,0948
2	90,857437	7,4683		74	90,409622	-36,2709	
		0,3194	0,0948			0,2642	0,0948
1	95,215622	24,2559		13	95,570831	-31,7335	
		0,2532	0,0948			0,2102	0,0948
11	99,775154	11,2646		273	100,606377	-33,6852	
		0,2549	0,0948			0,2748	0,0948
2	105,217888	23,4062		20	105,959892	-39,7474	
		0,2696	0,0948			0,2590	0,0948
3	110,901985	7,9477		49	110,962013	-35,2213	
		0,3244	0,0948			0,2819	0,0948
1	114,601334	17,5368		50	115,513931	-32,9471	
		0,2687	0,0948			0,2667	0,0948
1	120,9104	23,3410		54	120,856491	-35,8804	
		0,3674	0,0948			0,2774	0,0948
2	125,57547	12,2073		70	125,333191	-30,5660	
		0,3405	0,0948			0,2835	0,0948
4	130,036423	31,7175		58	130,144852	-31,0260	

		0,3014	0,0948			0,3100	0,0948
1	135,147934	5,4690		28	135,63559	-31,9137	
		0,3052	0,0948			0,3275	0,0948
3	140,974289	19,5078		40	140,705963	-32,2111	
		0,3752	0,0948			0,3556	0,0948
1	145,097092	34,8274		27	145,990631	-33,7745	
		0,4177	0,0948			0,3249	0,0948
3	150,616989	6,0885		22	150,875748	-29,8723	
		0,3158	0,0948			0,2725	0,0948
1	155,458069	8,0235		2	155,676834	-17,4189	
		0,3820	0,0948			0,3148	0,0948
1	160,959595	32,2303		11	160,264893	-26,6162	
		0,4227	0,0948			0,3494	0,0948
3	165,938217	6,4918		4	165,06189	-47,0655	
		0,3789	0,0948			0,3455	0,0948
1	169,936615	7,9290		14	170,972565	-27,0664	
		0,3832	0,0948			0,3445	0,0948
1	174,016617	9,1455		2	175,816269	-20,2203	
		0,3886	0,0948			0,3867	0,0948
1	180,767563	21,3265		5	180,833405	-21,3466	
		0,4323	0,0948			0,3398	0,0948
2	184,236984	10,1084		1	185,119797	-13,7345	
		0,4062	0,0948			0,3973	0,0948
1	186,846161	25,1398		2	188,463638	-29,5983	
		0,4356	0,0948			0,3750	0,0948

Unidad de generación N°7

Unidad N° 7							
Muestras	Pg MW	Qg MVAR (+)		Muestras	Pg MW	Qg MVAR (-)	
		Paux	Qaux			Paux	Qaux
2	79.511414	19.3540		70	80.796806	-37.3721	
		0.1942	0.1551			0.2714	0.1551
1	83.318192	18.9153		28	85.76284	-37.4359	
		0.2026	0.1551			0.2268	0.1551
3	89.606491	26.5099		70	90.977104	-36.2610	
		0.1904	0.1551			0.2511	0.1551
4	95.065887	8.3619		20	95.918457	-37.8771	
		0.2600	0.1551			0.2406	0.1551
1	100.895065	35.9318		262	100.242401	-33.8643	
		0.2469	0.1551			0.2758	0.1551
1	106.064323	7.3117		28	105.576393	-11.7098	
		0.3138	0.1551			0.2774	0.1551
6	110.238098	19.2881		50	110.879135	-32.2717	

		0.2229	0.1551			0.2830	0.1551
1	116.674622	4.6321		33	115.912582	-35.6991	
		0.3237	0.1551			0.3371	0.1551
5	121.564774	11.7648		47	120.691467	-32.2998	
		0.3383	0.1551			0.2599	0.1551
2	126.158936	6.9784		65	125.756248	-26.2660	
		0.3185	0.1551			0.3350	0.1551
3	130.809937	14.6904		51	130.534714		
		0.3409	0.1551			0.2869	0.1551
4	134.950592	5.1989		24	135.716309	-29.6703	
		0.3640	0.1551			0.3368	0.1551
4	140.43045	27.4373		26	140.88681	-32.2410	
		0.2789	0.1551			0.3052	0.1551
2	144.183289	5.6907		15	144.624832	-36.6422	
		0.3596	0.1551			0.3226	0.1551
5	150.884171	11.6789		19	150.977829	-28.6306	
		0.3903	0.1551			0.3535	0.1551
3	154.686386	16.6353		15	154.456131	-41.8752	
		0.3511	0.1551			0.3735	0.1551
1	160.648407	39.8240		14	160.161835	-28.5420	
		0.3419	0.1551			0.3402	0.1551
20	164.345169	6.1856		3	164.217072	-27.4665	
		0.3807	0.1551			0.3588	0.1551
9	170.328705	19.4471		10	170.962006	-33.5633	
		0.3686	0.1551			0.3215	0.1551
4	174.187286	12.4317		3	174.102829	-58.5034	
		0.3963	0.1551			0.3733	0.1551
3	180.152542	20.7093		2	180.603546	-20.5845	
		0.4125	0.1551			0.3328	0.1551
20	184.579422	21.2551		5	185.410797	-13.7097	
		0.4416	0.1551			0.3932	0.1551
				1	190.908554	-1.0432	
		0.1433	0.1551			0.4031	0.1551

Unidad de generación N°8

Unidad N° 8							
Muestras	Pg MW	Qg MVar (+)		Muestras	Pg MW	Qg MVar (-)	
		Paux	Qaux			Paux	Qaux
3	80.626877	12.5747		124	80.521629	-37.6087	
		0.2321	0.1539			0.2328	0.1539
				47	85.41227	-59.8739	
						0.2626	0.1539
4	90.444077	11.5580		95	90.496513	-37.2223	

		0.2633	0.1539			0.2461	0.1539
4	95.973221	9.2120		44	95.363403	-47.1507	
		0.3260				0.2965	0.1539
4	100.560661	23.0014		118	100.572823	-34.0266	
		0.2460	0.1539			0.2496	0.1539
1	105.887138	9.2681		20	105.398483	-15.7022	
		0.2661	0.1539			0.2697	0.1539
5	110.317947	16.7824		175	110.722221	-32.2011	
		0.2545	0.1539			0.2562	0.1539
2	115.641487	4.7223		41	115.599083	-33.4098	
		0.3324	0.1539			0.2538	0.1539
5	120.409233	5.6443		98	120.663803	-31.6040	
		0.2603	0.1539			0.2618	0.1539
2	125.8582	6.7638		104	125.479736	-9.2590	
		0.2876	0.1539			0.2828	0.1539
3	130.17775	13.5253		107	130.625381	-31.5804	
		0.2959	0.1539			0.2730	0.1539
4	134.230804	7.1709		70	135.440475	-37.2436	
		0.3567	0.1539			0.3404	0.1539
3	140.658005	5.4171		57	140.559601	-28.2338	
		0.3613	0.1539			0.2575	0.1539
9	144.417114	26.8050		52	145.458878	-17.4275	
		0.3523	0.1539			0.2994	0.1539
10	150.368347	11.3660		42	150.938431	-27.4217	
		0.3752	0.1539			0.3696	0.1539
8	154.535599	28.2096		10	155.758575	-18.2846	
		0.3631	0.1539			0.3355	0.1539
4	160.132095	7.6453		33	160.923538	-26.8239	
		0.3038	0.1539			0.3001	0.1539
14	165.385635	23.9697		11	165.459137	28.2599	
		0.3911	0.1539			0.3583	0.1539
6	170.718521	18.2386		25	170.949631	-23.8742	
		0.3396	0.1539			0.3121	0.1539
7	175.454834	4.1026		6	175.169601	28.0302	
		0.3920	0.1539			0.3516	0.1539
3	180.582794	22.3988		11	180.507202	-25.3397	
		0.3485	0.1539			0.3183	0.1539
3	185.984024	5.7980		9	185.532822	18.1402	
		0.4106	0.1539			0.3438	0.1539
1	190.380539	5.7170		1	190.134415	-27.9178	
		0.4128	0.1539			0.4063	0.1539

ANEXO III. Resumen de consumo de auxiliares de la unidad y de la central

Unidad N°1 añadido el consumo de los servicios auxiliares de la central tomado de los transformadores de las unidades 1 y 8.

