



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN REACTIVA PARA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DIÉSEL EN LA GENERACIÓN TÉRMICA DE LA ISLA SAN CRISTÓBAL GALÁPAGOS

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA

ING. MILTON ANÍBAL SANTANDER ORTEGA  
milton.santander@epn.edu.ec

DIRECTOR: Dr. CARLOS GALLARDO, PhD.  
carlos.gallardo@epn.edu.ec


CO-DIRECTOR: MSc. PATRICIO ZAMBRANO  
patricio.zambrano@epn.edu.ec

Quito, Enero 2019

## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Milton Anibal Santander Ortega bajo nuestra supervisión.

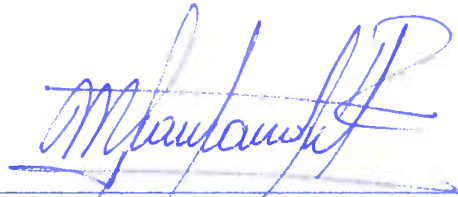
  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Carlos Gallardo, PhD.**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

  
\_\_\_\_\_  
**MSc. Patricio Zambrano**  
**CO-DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, Milton Anibal Santander Ortega, 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 mi derecho de propiedad intelectual correspondiente 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.



**Ing. Milton Anibal Santander Ortega**

## DEDICATORIA

A mi madre y a mis hijas.

## **AGRADECIMIENTO**

Al Ing. Eduardo Aguilera, Jefe de Mantenimiento zona Quito CELEC EP Termopichincha.

A mis compañeros del Departamento de Ingeniería de la Producción de CELEC EP Termopichincha.

Al Director de Tesis Dr. Carlos Gallardo, PhD.

Al Codirector de Tesis MSc. Patricio Zambrano

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos .....	4
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
1.1. Componentes del sistema eléctrico de generación.....	5
1.1.1. Parque eólico.....	5
1.1.2. Parque térmico .....	9
1.2. Tecnologías disponibles para la construcción.....	10
1.2.1. Métodos de control de voltaje .....	11
1.2.1.1. Reactores Shunt.....	12
1.2.1.2. Capacitores Shunt .....	12
1.2.1.3. Capacitores Serie .....	12
1.2.1.4. Equipos Estáticos de Compensación .....	13
<i>Static Synchronous Compensator (STATCOM)</i> .....	14
1.2.1.5. Motores Síncronos.....	15
<i>Capacitor o condensador síncrono</i> .....	18
<i>Arranque de los motores síncronos</i> .....	19
<i>Curva de Capacidad</i> .....	21
<b>2. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA</b> .	<b>27</b>
2.1. Selección de la mejor alternativa tecnológica .....	27
2.2. Detalle de la máquina síncrona.....	29
2.3. Construcción del sistema de arranque del compensador síncrono .....	31
2.3.1. Potencia requerida para el sistema de arranque .....	31
2.3.2. Cálculo de los límites operativos del compensador .....	40
2.3.2.1. Límite de corriente de armadura .....	42
2.3.2.2. Límite de corriente de campo.....	43
2.3.2.3. Límite de potencia mecánica.....	43
2.3.2.4. Límite de estabilidad en régimen permanente teórico.....	44
2.3.2.5. Límite teórico de mínima corriente de excitación .....	44
2.3.2.6. Límite práctico de mínima corriente de excitación .....	44
2.3.2.7. Límite de estabilidad en régimen permanente práctico.....	45
2.3.3. Diseño eléctrico del sistema de arranque del compensador síncrono.....	48
2.3.4. Construcción del sistema mecánico de arranque del compensador síncrono .....	53
2.3.4.1. Unión: rotor – embrague – motor de arranque.....	56
2.3.4.2. Apoyo posterior del compensador síncrono .....	58
2.4. Diseño del sistema de control para repartición de carga activa y reactiva, integración de unidades térmicas al SCADA híbrido.....	71

<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS ENERGÉTICOS Y RESULTADOS OBTENIDOS.....</b>	<b>74</b>
3.1.	Análisis.....	74
3.2.	Resultados .....	81
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>85</b>
	<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>87</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>89</b>
	Anexo I. Plano del filtro de red.....	89
	Anexo II. Cotización sistema de compensación estático .....	90
	Anexo III. Planos mecánicos del compensador sincrónico.....	91
	Anexo IV. Código en Matlab de curva de capacidad. ....	96
	Anexo V. Resultado obtenido de la simulación de la curva de capacidad.....	102
	Anexo VI. Registro fotográfico de la construcción del compensador sincrónico.....	103
	Anexo VII. Planos eléctricos del compensador sincrónico.....	109
	Anexo VIII. Flujo de información para la operación del compensador sincrónico.....	117
	Anexo IX. Procedimiento de arranque y parada para el compensador sincrónico.....	120

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 0.1: Esquema del diagrama unifilar sistema eléctrico San Cristóbal .....	1
Figura 1.1: Convertidor estático, aerogenerador AE-59. ....	5
Figura 1.2: Curva de potencia, aerogenerador AE-59. ....	6
Figura 1.4: Forma de onda de voltaje. Lineal (Discreta) y no lineal (sinusoidal).....	7
Figura 1.5: Arquitectura del sistema de control híbrido original .....	10
Figura 1.6: Forma básica del STATCOM. ....	14
Figura 1.7: Diagrama simplificado de dos fuentes de tensión conectados por una impedancia $X_L$ 15	
Figura 1.8: Motor síncrono con dos polos .....	16
Figura 1.9: Curvas en V de un motor síncrono.....	18
Figura 1.10: a) Diagrama fasorial de un motor síncrono subexcitado. b) Diagrama fasorial de un motor síncrono sobreexcitado. ....	18
Figura 1.11: a) Curva en V de un capacitor síncrono. b) Diagrama fasorial de la máquina correspondiente.....	19
Figura 1.12: Problemas en el arranque de un motor síncrono: el par alterna rápidamente en magnitud y dirección, por lo que el par de arranque neto es cero.....	20
Figura 1.13: Diagrama fasorial de tensión en dos ejes.....	22
Figura 1.14: Familia de Limacones de Pascal.....	24
Figura 1.15: Construcción geométrica de la curva de capacidad.....	24
Figura 1.16: Curva de capacidad de un generador de polos salientes conectado a un sistema de tensión constante. $X_d=1.1$ por unidad, $X_q=0.7$ por unidad, factor de potencia 0.9 atrasado. ....	26
Figura 2.1: Grupo térmico Perkins PS1386E desarmado, a) Generador sincrónico, b) Motor de combustión interna (eje del cigüeñal), c) Eje del rotor .....	28
Figura 2.2: Arquitectura del sistema de control propuesto.....	29
Figura 2.3: Componentes de la máquina sincrónica a utilizar.....	30
Figura 2.4: Diagrama vectorial máquina sincrónica.....	34
Figura 2.5: Potencia consumida por el compensador sincrónico durante el período de arranque y después de la sincronización.....	39
Figura 2.6: Límite de estabilidad en régimen permanente práctico.....	45
Figura 2.7: Curva de capacidad del generador STAMFORD modelo HCI634K modelada en Matlab. a. Límite de corriente de armadura, b. Límite de corriente de campo, c. Límite teórico de estabilidad en régimen permanente, d. Límite práctico de estabilidad en régimen permanente, e. Límite teórico de mínima corriente de excitación, g. Límite práctico de mínima corriente de excitación. ....	47
Figura 2.8: Esquema general de conexiones eléctricas. ....	50
Figura 2.9: Diagrama unifilar del sistema eléctrico de San Cristóbal, con el compensador sincrónico incorporado .....	51



Figura 2.10: Potencia reactiva del generador 3, oscilación de 320 kVAr aproximadamente, estabilización en 1 segundos .....	52
Figura 2.11: Potencia activa del generador 3, oscilación entre -350 kW y 350 kW aproximadamente, estabilización en menos de 3 segundos. ....	52
Figura 2.12: Voltaje en la barra principal, oscilación de 104% a 97%, estabilización en menos de 2 segundos.....	53
Figura 2.13: Frecuencia en la barra principal, oscilación imperceptible. ....	53
Figura 2.14: Despiece del embrague magnético PC-1225. 1: Armadura, 2: Accesorios de auto separación, 3: Accesorios de montaje, 4: Bobina, 5: Conector, 6: Anillos rozantes, 7: Carbones.....	54
Figura 2.15: Conjunto rotórico de la máquina sincrónica. a) Vista superior, descripción de las artes. b) Vista trasera, dimensiones de los ejes de acople. ....	56
Figura 2.16: Vista isométrica del conjunto rotórico de la máquina sincrónica .....	56
Figura 2.17: Eje principal del compensador sincrónico .....	57
Figura 2.18: Embrague magnético.....	58
Figura 2.19: Despiece del sistema de apoyo posterior del compensador sincrónico.....	59
Figura 2.20: Vista frontal, corte del sistema de apoyo del rodamiento posterior. ....	60
Figura 2.21: Vista trasera, corte del sistema de apoyo del rodamiento posterior. ....	60
Figura 2.22: Corte isométrico del sistema de integración del rotor de la máquina sincrónica y el motor de arranque .....	61
Figura 2.23: Vista isométrica del ensamble del rotor del compensador sincrónico, embrague magnético, eje principal, rodamientos y motor de arranque. ....	61
Figura 2.24: Dimensiones del eje principal del sistema de arranque .....	63
Figura 2.25: Eje redondo con filete en el hombro en torsión. $\tau_0 = Tc/J$ , donde $c = d/2$ y $J = \pi d^4/32$ . ....	65
Figura 2.26: Corte del Compensador Sincrónico.....	69
Figura 2.27: SCADA, Diagrama unifilar, compensador, generadores térmicos y generadores eólicos integrados.....	72
Figura 2.28: SCADA, Pantalla de operación principal, repartición de carga activa y reactiva.....	72
Figura 2.29: SCADA, Arquitectura de control implementada. ....	73
Figura 3.1: Comparación de potencia real vs potencia esperada en el parque eólico.....	74
Figura 3.2: Comparación del aporte de energía eólica real vs energía eólica esperada. (Año 2016) .....	75
Figura 3.3: Energía desperdiciada en el año 2016.....	76
Figura 3.4: Porcentaje de penetración de energía renovable y no renovable durante julio a noviembre del 2016 .....	76
Figura 3.5: Temperatura de las bobinas del rotor del compensador a 600 kVAr.....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Características principales del convertidor de frecuencia del aerogenerador AE-59 .....	7
Tabla 1.3: Características de las unidades térmicas central San Cristóbal.....	9
Tabla 2.1: Comparación de tecnologías para compensación de energía reactiva .....	27
Tabla 2.2: Principales características de la máquina sincrónica a ser utilizada.....	30
Tabla 2.3: Rangos aproximados del rendimiento mecánico y factores de compresibilidad .....	33
Tabla 2.4: Resumen de cálculos de potencia para arranque de la máquina sincrónica .....	37
Tabla 2.5: Potencia consumida por el compensador sincrónico durante el período de arranque y después de la sincronización. ....	39
Tabla 2.6: Resultados del modelamiento de la curva de capacidad del generador STAMFORD modelo HCI634K .....	47
Tabla 2.7: Datos previos al modelamiento para verificación estabilidad del sistema eléctrico. (Para este modelamiento el compensador se encuentra en su máxima carga reactiva). ....	51
Tabla 2.8: Materiales de las piezas a fabricar para el sistema de arranque del compensador sincrónico.....	62
Tabla 3.1: Comparación de energía teórica respecto a energía real (2016). ....	75
Tabla 3.2: Combustible no consumido y CO2 no emitido respecto a la generación real. ....	77
Tabla 3.3: Combustible no consumido y CO2 no emitido respecto a la generación teórica.....	77
Tabla 3.4: Facturación de ELECGALÁPAGOS. ....	78
Tabla 3.5: Histórico de generación Central San Cristóbal. ....	79
Tabla 3.6: Consumo de combustible .....	80
Tabla 3.7: Energía año 2017, meses de mayor viento en San Cristóbal.....	82
Tabla 3.8: Comparación de la energía generada en el 2016 y 2017.....	83
Tabla 3.9: Ahorro por reducción de uso de combustible entre el 2017 respecto al 2016.....	83

## RESUMEN

El sistema de generación eléctrica en la isla San Cristóbal en la provincia de Galápagos es un sistema híbrido compuesto por generadores térmicos y eólicos. El objetivo de este trabajo de titulación fue reducir el consumo de diésel de los generadores térmicos a partir de dos acciones bien definidas, la primera involucra la automatización de los sistemas de control y SCADA actuales para mejorar la operación conjunta entre motores térmicos y aerogeneradores, basándose principalmente en un análisis energético que optimiza el control de potencia activa y reactiva; La segunda acción fue la construcción de un sistema de compensación de energía reactiva que permita compensar los desbalances de energía reactiva provocados por las variaciones bruscas del viento sobre los aerogeneradores, así como compensar a los generadores térmicos para que su potencia reactiva sea cero y con ello consiguiendo una disminución del consumo de diésel. En una primera etapa se realizó una evaluación de la situación actual del sistema de generación en la isla, se presentaron las diferentes opciones tecnológicas que se pueden utilizar para mejorar este problema y se selecciona la mejor opción para que sea aplicada en el sistema de generación. Una segunda etapa involucra todos los cálculos necesarios para el diseño del sistema de compensación escogido y se realizó la construcción del sistema adaptándolo al sistema de generación actual. Finalmente se realizaron pruebas operativas sobre el sistema de generación de la isla, se obtuvieron mediciones en campo y se analizó los resultados.

**Palabras clave:** Combustible, compensador, energía, eólico, híbrido, reactivos.

## ABSTRACT

The power generation system on San Cristóbal Island in the province of Galápagos is a hybrid system composed of thermal and wind generators. The objective of this project was to reduce the diesel consumption of the thermal generators from two actions, the first involves the automation of the current control and SCADA systems to improve the joint operation between thermal engines and wind turbines, based on mainly in an energy analysis that optimizes the control of active and reactive power; The second action was the construction of a reactive energy compensation system that compensates for the imbalances of reactive energy caused by sudden wind variations on wind turbines, as well as compensate thermal generators so that their reactive power is zero and thus achieving a decrease in diesel consumption. In the first stage an evaluation of the current situation of the generation system on the island was made, the different technological options that can be used to improve this problem were presented and the best option is selected so that it can be applied in the generation system. A second stage involves all the necessary calculations for the design of the chosen compensation system and the construction of the system was carried out, adapting it to the current generation system. Finally, operational tests were carried out on the generation system of the island, measurements were obtained in the field and the results were analyzed.

**Keywords:** Fuel, compensator, energy, wind, hybrid, reactive.

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN REACTIVA PARA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE DIÉSEL EN LA GENERACIÓN TÉRMICA DE LA ISLA SAN CRISTÓBAL GALÁPAGOS

## Introducción

El sistema de generación eléctrica de la isla San Cristóbal en la provincia de Galápagos tiene una arquitectura híbrida y está compuesto por dos centrales de generación, una eólica y una térmica. El parque eólico tiene una capacidad total de generación de 2,4 MW, mientras que el parque térmico, que en el tiempo ha crecido dinámicamente en su capacidad, actualmente registra una potencia efectiva instalada de 7.35 MW. En la Figura 0.1 se observa el esquema unifilar del sistema eléctrico de la isla San Cristóbal.

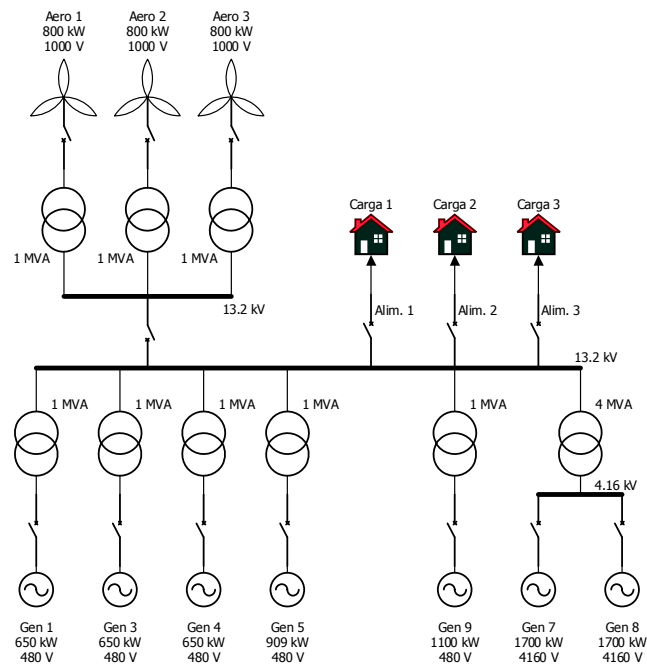


Figura 0.1: Esquema del diagrama unifilar sistema eléctrico San Cristóbal

El proyecto eólico de San Cristóbal contempló la instalación de 3 aerogeneradores de 800 kW de potencia nominal cada uno, una línea de subtransmisión en un voltaje de 13,2 kV que une el parque eólico con la subestación ubicada en la central térmica San Cristóbal, la automatización (hibridación) de 3 grupos electrógenos de marca

CATERPILLAR, modelo 3512, de 650 kW de potencia nominal y todos los elementos auxiliares que permitan el monitoreo, protección y control del sistema híbrido.

El objetivo del sistema de control automatizado fue aprovechar la mayor cantidad de energía del parque eólico, dejando la producción de los generadores a diésel al porcentaje mínimo, pero manteniendo siempre las condiciones necesarias para garantizar la estabilidad del sistema. Los aerogeneradores no tienen la capacidad de controlar frecuencia ni voltaje por si solos, siempre requieren de mínimo un grupo térmico.

Se observa que cuando los aerogeneradores operan, existen salidas súbitas que interrumpen el suministro de electricidad a la población, esto debido a variaciones continuas y rápidas de energía reactiva. Esto ha limitado el despacho de los aerogeneradores para dar confiabilidad al suministro del servicio eléctrico a la población.

Se ha identificado que la electrónica de potencia y los filtros de red de los aerogeneradores entregan una alta cantidad de potencia reactiva a la red eléctrica.

Los nuevos grupos de generación térmica recientemente ingresados a San Cristóbal (4 unidades), no están integrados al lazo de control de potencia reactiva que manejan los aerogeneradores.

Durante la operación de los aerogeneradores, el convertidor de frecuencia intenta controlar la potencia reactiva de los aerogeneradores para que los motores de combustión interna trabajen con factor de potencia cercano a la unidad. Sin embargo como se mencionó, al no tener integrados a las recientes unidades en su lazo de control, desestabiliza el sistema eléctrico, provocando apagones en el sistema eléctrico.

El lazo de control de potencia reactiva que ejecuta el convertidor de frecuencia se ve influenciado directamente por la variación en la velocidad del viento, motivo por el cual variaciones no controladas del viento se traducen en variaciones no controladas de la potencia reactiva de los aerogeneradores, lo cual contribuye a una inestabilidad del sistema eléctrico.

Se pudo identificar que la coordinación del despacho de los aerogeneradores con respecto a los motores de combustión interna depende de un sistema de control híbrido, mismo que monitorea en tiempo real las variables de proceso de la planta térmica y

eólica, y ejecuta acciones de acuerdo con escenarios previamente planificados. Existen 4 unidades térmicas que no están integradas en este lazo de control.

Los componentes eléctricos existentes en los aerogeneradores son parte del diseño original del fabricante y no pueden ser reemplazados, por otro lado, el hardware que maneja los lazos de control de potencia reactiva en los aerogeneradores está bloqueado por contraseña y por garantía no se puede intervenir sobre estos sistemas.

El proyecto ejecutado permite controlar la energía reactiva de la red mientras los aerogeneradores se encuentran disponibles, con esto se asegurará un adecuado despacho de los aerogeneradores y así se evitará la suplantación de energía térmica con los motores de combustión interna, reduciendo el consumo de combustible diésel y disminuyendo la emisión de gases contaminantes al medio ambiente.

El uso de sistemas de compensación de energía reactiva permite la generación/absorción de potencia reactiva a una red eléctrica, ajustando los valores de voltaje a los nominales y en su medida permitiendo que los generadores cercanos trabajen bajo sus límites operativos. Los sistemas de compensación de energía reactiva pueden ser activos o pasivos dependiendo de la aplicación y del costo asociado a su instalación.

La disminución de gases contaminantes aportará con la política medio ambiental del Parque Nacional Galápagos, de la fauna y flora, y de la población urbana cercana a la central térmica.