Unidad N° 1 añadido el consumo de TA1 y TA8							
Muestra	Potencia MW	Consumo Paux TA1+TA8 MW	Consumo Qaux (+) TA1+TA8 MVar	Muestra	Potencia MW	Consumo Paux TA1+TA8 MW	Consumo Qaux (-) TA1+TA8 MVar
8	80,771	2,654	1,464	29	80,749	1,95	0,96
11	85,098	2,643	1,485	22	85,130	2,04	1,01
18	89,528	2,526	1,471	47	90,988	2,00	1,02
7	94,256	2,508	1,313	7	95,064	1,90	1,01
24	100,841	2,625	1,382	184	100,762	2,55	1,38
4	104,764	2,623	1,355	17	105,447	2,61	1,35
1	110,410	2,633	1,348	39	110,271	2,59	1,40
5	114,983	2,585	1,378	33	115,093	2,03	0,98
4	120,569	2,529	1,294	22	120,858	2,58	1,36
15	126,262	2,653	1,387	45	125,249	2,16	1,04
6	130,064	2,465	1,299	26	130,850	2,59	1,40
9	136,799	2,567	1,329	19	135,224	2,53	1,33
8	140,000	2,585	1,354	28	140,166	2,70	1,46
3	145,000	2,489	1,336	24	145,237	2,07	1,05
7	150,655	2,687	1,359	27	150,791	2,59	1,36
3	154,007	2,793	1,369	2	155,206	2,38	1,37
2	160,371	2,670	1,428	9	160,919	2,66	1,43
7	165,053	2,721	1,440	17	165,053	2,76	1,44
2	170,195	2,658	1,362	17	170,711	2,76	1,39
2	174,179	2,750	1,380	3	175,875	2,71	1,38
12	181,979	3,039	-	3	180,651	2,15	0,97
1	183,542	0,370	0,161	9	185,016	0,40	0,16
				1	190,446	0,42	0,16

Debido a los mantenimientos que se realizan sobre las unidades es que se debe realizar un traspaso de una unidad a otra; es decir, que en el caso de que la unidad 1 u 8 salgan de operación los servicios auxiliares deben ser abastecidos por una de las dos unidades, en la siguiente tabla los valores obtenidos bajo estas condiciones.

Unidad N°1 y consumo de TA1							
Muestra	Potencia MW	Consumo Paux TA1+TA8 MW	Consumo Qaux (+) MVAr	Muestra	Potencia MW	Consumo Paux TA1+TA8 MW	Consumo Qaux (-) TA1+TA8 MVAr
8	80.7714	0.2982	0.1607	29	80.7489	1.5382	0.7297
11	85.0975	0.2797	0.1607	22	85.1299	1.6042	0.7629
18	89.5280	0.2787	0.1607	47	90.9883	1.4383	0.6538
7	94.2563	0.2903	0.1607	7	95.0640	1.5598	0.7455
24	100.8407	0.2768	0.1607	184	100.7622	1.5125	0.7284
4	104.7644	0.2834	0.1607	17	105.4468	1.4701	0.7156
1	110.4104	0.3286	0.1607	39	110.2709	1.5562	0.7920
5	114.9828	0.3116	0.1607	33	115.0926	1.6186	0.7731
4	120.5686	0.3261	0.1607	22	120.8583	1.5626	0.7711
15	126.2620	0.3250	0.1607	45	125.2488	1.8153	0.9730
6	130.0643	0.3473	0.1607	26	130.8497	1.8417	0.9737
9	136.7995	0.3290	0.1607	19	135.2243	1.4905	0.7416
8	140.0000	0.3185	0.1607	28	140.1658	2.0789	1.0986
3	145.0000	0.3253	0.1607	24	145.2374	1.5564	0.8976
7	150.6554	0.3872	0.1607	27	150.7913	1.9032	1.0150
3	154.0068	0.3511	0.1607	2	155.2056	2.0101	1.0600
2	160.3709	0.3617	0.1607	9	160.9193	2.1170	1.0630
7	165.0531	0.3565	0.1607	17	165.0531	1.5927	0.7540
2	170.1950	0.3789	0.1607	17	170.7111	1.9682	1.0470
2	174.1789	0.4000	0.1607	3	175.8751	0.3630	0.1607
12	181.9785	0.3782	0.1607	3	180.6510	0.4896	0.1607
1	183.5421	0.3705	0.1607	9	185.0163	0.3971	0.1607
				1	190.4464	0.4198	0.1607

Unidad N°8 añadido el consumo de los servicios auxiliares de la central tomados de los transformadores de las unidades 1 y 8.

Unidad N°8 añadido el consumo de TA1 y TA8							
Muestra	Potencia MW	Consumo Paux TA1 MW	consumo Qaux (+) MW	Muestra	Potencia MW	Consumo Paux TA1 MW	Consumo Qaux (-) TA1 MVAr
3	80.6269	0.2321	0.1543	124	80.5216	0.2328	0.1543
0	0.0000	0.0000	0.1543	47	85.4123	0.2626	0.1543
4	90.4441	0.2633	0.1543	95	90.4965	0.2461	0.1543
4	95.9732	0.3260	0.1543	44	95.3634	0.2965	0.1543
4	100.5607	1.7102	0.8746	118	100.5728	1.7139	0.9672
1	105.8871	0.2661	0.1543	20	105.3985	1.9477	0.9009
5	110.3179	1.7849	0.9009	175	110.7222	1.7866	0.9009
2	115.6415	0.3324	0.1543	41	115.5991	0.0000	0.0000

5	120.4092	0.2603	0.1543	98	120.6638	1.9456	0.9738
2	125.8582	0.2876	0.1543	104	125.4797	1.7449	0.8452
3	130.1778	2.0410	1.0523	107	130.6254	2.0181	1.0523
4	134.2308	2.0634	1.0119	70	135.4405	2.0471	1.0119
3	140.6580	1.8225	0.8572	57	140.5596	1.7187	0.8572
9	144.4171	2.0879	1.0340	52	145.4589	2.0350	1.0340
10	150.3683	2.0348	0.9790	42	150.9384	2.0293	0.9790
8	154.5356	0.3631	0.1543	10	155.7586	1.8391	0.9111
4	160.1321	2.0798	1.0527	33	160.9235	2.0761	1.0527
14	165.3856	2.6185	1.3497	11	165.4591	2.5857	1.3497

La tabla que se detalla a continuación contiene los datos de los consumos de la unidad N°8 así como también se añade el consumo de los servicios auxiliares de la central.

Unidad N°8 añadido el consumo de TA8							
Muestra	Potencia MW	Consumo Paux MW	Consumo Qaux (+) MVar	Muestra	Potencia MW	Consumo Paux MW	Consumo Qaux (-) MVar
3	80.6269	2.3159	1.3197	124	80.5216	2.3167	1.3197
4	90.4441	2.2552	1.1921	95	90.4965	2.2380	1.1921
4	100.5607	1.7023	0.8234	118	100.5728	1.7060	0.8234
1	105.8871	1.9565	0.3086	20	105.3985	1.9601	0.3086
5	110.3179	1.6787	0.8338	175	110.7222	1.6804	0.8338
2	115.6415	2.2867	1.1607	41	115.5991	2.2081	1.1607
5	120.4092	1.9544	1.4019	98	120.6638	1.9559	1.4019
2	125.8582	1.7579	0.8541	104	125.4797	1.7531	0.8541
3	130.1778	1.7789	0.9017	107	130.6254	1.7560	0.9017
4	134.2308	1.8096	0.8830	70	135.4405	1.7933	0.8830
3	140.6580	1.8649	0.8846	57	140.5596	1.7611	0.8846
9	144.4171	2.3076	1.5902	52	145.4589	2.2548	1.5902
10	150.3683	2.2891	1.1868	42	150.9384	2.2835	1.1868
8	154.5356	2.3342	1.3339	10	155.7586	2.3065	1.3339
4	160.1321	1.8245	1.3121	33	160.9235	1.8208	1.3121
14	165.3856	1.9005	0.8903	11	165.4591	1.8678	0.8903
6	170.7185	1.8805	0.9102	25	170.9496	1.8530	0.9102

ANEXO IV. Ecuaciones polinómicas para el análisis del límite de servicios auxiliares

Unidad	Descripción	Ecuación	Coficiente de correlación
1	Paux con Qg positivo con ta1 y ta8	$1 \times 10^{-6}Pg^3 - 0,0003Pg^2 + 0,0353Pg + 1,4416$	0,6403
	Qaux con Qg positivo con ta1 y ta8	$-8 \times 10^{-7}Pg^3 + 0,0004Pg^2 - 0,052Pg + 3,7462$	0,5681
	Paux con Qg negativo con ta1 y ta8	$3 \times 10^{-7}Pg^3 - 0,0002Pg^2 + 0,0496Pg - 0,6845$	0,381
	Qaux con Qg negativo con ta1 y ta8	$-6 \times 10^{-7}Pg^3 + 0,0001Pg^2 - 0,0039Pg + 0,6608$	0,3402
	Paux con Qg negativo con ta1	$-3 \times 10^{-6}Pg^3 + 0,001Pg^2 - 0,1254Pg + 6,2952$	0,4952
	Qaux con Qg negativo con ta1	$-2 \times 10^{-6}Pg^3 + 0,0009Pg^2 - 0,1029Pg + 4,5501$	0,5675
2	Paux con Qg positive	$0,0009Pg + 0,1964$	0,5033
	Paux con Qg negativo	$1 \times 10^{-7}Pg^3 - 4 \times 10^{-5}Pg^2 + 0,0047Pg + 0,0793$	0,7994
	Qaux	$0,149 Pg$	0
3	Paux con Qg positivo	$4 \times 10^{-7}Pg^3 - 0,0002Pg^2 + 0,0259Pg - 0,9196$	0,5536
	Paux con Qg negativo	$1 \times 10^{-7}Pg^3 - 5 \times 10^{-5}Pg^2 + 0,0075Pg - 0,1088$	0,7826
	Qaux	$-9 \times 10^{-18}Pg + 0,1601$	-5e-15
4	Paux con Qg negativo	$3 \times 10^{-7}Pg^3 - 0,0001 Pg^2 + 0,0174 Pg - 0,5321$	0,7935
	Qaux	$4 \times 10^{-18}Pg + 0,1519$	8e-16
5	Paux con Qg positive	$4 \times 10^{-7}Pg^3 - 0,0001Pg^2 + 0,0153Pg - 0,3811$	0,844
	Paux con Qg negativo	$4 \times 10^{-9}Pg^3 - 4 \times 10^{-6}Pg^2 + 0,0021Pg + 0,0688$	0,7637
	Qaux	$6 \times 10^{-18}Pg + 0,1618$	-6e-15
6	Paux con Qg positivo	$1 \times 10^{-8}Pg^3 - 9 \times 10^{-6}Pg^2 + 0,0034Pg + 0,014$	0,7605
	Paux con Qg negativo	$6 \times 10^{-8}Pg^3 - 2 \times 10^{-5}Pg^2 + 0,0044Pg - 0,0094$	0,818
	Qaux	$0,1576 Pg$	0
7	Paux con Qg positivo	$4 \times 10^{-7}Pg^3 - 0,0002Pg^2 + 0,0226Pg - 0,8443$	0,852
	Paux con Qg negative	$4 \times 10^{-8}Pg^3 - 2 \times 10^{-5}Pg^2 + 0,0037Pg + 0,0315$	0,7586
	Qaux	$1 \times 10^{-17}Pg + 0,1555$	1e-14

8	Paux con Qg negativo con ta1 y ta8	$9E - 06x^3 - 0,0034x^2 + 0,4369x - 16,663$	0,6685
	Qaux con Qg negativo con ta1 y ta8	$5E - 06x^3 - 0,0018x^2 + 0,2275x - 8,3993$	0,6921
	Paux con Qg positivo Con ta8	$-7E-06Pg^3 + 0,0027Pg^2 - 0,3472Pg + 16,312$	0,3116
	Paux con Qg positivo con ta8	$-7E-06Pg^3 + 0,0026Pg^2 - 0,3292Pg + 15,674$	0,3268
	Qaux con Qg negativo Con ta8	$-1E-05Pg^3 + 0,0038Pg^2 - 0,469Pg + 19,793$	0,33
	Qaux con Qg negativo con ta8	$-1E-05Pg^3 + 0,0037Pg^2 - 0,4597Pg + 19,434$	0,3261

ANEXO V. Código implementado en Matlab

MATLAB proporciona las herramientas necesarias para exportar el código realizado de manera que el usuario pueda entender mejor. Para ello se emplea la opción **PUBLISH** en la cual se selecciona el formato a publicar el código.

```
function varargout = GENERADOR(varargin)
% GENERADOR MATLAB code for GENERADOR.fig
%   GENERADOR, by itself, creates a new GENERADOR or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = GENERADOR returns the handle to a new GENERADOR or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   GENERADOR('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in GENERADOR.M with the given input arguments,
%
%   GENERADOR('Property','Value',...) creates a new GENERADOR or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before GENERADOR_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to GENERADOR_OpeningFcn via varargin,
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help GENERADOR

% Last Modified by GUIDE v2.5 01-Sep-2018 14:46:43

% Begin initialization code - DO NOT
EDIT gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',  @GENERADOR_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',   @GENERADOR_OutputFcn, ...
                  'gui_LayerFcn',    [] , ...
                  'gui_Callback',    []
                  );
if nargin &&
ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before GENERADOR is made visible.
function GENERADOR_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
```

```

% This function has no output args, see OutputFcn,
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to GENERADOR (see VARARGIN)

% Choose default command line output for GENERADOR
handles,output = hObject;

% Update handles
structure
guidata(hObject,
handles);

% UIWAIT makes GENERADOR wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles,figure1);
set(handles,uipanel6,'visible','off
')
set(handles,uipanel10,'visible','of
f')
set(handles,uitable1,'visible','off
')
str=get(handles,fech,'string');

c=imread('CCS.jpg
');
axes(handles,axes1
0) imshow(c)

d=imread('EPN.jpg
');
axes(handles,axes1
1) imshow(d)
hold
on
grid
on

axes(handles,axes9) axis([-250 250 0 250])

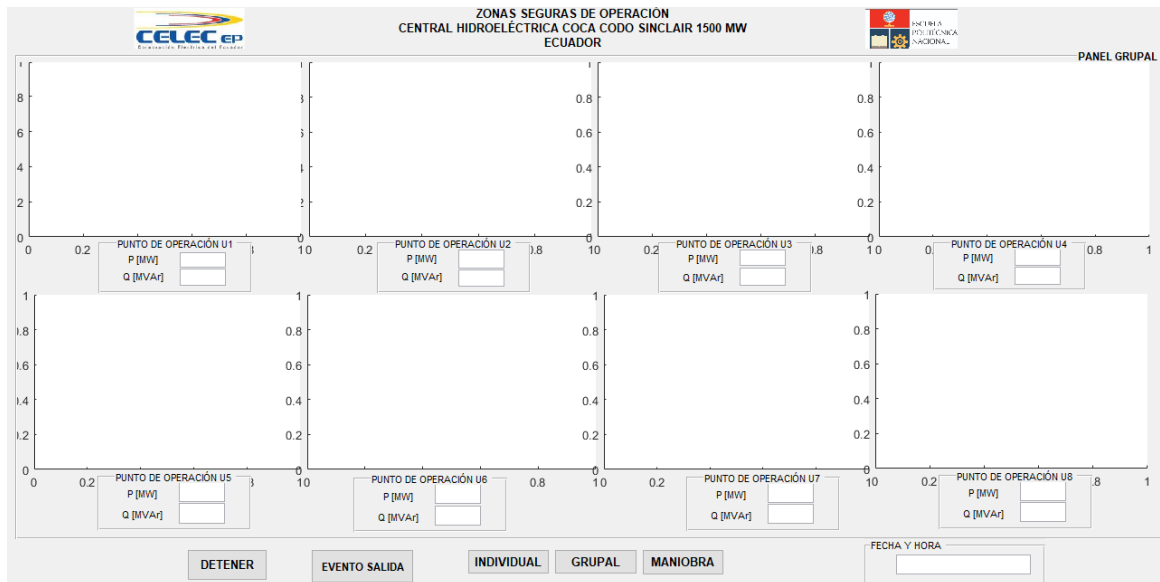
```