Este proyecto beneficia directamente al estado ecuatoriano quien a través de CELEC EP Termopichincha y ELECGALÁPAGOS es el encargado de gestionar la provisión de combustible diésel para generación térmica y suministro de energía a la población de la isla San Cristóbal, para tal efecto la implementación de este sistema de compensación de energía reactiva se sustenta en los artículos 15 y 413 de la Constitución de la República del Ecuador donde se indica que es responsabilidad del Estado promover la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas tecnológicas, diversificadas, no contaminantes, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua. <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Constitución de la República del Ecuador, Art 15 y 413.

## **Objetivo general**

Diseñar y construir un sistema de compensación de energía reactiva para obtener una reducción del consumo de combustible diésel en la generación térmica de la isla San Cristóbal Galápagos.

## **Objetivos específicos**

- Diseñar y construir la mejor alternativa de solución para que los aerogeneradores y los motores de combustión interna se complementen energéticamente para satisfacer la demanda de la isla.
- Diseñar, construir y configurar un sistema de compensación de energía reactiva activo.
- Diseñar y construir el sistema de arranque de un compensador sincrónico.
- Calcular y configurar los límites operativos del compensador sincrónico.
- Diseñar, construir y configurar todos los sistemas de control para que un compensador sincrónico opere en paralelo a la red eléctrica.
- Cuantificar la reducción del consumo de combustible diésel y el ahorro generado al estado ecuatoriano al utilizar un sistema de compensación de energía reactiva.



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Componentes del sistema eléctrico de generación

El sistema eléctrico de generación está compuesto por un parque térmico y un parque eólico, mismos que se encuentran separados una distancia aproximada de 5 km y se interconectan a través de una línea de transmisión de 13.2 kV que transporta la energía desde los aerogeneradores hasta la subestación de la Central Térmica San Cristóbal, desde donde la electricidad es despachada hacia los usuarios finales a través de 3 circuitos alimentadores.

### 1.1.1. Parque eólico

El sistema eléctrico de potencia está integrado por el generador, rectificador, chopper, inversor y transformador de potencia. El aerogenerador AE-59 está dotado de un generador síncrono: autoexcitable, autoregurable y sin escobillas que es accionado por una aeroturbina de eje horizontal (palas, buje, eje principal), a través de un multiplicador de velocidad y conectado mediante un convertidor de frecuencia a la red eléctrica. El convertidor estático, (Figura 1.1) constituye la esencia del sistema de regulación. Básicamente se encarga de regular el par del alternador en función de la frecuencia (velocidad) según una curva preprogramada, de esta forma se puede seguir la curva de máxima potencia (Figura 1.2) hasta la velocidad nominal, a partir de la cual se mantendrá la potencia constante. [1, pp. 4,5 y 21].

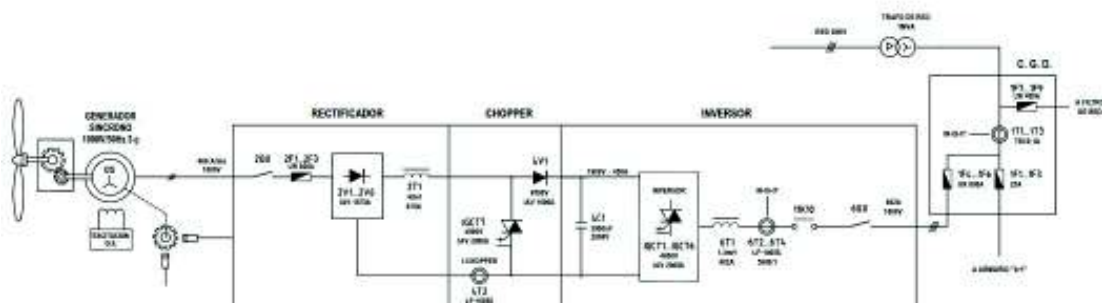


Figura 1.1: Convertidor estático, aerogenerador AE-59.

Fuente: [1, p. 4].

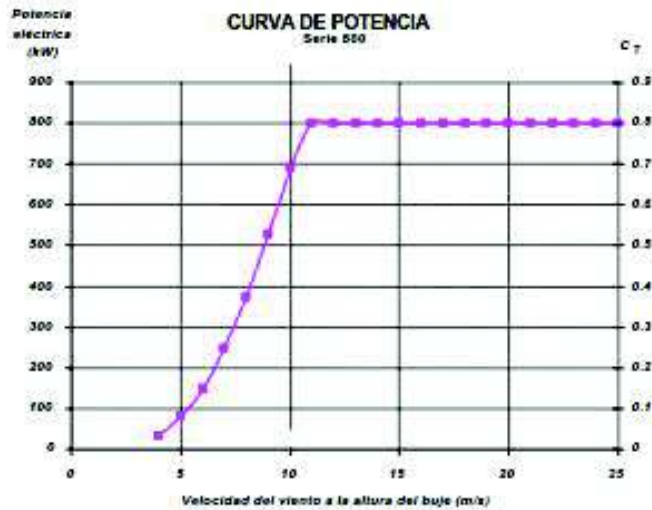


Figura 1.2: Curva de potencia, aerogenerador AE-59.  
Fuente: [1, p. 21].

La energía cinética del viento se transforma en eléctrica en la red a través de una conversión AC/DC/AC en 50Hz. Esta conversión se realiza en las siguientes etapas:

1. Energía cinética del viento en energía cinética de las palas, que accionan la turbina y el alternador.
2. Conversión de la potencia mecánica del alternador en energía eléctrica. Curva tensión - frecuencia lineal hasta 1000V.
3. Conversión AC en DC en el rectificador.
4. Generación de una tensión continua de valor fijo en los condensadores C1, con intensidad variable.
5. Inversor, que transforma la tensión continua fija e intensidad variable en tensión alterna 1000V/50Hz e intensidad trifásica variable. [2, p. 208].

Tabla 1.1: Características principales del convertidor de frecuencia del aerogenerador AE-59

<b>CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES</b>	
Rango de potencia	800 Kw
Intensidad nominal	462 A
Tensión de red	1000 V
Frecuencia de alimentación de la red	50/60 Hz +/-3%
Factor de potencia	1
Rango de velocidad	300-1750 r.p.m. AJUSTABLES
Rango de potencia	800 kW
<b>SISTEMA DE POTENCIA</b>	
Topología	STEP-UP CHOPPER + INVERSOR SINUSOIDAL
Tipo de inversor	PWM CON IGCTs
Configuración del inversor	Puente Trifásico
Número de IGCT's en el inversor	6
Rango de frecuencias	50/60 Hz
Configuración del rectificador	Puente Hexafásico De Diodos
<b>ESTRATEGIAS Y MODOS DE CONTROL</b>	
Inversor de red	INVERSOR SINUSOIDAL CON $\cos \phi = \text{UNIDAD}$
Regulación del bus de c.c.	Bucle Cerrado De Regulación, Mediante El Control Del Inversor De Red
Control del chopper elevador	Control De La Corriente Del Generador Para Entregar La Potencia Requerida A Cada Velocidad

(Fuente: [2, p. 207])

El inversor que forma parte del convertidor de frecuencia es el encargado de realizar una modulación P.W.M. mediante elementos discretos IGCT's, los cuales generan una onda AC de 60 Hz no lineal (Ver Figura 1.3) a la salida del mismo. El uso de este tipo de elementos electrónicos genera un aporte no deseado de armónicos a la red eléctrica.

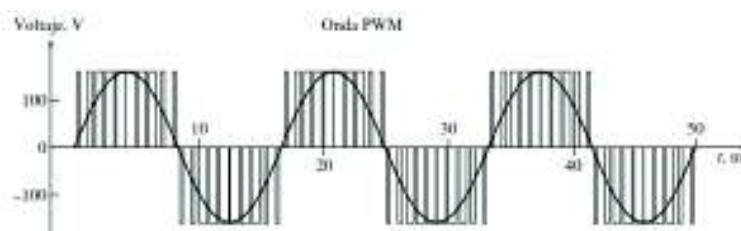


Figura 1.3: Forma de onda de voltaje. Lineal (Discreta) y no lineal (sinusoidal).  
Fuente: [3, p. 280]

Con el objetivo de alcanzar una onda lo más sinusoidal posible, el fabricante del aerogenerador AE-59 ha instalado un filtro de red que es el encargado de compensar el contenido de armónicos que genera la electrónica de potencia del convertidor de frecuencia, en específico del inversor del aerogenerador, con el objetivo de que a la

salida y antes de entregar la potencia al transformador elevador se mantenga una onda sinusoidal, similar a la generada por los grupos térmicos.

El conjunto de elementos que componen este filtro de red se pueden observar en el plano del ANEXO I [4], donde se pueden apreciar 5 bancos capacitores en paralelo. Cada capacitor tiene una capacitancia de 112 uF.

Todos los convertidores electrónicos de potencia utilizados en diferentes tipos de sistemas electrónicos pueden incrementar las perturbaciones armónicas con la inyección de armónicos de corriente directamente hacia la red de distribución. Los armónicos pueden ser reducidos por la modificación de la red alimentación, el sistema de variación de velocidad y el uso de filtros externos. [5, p. 1].

La potencia reactiva de un condensador se define por:

$$Q = U^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \quad (1)$$

Donde:

$U$  = Tensión de la red (Vac)

$F$  = Frecuencia de la red (Hz)

$C$  = Capacitancia del capacitor (F)

$Q$  = Potencia reactiva (Var)

Si consideramos que capacitores en paralelo suman su cantidad de capacitancia y reemplazamos estos valores del filtro de red en la ecuación ( 1 ), tenemos:

$$Q = \frac{1000^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 112 \cdot 10^{-6} \cdot 5}{1000}$$
$$Q = 211.12 \text{ kVar}$$

Se observa que teóricamente la cantidad de potencia reactiva que cada uno de los aerogeneradores aporta al sistema eléctrico de San Cristóbal es de 211.12 kVAr.

Suponiendo un escenario donde estén 3 aerogeneradores en paralelo el aporte de energía reactiva por parte del parque eólico es de 633.36 kVAr. En sitio se ha identificado que este valor es de 500 kVAr aproximadamente.

### 1.1.2. Parque térmico

Las características técnicas de las unidades térmicas de la central San Cristóbal se pueden observar en la Tabla 1.2.

El parque térmico está compuesto por 7 motores de combustión interna turbocargados, todos motores de 4 tiempos y de ciclo diésel, cada uno de los cuales tienen integrado un generador sincrónico de polos salientes y una excitatriz con un juego de diodos rotatorios. Los sistemas auxiliares de estos grupos térmicos son independientes y están compuestos principalmente por un radiador para el sistema de enfriamiento de agua y enfriamiento de aceite lubricante. Eléctricamente cada uno de ellos se sincroniza a la red a través de equipos de control dedicados y por medio de un interruptor de vacío para las unidades SKL y de caja moldeada para las demás unidades. Cada grupo dispone de sistemas de medición, sistemas de control de velocidad, sistema de control de voltaje, sistema de protecciones electromecánicas y sistema de protecciones eléctricas que les permiten integrarse a la red eléctrica con alta confiabilidad. Cada uno de estos grupos térmicos entregan su energía en un nivel de baja tensión, y a través de transformadores elevadores suministran su electricidad en un nivel de tensión de 13.2 kV, de acuerdo al esquema de la Figura 0.1.

Tabla 1.2: Características de las unidades térmicas central San Cristóbal

No.	Marca	Potencia nominal	Voltaje
		<b>kW</b>	<b>V</b>
<b>1</b>	Caterpillar	650	480
<b>3</b>	Caterpillar	650	480
<b>4</b>	Caterpillar	650	480
<b>5</b>	MTU – SDMO	909	480
<b>6</b>	MTU (FUERA DE SERVICIO)	1100	480
<b>7</b>	SKL	1700	4160
<b>8</b>	SKL	1700	4160
<b>9</b>	Caterpillar	900	480

El sistema de control dedicado para el despacho de los aerogeneradores y generadores térmicos, control de potencia activa y reactiva de generadores térmicos y eólicos, originalmente operaba en automático y la arquitectura de control se muestra en la Figura 1.4.

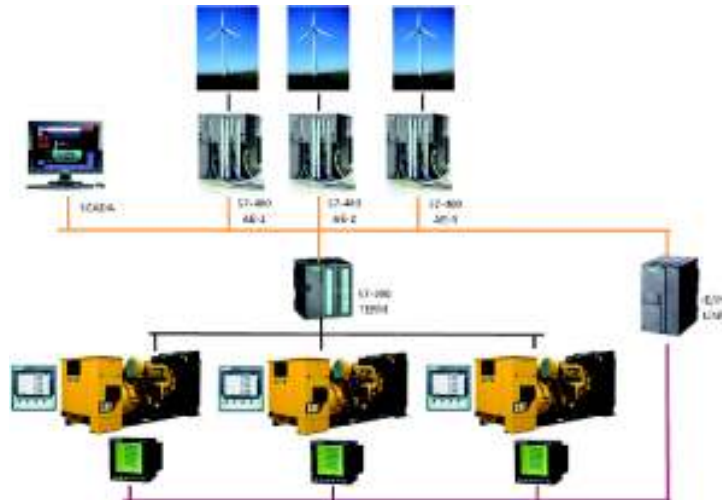


Figura 1.4: Arquitectura del sistema de control híbrido original

Sin embargo, con el aumento de la demanda, se han incorporado al parque térmico 4 nuevas unidades, mismas que no han sido integradas al sistema de control original. Los problemas de coordinación de despacho y descontrol de potencia activa y reactiva han provocado que el sistema original pase a operar en modo manual.

El consumo de combustible en un motor de combustión interna depende de la potencia generada, de condiciones ambientales y del estado mecánico de los componentes del motor. Para motores similares a los de San Cristóbal el rendimiento oscila entre 10 y 15 kWh/gal.

## 1.2. Tecnologías disponibles para la construcción

Cuando un sistema eléctrico de potencia opera en condiciones de estado estable, es muy importante mantener un apropiado balance tanto en la potencia activa como en la potencia reactiva. Es decir, la generación de potencia activa debe ser igual a la potencia efectiva de consumo más las pérdidas, con el fin de obtener una frecuencia constante; de manera similar debe existir un buen acoplamiento entre el balance de potencia reactiva y la tensión, porque si la magnitud de la tensión en una barra varía, significa que el balance de potencia reactiva (o reactivos) no se cumple en dicha barra.

En general el balance de potencia activa se lo hace mediante las unidades generadoras, mientras que el balance de potencia reactiva se efectúa ya sea en

base al control en la excitación de los generadores, como también con la ayuda de ciertos elementos compensadores de reactivos tales como: capacitores, reactores, máquinas sincrónicas, etc.

Todos los equipos electromecánicos que están constituidos por devanados o bobinas, tales como motores y transformadores necesitan la denominada corriente reactiva para establecer campos magnéticos necesarios para su operación. La corriente reactiva produce un desfase entre la onda de tensión y la onda de corriente, si no existiera la corriente reactiva la tensión y la corriente estarían en fase y el factor de potencia sería la unidad. [6, pp. 2, 3, 4].

### **1.2.1. Métodos de control de voltaje**

El control de los niveles de voltaje está acompañado del control de la producción y absorción de flujo de potencia reactiva. Las unidades de generación proveen los medios básicos de control de voltaje a través de los reguladores automáticos de voltaje que controlan la excitación de campo para mantener el nivel de voltaje programado en los terminales del generador.

Dispositivos de compensación son usualmente agregados para suplir o absorber potencia reactiva y de este modo controlar el balance de potencia reactiva en una manera deseada.

Los capacitores y reactores shunt, y los capacitores serie proveen una compensación pasiva. Ellos pueden ser conectados permanente o alternativamente al sistema de transmisión y distribución. Ellos contribuyen al control de voltaje por la modificación de las características de la red.

Los condensadores sincrónicos y los compensadores estáticos proveen una compensación activa, la potencia activa absorbida/producida es entonces automáticamente ajustada para de este modo mantener el voltaje en las barras donde ellos son conectados. Todos juntos con las unidades de generación, establecen los voltajes en puntos específicos del sistema. [7, pp. 2, 3].

Cada aerogenerador en la isla San Cristóbal está diseñado con un filtro de red que está compuesto por un banco de capacitores, estos filtros introducen reactivos a la red eléctrica que sumados al control de potencia reactiva por parte de los aerogeneradores causan inestabilidad en el sistema eléctrico de potencia.

#### **1.2.1.1. Reactores Shunt**

Los reactores shunt son usados para compensar los efectos de la capacitancia de la línea, particularmente para limitar el aumento de voltaje en circuito abierto o altas cargas. [7, p. 4].

Físicamente pueden ser bobinas en aire o núcleo ferromagnético y tienen aplicaciones diversas tanto en sistemas de medio, alto, y extra alto voltaje, así como también en redes de bajo voltaje. [8, p. 21].

Económicamente los reactores son mucho más convenientes que cualquier compensador activo debido a la relativa sencillez de su construcción y principio de funcionamiento, sin embargo, a diferencia de los compensadores activos es un elemento que solo puede consumir reactivos. [9].

#### **1.2.1.2. Capacitores Shunt**

Los capacitores shunt suplen potencia reactiva y aumenta el voltaje local. Ellos son usados a través del sistema y son aplicados en un variado rango de tamaños. La principal ventaja de los capacitores shunt son su bajo costo y su flexibilidad de instalación y operación. Ellos son fácilmente aplicables en varios puntos en el sistema, así contribuye con la eficiencia de la transmisión y distribución de potencia. La principal desventaja de los capacitares shunt es que su valor de potencia es proporcional al cuadrado del voltaje. Consecuentemente, la potencia reactiva de salida es reducida a voltajes bajos cuando es deseable que se entreguen más. [7, p. 5].

#### **1.2.1.3. Capacitores Serie**

Los capacitores serie son normalmente instalados para control de voltaje, debido a que ellos contribuyen a mejorar el control de voltaje y el balance de potencia. La potencia reactiva producida por un capacitor serie se incrementa cuando la potencia transferida se incrementa; un capacitor serie es autoregulante en este aspecto.



Un capacitor serie no solo reduce la caída de voltaje en régimen permanente, sino que este responde instantáneamente a los cambios en la corriente de carga. [7, p. 8].

#### **1.2.1.4. Equipos Estáticos de Compensación**

Un equipo de compensación estática o sistema flexible de transmisión de corriente alterna FACTS es definido por el IEEE Working group como “Un equipo utilizado para la transmisión de corriente alterna incorporando elementos de la electrónica de potencia para permitir el incremento de la capacidad de transmisión de potencia”. La importancia de la electrónica de potencia y otros controladores estáticos es que tienen una gran velocidad de respuesta lo que no limita el número de operaciones. Estos controladores pueden realizar, en forma dinámica, el control de la impedancia de línea, voltaje de línea y flujo de potencia activa y reactiva. También pueden absorber o entregar potencia reactiva y en el caso de contar con algún medio de almacenamiento, pueden absorber o entregar potencia activa.

Los controladores FACTS pueden estar basados en tiristores sin compuerta de apagado o con dispositivos de electrónica de potencia con compuerta de apagado. La mayoría de los controladores con dispositivos con compuerta de apagado son la base de los convertidores DC/AC, los cuales pueden realizar el intercambio de potencia activa y reactiva con el sistema AC. Cuando el intercambio solo involucra potencia reactiva, ella es proporcionada por una mínima capacidad de almacenamiento en el lado DC, sin embargo, si el voltaje o corriente AC que debe ser generado se desvía de los  $90^\circ$  con respecto a la corriente o voltaje, respectivamente, el almacenamiento del convertidor del lado DC debe ser aumentado por sobre el mínimo requerido si es que fuera solo una fuente de potencia reactiva. Esto debe ser hecho en el nivel de convertidor para abastecer el consumo transitorio necesario. Además, otra fuente de almacenamiento como baterías, superconductores magnéticos, o cualquier otra fuente de energía puede ser agregada en paralelo a través de una interface electrónica que complementa el almacenamiento DC del convertidor.

Un controlador basado en convertidores también puede ser diseñado con lo que se conoce como modulación del ancho del pulso (PWM) con la finalidad de reducir las armónicas de bajo orden a un nivel muy bajo. De hecho un convertidor puede

ser diseñado de manera tal que genere la correcta forma de onda de modo de actuar como filtro activo.

También puede ser controlado y operado para lograr equilibrar los desbalances de voltaje, a través de transferencias de energía entre fases. [10, pp. 24-29].

### **Static Synchronous Compensator (STATCOM)**

Es un generador sincrónico estático operado como un “Static var compensator” cuya corriente de salida capacitiva o inductiva puede ser controlada independiente del sistema AC de voltaje. Los STATCOM son los controladores claves en materia de FACTS. Pueden estar basados en convertidores de corriente o de voltaje. [10, p. 29].

El STATCOM, sigla de Static Synchronous Compensator, es un dispositivo FACTS, compuesto por inversores, transformadores, capacitores y controles, como se muestra en la Figura 1.5, el cual se implementa para controlar potencia reactiva, tanto capacitiva como inductiva. Éste dispositivo puede ser utilizado para hacer el control del factor de potencia, regulación de tensión en el punto de conexión y para mejorar la estabilidad dinámica del sistema eléctrico. [11, pp. 904 - 911].

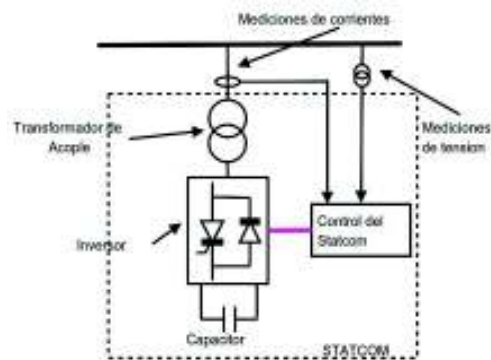


Figura 1.5: Forma básica del STATCOM.  
Fuente: [12, p. 3].

El principio de funcionamiento del STATCOM puede ser descrito a través del diagrama mostrado en la Figura 1.6, que es igual a una representación del STATCOM en conjunto con un sistema eléctrico de potencia. [12, p. 13].

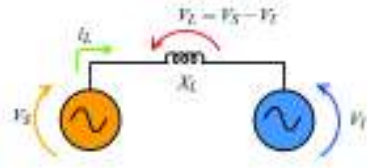


Figura 1.6: Diagrama simplificado de dos fuentes de tensión conectadas por una impedancia  $X_L$ .  
Fuente: [12, p. 13].

En este esquema (Figura 1.6), el sistema eléctrico y el STATCOM, se representan respectivamente por las tensiones  $V_s$  y  $V_i$ , además de una reactancia equivalente representando el transformador de acople.

Las potencias activas y reactivas entre las dos fuentes de tensión en régimen permanente, se describen a través de: [12, p. 13].

$$P = \frac{V_s V_i}{X_L} \sin \delta \quad (2)$$

$$Q = \frac{V_s^2}{X_L} - \frac{V_s V_i}{X_L} \cos \delta \quad (3)$$

Una fuente de tensión con capacidad de control de fase puede direccionar el flujo de potencia activa, y con control de amplitud, puede controlar la potencia reactiva en aquel punto de conexión.

En este caso el STATCOM es una fuente de tensión controlada en amplitud y fase, e implementada a través de inversores. Estos inversores poseen en su lado de corriente continua capacitores para simular una fuente de tensión DC. El capacitor en el lado de corriente continua también sirve como sistema almacenador de energía. Los transformadores son utilizados para compatibilizar los niveles de impedancia del compensador y del sistema de potencia AC. En la mayoría de los casos los transformadores son utilizados para minimizar el contenido de armónicos de tensión del inversor. [12, pp. 14-15].

#### 1.2.1.5. Motores Síncronos

La Figura 1.7 muestra un motor síncrono con dos polos. La corriente de campo  $I_f$  del motor produce un campo magnético en estado estacionario  $B_R$ . Se aplica un conjunto de voltajes trifásicos al estator de la máquina, lo que produce un flujo de corriente trifásica en los devanados. [3, p. 205].

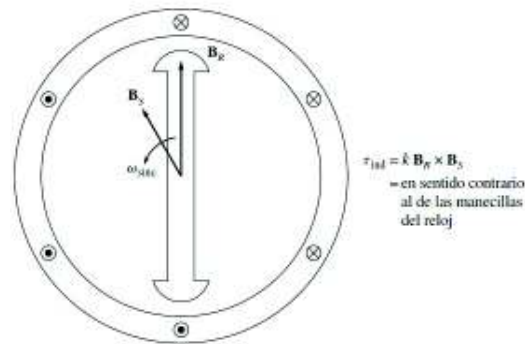


Figura 1.7: Motor síncrono con dos polos  
Fuente: [3, p. 205]

Un conjunto de corrientes trifásicas en el inducido de un devanado produce un campo magnético giratorio uniforme  $B_s$ . Por lo tanto, hay dos campos magnéticos presentes en la máquina y el campo del rotor tenderá a alinearse con el campo del estator, igual que dos imanes tenderán a alinearse si se colocan uno cerca del otro. Debido a que el campo magnético del estator gira, el campo magnético del rotor (y el rotor mismo) tratará constantemente de alcanzarlo. Mientras más grande sea el ángulo entre los dos campos magnéticos (hasta un ángulo máximo), mayor será el par en el rotor de la máquina. El principio básico de la operación de los motores síncronos es que el rotor “persigue” al campo magnético giratorio del estator alrededor de un círculo y nunca lo alcanza.

Un motor síncrono es igual en todos los aspectos a un generador síncrono, excepto en que la dirección del flujo de potencia es la opuesta. Debido a que se invierte la dirección del flujo de potencia en la máquina, se puede esperar que la dirección del flujo de corriente en el estator del motor también se invierta.

Debido al cambio en la dirección de  $I_A$ , cambia también la ecuación de la ley de voltaje de Kirchhoff para el circuito equivalente. La nueva ecuación de la ley de voltaje de Kirchhoff es: [3, pp. 205-206].

$$V_\phi = E_A + jX_S I_A + R_A I_A \quad (4)$$

o

$$E_A = V_\phi - jX_S I_A - R_A I_A \quad (5)$$

$$n_m = \frac{120 \cdot f e}{P} \quad (6)$$

Ésta es exactamente la misma ecuación que para el generador, excepto que se invierte el signo en el término de la corriente.

Los motores síncronos suministran potencia a cargas que son básicamente dispositivos de velocidad constante. Es normal que estén conectados a sistemas de potencia mucho más grandes que los motores individuales, por lo que los sistemas de potencia parecen buses infinitos de motores. Esto quiere decir que el voltaje en los terminales y la frecuencia del sistema serán constantes sin importar la cantidad de potencia que consuma el motor. La velocidad de rotación del motor está asociada a la tasa de rotación de los campos magnéticos, y la tasa de rotación de los campos magnéticos aplicados está asociada a la frecuencia eléctrica aplicada, por lo que la velocidad del motor síncrono será constante sin que importe la carga. Esta velocidad fija de rotación está dada por la ecuación ( 6 ), donde  $n_m$  es la velocidad mecánica de rotación,  $f_e$  es la frecuencia eléctrica del estator y  $P$  es el número de polos en el motor.

En la Figura 1.8 se muestra una gráfica de  $I_A$  versus  $I_F$  de un motor síncrono. Esta gráfica se llama curva en V del motor síncrono, por la obvia razón de que tiene la forma de esa letra. Hay muchas curvas en V que corresponden a diferentes niveles de potencia real. En cada curva, la corriente mínima del inducido se presenta con un factor de potencia unitario cuando sólo se suministra al motor potencia real. En cualquier otro punto de la curva se suministra alguna cantidad de potencia reactiva, ya sea al motor o desde el motor. En el caso de corrientes de campo menores que el valor que resulta en la mínima  $I_A$ , la corriente del inducido está en retraso y consume  $Q$ . En el de corrientes de campo mayores que el valor que resulta en la mínima  $I_A$ , la corriente del inducido está en adelanto y suministra  $Q$  al sistema de potencia como lo haría un capacitor. Por lo tanto, si se controla la corriente de campo de un motor síncrono, se puede controlar la potencia reactiva suministrada a, o consumida por, el sistema de potencia. [3, p. 208 y 212].

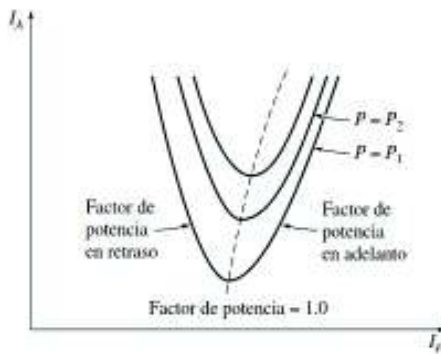


Figura 1.8: Curvas en V de un motor síncrono.  
Fuente: [3, p. 212].

Cuando la proyección del fasor  $E_A$  sobre  $V_f$  ( $E_A \cos \delta$ ) es más corta que  $V_f$ , el motor síncrono tiene una corriente en retraso y consume  $Q$ . Debido a que la corriente de campo es pequeña en esta situación, se dice que el motor está subexcitado. Por otro lado, cuando la proyección de  $E_A$  sobre  $V_f$  es más larga que  $V_f$ , el motor síncrono tiene una corriente en adelanto y suministra  $Q$  al sistema de potencia. Debido a que la corriente de campo es grande en esta situación, se dice que el motor está sobreexcitado. En la Figura 1.9 se muestran los diagramas fasoriales que ilustran estos conceptos. [3, p. 212].

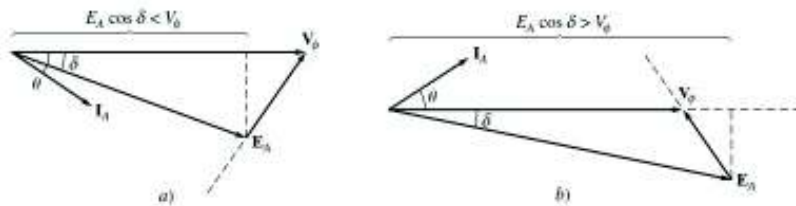


Figura 1.9: a) Diagrama fasorial de un motor síncrono subexcitado. b) Diagrama fasorial de un motor síncrono sobreexcitado.  
Fuente: [3, p. 213].

### **Capacitor o condensador síncrono**

Un motor síncrono adquirido para accionar una carga puede operar sobreexcitado para suministrar potencia reactiva  $Q$  a un sistema de potencia.

En la Figura 1.10 a) se puede observar la curva en V de un capacitor síncrono. Ya que la potencia real que suministra a la máquina es cero (excepto por las pérdidas), con un factor de potencia unitario, la corriente  $I_A = 0$ . Conforme se incrementa la corriente de campo por arriba de este punto, la corriente en la línea (y la potencia reactiva que suministra el motor) aumenta de manera casi lineal

hasta llegar al punto de saturación. La Figura 1.10 b) muestra el efecto de incrementar la corriente de campo en el diagrama fasorial del motor. [3, pp. 218-219].

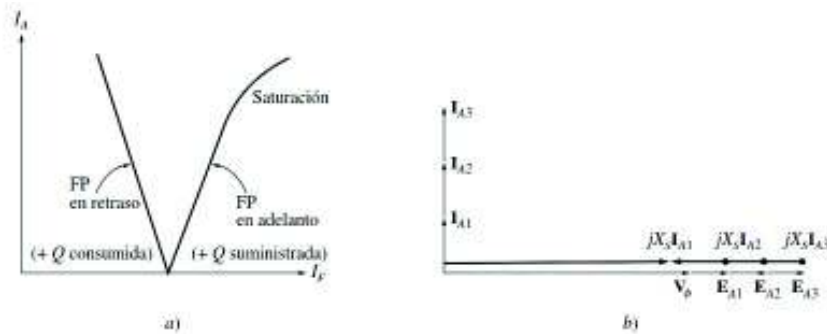


Figura 1.10: a) Curva en V de un capacitor síncrono. b) Diagrama fasorial de la máquina correspondiente.  
Fuente: [3, p. 219].

### **Arranque de los motores síncronos**

En la Figura 1.11 se muestra un motor síncrono a 60 Hz en el momento en que se aplica potencia a los devanados del estator. El rotor del motor está estacionario y, por lo tanto, el campo magnético  $B_R$  también. El campo magnético del estator  $B_S$  comienza a girar dentro del motor a velocidad síncrona.

La Figura 1.11 a) muestra la máquina en el tiempo  $t = 0$  s, cuando  $B_R$  y  $B_S$  están perfectamente alineados. Con la ecuación de par inducido: [3, p. 219].

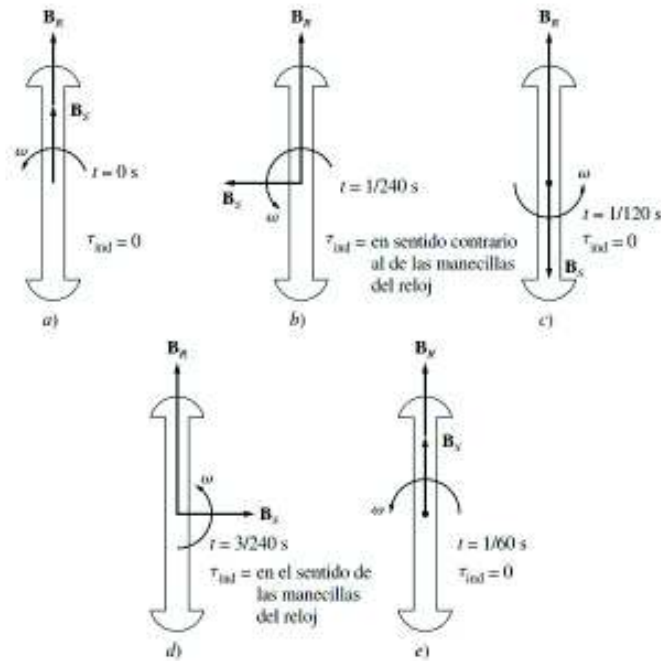


Figura 1.11: Problemas en el arranque de un motor síncrono: el par alterna rápidamente en magnitud y dirección, por lo que el par de arranque neto es cero.  
Fuente: [3, p. 220].

El par inducido en el eje del rotor es cero. En la Figura 1.11 b) se observa la situación en el tiempo  $t = 1/240$  s. En tan corto tiempo el rotor apenas se ha movido, pero el campo magnético del estator apunta ahora hacia la izquierda. Con la ecuación de par inducido, el par en el eje del rotor ahora tiene un sentido contrario al de las manecillas del reloj. La Figura 1.11 c) muestra la situación en el tiempo  $t = 1/120$  s. En ese momento  $B_R$  y  $B_S$  apuntan en direcciones opuestas y  $\tau_{ind}$  es igual a cero una vez más. En el tiempo  $t = 3/240$  s, el campo magnético del estator apunta hacia la derecha y el par resultante tiene el sentido de las manecillas del reloj. Por último, en  $t = 1/60$  s, el campo magnético del estator está alineado una vez más con el campo magnético del rotor y  $\tau_{ind} = 0$ . Durante un ciclo eléctrico, el par pasó de tener una dirección en sentido opuesto a las manecillas del reloj a tener una dirección en el sentido de las manecillas del reloj y el par promedio durante el ciclo completo es cero. Lo que le sucede al motor es que vibra muy fuerte con cada ciclo eléctrico y finalmente se sobrecalienta.

Este método de arranque de un motor síncrono no es nada satisfactorio.

Se pueden utilizar tres métodos para hacerlo de manera segura:

1. Reducir la velocidad del campo magnético del estator a un valor lo suficientemente bajo como para que el rotor pueda acelerar y fijarse a él durante



un semiciclo de la rotación del campo magnético. Este objetivo se puede lograr con la reducción de la frecuencia de la potencia eléctrica aplicada.

Si los campos magnéticos del estator en un motor síncrono giran a una velocidad lo suficientemente baja, no habrá ningún problema para que el rotor se acelere y se enlace con el campo magnético del estator. Entonces se puede incrementar la velocidad de los campos magnéticos del estator aumentando gradualmente  $f_e$  hasta su valor normal de 50 o 60 Hz.

Se pueden usar los controladores de estado sólido para motores a fin de convertir una frecuencia de entrada constante en cualquier frecuencia de salida deseada, simplemente se ajusta la frecuencia a un valor muy bajo para el arranque y luego se eleva hasta la frecuencia de operación deseada para la operación normal.

Cuando se opera un motor síncrono a una velocidad menor a la velocidad nominal, su voltaje interno generador  $E_A = K\phi\omega$  será menor que lo normal. Si se reduce la magnitud de  $E_A$  entonces el voltaje en los terminales aplicado al motor se debe reducir también para mantener la corriente en el estator en niveles seguros. El voltaje en cualquier accionador de frecuencia variable o circuito de ataque de frecuencia variable debe variar casi linealmente con la frecuencia aplicada.

2. El segundo método de arranque de un motor síncrono es adjuntarle un motor de arranque externo y llevar la máquina síncrona hasta su velocidad plena con un motor externo. Entonces se puede conectar la máquina síncrona en paralelo con el sistema de potencia como generador y se puede desconectar el motor primario del eje de la máquina. Una vez que se apaga el motor de arranque, el eje de la máquina pierde velocidad, el campo magnético del rotor  $B_R$  se retrasa con respecto a  $B_{net}$  y la máquina síncrona comienza a comportarse como motor. Una vez que se completa la conexión en paralelo, el motor síncrono se puede cargar de manera normal.
3. Utilizar devanados de amortiguamiento, los cuales son unas barras especiales dispuestas en ranuras labradas en la cara del rotor de un motor síncrono y en cortocircuito en cada extremo con un gran anillo en cortocircuito. [3, pp. 220-222].

### ***Curva de Capacidad***

El modelamiento de la máquina síncrona es fundamental para varios análisis en sistemas de potencia eléctrica, la operación de la máquina síncrona puede ser representado utilizando el diagrama de operación o curva de capacidad. La

construcción de dicha curva se realiza considerando varios límites los cuales definen la región donde el generador opera en forma estable.

El diagrama vectorial convencional de una máquina síncrona de polos salientes que suministra energía a una carga con factor de potencia atrasado se muestra en la Figura 1.12. [13, pp. 13-52].

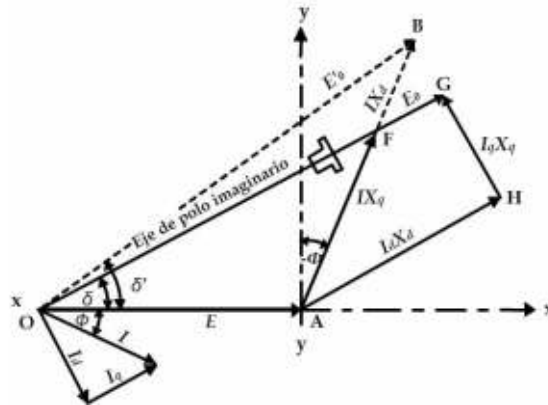


Figura 1.12: Diagrama fasorial de tensión en dos ejes  
Fuente: [13, pp. 13-52]

De donde tras varias operaciones matemáticas se obtiene las ecuaciones para potencia activa y potencia reactiva:

$$P = \frac{E \cdot E_o}{X_d} \sin \delta + \frac{E^2}{2} \left( \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2\delta \quad (7)$$

$$Q = \frac{E \cdot E_o}{X_d} \cos \delta + \frac{E^2}{2} \left( \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \cos 2\delta - \frac{E^2}{2} \left( \frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \right) \quad (8)$$

Donde:

$E$ : Tensión en los terminales del motor síncronico.

$E_o$ : Tensión interna de generación. (fem).

$X_d$ : Reactancia síncrona en el eje directo.

$X_q$ : Reactancia síncrona en eje de cuadratura.

$\delta$ : Ángulo de potencia.

$P$ : Potencia activa.

$Q$ : Potencia reactiva.

Simplificando:

$$m = \frac{E \cdot E_o}{X_d} \quad (9)$$

$$s = \frac{E^2}{2} \left( \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \quad (10)$$

$$n = \frac{E^2}{2} \left( \frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \right) \quad (11)$$

Reemplazando obtenemos:

$$P = m \sin \delta + s \sin 2\delta \quad (12)$$

$$Q = m \cos \delta + s \cos 2\delta - n \quad (13)$$

$$k = n + s \quad (14)$$

Se especifican cinco límites:

- Límite de corriente de armadura.
  - Límite de corriente de campo.
  - Límite de corriente mecánica del primo motor.
  - Límite de estabilidad permanente teórico y práctico.
  - Límite de mínima corriente de excitación teórico y práctico.
1. **Límite de corriente de armadura:** Se determina con la potencia aparente máxima que puede suministrar el generador síncrono, de modo que la corriente de armadura ( $I_a^{\max}$ ) no produzca deterioro en su bobinado. Este límite resulta una circunferencia con centro en el origen de coordenadas del plano P-Q: [14, p. 303].