DATOS DE PLACA

```

global S fp Pmax Pmin m1 m2 m3
S=205; %Potencia nominal
[MVA] fp=0,9; %factor de potencia
Pmax=192; %Potencia mecánica
máxima Pmin=18.75; %Potencia
mecánica mínima
m1=0; %Marca de inicialización del contador
m2=1; %Marca para almanecar el ultimo valor
leido
m3=1; %Marca para almacenar los valores de salida de parámetro en Excel

```



Curva de capacidad unidad 1

```

function U1_Callback(hObject, eventdata, handles)

global contador condicion condicion3 paso a t s m1 m2 h hp h2 h2p h3 h4 h5 h6 h7 h8 S
fp Pmax Pmin Q count

cla reset %permite eliminar gráficas anteriores
%----Cambio de pestaña almacena contador-----%
d=contador %Cuando cambia de pestaña que almacene el contador con ese
número condicion=get(handles,togglebutton4,'value');
condicion3=get(handles,togglebutton6,'value');
m1=d %Almaceno el ultimo valor del contador
m2=d %Almaceno el ultimo valor en que se quedo para continuar con el
lazo a=d%1 continuar el lazo desde donde se quedo
contador=d-1
%-----%

if
    condicion==0&&s==0|condicion3==0&&
    s=0 t=0;
    while 1
        direc='C:\Users\Paola
Chimarro\Desktop\CodigoTesis';
        list=dir([direc,'/*.xls']);% extension XLS
        reportes list=
        list(~cellfun(@isempty,{list(:),date}));
        ng=length(list)
        cel=struct2cell(list); %forma una estructura solamente con el nombre de los reportes
        generados
        exit=get(handles,detener,'value');

        for nu=a:ng
            hold
            on
            grid
            on
            unidad=1;
            u=1;v=2;w=3;x=4;y=5;z=6;
            axes(handles,axes9)
            axis([-250 250 0 250])
            [ PR,PA,Vt1,f,Vexc,Iexc,fuera ] = ReporteDatos(u,v,w,x,y,z,cel,nu);
            box1=fuera
            set(handles,q,'String',PR)
    end
end

```

```

set(handles,p,'String',PA)
set(handles,vt,'String',Vt1)
set(handles,fp,'String',f)
set(handles,vexc,'String',Vexc)
set(handles,Ia,'String',Iexc)
set(handles,fech,'String',fecha)

Zbase1=Vt1^2/S;
Xd=0,973*Zbase1;
Xq=0,608*Zbase1;
Xt=(0,1401*(S/69))*Zbase1
; if PR==0&&PA==0
    pause(1)

```

```

delete (h)
hold
on
grid
on
axes(handles,axes9)
axis([-250 250 0
250])
h=plot(PR,PA,'b*-');%Gráfica para Ia UI
else

```

```

[ Q,Pmax,Pmin,Pnom,P_Emin,Q_Emin,P_Emax,Q_Emax,Q0,Pi,Qc,Pc,in] = funCurvas(
Vt1,Xd,Xq,Xt,S,fp,Pmax,Pmin,PR,PA);
delete(h)
delete(hp)
delete(h2)
delete(h2p)
delete(h3)
delete(h4)
delete(h5)
delete(h6)
delete(h7)
delete(h8)

```

GRAFICA UNIDAD 1

```

%Para graficar el punto en PANTALLA
hold on
grid on
axes(handles,axes9)
axis([-250 250 0
250])
plot(Q,Pnom,Q,Pmmax,Q,Pmmin,Q_Emax,P_Emax,Q_Emin,P_Emin,Q0,Pi,Qc,P
c) str = '$$ subexcitado $$';
text(-180,-
30,str,'Interpreter','latex') str =
 '$$ sobreexcitado $$';
text(100,-30,str,'Interpreter','latex')
legend('Límite por corriente de armadura','Límite de potencia máxima','Límite de
potencia mínima','Límite por corriente de campo máxima','Límite por corriente de campo
mínima','Límite de margen de estabilidad de estado estable','Límite por calentamiento
en los terminales','Location','northeastoutside')
ylabel('Potencia Activa [MW]')
xlabel('Potencia Reactiva
[MVAr]')
h=plot(PR(in),PA(in),'r*');
hp=plot(PR(~in),PA(~in),'g*');
pause(3)
%-----%
if in==0
 [ count ] = SalidaParametro( PR,PA,fuera,unidad,count);
else
end
%-----%
end

comp=strcmp(paso,box1) %Comparaciones para lectura de nuevo
documento if comp==0
contador=contador+1 %Ayuda a que ya no se repita el documento leído
anteriormente else
pause(3) %Pause para la siguiente
lectura end
if contador==ng %Para que regrese al ultimo documento que leyó

paso=bo
x1
if
condicion==1 ||condicion
3==1 t=0
p=contador
m1=p
m2=p
pause
end
if exit==1
break
end

end
end
end

```

Función Salida de la Zona Segura de Operación

```

function [ count ] = SalidaParametro( PR,PA,fuera,unidad,count)
count=count+1
warndlg(sprintf('ZONA NO SEGURA UNIDAD
 %d:\n% s\n',unidad,fuera),'ALERTA!')
Titulos={'FECHA' 'P [MVA]' 'Q [MVAr]' 'UNIDAD'}; % Variable Titulos

```

```

xlswrite('EventoSalida.xlsx',Titulos,'A1:D1'); % Escribir Titulos en Excel
Datos={ fuera PA PR unidad} % Variable Datos
xlswrite('EventoSalida.xlsx',Datos,'Hoja1',sprintf('A%d:D%d',count,count)); % Escribir Titulos en Excel