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (15)$$

2. **Límite de corriente de campo:** Es el límite térmico para que los bobinados de campo no sufran deterioro. Para graficar esta curva se hará uso de las ecuaciones (12) y (13).

Estas ecuaciones graficadas en forma polar en el plano P-Q representa el lugar geométrico de la potencia aparente para un valor constante de la corriente de campo, dicha curva se denomina "Limacón de Pascal". La Figura 1.13 muestra una familia de curvas para diferentes valores de m variable, n=1 y s=1. [14, p. 303].

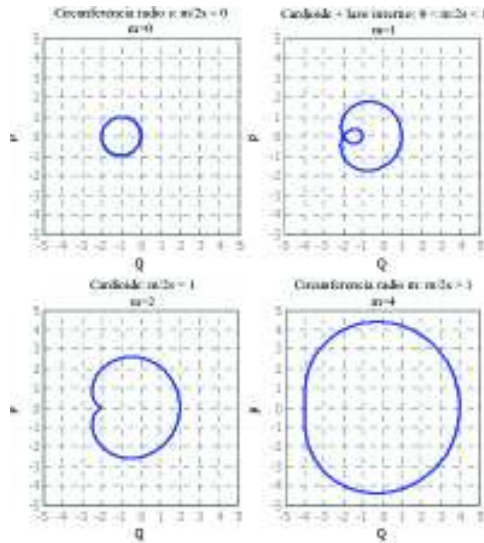


Figura 1.13: Familia de Limacones de Pascal  
Fuente: [14, p. 303]

El límite máximo de corriente de campo, que representa el límite térmico del bobinado de campo, será aquella curva obtenida con la máxima tensión de campo reflejada en el estator y eso puede producir un  $m_{max}$ .

La curva de límite de corriente de campo y la curva de límite de armadura se interceptan en un punto donde el  $f_p$  es el nominal como se muestra en la Figura 1.14. [14, p. 303].

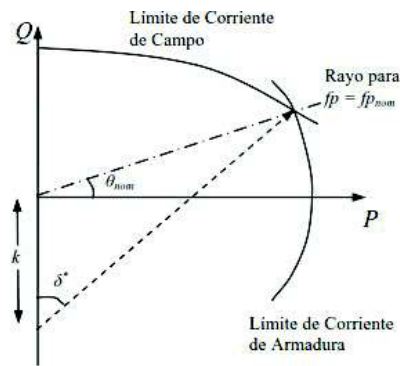


Figura 1.14: Construcción geométrica de la curva de capacidad  
Fuente: [15]

3. **Límite de potencia mecánica del primo motor:** Es impuesto un valor límite por la máquina prima de acuerdo con la ecuación ( 16 ), este límite es una recta paralela al eje horizontal pues tiene un valor constante. [14, p. 304]

$$P_{mec} = k \quad (16)$$

4. **Límite de estabilidad en régimen permanente:** Es el límite de potencia activa máxima suministrada por el generador, sin que la máquina pierda estabilidad. La expresión matemática correspondiente se consigue al determinar la potencia activa máxima, o sea, derivando la ecuación ( 12 ) con respecto a  $\delta$  e igualando a cero se obtiene: [14, p. 304].

$$P = \sqrt{\frac{(Q + k)^3}{(s - n) - Q}} \quad (17)$$

Se nota que la función es definida en  $-n-s < Q < -n+s$ . Esta curva representa el límite de estabilidad permanente teórico de la máquina síncrona de polos salientes, donde  $Q$  es el valor que hace que  $P$  sea máximo. La curva resultante es asintótica con respecto al límite superior de  $Q = -n+s$  y es conocida como la "Cisoide de Diocles". [14, p. 304].

En la práctica no se acepta el límite teórico y para encontrar el límite práctico es necesario dejar un margen de estabilidad disponible en todos los casos igual a un 10 a 20 por ciento de la potencia activa nominal. [13].

5. **Límite de mínima corriente de excitación:** La mínima corriente de excitación para que la máquina genere tensión, esta dado por la semicircunferencia de radio  $s$  trazada entre las ordenadas  $-n-s < Q < -n+s$ . Este límite es definido para las máquinas de polos salientes como: [14, p. 304].

$$P^2 + (Q + n)^2 = s^2 \quad (18)$$

Para encontrar un límite práctico se recomienda desplazar la circunferencia un cierto porcentaje pequeño, como 5%. [16, pp. 1001-1008]. Se resume la curva de capacidad en la Figura 1.15.

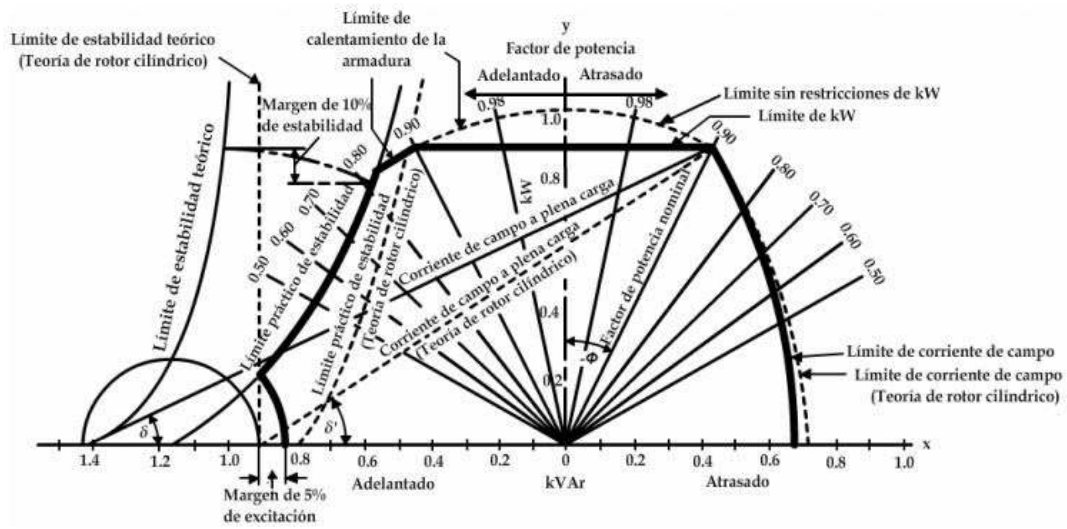


Figura 1.15: Curva de capacidad de un generador de polos salientes conectado a un sistema de tensión constante.  $X_d=1.1$  por unidad,  $X_q=0.7$  por unidad, factor de potencia 0.9 atrasado. Fuente: [13]

## 2. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA

### 2.1. Selección de la mejor alternativa tecnológica

Una vez que en el Capítulo II se han revisado las principales alternativas disponibles en el mercado para que sean tomadas en cuenta para la construcción del sistema de compensación de energía reactiva se realiza un cuadro comparativo (Ver Tabla 2.1) donde se observan las ventajas y desventajas de un equipamiento respecto a otro.

Tabla 2.1: Comparación de tecnologías para compensación de energía reactiva

	Tipo de Compensación	Costo	Elementos disponibles en CELEC EP
<b>Reactor SHUNT</b>	Pasiva	Bajo	No
<b>Capacitor SHUNT</b>	Pasiva	Bajo	No
<b>FACTS</b>	Activa	Medio	No
<b>Máquina sincrónica</b>	Activa	Medio	Si

Para la aplicación en San Cristóbal es necesario que el sistema de compensación de energía reactiva sea activo, así con ello tener un control instantáneo de los niveles de voltaje del sistema eléctrico. Con esto se logrará tener una estabilidad en el sistema de potencia.

Un sistema de compensación de energía reactiva de aproximadamente 625 KVAR compuesto por una máquina sincrónica tiene un costo aproximado de 80.000<sup>2</sup> dólares, mientras que el mismo sistema compuesto por un FACT tiene un costo de 177,270.00 dólares. (Revisar ANEXO II).

En la Central Térmica San Cristóbal el grupo térmico Perkins PS1386E sufrió un daño mecánico irreparable en su motor de combustión interna, motivo por el cual ha sido dado

---

<sup>2</sup> Sumatoria de precios de mercado de un generador sincrónico de 1 MVA, un variador de velocidad de 30 kW, un motor de arranque de 30 kW, un regulador automático de voltaje DECS250 y un embrague magnético.

de baja. Sin embargo, su generador (máquina sincrónica), STAMFORD modelo HCI634K con una capacidad de 986 KVA se encuentra en perfecto estado. Ver Figura 2.1.



Figura 2.1: Grupo térmico Perkins PS1386E desarmado, a) Generador sincrónico, b) Motor de combustión interna (eje del cigüeñal), c) Eje del rotor

Con estos antecedentes, se considera como la mejor alternativa el uso del generador STAMFORD modelo HCI634K como máquina sincrónica que permitirá realizar el control de potencia reactiva del sistema eléctrico de manera activa. Con este objetivo se construirá el sistema de arranque que permita que esta máquina sincrónica pase de un estado de reposo a su estado de velocidad nominal.

Por otra parte, se plantea la construcción de un nuevo sistema de control y SCADA, mismo que se puede observar en la arquitectura de la Figura 2.2.





Figura 2.2: Arquitectura del sistema de control propuesto

Como se puede observar, se instalará un controlador de grupo en cada una de las 7 unidades térmicas, esto permitirá en primer lugar, realizar la repartición de carga activa y reactiva entre los generadores térmicos que se encuentren sincronizados a la red, adicional permitirá enviar los valores de energía al sistema de control de cada uno de las aerogeneradores, para que estos a su vez realicen el algoritmo de control de potencia activa y reactiva sobre los aeros. Para la comunicación entre controladores de grupo se utilizará el protocolo CAN a través de cable de cobre en configuración RS-485. Por otro lado, la comunicación hacia el sistema de control de los aerogeneradores y el SCADA se lo realizará a través de Modbus RS-485 que interconectará a todos los controladores de grupo, esta comunicación pasará a través de un convertidor de medio para que sea visto en la red industrial Ethernet.

## 2.2. Detalle de la máquina sincrónica

La máquina sincrónica utilizada para este proyecto está compuesta por los siguientes elementos: (Ver Figura 2.3).

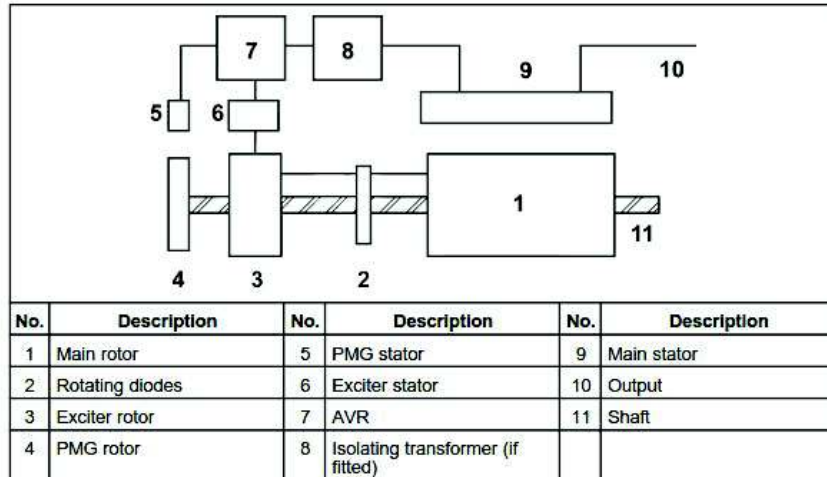


Figura 2.3: Componentes de la máquina sincrónica a utilizar.  
Fuente: [17, p. 14]

En la Tabla 2.2 se muestran las principales características del generador, estos datos serán utilizados para realizar los cálculos de diseño del compensador sincrónico. Adicional se informa que la máquina sincrónica es de polos salientes y tiene 4 polos por lo cual su velocidad nominal es de 1800 RPM.

Tabla 2.2: Principales características de la máquina sincrónica a ser utilizada

<b>GENERADOR STAMFORD HCI634K</b>	
CONTROL SYSTEM	SEPARATELY EXCITED BY P.M.G.
INSULATION SYSTEM	CLASS H
RATED POWER FACTOR	0.8
Rotor WDG. Resistance	2.36 Ohms
No. BEARINGS	1 BEARING
WEIGHT WOUND ROTOR	1093 kg
WR <sup>2</sup> INERTIA	26.5295 kgm <sup>2</sup>
FREQUENCY	60 Hz
Minimum Air Flow	1.961 m <sup>3</sup> /sec 4156 cfm
Maximum intake to outlet pressure drop	6 mmH <sub>2</sub> O/0.25 inH <sub>2</sub> O
VOLTAGE STAR	480/277 V
KVA	986
kW	788.8
Factor de potencia	0.8
X <sub>d</sub> DIR. AXIS SYNCHRONOUS	2.71
X' <sub>d</sub> DIR. AXIS TRANSIENT	0.22
X'' <sub>d</sub> DIR. AXIS SUBTRANSIENT	0.15
X <sub>q</sub> QUAD. AXIS REACTANCE	1.59
X'' <sub>q</sub> QUAD. AXIS SUBTRANSIENT	0.23
XL LEAKAGE REACTANCE	0.07

X2 NEGATIVE SEQUENCE	0.22
X0 ZERO SEQUENCE	0.03
T'd TRANSIENT TIME CONST.	0.185
T"d SUB-TRANSTIME CONST.	0.025
T'do O.C. FIELD TIME CONST.	3.4
Ta ARMATURE TIME CONST.	0.049
SHORT CIRCUIT RATIO	1/Xd

(Fuente: [18, p. 19] y de [19, p. 3 y 8])

Es necesario que la máquina síncrona salga del estado de reposo, motivo por el cual se debe construir el sistema de arranque, para esto se utilizará un motor auxiliar de acuerdo con lo indicado en el punto: *Arranque de los motores síncronos*.

### 2.3. Construcción del sistema de arranque del compensador síncrono

Para la construcción del compensador síncrono se seguirán los siguientes pasos:

- 1) Cálculo de la potencia requerida para el arranque de la máquina síncrona.
- 2) Diseño del sistema de eléctrico para el arranque de la máquina síncrona y sistema de control de voltaje.
- 3) Construcción del sistema que une el eje del rotor de la máquina síncrona con el eje del embrague y construcción del sistema de apoyo del segundo soporte del rotor de la máquina síncrona.
- 4) Cálculo de los límites operativos de la máquina síncrona.

#### 2.3.1. Potencia requerida para el sistema de arranque

De la Tabla 2.2 se conoce que:

$$m = 1093 \text{ Kg}$$

$$\omega_f = 1800 \text{ RPM}$$

$$I = 26.5295 \text{ kg.m}^2$$

Debido a que el generador síncrono que se pretende reutilizar tiene un solo rodamiento de apoyo, no se puede realizar una medición directa del torque mínimo para sacar al

conjunto rotórico del reposo, motivo por el cual, se ha aprovechado que en la central Santa Cruz, existe un generador sincrónico desarmado, mismo que tiene las mismas características eléctricas que el generador que se utilizará para este proyecto, cabe indicar que el generador de Santa Cruz dispone de dos cojinetes, uno ubicado en la parte anterior y uno en la parte posterior del rotor. Experimentalmente a través de un torquímetro se obtiene que el torque mínimo es de 5.65 Nm. (  $\tau \geq 5.65 Nm$  ). Se va a asumir este valor para los cálculos siguientes.

Si consideramos entonces que:

$$\tau = I \cdot \alpha \quad (19)$$

Donde  $\alpha$  es la aceleración del movimiento rotacional ejercido por la máquina sincrónica para alcanzar la velocidad nominal, tenemos que:

$$\alpha = \frac{\tau}{I} = \frac{5.65}{26.5295} = 0.21297 \frac{rad}{s^2}$$

Por otra parte sabemos que:

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_o}{t} \quad (20)$$

Si consideramos que el sistema parte del reposo, es decir que  $\omega_o = 0$  tenemos que:

$$t = \frac{\omega_f}{\alpha} = \frac{1800 \cdot \frac{2\pi}{60}}{0.21297} = 14.75 \text{ min}$$

Con lo cual podemos asegurar que si aplicamos un torque de 5.65 Nm llegaremos a la velocidad nominal en un tiempo de 14.75 min.

Para conocer la potencia  $P_1$  necesaria para que el rotor de la máquina sincrónica salga de la inercia y llegue a la velocidad nominal podemos aplicar:

$$P_1 = \omega \cdot \tau \quad (21)$$

$$P_1 = \frac{1800 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot 5.65}{1000} = 1.065 \text{ kW}$$

Para determinar la potencia  $P_2$  que necesita el ventilador que se encuentra sobre el mismo eje de la máquina sincrónica utilizamos la siguiente ecuación:

$$P_2 = k \cdot \frac{\Delta P \cdot Q \cdot g}{n_v} \quad (22)$$

Donde:

$P_2$  = Potencia requerida por el ventilador para operar a velocidad nominal.

$k$  = Factor de compresibilidad (adimensional).

$Q$  = Caudal volumétrico ( $m^3/s$ )

$n_v$  = Rendimiento mecánico del ventilador (%)

$\Delta P$  = Aumento de presión total desde la entrada a la salida de la máquina (Pa)

$g$  = gravedad ( $9.8 m/s^2$ )

De acuerdo a lo indicado en la Tabla 2.2, tenemos que para nuestra máquina sincrónica:

$$\Delta P = 6mmH_2O = 58.838 Pa$$

$$Q = 1.961 \frac{m^3}{s}$$

En la Tabla 2.3 se pueden observar los rendimientos y factores de compresibilidad típicos para cierto tipo de ventiladores:

Tabla 2.3: Rangos aproximados del rendimiento mecánico y factores de compresibilidad

<i>Rangos aproximados del rendimiento mecánico (<math>\eta_v</math>)</i>							
<i>Ventiladores centrífugos</i>							
<i>Álabes de paletas</i>				<i>45 a 60 %</i>			
<i>Álabes curvados hacia delante</i>				<i>45 a 60 %</i>			
<i>Álabes curvados hacia atrás</i>				<i>75 a 85 %</i>			
<i>Álabes inclinados radialmente</i>				<i>60 a 70 %</i>			
<i>Air Foil</i>				<i>80 a 90 %</i>			
<i>Ventiladores axiales</i>				<i>85 a 90 %</i>			
<i>Valores aproximados de los factores de compresibilidad para el aire</i>							
$\Delta P/P$	0	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18
$k$	1	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94

(Fuente: [20, p. 19])

Para nuestro caso, los álabes son curvados hacia atrás por lo cual utilizaremos:  $k = 1$  y  $\eta_v = 75\%$ . Por tanto:

$$P_2 = 1 \cdot \frac{58.838 \cdot 1.961 \cdot 9.8}{0.75 \cdot 1000} = 1.507 \text{ kW}$$

También, se considera una potencia  $P_3$  por magnetización del sistema de excitación para elevar el voltaje del estator a su valor nominal. Para calcular este dato usaremos los siguientes algoritmos:

De la Figura 1.12 se obtiene que:

$$\begin{aligned} I d_{pu} &= I_{pu} \cdot \cos(90^\circ - \delta - \phi) \\ I d_{pu} &= I_{pu} \cdot \cos(90^\circ - 33.06^\circ - \cos^{-1}(0.8)) \\ I d_{pu} &= 1 \cdot \cos(20.06^\circ) \\ I d_{pu} &= 0.94 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I q_{pu} &= I_{pu} \cdot \sin(90^\circ - \delta - \phi) \\ I q_{pu} &= I_{pu} \cdot \sin 90^\circ - 33.06^\circ - \cos^{-1}(0.8) \\ I q_{pu} &= 1 \cdot \sin(20.06^\circ) \\ I q_{pu} &= 0.34 \end{aligned}$$

Partiendo del diagrama vectorial indicado en la Figura 2.4 se obtienen las siguientes ecuaciones:

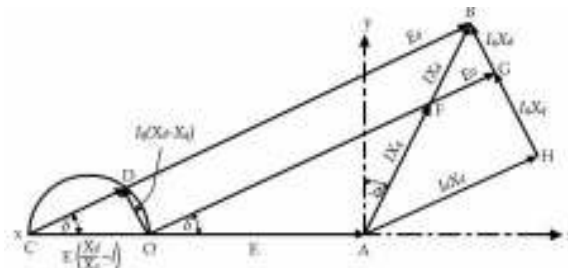


Figura 2.4: Diagrama vectorial máquina sincrónica

$$\begin{aligned} E_o &= E_{pu} + I d_{pu} \cdot X d_{pu} \cdot \angle \delta + I q_{pu} \cdot X q_{pu} \cdot \angle (90^\circ + \delta) \\ E_o &= 1 + 0.94 \cdot 2.71 \cdot \angle 33.06^\circ + 0.34 \cdot 1.59 \cdot \angle 123.06^\circ \\ E_o &= 1 + 2.54 \cdot \angle 33.06^\circ + 0.54 \cdot \angle 123.06^\circ \end{aligned}$$

$$E_o = 1 + 2.13 + j1.38 - 0.29 + j0.45$$

$$E_o = 2.84 + j1.84$$

$$E_o(f_p=0.8) = 3.38 \cdot \angle 33.06^\circ$$

Partiendo que antes de la sincronización el compensador sincrónico estará en voltaje nominal y no existirá absorción ni entrega de potencia reactiva entonces el  $f_p = 1$ . Por tanto:

$$E_o(\overline{OF}) = E_{pu} + I_{pu} \cdot Xq_{pu} \angle (90^\circ - \phi)$$

$$E_o(\overline{OF}) = 1 + 1 \cdot 1.59 \angle (90^\circ - \cos^{-1}(1))$$

$$E_o(\overline{OF}) = 1 + 1.59 \cdot \angle 0^\circ$$

$$E_o(\overline{OF}) = 1 + (0 + j1.59)$$

$$E_o(\overline{OF}) = 1 + j1.59$$

$$E_o(\overline{OF}) = 1.87 \cdot \angle 57.83^\circ$$

Por tanto:

$$\delta = 57.83^\circ$$

Ahora calculamos  $I_d$  e  $I_q$  para el nuevo valor de  $\delta$ :

$$I_{d_{pu}(57.83^\circ)} = I_{pu} \cdot \cos(90^\circ - \delta - \phi)$$

$$I_{d_{pu}(57.83^\circ)} = I_{pu} \cdot \cos(90^\circ - 57.83^\circ - \cos^{-1}(1))$$

$$I_{d_{pu}(57.83^\circ)} = 1 \cdot \cos(-57.83^\circ)$$

$$I_{d_{pu}(57.83^\circ)} = 0.53$$

$$I_{q_{pu}(57.83^\circ)} = I_{pu} \cdot \sin(90^\circ - \delta - \phi)$$

$$I_{q_{pu}(57.83^\circ)} = I_{pu} \cdot \sin(90^\circ - 57.83^\circ - \cos^{-1}(1))$$

$$I_{q_{pu}(57.83^\circ)} = 1 \cdot \sin(-57.83^\circ)$$

$$I_{q_{pu}(57.83^\circ)} = -0.84$$

Ahora calculamos el  $E_o$  para  $f_p=1$ ;

$$E_{o_{pu}} = E_{pu} + I_{d_{pu}} \cdot Xd_{pu} \cdot \angle \delta + I_{q_{pu}} \cdot Xq_{pu} \cdot \angle (90^\circ + \delta)$$

$$E_o = 1 + 0.53 \cdot 2.71 \cdot \angle 57.83^\circ - 0.84 \cdot 1.59 \cdot \angle 147.83^\circ$$

$$E_o = 1 + 1.44 \cdot \angle 57.83^\circ - 1.34 \cdot \angle 147.83^\circ$$

$$E_o = 1 + 0.77 + j1.22 + 1.14 - j0.72$$

$$E_o = 2.91 + j0.5$$

$$E_{o(fp=1)} = 2.95 \cdot \angle 9.85^\circ$$

Al asumir que no hay saturación,  $E_o$  también representa la corriente de campo a plena carga  $I_f$ , por lo que  $E_o$  también se puede escribir como  $I_f$ . [21, p. 32].

Por tanto:

$$I_{f(max)} = E_{o(fp=0.8)} = 3.38$$

$$I_{f(sin\ carga)} = E_{o(fp=1)} = 2.95$$

Se observa que el fabricante ha incluido en su diseño original diodos rotatorios en la placa de rectificación, mismos que soportan hasta 70 A. Por lo cual se asume que por diseño este valor es la corriente máxima que fluirá por la bobina de campo del generador, de tal manera que se establece la siguiente relación.

$$\frac{I_{\max\ en\ la\ bobina\ de\ campo\ del\ generador}}{I_{f(max,fp=0.8)}} = \frac{I_{bobina\ del\ generador\ antes\ de\ la\ sincronización}}{I_{f(sin\ carga)}}$$

$$\frac{70\ A}{3.38} = \frac{I_{bobina\ del\ generador\ antes\ de\ la\ sincronización}}{2.95}$$

$$I_{bobina\ del\ generador\ antes\ de\ la\ sincronización} = I_{campo} = 61.05\ A$$

Por tanto tenemos que:

$$P_3 = I_{campo}^2 R_{bobina\ de\ campo}$$

$$P_3 = (61.05)^2 \cdot 2.36 = 8.796\ kW$$

Para calcular la potencia  $P_4$  correspondiente a la cantidad de energía requerida para mover el motor de arranque en vacío se realizaron mediciones que permitieron a este motor alcanzar los 60 Hz, para esto se logró conseguir un motor eléctrico trifásico de 30 kW en la central Guangopolo. Se utilizó un analizador de red trifásico marca FLUKE, obteniéndose los siguientes resultados:

$$f = 60\ Hz$$

$$I = 3\ A$$



$$V = 380 \text{ V}$$

$$fp = 0.8$$

Aplicando:

$$P_4 = I \cdot V \cdot \sqrt{3} \cdot fp \quad (23)$$

$$P_4 = \frac{3 \cdot 380 \cdot \sqrt{3} \cdot 0.8}{1000} = 1.58 \text{ kW}$$

En la Tabla 2.4 se puede observar un resumen de los cálculos realizados.

Tabla 2.4: Resumen de cálculos de potencia para arranque de la máquina sincrónica

<b>CÁLCULO DE POTENCIA PARA SALIR DE LA INERCIA</b>			
m	Masa del conjunto rotórico	1,093	kg
I	Momento de inercia del conjunto rotórico	26.5295	kg.m2
w	Velocidad nominal de la máquina sincrónica	1,800	RPM
		188.50	rad/s
t	Tiempo de subida	14.75	min
		885.078	s
$\alpha$	Aceleración	0.21297	rad/s2
$T_1$	Torque necesario para salir de la inercia	5.65	N.m
$P_1$	Potencia requerida para alcanzar la velocidad nominal w en el tiempo t	<b>1.065</b>	kW
<b>CÁLCULO DE POTENCIA DEL VENTILADOR</b>			
Q	Caudal mínimo de aire	1.961	m3/s
$\Delta P$	Máximo delta de presión	6.00	mmca
		58.84	Pa
$n_v$	Rendimiento del ventilador	75	%
K	Constante de compresibilidad	1	
$P_2$	Potencia consumida por parte del ventilador	<b>1.507</b>	kW
<b>CÁLCULO DE POTENCIA DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN</b>			
$P_3$	Máxima potencia consumida por el sistema de excitación	<b>8.796</b>	kW
<b>CÁLCULO DE POTENCIA DEL MOTOR DE ARRANQUE EN VACÍO</b>			
I	Corriente del motor de arranque en vacío a velocidad nominal	3	A
V	Voltaje del motor de arranque en vacío a velocidad nominal	380	V
fp	Factor de potencia del motor de arranque en vacío a velocidad nominal	0.80	
$P_4$	Potencia del motor de arranque en vacío y a velocidad nominal	<b>1.58</b>	kW

Una vez que la máquina sincrónica se encuentra en paralelo al sistema eléctrico consumirá una cantidad de potencia activa con el fin de mantenerse girando a velocidad nominal y a la misma frecuencia de la red.

Para observar el comportamiento del consumo energético del compensador sincrónico durante el arranque y operación en paralelo a la red eléctrica se ha elaborado las Tabla 2.5 y en la Figura 2.5 . Sobre esta figura se realizan las siguientes consideraciones:

1. En el punto A: Antes de llegar a 12.9 kW, el compensador sincrónico se encuentra en el tiempo de subida, se consideran las potencias requeridas para vencer la inercia, por consumo del ventilador, por excitación y por consumo del motor de arranque.
2. En el punto A: Al llegar a 12.9 kW el compensador sincrónico llega a la velocidad nominal ( $V_{nom} = 1800 \text{ RPM} = \text{cte}$ ), en este momento el torque requerido para vencer la inercia del sistema se hace cero, por tanto,  $P_1(\text{inercia}) = 0 \text{ kW}$ . El motor de arranque consume una potencia  $P_4 = \text{cte}$ . El ventilador consume una potencia  $P_2 = \text{cte}$  y la excitación consume una potencia  $P_3 = \text{cte}$ .
3. En el punto B: Se realiza la sincronización a la red eléctrica, en este mismo instante el embrague magnético se abre, por tanto, el motor de arranque deja de consumir potencia. El sistema sigue su operación normal absorbiendo 10.3 kW de potencia activa del sistema eléctrico.
4. La potencia de inercia  $P_1$  es proporcional a la velocidad angular y el torque  $T_1$  es constante todo el tiempo de subida.
5. Considerando que el ventilador y el motor de arranque son equipos de par variable, las potencias  $P_2$  y  $P_4$  durante el tiempo de subida se calculan mediante la siguiente expresión:

$$\frac{P_{final}}{P_{inicial}} = \left( \frac{\omega_{final}}{\omega_{inicial}} \right)^3$$

Tabla 2.5: Potencia consumida por el compensador sincrónico durante el período de arranque y después de la sincronización.

		Inercia		Ventilador		Excitación		Motor Arranque		Total	
w	t	P1	T1	P2	T2	P3	T3	P4	T4	PT	TT
RPM	min	kW	Nm	kW	Nm	kW	Nm	kW	Nm	kW	Nm
0	0	0.0	0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00
180	1,5	0.1	5.7	0.0	0.08	0.88	46.66	0.0	0.08	1.0	52.48
360	3,0	0.2	5.7	0.0	0.32	1.76	46.66	0.0	0.34	2.0	52.97
540	4,4	0.3	5.7	0.0	0.72	2.64	46.66	0.0	0.75	3.0	53.79
900	5,9	0.5	5.7	0.2	2.00	4.40	46.66	0.2	2.10	5.3	56.41
1,080	7,4	0.6	5.7	0.3	2.88	5.28	46.66	0.3	3.02	6.6	58.21
1,260	8,9	0.7	5.7	0.5	3.92	6.16	46.66	0.5	4.11	8.0	60.34
1,440	10,3	0.9	5.7	0.8	5.12	7.04	46.66	0.8	5.36	9.5	62.79
1,620	11,8	1.0	5.7	1.1	6.48	7.92	46.66	1.2	6.79	11.1	65.58
1,800	13,3	1.1	5.7	1.5	7.99	8.80	46.66	1.6	8.38	12.9	68.69
1,800	14,8	0.0	0	1.5	7.99	8.80	46.66	1.6	8.38	11.9	63.04
1,800	14,8	0.0	0	1.5	7.99	8.80	46.66	1.6	0.00	11.9	54.66
1,800	16,2	0.0	0	1.5	7.99	8.80	46.66	0.0	0.00	10.3	54.66
1,800	16,2	0.0	0	1.5	7.99	8.80	46.66	0.0	0.00	10.3	54.66

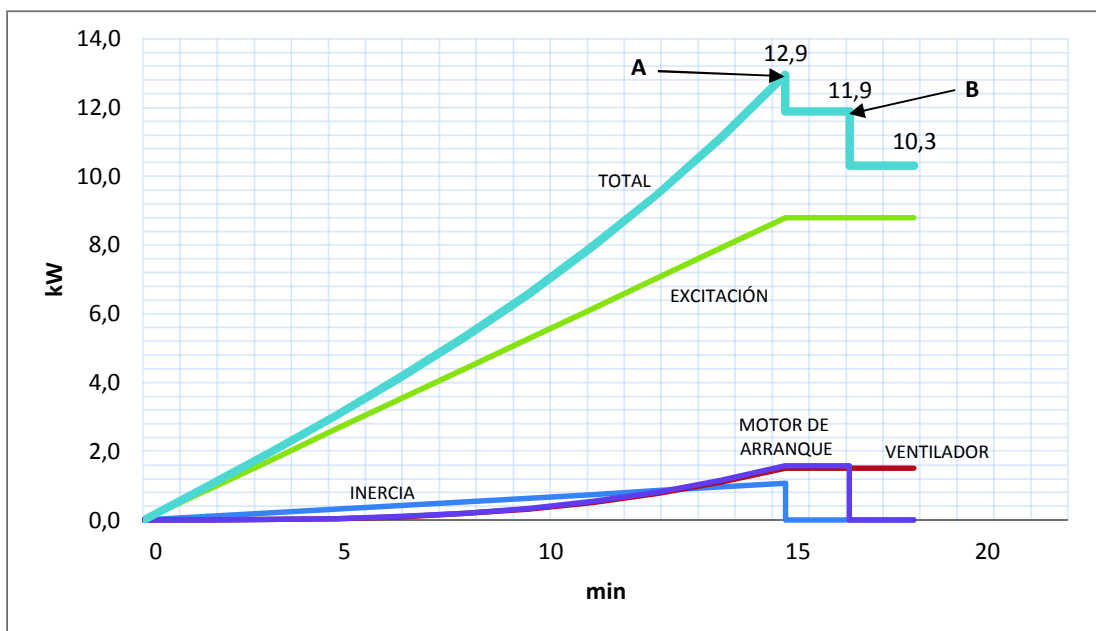


Figura 2.5: Potencia consumida por el compensador sincrónico durante el período de arranque y después de la sincronización

### 2.3.2. Cálculo de los límites operativos del compensador

Los límites operativos de una máquina sincrónica se determinan a través de su respectiva curva de capacidad. En la Tabla 2.2 se observan las características eléctricas de la máquina sincrónica, las cuales serán utilizadas en este cálculo.

Se ha modelado en MATLAB el siguiente algoritmo matemático para la obtención de estos límites.

En los datos técnicos del generador no existe la corriente de armadura, por lo cual esta corriente se obtendrá a partir de:

$$S = \sqrt{3} \cdot E \cdot I \quad (24)$$

Donde:

$S$ : Potencia aparente (KVA)

$E$ : Tensión nominal (V)

$I$ : Corriente de armadura (A)

Por tanto:

$$I = \frac{986}{\sqrt{3} \cdot 480}$$
$$I = 1.19 \text{ kA}$$

Para facilidad, todos los cálculos se realizarán en valores por unidad, por tanto:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot E_B} \quad (25)$$

Donde:

$I_B$ : Corriente base (A)

$S_B$ : Potencia base (KVA)

$E_B$ : Voltaje nominal base (V)

Por tanto:

$$I_B = \frac{986}{\sqrt{3} \cdot 480} = 1.19 \text{ kA}$$

La corriente por unidad está dada por:

$$I_{pu} = \frac{I}{I_B} \quad (26)$$

$$I_{pu} = \frac{1.19}{1.19} = 1$$

Haciendo uso de las ecuaciones ( 10 ) y ( 11 ) obtenemos:

$$s = \frac{E_{pu}^2}{2} \left( \frac{Xd_{pu} - Xq_{pu}}{Xd_{pu}Xq_{pu}} \right)$$

$$s = \frac{1^2}{2} \left( \frac{2.71 - 1.59}{2.71 \cdot 1.59} \right) = 0.1299$$

$$n = \frac{E_{pu}^2}{2} \left( \frac{Xd_{pu} + Xq_{pu}}{Xd_{pu}Xq_{pu}} \right)$$

$$n = \frac{1^2}{2} \left( \frac{2.71 + 1.59}{2.71 \cdot 1.59} \right) = 0.4989$$

Haciendo uso de la Figura 1.12 se encuentra el valor de  $\delta$ , utilizamos la siguiente ecuación:

$$E_o(\overline{OF}) = E + jX_q \cdot I \quad (27)$$

Se considera que  $E_o$  sección  $\overline{OF}$  está en el eje directo y  $X_q$  está en el eje de cuadratura, existe un ángulo de  $90^\circ$  entre ellos.

Se considera que  $E_o$  sección  $\overline{OF}$  está en el eje directo e  $I$  está desplazado un ángulo  $-\phi$  de  $E_o$ . Sabemos que  $fp = \cos(\phi)$ ;  $\phi = \cos^{-1}(fp) = \cos^{-1}(0.8)$ .

Por lo tanto de la Figura 1.12 se obtiene:

$$E_o(\overline{OF}) = E_{pu} + Xq_{pu} \cdot 90 \cdot I_{pu} \cdot \angle(-\phi)$$

$$E_o(\overline{OF}) = 1 + 1.59 \cdot 1 \cdot \angle(90^\circ - \cos^{-1}(0.8))$$

$$E_o(\overline{OF}) = 1 + 1.59 \cdot 1 \cdot \angle - 36.86^\circ$$

$$E_o(\overline{OF}) = 1 + 1.59 \cdot \angle 53.13^\circ$$

$$E_o(\overline{OF}) = 1 + (0.954 + j1.272)$$

$$E_o(\overline{OF}) = 1.954 + j1.272$$

$$E_o(\overline{OF}) = 2.33 \cdot \angle 33.06^\circ$$

Por tanto:

$$\delta = 33.06^\circ$$

Se requiere el valor de potencia activa por unidad, para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{pu} = \frac{P}{S} \quad (28)$$

$$P_{pu} = \frac{788.8}{986} = 0.8$$

Sabemos que:

$$P_{pu} = m \cdot \sin \delta + s \sin 2\delta$$

$$0.8 = m \cdot \sin(33.06) + 0.1299 \sin(2 \cdot 33.06)$$

$$m = 1.248$$

La potencia reactiva se calcula con la ecuación ( 15 ):

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{986^2 - 788.8^2}$$

$$Q = 591.6 \text{ kVAR}$$

La potencia reactiva por unidad se calcula:

$$Q_{pu} = \frac{Q}{S} \quad (29)$$

$$Q_{pu} = \frac{591.6}{986} = 0.6$$

### 2.3.2.1. Límite de corriente de armadura

Este límite se representa en el plano P-Q con una circunferencia de centro en el origen y el radio dado por la potencia aparente máxima que puede suministrar el generador, al trabajar en valores por unidad el radio es igual a 1. Su ecuación será:

$$P = \sqrt{1 - Q^2}$$

Código en MATLAB:

```
% Límite de corriente de armadura
S=986;
SB=986;
x=-1:0.001:1;
y=sqrt(((S/SB)^2) - (x.^2));
```

### 2.3.2.2. Límite de corriente de campo

Se representa mediante una curva conocida como limacón de pascal, este límite será calculado en coordenadas cartesianas y graficado a través de funciones paramétricas, para ello se utilizarán las ecuaciones ( 12 ) y ( 13 ).

$$P = m \sin \delta + s \sin 2\delta$$

$$Q = m \cos \delta + s \cos 2\delta - n$$

Donde:

$\delta$ : variable paramétrica

P: variable en el eje de las ordenadas

Q: variable en el eje de las abscisas

Código en MATLAB:

```
%Límite de corriente de campo
m=1.248;
s=0.1299;
n=0.4989;
t=0:0.001:pi;
x1=(m.*cos(t))+(s.*cos(2.*t))-n;
y1=(m.*sin(t))+(s.*sin(2.*t));
```

### 2.3.2.3. Límite de potencia mecánica

La máxima potencia mecánica se representará mediante una recta paralela al eje de las abscisas, para nuestro cálculo al no existir MCI, se asume que este valor coincidirá con el factor de potencia.

$$P = P_{pu}$$

Código en MATLAB:

```
% Límite de potencia mecánica del motor
x2=[-1:0.001:1];
```

```
Pmax/S
y2= (Pmax/S) + (0.*x2) ;
```

### 2.3.2.4. Límite de estabilidad en régimen permanente teórico

Es el límite de potencia activa máxima suministrada por el generador, sin que la máquina pierda estabilidad. Para ser representado el límite teórico en coordenadas cartesianas en el plano P-Q se utilizará la siguiente ecuación correspondiente a una Cisoide de Diocles:

$$P = \sqrt{\frac{(Q + k)^3}{(s - n) - Q}}$$

Para el límite práctico se realiza un desplazamiento de la curva en función del margen de seguridad del límite de estabilidad.