```

Función Reporte Datos

```

function [ PR,PA,Vt,f,Vexc,Iexc,fuera ] = ReporteDatos(u,v,w,x,y,z,cel,nu)
g=char(cel(1,nu));%Tener un array de caracteres con el nombre especifico de
cada reporte
fuera=char(cel(2,nu));%fecha encontrada
dato=xlsread(g);%almacena en un solo vector los datos necesarios de las 8
unidades
PA=dato(1,u);%columna a seleccionar potencia activa U1
PR=dato(1,v);%columna a seleccionar potencia reactiva U1
Vt=dato(1,w);% columna a seleccionar de Voltaje en terminales U1
f=dato(1,x);% columna a seleccionar de factor de potencia U1
Vexc=dato(1,y);% columna a seleccionar de voltaje de excitacion U1
Iexc=dato(1,z);% columna a seleccionar de corriente de excitacion U1
end

```

Funcion Calentamiento

```

function [ Pc,Qc ] = funcion_calentamiento( S )
%UNTITLED2 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
%% curva del calentamiento para generador de polos lisos
Pc=linspace(0,1,10)*S;
Vt=13.8;
Zbase=(Vt^2)/S;
Xd = 0.973*Zbase; %Reactancia de eje directo
Xt = 1;%(0.1401*S/69)*Zbase; % Reactancia del transformador principal
Q=sym('Q','positive');
for i=1:length(Pc)
%[Qcp(i,:)] =vpasolve((Vt^2*0.5*((1/Xd)+(1/Xt)))^2==(Q-(Vt^2*0.5*((1/Xt)-(1/Xd))))^2+Pc(1,i)^2,Q);
[Qcp(i,:)] =vpasolve((Vt^2*0.5*((1/Xd)+(1/Xt)))^2==(Q+(Vt^2*0.5*((1/Xd)-(1/Xt))))^2+Pc(1,i)^2,Q);
end
Qc=[Qcp(:,1)]';
end

```

Botón de verificación PANEL DE MANIOBRA

```

function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
global j1 j2
hold on
grid on
axes(handles,axes13
) axis([-250 250 0
250])

```

```

PA=str2double(get(handles,edit34,'string'));
PR=str2double(get(handles,edit35,'string'));
xv=[-122,7,-118,9,-106,1,-74,2,-
23,5,85,82,9059,85,9891,88,9924,91,9151,94,7560,97,5139,100,1881,102,7774,105,2810,107,6
979,110,0272,112,2681,114,4198,116,4816,118,4525,120,3320,122,1193,123,8137,125,4147,126
,9217,128,3340,129,6513,130,8729,131,9984,133,0275,133,9598,134,7948,135,5324,136,1721,1
36,7138,137,1573,137,5024,137,7490,137,8970,137,9464,137,9,-122,7]*1,002;
yv=[5,51,25,104,1,162,8,192,192,195,4357,190,3162,185,1421,179,9149,174,6360,169,3068
,16
3,9288,158,5035,153,0323,147,5168,141,9585,136,3590,130,7198,125,0425,119,3288,113,5803,
107,7986,101,9853,96,1422,90,2709,84,3732,78,4507,72,5052,66,5383,60,5519,54,5477,48,52
7

```



```

4,42,4928,36,4457,30,3878,24,3210,18,2470,12,1677,6,0847,0,5,5]*1,002;
in=inpolygon(PR,PA,xv,yv)
j1=plot(PR(in),PA(in),'r*
');
j2=plot(PR(~in),PA(~in),'g*-');

```

Punto fuera de sus límites

```

if in==0
warndlg(sprintf('ZONA NO SEGURA\n SALIDA DE PARÁMETROS'),'ALERTA!')
else
end

```

Botón borrar PANEL DEL OPERADOR

```

function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton9 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA) global j1 j2
delete(j
1)
delete(j
2)
potop='
';
set(handles,edit34,'string',poto
p)
set(handles,edit35,'string',poto
p)

% --- Executes on button press in pushbutton10,
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton10 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in radiobutton9,
function radiobutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

Curvas de capacidad PANEL GRUPAL

```

function togglebutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
global condicion condicion2 u up u2 u2p u3 u3p u4 u4p u5 u5p u6 u6p u7 u7p u8 u8p
marca S fp Pmax Pmin s a m1 m2 m3 contador count
contador=m1%0;
a=m2%1 continuar el lazo desde donde se quedo
count=m3
set(handles,uipane15,'visible','on') %Visibilidad pantalla GRUPAL
set(handles,uipane16,'visible','off') %Invisibilidad pantalla INDIVIDUAL
set(handles,uipane110,'visible','off')%Invisibilidad pantalla MANIOBRA
set(handles,uitable1,'visible','off') %Invisibilidad información de fallas

condicion=get(handles,togglebutton4,'value');
condicion2=get(handles,togglebutton5,'value');
set(handles,togglebutton4,'value',0)
set(handles,togglebutton5,'value',0)

```

```

if condicion==0||condicion2==0%1
s=0;
while 1
direc='C:\Users\PaoIa Chamarro\Desktop\CodigoTesis';%Direccion de la
carpeta de los archivos
list=dir([direc,'/*,*.xls']);

```

```

        list =
        list(~cellfun(@isempty,{list(:),date}));
        cel=struct2cell(list)
        nf=length(list)
        exit=get(handles,detener,'value')
        e')

for na=a:nf
g=char(cel(1,na));%Tener un array de caracteres con el nombre especifico de
cada reporte
dato=xlsread(g)%almacena en un solo vector los datos necesarios de las 8 unidades
fuera=char(cel(2,na));%fecha encontrada
set(handles,fech,'String',fuera)
ra) box=fuera
%Unidad 1
PR1=dato(1,2);%columna a seleccionar Potencia Reactiva UI
PA1=dato(1,1);%columna a seleccionar Potencia Activa UI
Vt1=dato(1,3);%columna a seleccionar de Voltaje en terminales
UI
if PR1==0&&PA1==0
    pause(1)
    delete
    (u) hold
    on grid
    on
    axes(handles,axes1)
    axis([-250 250 0
250])
    set(handles,pu1,'String',PA1)
    set(handles,qu1,'String',PR1)
    u=plot(PR1,PA1,'b*-');%Gráfica para la
    UI
else
    Zbase=Vt1^2/S;
    Xd=0.973*Zbase;
    Xq=0.608*Zbase;
    Xt=(0.1401*(205/69))*Zba
    se;
    ulg=1;

    [ Q,Pmmax,Pmmin,Pnom,P_Emin,Q_Emin,P_Emax,Q_Emax,Q0,Pi,Qc,Pc,in] =
funCurvas( Vt1,Xd,Xq,Xt,S,fp,Pmax,Pmin,PR1,PA1);
    delete (u)
    delete
    (up)
    set(handles,pu1,'String',P
A1)
    set(handles,qu1,'String',P
R1)
    hold
    on
    grid
    on
    axes(handles,axes1)
    axis([-250 250 0
250])
    plot(Q,Pnom,Q,Pmmax,Q,Pmmin,Q_Emax,P_Emax,Q_Emin,P_Emin,Q0,Pi,Qc,P
c) u=plot(PR1(in),PA1(in),'r*-') %Gráfica para la UI
    up=plot(PR1(~in),PA1(~in),'g*-') %Gráfica para la UI

    pause(2)
    %-----%

```

```

    if in==0
        [ count ] = SalidaParametro( PR1,PA1,fuera,u1g,count);
    else
    end
    %-----%
end
%%Para unidad U2
PR2=dato(1,9);%columna a seleccionar Potencia Reactiva U1
PA2=dato(1,8);%columna a seleccionar Potencia Activa U1
Vt2=dato(1,10);%columna a seleccionar de Voltaje en terminales
U1 if PR2==0&&PA2==0
    pause(1)
    delete
    (u2)
    hold on
    grid on

    axes(handles,axes2)
    axis([-250 250 0 250])
    set(handles,pu2, 'String',PA2)
    set(handles,qu2, 'String',PR2)
    u2=plot(PR2,PA2, 'b*-');%Gráfica para la
    U3
else
    Zbase2=Vt2^2/S;
    Xd2=0,973*Zbase2;
    Xq2=0,608*Zbase2;
    Xt2=(0,1401*(205/69))*Zbas
    e2;
    u2g=2;
    [ Q,Pmmax2,Pmmin2,Pnom,P_Emin2,Q_Emin2,P_Emax2,Q_Emax2,Q02,Pi2,Qc,Pc,in]
    = funCurvas( Vt2,Xd2,Xq2,Xt2,S,fp,Pmax,Pmin,PR2,PA2);
    delete
    (u2)
    delete
    (u2p)
    set(handles,pu2, 'String',P
    A2)
    set(handles,qu2, 'String',P
    R2) hold on
    grid on
    axes(handles,axes2)
    axis([-250 250 0
    250])
    plot(Q,Pnom,Q,Pmmax2,Q,Pmmin2,Q_Emax2,P_Emax2,Q_Emin2,P_Emin2,Q02,Pi2,Qc,P
    c) u2=plot(PR2(in),PA2(in), 'r*-')%Gráfica para la U2
    u2p=plot(PR2(~in),PA2(~in), 'g*-')%Gráfica para la U2
    pause(2)
    %-----%
    if in==0
        [ count ] = SalidaParametro( PR2,PA2,fuera,u2g,count);%En el caso que salga de
        sus parámetros
    else
    end
    %-----%
end
end

```

```

%%Para unidad U3
PR3=dato(1,16);%columna a seleccionar Potencia Reactiva U1
PA3=dato(1,15);%columna a seleccionar Potencia Activa U1
Vt3=dato(1,17);%columna a seleccionar de Voltaje en terminales
U1
if PR3==0&&PA3==0
    pause(1)
    delete
    (u3)
    hold on
    grid on
    axes(handles,axes3)
    axis([-250 250 0
250])
    set(handles,pu3, 'String',PA3)
    set(handles,qu3, 'String',PR3)
    u3=plot(PR3,PA3, 'b*-');%Gráfica para la
U3
else
    [ Q,Pmmax3,Pmmin3,Pnom,P_Emin3,Q_Emin3,P_Emax3,Q_Emax3,Q03,Pi3,Qc,Pc,in]
= funCurvas( Vt3,Xd3,Xq3,Xt3,S,fp,Pmax,Pmin,PR3,PA3);
    delete
    (u3)
    delete
    (u3p)
    set(handles,pu3, 'String',P
A3)
    set(handles,qu3, 'String',P
R3) hold on
    grid on
    axes(handles,axes3)

    axis([-250 250 0 250])
    plot(Q,Pnom,Q,Pmmax3,Q,Pmmin3,Q_Emax3,P_Emax3,Q_Emin3,P_Emin3,Q03,Pi3,Qc,P
c) u3=plot(PR3(in),PA3(in), 'r*-')%Gráfica para la U3
    u3p=plot(PR3(~in),PA3(~in), 'g*-')%Gráfica para la U3
    pause(2)
    %-----%
    if in==0
        [ count ] = SalidaParametro(
PR3,PA3,fuera,u3g,count) else
    end
    %-----%
end
%%Para unidad U4
PR4=dato(1,23);%columna a seleccionar Potencia Reactiva U4
PA4=dato(1,22);%columna a seleccionar Potencia Activa U4
Vt4=dato(1,24);%columna a seleccionar de Voltaje en terminales
U4 if PR4==0&&PA4==0
    pause(1)
    delete
    (u4)
    hold on
    grid on
    axes(handles,axes4)
    axis([-250 250 0
250])
    set(handles,pu4, 'String',PA4)
    set(handles,qu4, 'String',PR4)
    u4=plot(PR4,PA4, 'b*-');%Gráfica para la
U4
else

```

```

Zbase4=Vt4^2/S;
Xd4=0,973*Zbase4;
Xq4=0,608*Zbase4;
Xt4=(0,1401*(205/69))*Zbas
e4;
u4g=4;

[ Q,Pmmax4,Pmmin4,Pnom,P_Emin4,Q_Emin4,P_Emax4,Q_Emax4,Q04,Pi4,Qc,Pc,in]
= funCurvas( Vt4,Xd4,Xq4,Xt4,S,fp,Pmax,Pmin,PR4,PA4);
delete
(u4)
delete
(u4p)
set(handles,pu4,'String',P
A4)
set(handles,qu4,'String',P
R4) hold on
grid on
axes(handles,axes4)
axis([-250 250 0
250])
plot(Q,Pnom,Q,Pmmax4,Q,Pmmin4,Q_Emax4,P_Emax4,Q_Emin4,P_Emin4,Q04,Pi4,Qc,P
c) u4=plot(PR4(in),PA4(in),'r*-')%Gráfica para la U4
u4p=plot(PR4(~in),PA4(~in),'g*-')%Gráfica para la U4
pause(2)
%-----%
if in==0
[ count ] = SalidaParametro( PR4,PA4,fuera,u4g,count);%En el caso que salga de
sus parámetros
else
end
%-----%
end
%%Para unidad U5
PR5=dato(1,30);%col
unma a seleccionar
Potencia Reactiva
U1
PA5=dato(1,29);%col
unma a seleccionar
Potencia Activa U1

Vt5=dato(1,31);%columna a seleccionar de Voltaje en terminales U1
if PR5==0&&PA5==0
pause(1)
delete
(u5)
hold on
grid on
axes(handles,axes5)
axis([-250 250 0
250])
set(handles,pu5,'String',PA5)
set(handles,qu5,'String',PR5)
u5=plot(PR5,PA5,'b*-')%Gráfica para la
U5
else
Zbase5=Vt5^2/S;
Xd5=0,973*Zbase5;
Xq5=0,608*Zbase5;
Xt5=(0,1401*(205/69))*Zbas
e5;

```

```

u5g=5;
[ Q,Pmmax5,Pmmin5,Pnom,P_Emin5,Q_Emin5,P_Emax5,Q_Emax5,Q05,Pi5,Qc,Pc,in]
= funCurvas( Vt5,Xd5,Xq5,Xt5,S,fp,Pmax,Pmin,PR5,PA5);

delete
(u5)
delete
(u5p)
set(handles,pu5,'String',P
A5)
set(handles,qu5,'String',P
R5) hold on
grid on
axes(handles,axes5)
axis([-250 250 0
250])
plot(Q,Pnom,Q,Pmmax5,Q,Pmmin5,Q_Emax5,P_Emax5,Q_Emin5,P_Emin5,Q05,Pi5,Qc,P
c) u5=plot(PR5(in),PA5(in),'r*-')%Gráfica para la U5
u5p=plot(PR5(~in),PA5(~in),'g*-')%Gráfica para la U5
if in==0
[ count ] = SalidaParametro( PR5,PA5,fuera,u5g,count);%En el caso que salga de
sus parámetros
else
end
%-----%
end
%%Para unidad U6
PR6=dato(1,37);%columna a seleccionar Potencia Reactiva U6
PA6=dato(1,36);%columna a seleccionar Potencia Activa U6
Vt6=dato(1,38);% columna a seleccionar de Voltaje en terminales
U6 if PR6==0&&PA6==0
%-----%
pause(1)
delete
(u6)
hold on
grid on
axes(handles,axes3)
axis([-250 250 0
250])
set(handles,pu6,'String',PA6)
set(handles,qu6,'String',PR6)
u6=plot(PR6,PA6,'b*-');%Gráfica para la
U6
else
Zbase6=Vt6^2/S;
Xd6=0,973*Zbase6;
Xq6=0,608*Zbase6;
Xt6=(0,1401*(205/69))*Zbas
e6;
u6g=6;
[ Q,Pmmax6,Pmmin6,Pnom,P_Emin6,Q_Emin6,P_Emax6,Q_Emax6,Q06,Pi6,Qc,Pc,in]
= funCurvas( Vt6,Xd6,Xq6,Xt6,S,fp,Pmax,Pmin,PR6,PA6);

```