Código en MATLAB:

```
% Límite de estabilidad en régimen permanente teórico
x3=-s-n:0.0001:s-n;
y3=sqrt(((x3+k1).^3)./(s-n-x3));
a4=1
```

### 2.3.2.5. Límite teórico de mínima corriente de excitación

El límite teórico está dado por la semicircunferencia de radio  $s$  entre los límites  $-n - s < Q < -n + s$ , quedando  $n$  como centro de la circunferencia y dado por la ecuación:

$$P = \sqrt{s^2 - (Q + n)^2}$$

Del mismo modo que con el límite anterior el límite práctico sufre un desplazamiento en función del margen de seguridad práctico del límite mínimo de corriente de excitación.

Código en MATLAB:

```
% Límite de mínima corriente de excitación teórico
x5=-n-s:0.0001:-n+s;
y5=sqrt((s^2)-((x5+n).^2));
a5=1
```

### 2.3.2.6. Límite práctico de mínima corriente de excitación

Para determinar el límite práctico se considera que la curva de mínima corriente de excitación es un limacón de pascal el cual se desplazará en un porcentaje hacia la derecha para cubrir los efectos de magnetización del sistema de excitación.



### Código en MATLAB:

```
% Límite de mínima corriente de excitación práctico
x6a=(2*s.*cos(t).*cos(t))-k1;
y6a=(s.*sin(2.*t));
X6a=solve([0==(s*(sin(2*t1))),X1==(2*s*cos(t1)*cos(t1))-k1]);
X3=X6a.X1+(MSlex/100);
Sol1=solve([0==(m5*sin(t1))+(s*(sin(2*t1))),X3==(m5*cos(t1))+(2*s*cos(t1)
*cos(t1))-k1,t1==0]);
m11=Sol1.m5;
x6=(m11.*cos(t))+(2*s.*cos(t).*cos(t))-k1;
y6=(m11.*sin(t))+(s.*sin(2.*t));
a6=1
```

### 2.3.2.7. Límite de estabilidad en régimen permanente práctico

Para determinar el límite práctico se extienden en varias ocasiones la curva de mínima corriente de excitación, luego en el punto de intersección de estas curvas con el límite de estabilidad permanente teórico se desplaza hacia abajo un porcentaje, luego este punto se desplaza hacia la derecha y en el punto donde se cruce con su propia curva de mínima corriente de excitación se genera la curva de límite de estabilidad en régimen permanente práctico. Ver Figura 2.6.

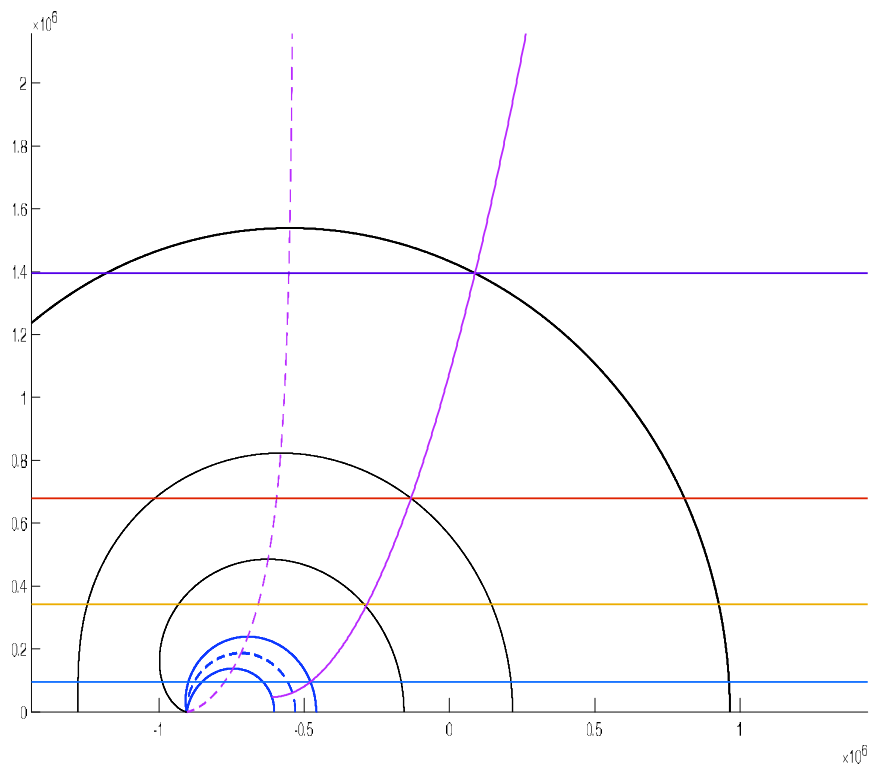


Figura 2.6: Límite de estabilidad en régimen permanente práctico

### Código en MATLAB:

```
% Límite de estabilidad en régimen permanente práctico
Sol8=solve([rho==2*s*tan(phi1)*sin(phi1),rho==m11+(2*s*cos(phi1))]);
rho8I=double(Sol8.rho);
phi8I=double(Sol8.phi1);
py1=rho8I.*sin(phi8I);
ypr1=py1(4)-(MSles/100);
Sol8=solve([rho==2*s*tan(phi1)*sin(phi1),rho==m2+(2*s*cos(phi1))]);
rho8I=double(Sol8.rho);
phi8I=double(Sol8.phi1);
py1=rho8I.*sin(phi8I);
ypr2=py1(4)-(MSles/100);
a7=1
Sol8=solve([rho==2*s*tan(phi1)*sin(phi1),rho==m4+(2*s*cos(phi1))]);
Sol8.rho;
rho8I=double(Sol8.rho);
phi8I=double(Sol8.phi1);
py1=rho8I.*sin(phi8I);
ypr4=py1(4)-(MSles/100);
Y=ypr1;
Sol9=solve([(X1^2)+(Y^2)-(2*s*X1))^2==(m11^2)*(X1^2+Y^2)]);
X2=double(Sol9)
P1=[(X2(4)-k1)*S,Y*S];

Y=ypr2;
Sol9=solve([(X1^2)+(Y^2)-(2*s*X1))^2==(m2^2)*(X1^2+Y^2)]);
X2=double(Sol9)
P2=[(X2(4)-k1)*S,Y*S];
Y=ypr4;
Sol9=solve([(X1^2)+(Y^2)-(2*s*X1))^2==(m4^2)*(X1^2+Y^2)]);
X2=double(Sol9)
P4=[(X2(4)-k1)*S,Y*S];
sol10=solve([(ypr1*S*1000==((P1(1)*1000)^2)*a)+(P1(1)*b*1000)+(c)],[ypr2
*S*1000==((P2(1)*1000)^2)*a)+(P2(1)*b*1000)+(c)],[ypr4*S*1000==((P4(1)*
1000)^2)*a)+(P4(1)*b*1000)+(c)]);
a1=double(sol10.a)
b1=double(sol10.b)
c1=double(sol10.c)
```

Tras ejecutar los comandos antes descritos, se obtienen las curvas mostradas en la Figura 2.7, las cuales son el resultado de los límites de operación de la máquina sincrónica.

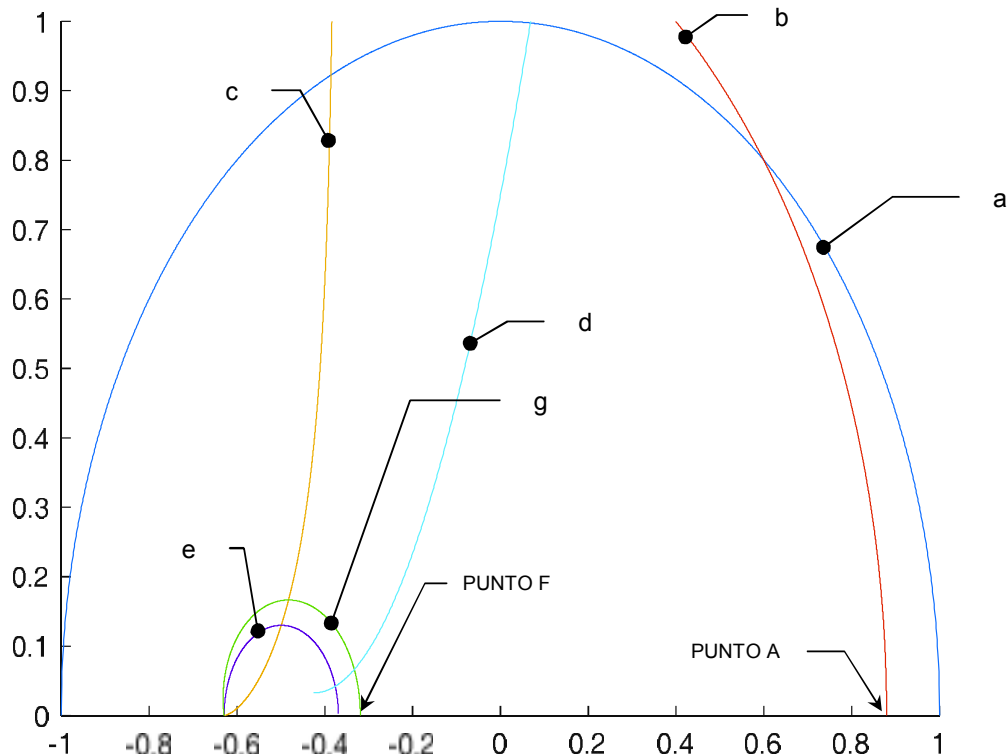


Figura 2.7: Curva de capacidad del generador STAMFORD modelo HCI634K modelada en Matlab. a. Límite de corriente de armadura, b. Límite de corriente de campo, c. Límite teórico de estabilidad en régimen permanente, d. Límite práctico de estabilidad en régimen permanente, e. Límite teórico de mínima corriente de excitación, g. Límite práctico de mínima corriente de excitación.

Con las ecuaciones planteadas se requiere determinar los puntos donde estas 6 curvas se intersecan, para ello se hace uso de la herramienta SOLVE de Matlab. (Se adjunta el código completo en el ANEXO IV).

Luego de ejecutar el código completo con la herramienta Matlab, donde se ingresan todos los datos técnicos del generador, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Resultados del modelamiento de la curva de capacidad del generador STAMFORD modelo HCI634K

Margen de estabilidad permanente	Margen de mínima corriente de excitación	PUNTO F	PUNTO A
%	%	KVAr	KVAr
10	5	-265.24	867

Se observa que el compensador sincrónico a instalarse podrá operar en un rango desde -265 kVAr hasta 867 kVAr.

En el ANEXO V se muestra el resultado del modelamiento realizado en Matlab, bajo la herramienta GUIDE. En el ANEXO IV se adjunta el código respectivo.

### **2.3.3. Diseño eléctrico del sistema de arranque del compensador sincrónico**

El sistema eléctrico de arranque estará formado por un conjunto de equipos que permitan que la máquina sincrónica salga del reposo y llegue a la velocidad nominal. Adicional se deberá elevar el voltaje del estator a través de un sistema de excitación propio de la máquina sincrónica.

Para este propósito CELEC EP cuenta con los siguientes equipos:

1. Motor de arranque: Este equipo será el encargado de proveer la potencia necesaria al compensador sincrónico durante el tiempo de subida. Una vez que el compensador sincrónico se encuentre en paralelo a la red eléctrica el motor de arranque se apagará. Este motor se alimentará con el voltaje y corriente proveniente de un variador de velocidad.
2. Embrague magnético: Este equipo será el encargado de unir el motor de arranque con el compensador sincrónico durante el tiempo de subida, una vez que el compensador sincrónico se encuentre en paralelo a la red eléctrica, el embrague se abrirá. Para su conexión se alimentará con 90 VDC provenientes de un banco de baterías existente en la central térmica.
3. Regulador Automático de Voltaje (AVR) Basler Electric DECS 250: Este equipo de regulación de voltaje se alimentará con 220 VAC directamente desde el PMG (generador de imanes permanentes) ubicado en la máquina sincrónica. Una vez que el DECS 250 rectifique el voltaje AC proveniente del PMG, alimentará con voltaje DC a la excitatriz de diodos rodantes para que esta a su vez magnetice la bobina de campo del rotor y se induzca una corriente en las bobinas del estator, generando la subida de voltaje en los terminales del compensador sincrónico.

Mediante el control de la corriente de campo, el AVR DECS 250 realizará las siguientes acciones:

- Antes de la sincronización, elevará el voltaje del compensador sincrónico a su valor nominal.
  - Mediante un módulo de sincronismo, verificará que tanto la frecuencia como el voltaje de la red eléctrica y del compensador sincrónico sean iguales y actuará sobre la bobina de cierre del interruptor principal para realizar el sincronismo.
  - Mediante un módulo de protecciones eléctricas, realizará la verificación de parámetros eléctricos con el fin de proteger ante una eventual falla, para lo cual actuará sobre la bobina de apertura del interruptor principal.
  - Permitirá que el compensador sincrónico opere dentro de los límites operativos detallados en la curva de capacidad.
  - Mediante un módulo especial realizará el control de voltaje de la red eléctrica en modo isócrono, con el objetivo de responder más rápido que las demás maquinas sincrónicas conectadas en el sistema eléctrico.
4. Variador de velocidad marca VACON. Este equipo permitirá que el motor de arranque aumente su velocidad gradualmente en un tiempo de subida igual a 14.75 minutos. Su operación está basada en elementos estáticos que generan una onda PWM la cual oscila de acuerdo con la frecuencia en la cual se desea que opere el motor de arranque. Este equipo será alimentado con un voltaje de 480 VAC provenientes de la red eléctrica y aportará con un voltaje de 380 VDC hacia el motor de arranque.

En la Figura 2.8 se describen de manera general las conexiones del sistema eléctrico del compensador sincrónico, en el ANEXO VII se encuentran planos eléctricos del sistema.

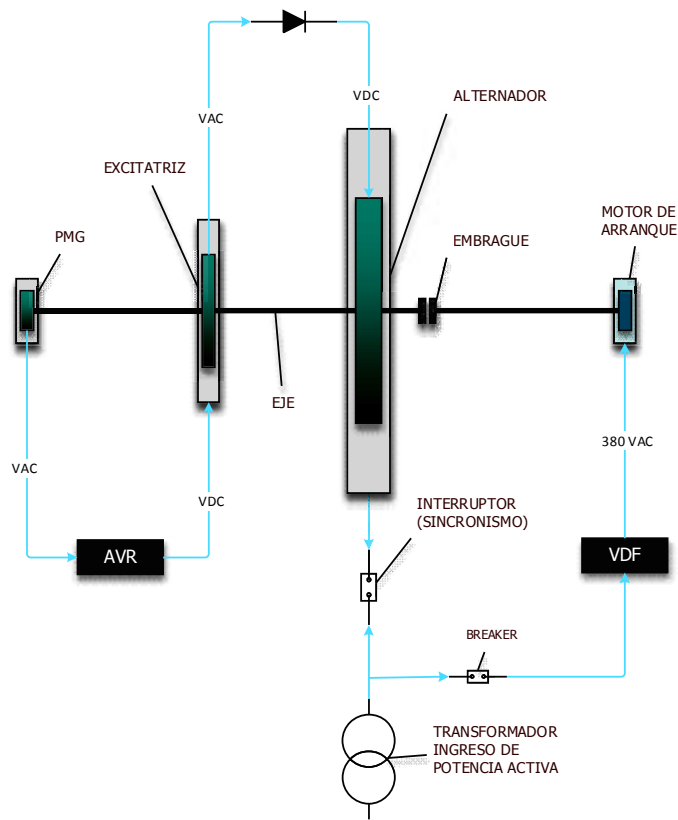


Figura 2.8: Esquema general de conexiones eléctricas.

En el ANEXO VIII se detalla el flujo de información que manejará el compensador síncrono para la secuencia de arranque. Adicional en el ANEXO IX se detallan los procedimientos de arranque y parada.

Con el objetivo de verificar el comportamiento del compensador síncrono en el sistema eléctrico de potencia de San Cristóbal, se realizó un modelamiento matemático con la herramienta ETAP. Para esto, en el año 2015, CELEC EP Termopichincha contrató un estudio eléctrico de flujos de potencia, corrientes de cortocircuito y protecciones eléctricas, mismo que fue realizado en ETAP. A partir de este estudio se incorpora las dos nuevas unidades SKL de 1700 kW, mismas que ingresaron a inicios del año 2017, adicional se integra al compensador síncrono.

Existen dos escenarios importantes sobre el funcionamiento del compensador síncrono, el primero involucra la sincronización del compensador a la red eléctrica, y el segundo ataca una salida súbita del sistema eléctrico a máxima carga reactiva (867 kVAr de acuerdo a lo calculado en la curva de capacidad).

En el primer escenario, el modelamiento se hace innecesario ya que el sistema de control del compensador sincrónico está programado para sincronizar con la red eléctrica justamente con un desfase de voltaje y frecuencia de cero, adicional a esto, su tipo de control es isócrono de voltaje, es decir, él mantiene al voltaje de la red en un valor fijo.

Por otro lado, el segundo escenario es importante modelarlo, para ello en la Figura 2.9 se puede observar el diagrama unifilar con el modelamiento respectivo. Para esta simulación se toma el escenario real del 6 de diciembre del 2018, el cual involucra las siguientes condiciones:

Tabla 2.7: Datos previos al modelamiento para verificación estabilidad del sistema eléctrico. (Para este modelamiento el compensador se encuentra en su máxima carga reactiva).

<b>Unidades Operativas</b>	<b>Potencia Activa</b>	<b>Potencia Reactiva</b>
	<b>kW</b>	<b>kVAr</b>
Unidad térmica 3	331	30
Unidad térmica 7	853	312
Unidad eólica 2	222	-178
Unidad eólica 3	359	283
Compensador	0	867

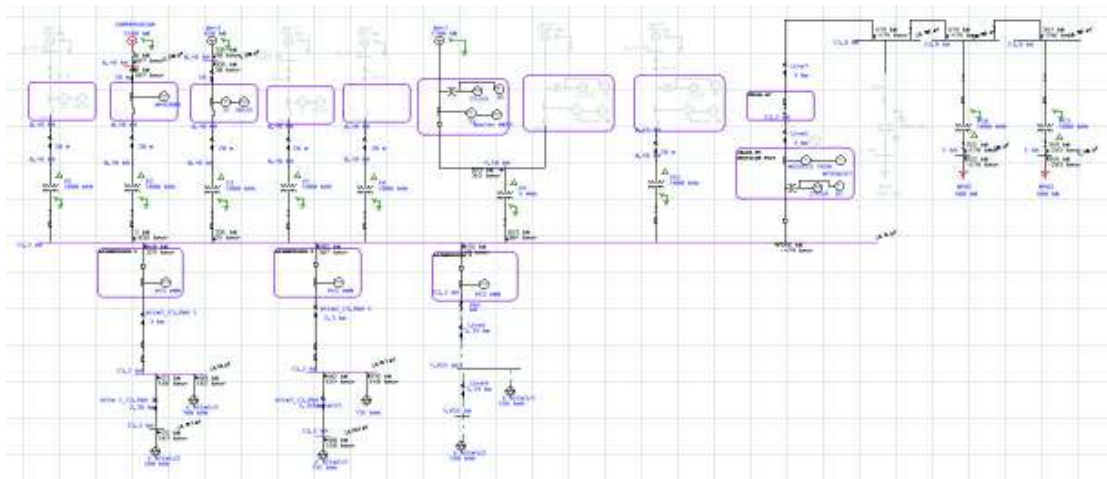


Figura 2.9: Diagrama unifilar del sistema eléctrico de San Cristóbal, con el compensador sincrónico incorporado

Como resultado de este modelamiento se obtuvieron los siguientes gráficos:

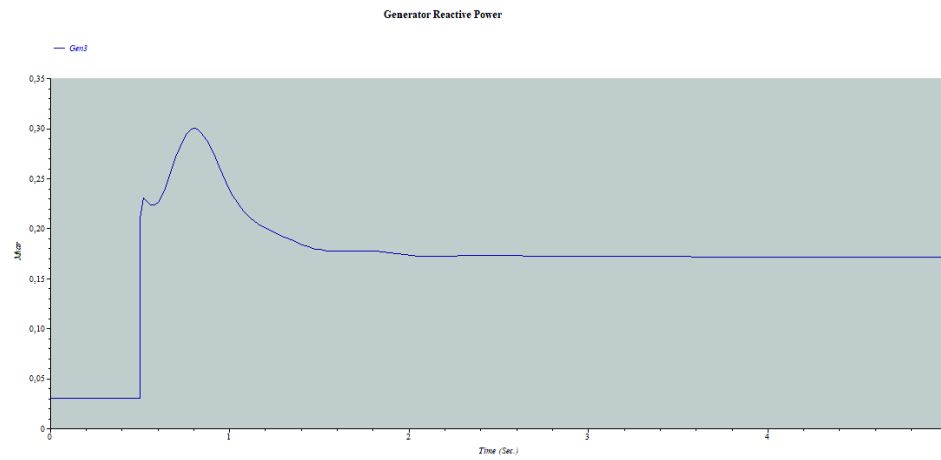


Figura 2.10: Potencia reactiva del generador 3, oscilación de 320 kVAr aproximadamente, estabilización en 1 segundos

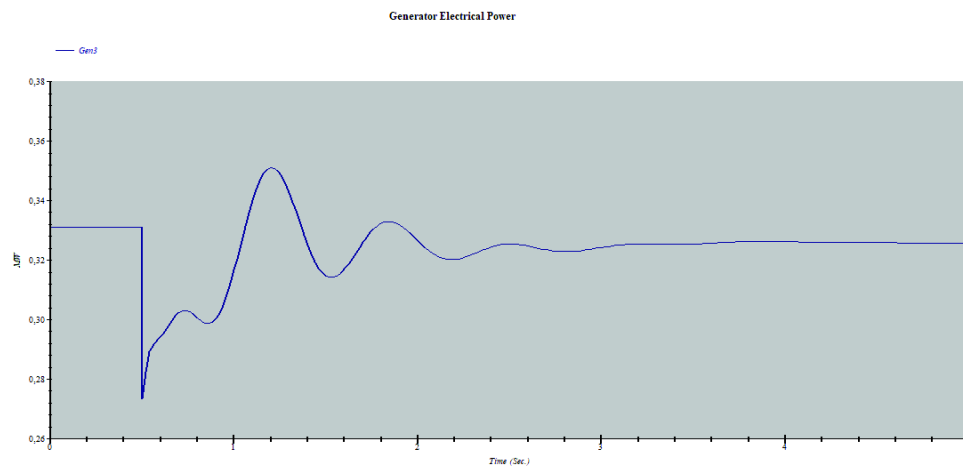


Figura 2.11: Potencia activa del generador 3, oscilación entre -350 kW y 350 kW aproximadamente, estabilización en menos de 3 segundos.