```

delete
(u6)
delete
(u6p)
set(handles,pu6,'String',P
A6)
set(handles,qu6,'String',P
R6) hold on
grid on
axes(handles,axes6)
axis([-250 250 0
250])
plot(Q,Pnom,Q,Pmax6,Q,Pmin6,Q_Emax6,P_Emax6,Q_Emin6,P_Emin6,Q06,Pi6,Qc,P
c) u6=plot(PR6(in),PA6(in),'r*-')%Gráfica para la U6
u6p=plot(PR6(~in),PA6(~in),'g*-')%Gráfica para la U6
%-----%
if in==0
[ count ] = SalidaParametro( PR6,PA6,fuera,u6g,count);%En el caso que salga de
sus parámetros
else
end
%-----%
end
%%Para unidad U7
PR7=dato(1,44);%columna a seleccionar Potencia Reactiva U7
PA7=dato(1,43);%columna a seleccionar Potencia Activa U7
Vt7=dato(1,45);% columna a seleccionar de Voltaje en terminales
U7 if PR7==0&&PA7==0
pause(1)
delete
(u7)
hold on
grid on
axes(handles,axes7)
axis([-250 250 0
250])
set(handles,pu7,'String',PA7)
set(handles,qu7,'String',PR7)
u7=plot(PR7,PA7,'b*-');%Gráfica para la
U7
else
Zbase7=Vt7^2/S;
Xd7=0,973*Zbase7;
Xq7=0,608*Zbase7;
Xt7=(0,1401*(205/69))*Zbas
e7;
u7g=7;
[ Q,Pmax7,Pmin7,Pnom,P_Emin7,Q_Emin7,P_Emax7,Q_Emax7,Q07,Pi7,Qc,Pc,in]
= funCurvas( Vt7,Xd7,Xq7,Xt7,S,fp,Pmax,Pmin,PR7,PA7);

```

```

delete
(u7)
delete
(u7p)
set(handles,pu7,'String',P
A7)
set(handles,qu7,'String',P
R7) hold on
grid on
axes(handles,axes7)
axis([-250 250 0
250])
plot(Q,Pnom,Q,Pmax7,Q,Pmin7,Q_Emax7,P_Emax7,Q_Emin7,P_Emin7,Q07,Pi7,Qc,P
c) u7=plot(PR7(in),PA7(in),'r*-')%Gráfica para la U7
u7p=plot(PR7(~in),PA7(~in),'g*-')%Gráfica para la U7
%-----%
if in==0
[ count ] = SalidaParametro( PR7,PA7,fuera,u7g,count);%En el caso que salga de sus
parámetros
else
end
%-----%
end
%%Para unidad U8
PR8=dato(1,51);%columna a seleccionar Potencia Reactiva U8
PA8=dato(1,50);%columna a seleccionar Potencia Activa U8
Vt8=dato(1,52);% columna a seleccionar de Voltaje en terminales
U8 if PR8==0&&PA8==0
pause(1)
delete
(u8)
hold on
grid on
axes(handles,axes8)
axis([-250 250 0
250])
set(handles,pu8,'String',PA8)
set(handles,qu8,'String',PR8)
u8=plot(PR8,PA8,'b*-');%Gráfica para la
U8
else
Zbase8=Vt8^2/S;
Xd8=0,973*Zbase8;
Xq8=0,608*Zbase8;
Xt8=(0,1401*(205/69))*Zbas
e8;
u8g=8;
[ Q,Pmax8,Pmin8,Pnom,P_Emin8,Q_Emin8,P_Emax8,Q_Emax8,Q08,Pi8,Qc,Pc,in]
= funCurvas( Vt8,Xd8,Xq8,Xt8,S,fp,Pmax,Pmin,PR8,PA8);
delete
(u8)
delete
(u8p)
set(handles,pu8,'String',PA8)
set(handles,qu8,'String',PR8)

```



```

hold on
grid on
axes(handles,axes8)
axis([-250 250 0
250])
plot(Q,Pnom,Q,Pmax8,Q,Pmin8,Q_Emax8,P_Emax8,Q_Emin8,P_Emin8,Q08,Pi8,Qc,P
c) u8=plot(PR8(in),PA8(in),'r*-')%Gráfica para la U8
u8p=plot(PR8(~in),PA8(~in),'r*-')%Gráfica para la U8
%-----%
if in==0
[ count ] = SalidaParametro( PR8,PA8,fuera,u8g,count);%En el caso que salga de
sus parámetros
else
end
%-----%
end

comp=strcmp(marca,box) %Comparaciones para lectura de nuevo
documento if comp==0
contador=contador+1 %Ayuda a que ya no se repita el documento leído
anteriormente else
pause(3) %Pause para la siguiente
lectura end
if contador==nf %Para que regrese al ultimo documento que
leyo a=contador %Alamecena el número del último documento
end

end
marca=box

if condicion==1||condicion2==1%0
s=0 %Marca para activar la siguiente
ventana pause
end
if
exit=
=1
brea
k
end
end
end

end
end
end

```

Zona Segura de Operación para el Panel de Maniobra

```

function togglebutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
global condicion S Pmax Pmin fp s t contador m1 m2
set(handles,togglebutton6,'value'
,0)
set(handles,togglebutton5,'value'
,0)

%----Cambio de pestaña almacena contador-----%
x=contador; %Cuando cambia de pestaña que almacene el contador con ese
número condicion=get(handles,togglebutton4,'value');
m1=x %Almaceno el ultimo valor del contador
m2=x %Almaceno el ultimo valor en que se quedo para continuar con el lazo
%-----%
if s==0||t==0
set(handles,uipane15,'visible','off')
set(handles,uipane16,'visible','of
f')
end

```

```

set(handles,uipane110,'visible','on')
set(handles,uitable1,'visible','off') set(handles,fech,'string','')
hold
on
grid
on
axes(handles,axes13)

axis([-250 250 0
250]) Vtp=13,8;
Zbase=(Vtp^2)/S;
Xdo = 0,973*Zbase;% direct axis reactance p,u Xqo = 0,608*Zbase;% quadrature axis
reactance p,u Xto=(0,1401*(S/69))*Zbase;

```

Función del voltaje internos E

```

syms Efo do %% Variables
[Enom,Emin,Ao] = E_inter(Vtp,Xdo,Xqo,do,Efo,S,fp);
function [Enom,Emin,A] = E_inter(Vt,Xd,Xq,d,Ef,S,fp)

syms Ef d %% Variables

fP = Ef*Vt*sin(d)/Xd+0.5*Vt^2*(1/Xq-1/Xd)*sin(2*d)==Po; %Potencia activa PS
fQ = Ef*Vt*cos(d)/Xd+0.5*Vt^2*(1/Xq-1/Xd)*cos(2*d)-0.5*Vt^2*(1/Xq+1/Xd)==Qo;
%Potencia reactiva PS

[Efo,do]= solve(fP,fQ,Ef,d);%obtiene Vtvalores iniciales de EF y delta

A = [single(do),single(Efo)];