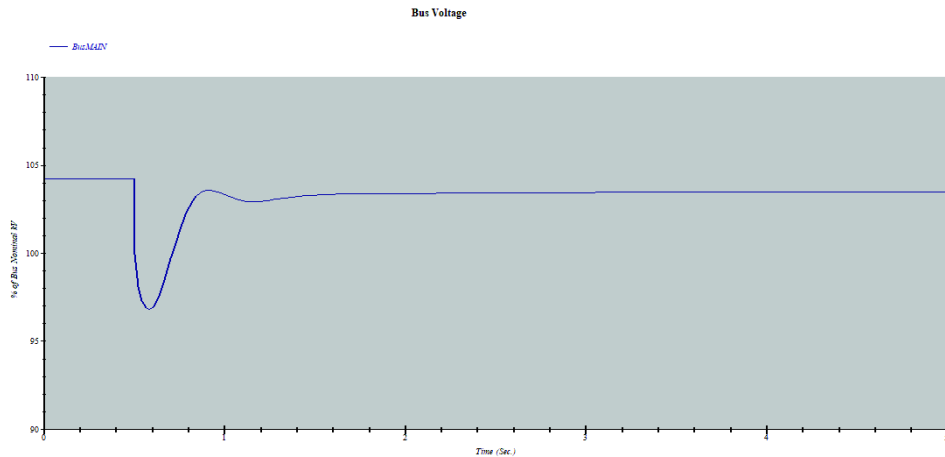


Figura 2.12: Voltaje en la barra principal, oscilación de 104% a 97%, estabilización en menos de 2 segundos.

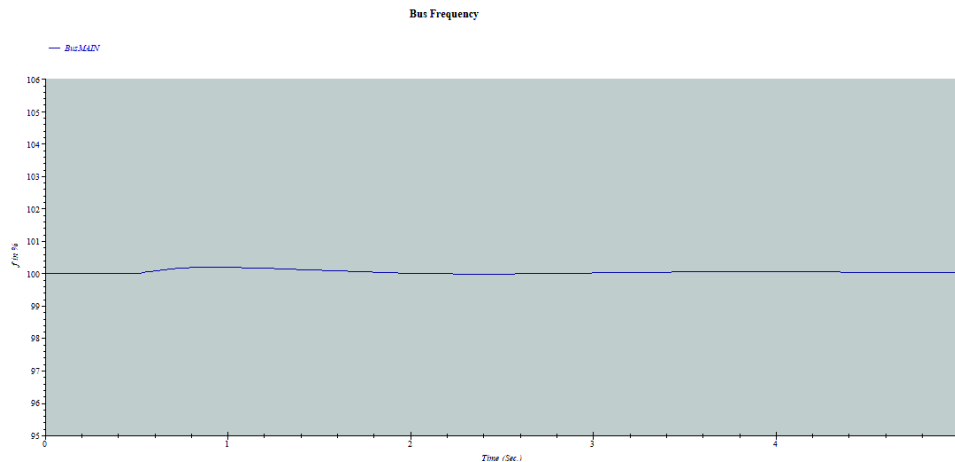


Figura 2.13: Frecuencia en la barra principal, oscilación imperceptible.

Con esto se demuestra que para el peor de los escenarios, el compensador no influirá con la estabilidad del sistema eléctrico de potencia en San Cristóbal.

#### 2.3.4. Construcción del sistema mecánico de arranque del compensador sincrónico

Como se indicó, la unidad de generación a ser utilizada sufrió un daño irreparable en el motor de combustión interna, por lo que se procede al desmontaje de la máquina sincrónica de esta unidad de generación.

Para la construcción de las partes mecánicas, se consideran las potencias calculadas en el ítem 3.3.1, estos cálculos permiten localizar los equipos necesarios en las diferentes centrales térmicas a cargo de CELEC EP Termopichincha. CELEC EP dispone de los siguientes elementos:

- 1) Un motor de inducción, trifásico, marca MEIDENSHA, de 30 kW de potencia nominal que opera a 60 Hz y 1760 RPM, se alimenta con un voltaje de 380 V y trabaja con factor de potencia de 0.8. El eje de transmisión es de acero de transmisión y tiene 50 mm de diámetro.
- 2) Un embrague magnético marca WARNER ELECTRIC, modelo PC-1225 Normal Duty, con torque máximo de 630.45 Nm. Este equipo se magnetiza con un voltaje de 90 VDC, en la Figura 2.14 se puede observar el despiece del embrague referido, el cual en estado normal mantiene a la bobina desenergizada, haciendo que la armadura y la bobina se encuentren separados automáticamente una distancia de 0.8 de mm por efecto de los resortes de los accesorios de auto separación, cuando la bobina se energiza con 90 VDC la armadura se desplaza hasta unirse fuertemente con la bobina, haciendo que estas dos piezas unan los ejes que se encuentran acoplados a ellas y permitiendo que ambas roten a la misma velocidad angular.
- 3) Un rodamiento 6319.
- 4) Una bicha de seguridad de 90 mm de diámetro interior.

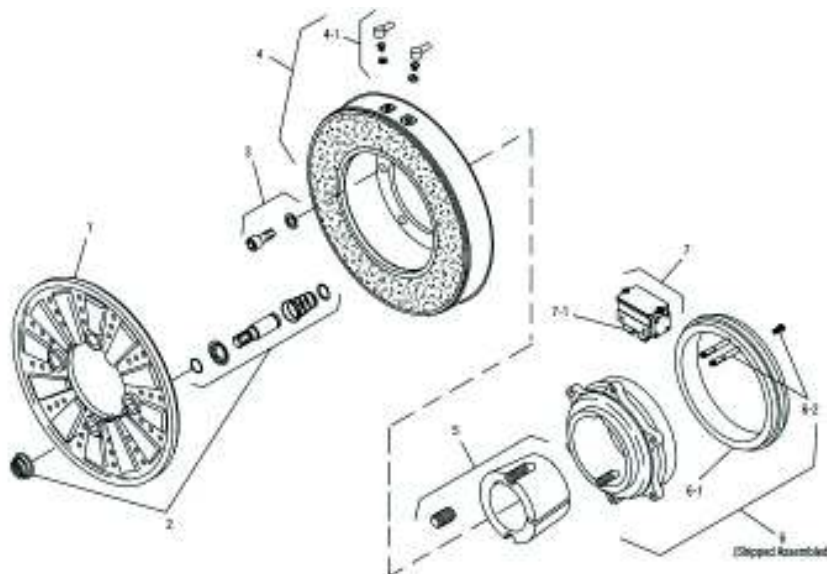
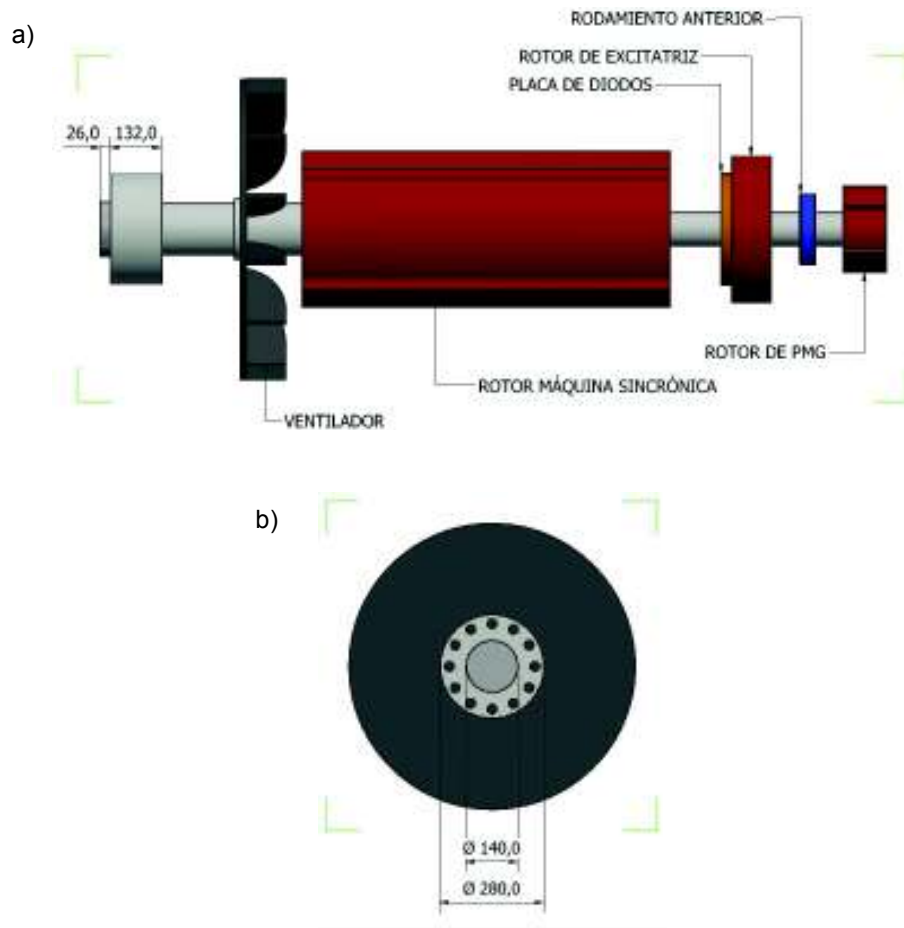


Figura 2.14: Despiece del embrague magnético PC-1225. 1: Armadura, 2: Accesorios de auto separación, 3: Accesorios de montaje, 4: Bobina, 5: Conector, 6: Anillos rozantes, 7: Carbones  
Fuente [22, p. 82]

Para llevar a la máquina sincrónica a su velocidad nominal es necesario construir varias piezas que integren un sistema de arranque, para ello, en primer lugar se realiza un levantamiento de dimensiones del conjunto rotórico, obteniéndose como resultado las dimensiones detalladas en la Figura 2.15. (Todos los gráficos han sido realizados en Inventor de Autodesk).

Para la construcción del sistema de arranque se ejecutan los trabajos en conjunto con el Departamento de Mantenimiento Mecánico de la Central Térmica Guangopolo, quienes basados en experiencia y dimensiones originales de los elementos rotativos tales como eje del motor de arranque, eje del rotor del generador y diámetros internos de los rodamientos, realizan la construcción.

En la Figura 2.16 se puede observar la vista isométrica frontal y trasera del conjunto rotórico de la máquina sincrónica a utilizar.



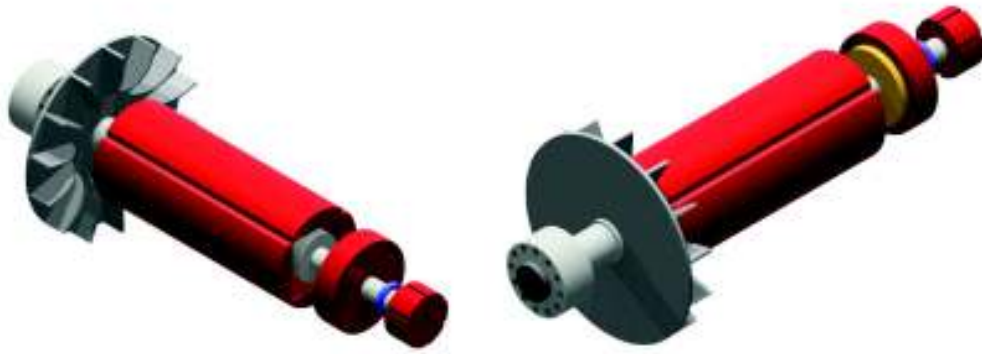


Figura 2.15: Conjunto rotórico de la máquina sincrónica. a) Vista superior, descripción de las artes.  
b) Vista trasera, dimensiones de los ejes de acople.

Figura 2.16: Vista isométrica del conjunto rotórico de la máquina sincrónica

Se observa que en el extremo posterior del rotor de la máquina sincrónica existe un eje con diámetro de 280 mm, el cual tiene 12 orificios repartidos uniformemente alrededor del mismo. Se observa un segundo eje de 140 mm de diámetro que sobresale del primero con 27 mm. Este conjunto de ejes son los que permiten la unión del conjunto rotórico de la máquina sincrónica con el eje del cigüeñal del motor de combustión interna, ambos se unen mediante 12 pernos de sujeción.

El conjunto rotórico de la máquina sincrónica posee un rodamiento 6017 en la parte anterior del mismo, pero en la parte posterior no dispone de sistema de apoyo independiente. En operación normal, es decir cuando esta máquina se encuentra operando integrada a un motor de combustión interna, la parte posterior se apoya sobre el primer cojinete de bancada del cigüeñal del motor de combustión interna.

#### **2.3.4.1. Unión: rotor – embrague – motor de arranque**

Se define a esta pieza como el eje principal del compensador sincrónico, el cual unirá el conjunto rotórico de la máquina sincrónica con el embrague magnético, para su construcción se considera lo siguiente: (Referirse a la Figura 2.17).

- a) Un extremo del eje principal tendrá un diámetro de 280 mm y 12 orificios repartidos de igual manera que el extremo posterior del eje del rotor de la máquina sincrónica. Sobre este eje se considera un cilindro hueco de 27 mm de profundidad y de 140 mm de diámetro.

- b) En la mitad del eje principal se reducirá el diámetro a 95 mm con el fin de que sobre esta sección se introduzca el rodamiento 6319 que servirá para apoyo posterior de la máquina sincrónica. Para evitar un desplazamiento axial se incluye una bincha de seguridad de 90 mm de diámetro interno.
  
- c) El otro extremo del eje principal se reducirá en diámetro a 50 mm para que sobre esta sección del eje se introduzca una brida de 50 mm de diámetro interno, el ajuste entre estas piezas se lo realizará con una chaveta. La brida será de 185mm de diámetro externo, tendrá 4 huecos distribuidos con igual geometría que los existentes en la armadura del embrague magnético. (Ver Figura 2.18).

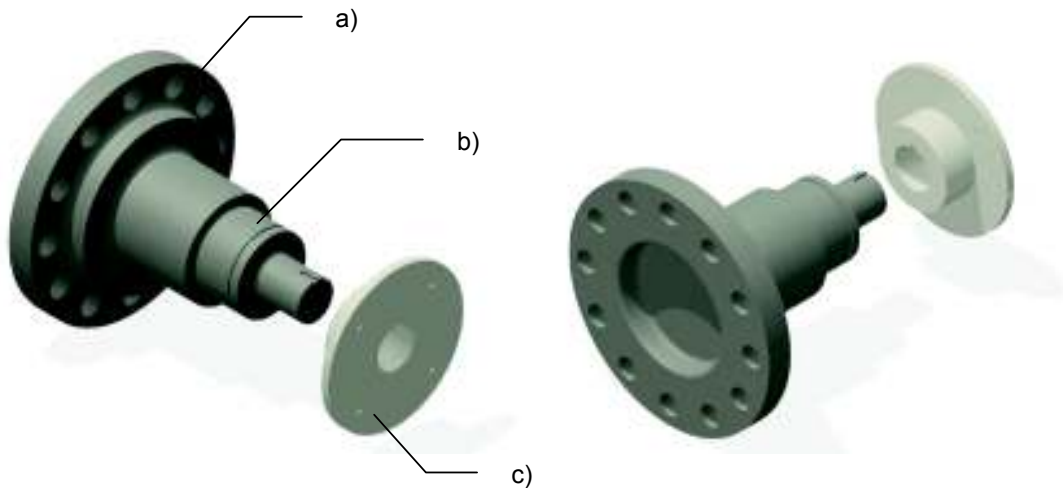


Figura 2.17: Eje principal del compensador sincrónico

Para la unión del embrague magnético con el eje del motor de arranque se utilizará el conector cónico propio del embrague, el cual tiene hueco de 50mm de diámetro interno. Se ajusta al eje del motor de arranque a través de 3 espárragos y una chaveta. (Ver Figura 2.18).



Figura 2.18: Embrague magnético

#### 2.3.4.2. Apoyo posterior del compensador sincrónico

Para construir esta pieza se realizan las siguientes consideraciones:

- 1) Se utilizará como soporte principal la carcasa original que unía al rotor del generador con el motor de combustión interna. Esta carcasa servía para cubrir al volante del motor de combustión interna, al mismo tiempo que soportaba 2 motores eléctricos de arranque y 2 sensores magnéticos de velocidad. La misma

ha sido dibujada en la Figura 2.19. Ahora esta carcasa se unirá al estator de la máquina sincrónica a través de pernos de sujeción.

- 2) Para soportar el rodamiento 6319 se construye una pieza de diámetro externo de 250mm, la cual será soldada a una plancha de hierro fundido de 30mm de espesor, y esta a su vez se sujetará por medio de 10 pernos a la carcasa mencionada anteriormente.

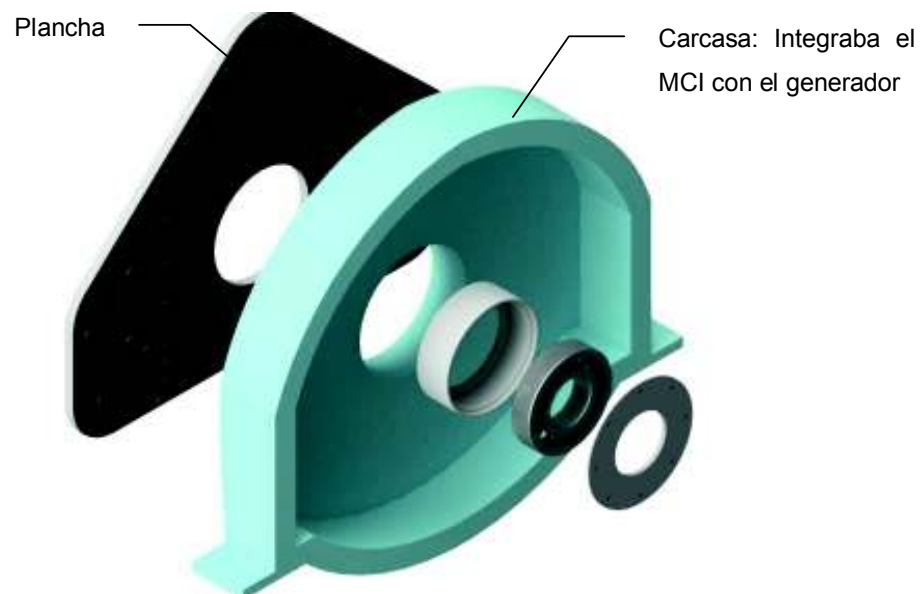


Figura 2.19: Despiece del sistema de apoyo posterior del compensador sincrónico.