Enom = A(1,2);

Emin=0.1*Enom;

end

```

_ Función Potencia Mecánica Máxima Y Mínima

Se generaran matrices con valores de potencia activa y reactiva

```

Qo=-S:0,1:S; %Vector de valores en pasos de 0,1
Pmmaxo=Pmax*ones(1,length(Qo)); %Pmax con la misma longitud que el vector
Qpmino=Pmin*ones(1,length(Qo));

```

Límite por Corriente de Armadura

```
Pnomo=sqrt(S^2-Qo.^2);
```

Límite de Corriente de Campo

```

function [P_Emin,Q_Emin,P_Emax,Q_Emax] = limit_camp_max_min(Xd,Xq,Vt,Emin,Enom,A)
syms dm dmax
dn=single(A(1,1));
dm=double(solve(Emin*Vt*cos(dm)/Xd+Vt^2*(1/Xq-1/Xd)*cos(2*dm)==0, dm));
for p=1:length(dm)
if dm(p,1)<pi/2 & dm(p,1)>0
angulo=dm(p,1);
end
end
i=linspace(0,angulo);

P_Emin=Emin*Vt*sin(i)/Xd+0.5*Vt^2*((1/Xq)-(1/Xd))*sin(2*i);
Q_Emin=Emin*Vt*cos(i)/Xd+0.5*Vt^2*((1/Xq)-(1/Xd))*cos(2*i)-0.5*Vt^2*((1/Xq)+(1/Xd));

%%LÍMITE DE CORRIENTE DE CAMPO MÁXIMO

```

```

dmax=double(solve(Enom*Vt*cos(dmax)/Xd+Vt^2*(1/Xq-1/Xd)*cos(2*dmax)==0,dmax));
for p=1:length(dmax)
if dmax(p,1)<pi/2 & dmax(p,1)>0
amax=dmax(p,1);
end
end
Dmax=amax;
j=linspace(0,Dmax);

P_Emax=Enom*Vt*sin(j)/Xd+0.5*Vt^2*(1/Xq-1/Xd)*sin(2*j);
Q_Emax=Enom*Vt*cos(j)/Xd+0.5*Vt^2*(1/Xq-1/Xd)*cos(2*j)-0.5*Vt^2*(1/Xq+1/Xd);
end

```

Margen de Estabilidad en Estado Estable

```

[ Q0o,Pio ] = MargenEEE( Pmax,Vtp,Xdo,Xqo,Xto);
Pi=Pmax-0.1*Pmax;
for i=2:10
[Pi(i)]=Pi(i-1)-0.1*Pi(i-1);
end
Pj=[Pmax Pi];
syms dmax
dM=sym('dM','real');
for j=1:10
fmee(j)=Emax*Vt*sin(dmax)/(Xd+Xt)+0.5*Vt^2*((1/(Xq+Xt))-
(1/(Xd+Xt)))*sin(2*dmax)==Pj(1,j);
end
Dfmee=diff(Emax*Vt*sin(dmax)/(Xd+Xt)+0.5*Vt^2*((1/(Xq+Xt))-
(1/(Xd+Xt)))*sin(2*dmax)==0,dmax);
for i=1:10
w=fmee(1,i);
[fun(i),ang(i)]=vpasolve(Dfmee,w,[Emax,dmax]);%[fun(i),ang(i)]=solve(Dfmee,w,Emax,dma
x);
end
Emax=[double(fun);double(ang)];%Tomo el valor de Emax
for t=1:10
[dME(t)]=vpasolve(Pi(1,t)==Emax(1,t)*Vt*sin(dM)/(Xd+Xt)+0.5*Vt^2*(1/(Xq+Xt))-
(1/(Xd+Xt))*sin(2*dM),dM);%Calculo el angulo de MEEE
[Q0(t)]=Emax(1,t)*Vt*cos(dME(1,t))/(Xd+Xt)+0.5*Vt^2*((1/(Xq+Xt))-
(1/(Xd+Xt)))*cos(2*dME(1,t))-0.5*Vt^2*(1/(Xq+Xt)+(1/(Xd+Xt)));
end
end

```

Límite de Calentamiento en los terminales del núcleo del estator

```

Pc=linspace(0,1,5)*S;
Qc=[-0,6 -0,58 -0,52 -0,44 0]*S; %Parámetros seteados del regulador de velocidad

```

GRAFICAR

```
hold
on
grid
on
axes(handles,axes13
) axis([-250 250 0
250])
plot(Qo,Pnomo,Qo,Pmmaxo,Qo,Pmmino,Q_Emaxo,P_Emaxo,Q_Emino,P_Emino,Q0o,Pio,Qc,P
c) str = '$$ subexcitado $$';
text(-180,-
30,str,'Interpreter','latex') str =
'$ $ sobreexcitado $ $';
text(100,-30,str,'Interpreter','latex')
legend('Límite por corriente de armadura','Límite de potencia máxima','Límite de
potencia mínima','Límite por corriente de campo máxima','Límite por corriente de campo
mínima','Límite de margen de estabilidad de estado estable','Límite por calentamiento
en los terminales','Location','northeastoutside')
xlabel('Potencia Reactiva
Q') ylabel('Potencia Activa
P')
end
% --- Executes on button
press in togglebutton5,
```

Acceso al PANEL INDIVIDUAL

```
function togglebutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)

global condicion2 contador m1 m2 s
if s==0
set(handles,uipane15,'visible','off') %Visibilidad pantalla GRUPAL
set(handles,uipane16,'visible','on') %Invisibilidad pantalla INDIVIDUAL
set(handles,uipane110,'visible','off') %Invisibilidad pantalla MANIOBRA
set(handles,uitable1,'visible','off') %Invisibilidad información de
fallas set(handles,togglebutton6,'value',0) %Desactivar botón ventana
GRUPAL set(handles,fech,'string','') %Vaciar fecha de la nueva
pestaña
%----Cambio de pestaña almacena contador-----%
k=contador; %Cuando cambia de pestaña que almacene el contador con ese
número condicion2=get(handles,togglebutton5,'value');
m1=k %Almaceno el ultimo valor del contador
m2=k %Almaceno el ultimo valor en que se quedo para continuar con el lazo
%-----%
end
```

Evento salida de la zona segura de operación de unidades

```
function togglebutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)

[~,~, table] = xlsread ('EventoSalida,xlsx')
table(cellfun(@(x) ~isempty(x) && isnumeric(x) && isnan(x),table)) =
{' '}; inicio=get(handles,togglebutton7,'value')
if inicio==1
set(handles,uitable1,'visible','on')
Titulos={'DATOS' 'SALIDA' 'DE' 'PARÁMETROS'}; % Variable
Titulos set(handles,uitable1,'columnName',Titulos)
set(handles,uitable1,'data',table)
else if inicio==0
set(handles,uitable1,'visible','off')
end
end
```

ORDEN DE EMPASTADO



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
"CAMPUS POLITÉCNICO JOSÉ RUBÉN ORELLANA RICAURTE"

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ORDEN DE EMPASTADO

De acuerdo con lo estipulado en el Art. 27 del Instructivo para la Implementación de la Unidad de Titulación en las Carreras y Programas Vigentes de la Escuela Politécnica Nacional, aprobado por Consejo Politécnico en sesión extraordinaria del 29 de abril de 2015 y por delegación del Decano, una vez verificado el cumplimiento de formato de presentación establecido, se autoriza la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación presentado por:

ANDREA PAOLA CHIMARRO ALOMOTO

Fecha de autorización: 8 de enero de 2019


M.Sc. YADIRA BRAVO
Subdecana

Paola P