En: Figura 2.20, Figura 2.21 y ANEXO III Se muestran los detalles del sistema de arranque del compensador sincrónico.



Figura 2.20: Vista frontal, corte del sistema de apoyo del rodamiento posterior.

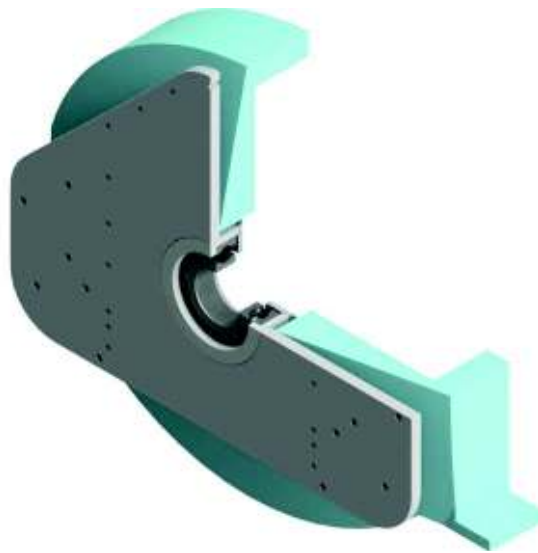


Figura 2.21: Vista trasera, corte del sistema de apoyo del rodamiento posterior.



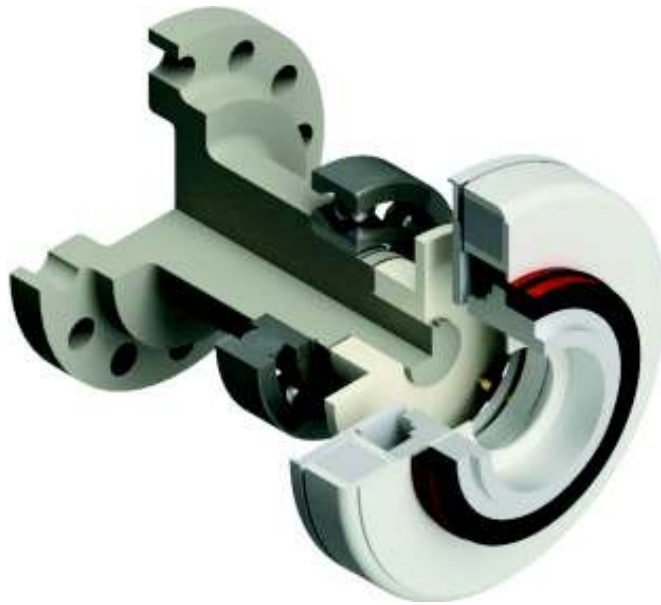


Figura 2.22: Corte isométrico del sistema de integración del rotor de la máquina sincrónica y el motor de arranque



Figura 2.23: Vista isométrica del ensamble del rotor del compensador sincrónico, embrague magnético, eje principal, rodamientos y motor de arranque.

Para la construcción de las piezas del sistema de arranque se ha utilizado un torno que actualmente está disponible en el taller de mantenimiento mecánico de la central térmica Guangopolo, para ello se han utilizado los siguientes materiales:

Tabla 2.8: Materiales de las piezas a fabricar para el sistema de arranque del compensador sincrónico

Detalle	Material utilizado
Figuras: 3-17 a) y 3-17 b)	Pieza de 300mm de diámetro x 350mm de largo de acero de transmisión SAE 1045 (No se encontró acero de transmisión SAE 1018 en el mercado para las dimensiones requeridas)
Figura: 3-17 c)	Hierro, eje de 200mm de diámetro x 50mm de largo.
Figura: 3-19	Plancha de hierro de 30mm de ancho
Piezas que acogen el rodamiento detallado en la Figura 2.19	Pieza de 250mm de diámetro x 100mm de largo de acero de transmisión SAE 1018.

En el ANEXO VI se adjunta el registro fotográfico que respalda la construcción de las piezas detalladas.

Para respaldar la construcción de las piezas construidas se realizan los siguientes cálculos:

$$w = 1800 \text{ RPM} = 188.5 \text{ s}^{-1}$$

$$T_{max} = \frac{P_{max}(\text{del motor})}{w} = \frac{30 \text{ kW}}{188.5 \text{ s}^{-1}} = 159.15 \text{ Nm}$$

De [23] sabemos que:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Donde:

G: Módulo de rigidez o módulo de corte.

E: Módulo de Young o módulo de elasticidad. (Para el acero de transmisión SAE 1045 es de 200 [GPa])

$\nu$ : Relación de poisson (Para el acero de transmisión SAE 1045 es de 0.3)

$$G = \frac{200 \text{ GPa}}{2(1 + 0.3)} = 76.92 \text{ GPa}$$

De [23] se conoce que:

$$\theta = \frac{T \times l}{G \times J}$$

Y que:

$$J = \frac{\pi \times d^4}{32}$$

Donde:

$\theta$ : Ángulo de giro

T: Torque

l: Longitud de la sección del eje

G: Módulo de rigidez o módulo de corte

J: Segundo momento polar del área

d: diámetro de la sección del eje.

Por tanto, con la ayuda de la Figura 2.24 se obtiene que:

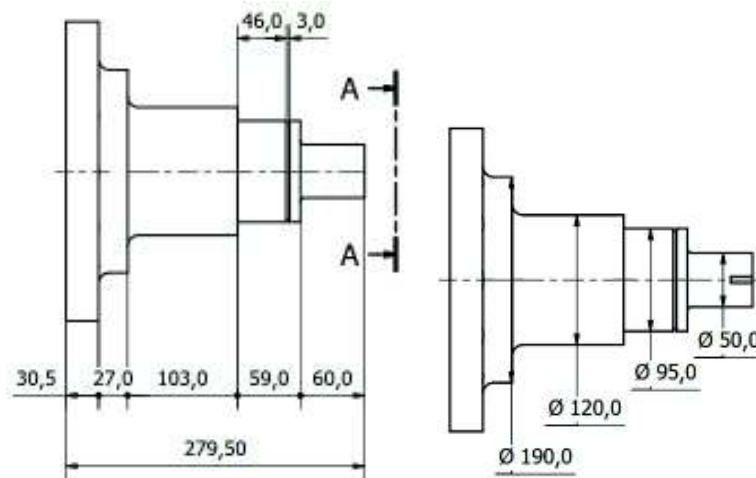


Figura 2.24: Dimensiones del eje principal del sistema de arranque

$$\theta = \frac{32 \times T}{G \times \pi} \times \frac{l}{d^4}$$

Considerando que existen 5 secciones diferentes en el eje, se suman sus ángulos de giro.

$$\theta = \frac{32 \times 159.15 \text{ Nm}}{76.92 \text{ E}^9 \text{ Pa} \times \pi} \times \left( \frac{30.5 \text{ E}^{-3} \text{ m}}{(280 \text{ E}^{-3})^4 \text{ m}^4} + \frac{27 \text{ E}^{-3} \text{ m}}{(190 \text{ E}^{-3})^4 \text{ m}^4} + \frac{103 \text{ E}^{-3} \text{ m}}{(120 \text{ E}^{-3})^4 \text{ m}^4} + \frac{59 \text{ E}^{-3} \text{ m}}{(95 \text{ E}^{-3})^4 \text{ m}^4} + \frac{60 \text{ E}^{-3} \text{ m}}{(50 \text{ E}^{-3})^4 \text{ m}^4} \right) = 0.23 \text{ E}^{-3} \text{ grados} \approx 0^\circ$$

Se observa que no existe deflexión torsional.

Para calcular el esfuerzo de corte máximo se tomará como caso de estudio la sección más pequeña de eje, es decir la sección de 50 mm.

Para este cálculo se requiere conocer que:

*d = diámetro de la sección más pequeña en el eje = 50 mm*

*D = diámetro de la sección que antecede a d = 95 mm*

*r = radio de acuerdo entre secciones del eje*

*= 2 mm (Dependen de la cuchilla utilizada en el torno)*

$$\frac{r}{d} = 0.04 \text{ y } \frac{D}{d} = 1.9$$

De acuerdo a lo indicado en la Figura 2.25,  $K_T$  es igual a 1.8.  $K_T$  o  $K_{ts}$  es el factor de concentración del esfuerzo.

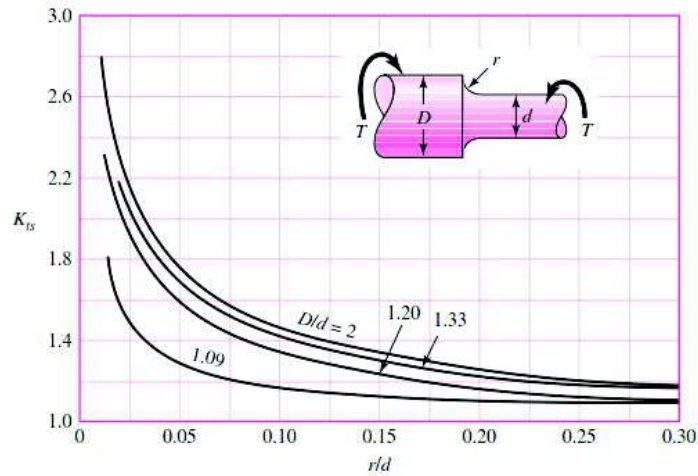


Figura 2.25: Eje redondo con filete en el hombro en torsión.  $\tau_0 = Tc/J$ , donde  $c = d/2$  y  $J = \pi d^4/32$ .  
Fuente: [23]

De [23] sabemos que:

$$K_f = 1 + q(K_T - 1)$$

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

$$\begin{aligned} \sqrt{a} = & 0.245799 - 0.307794(10^{-2})S_{ut} \\ & + 0.150874(10^{-4})S_{ut}^2 - 0.266978(10^{-7})S_{ut}^3 \end{aligned}$$

Donde:

$K_f$ : Factor de concentración del esfuerzo por fatiga

$q$ : Sensibilidad a la muesca

$\sqrt{a}$ : Constante de Neuber ( $S_{ut}$  debe estar en kPSI)

$S_{ut}$ : Coeficiente de esfuerzo máximo (Para el acero AISI 1045 este valor es de 565 MPa o 81.9 kPSI).

Reemplazando, tenemos que:

$$\begin{aligned} \sqrt{a} = & 0.245799 - 0.307794(10^{-2}) \times 81.9 \\ & + 0.150874(10^{-4})81.9^2 - 0.266978(10^{-7})81.9^3 = 0.08 \end{aligned}$$

$$q = \frac{1}{1 + \frac{0.08}{\sqrt{2}}} = 0.95$$

$$K_f = 1 + 0.95(1.8 - 1) = 1.76$$

Por otra parte, de [23] se conoce que:

$$\tau_{max} = \frac{P \times k_t \times d}{J \times \omega}$$

Donde:

$\tau_{max}$ : Esfuerzo cortante máximo

P: Potencia del motor de arranque

$K_T$ : Factor teórico o geométrico de la concentración de esfuerzos

d: Diámetro

J: Segundo momento polar del área

w: Velocidad máxima del eje

$$\tau_{max} = \frac{30 E^3 \frac{Nm}{s} \times 1.8 \times 50 E^{-3} m}{\frac{\pi \times (50 E^{-3} m)^4}{32} \times 188.5 s^{-1}} = 23,34 MPa$$

Se observa que el esfuerzo cortante máximo (23.34 MPa) es mucho menor que el módulo de rigidez o módulo de corte del acero de transmisión (76.92 GPa).

De [23] conocemos que:

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[ 4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[ 4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Consideramos que todo lo alternante es nulo, pues va a trabajar a máxima carga de diseño y no hay ni engranes ni poleas. Por otra parte, se calculó que la deflexión es prácticamente cero, por lo tanto,  $M_m$  es despreciable. Con estas consideraciones la ecuación anterior nos quedaría:

$$d = \left( \frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_{ut}} \left[ 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

d: Diámetro

n: Factor de seguridad (Consideraremos un escenario conservador, es decir un factor de 2.5)

$K_{fs}$ : Factor de concentración del esfuerzo por fatiga (Igual a  $K_f$ )

$T_m$ : Par de torsión medio (Para el peor escenario, este dato es igual a  $T_{max} = 159.15 \text{ Nm}$ ).

Reemplazando tenemos que:

$$d = \left( \frac{16 \times 2.5}{\pi} \left\{ \frac{1}{565 \text{ E}^6 \text{ Pa}} [3(1.76 \times 159.15 \text{ Nm})^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} = 22.19 \text{ mm}$$

Es decir, que con un eje de 22.19 mm tendríamos un factor de seguridad conservador de 2.5, por lo tanto, al tener un diámetro de 50 mm como sección mínima, aseguramos que el factor de seguridad va a estar muy por arriba de lo necesario.

Con respecto a los pernos que unen el eje rotórico del generador y el eje principal, se utilizaron los mismos 12 pernos del diseño original, estos pernos tienen las siguientes características:

Pernos M24 de 20 mm de diámetro y de 8.8 grados de resistencia.

De la hoja técnica de los pernos se pudo determinar que:

Resistencia de prueba: 600 MPa

Resistencia mínima de tensión: 830 MPa

Resistencia mínima de fluencia: 660 MPa

Se conoce que:

$$T = F \times l$$

Donde:

T: Toque máximo.

F: Fuerza aplicada en cada perno

L: Distancia desde el centro del eje hasta el centro del perno. (115 mm)

$$T = 12 \times F \times l$$
$$F = \frac{T}{12 \times l} = \frac{159.15 \text{ Nm}}{12 \times 115 \text{ E}^{-3} \text{ m}} = 115.33 \text{ N}$$

Por otra parte, en [23], se dice que para conexiones permanentes, la precarga del perno ( $F_i$ ) es:

$$F_i = 0.9F_p = 0.9 \times A_t \times S_p = 0.9 \times A_t \times 0.85 \times S_y$$

Donde:

$F_i$ : Fuerza de precarga del perno

$A_t$ : Área transversal del perno (radio de 10 mm)

$S_p$ : Resistencia de prueba

$S_y$ : Resistencia de mínima fluencia

Reemplazando:

$$F_i = 0.9 \times \pi \times (10 \text{ E}^{-3})^2 \text{ m}^2 \times 0.85 \times 660 \text{ E}^6 \text{ Pa} = 0.16 \text{ MN}$$

Por otro lado, la fuerza de aplastamiento del perno está definida por:

$$F = \frac{12 \times t \times d \times S_p}{n_d}$$

Donde:

$t$ : espesor de la placa más delgada

$d$ : diámetro del perno

$n_d$ : Factor de seguridad (Para este caso se trabajará con un factor de seguridad conservador de 2.5)

Reemplazando,

$$F = \frac{12 \times 30.5 \text{ E}^{-3} \text{ m} \times 20 \text{ E}^{-3} \text{ m} \times 600 \text{ E}^6 \text{ Pa}}{2.5} = 1,76 \text{ MN}$$

La fuerza de aplastamiento del elemento está dada por:

$$F = \frac{12 \times t \times d \times S_y(\text{elemento})}{n_d}$$
$$F = \frac{12 \times 30.5 \text{ E}^{-3} \text{ m} \times 20 \text{ E}^{-3} \text{ m} \times 310 \text{ E}^6 \text{ Pa}}{2.5} = 2,26 \text{ MN}$$



Y la fuerza cortante del perno, está dada por:

$$F = \frac{0.577 \times \pi \times d^2 \times S_p}{n_d}$$

$$F = \frac{0.577 \times \pi \times (20 \text{ E}^{-3})^2 \text{ m}^2 \times 600 \text{ E}^6 \text{ Pa}}{2.5} = 174019 \text{ N}$$

Por tanto se ha calculado que la fuerza aplicada en cada perno (115.33 N) es mucho menor que la fuerza cortante del perno (174019 N). Lo cual nos asegura que los pernos trabajarán sin ninguna novedad.

Por otra parte, en la Figura 2.26 se puede observar un corte transversal del conjunto rotórico y el eje fabricado. Aquí se aprecian:

$W_R$ : Peso del rotor = 1093 Kgf = 10,71 kN

$W_F$ : Peso del eje fabricado = 150 Kgf = 1,47 kN

$L_R$  = 1491,38 mm

$L_F$  = 300 mm

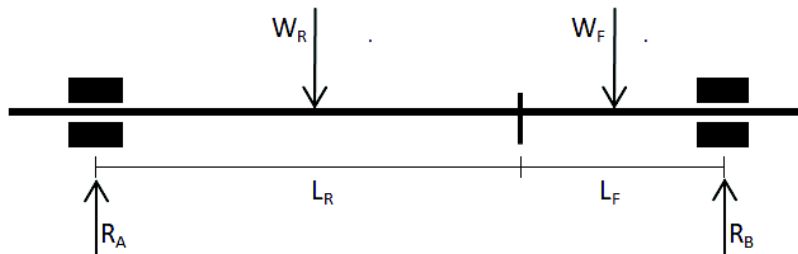


Figura 2.26: Corte del Compensador Síncronico

Haciendo un diagrama de cuerpo libre, se obtiene que:

$$\sum M_A = 0$$

$$R_B \times (L_R + L_F) - W_R \times \frac{L_R}{2} - W_F \times \left( L_R + \frac{L_F}{2} \right) = 0$$

$$R_B = \frac{10,71 \text{ kN} \times \frac{1,49 \text{ m}}{2} + 1,5 \text{ kN} \times \left( 1,49 \text{ m} - \frac{0,3 \text{ m}}{2} \right)}{1,49 \text{ m} + 0,3 \text{ m}}$$

$$R_B = 5,58 \text{ kN}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A + R_B - W_R - W_F = 0$$

$$R_A = 10,71 \text{ kN} + 1,5 \text{ kN} - 5,58 \text{ kN} = 6,63 \text{ kN}$$

Como se indicó anteriormente, el rodamiento utilizado para la construcción del soporte en el punto B, fue un rodamiento 6319, mismo que tiene los siguientes datos definidos en su hoja técnica:

C: Coeficiente de carga dinámico = 155,9 kN

C<sub>0</sub>: Coeficiente de carga estático = 115,7 kN

Podemos observar que la carga aplicada en el punto B, (R<sub>B</sub>), es mucho menor que el límite permitido por el rodamiento instalado en el punto B.

Por otra parte la vida de fatiga se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$L_A = \left(\frac{C}{R_A}\right)^3 = \left(\frac{155,9}{6,63}\right)^3 = 13 \text{ E}^3 \text{ millones de revoluciones}$$

$$L_B = \left(\frac{C}{R_B}\right)^3 = \left(\frac{155,9}{5,58}\right)^3 = 21,8 \text{ E}^3 \text{ millones de revoluciones}$$

Conocemos que el sistema de arranque opera únicamente de manera esporádica y únicamente durante 14,75 minutos. Suponiendo que el sistema de arranque operaría de manera continua, podríamos decir que:

$$\frac{1800 \text{ revoluciones}}{1 \text{ minuto}} \times 525600 \text{ minutos en un año} = 946080 \text{ E}^3 \text{ revoluciones en un año}$$

Es decir que bajo estas consideraciones extremas el rodamiento utilizado, antes de fatigarse podría operar:

$$\frac{21,8 \text{ E}^3 \text{ millones de revoluciones}}{946080 \text{ E}^3 \text{ revoluciones en un año}} = 23 \text{ años}$$

## **2.4. Diseño del sistema de control para repartición de carga activa y reactiva, integración de unidades térmicas al SCADA híbrido**

Paralelo a la construcción del compensador sincrónico se ha visto la necesidad de integrar a las cuatro unidades térmicas que no forman parte del algoritmo de control de potencia reactiva que realizan los PLC's de los aerogeneradores. Para ello, en seis de las siete unidades térmicas se instala un controlador de grupo marca Comap modelo Intelligen, mismo que permite la comunicación bidireccional desde y hacia los aerogeneradores, del mismo modo estos controladores de grupo permiten realizar un reparto de carga activa y reactiva entre todos los generadores térmicos. En la unidad No. 5 no se ha instalado un controlador de grupo, debido a que el sistema de control actual referente a esta unidad permite realizar un control de potencia activa fija (carga base), lo cual es una herramienta bastante útil que es una alternativa para los operadores el momento de controlar la potencia activa entre los grupos térmicos y eólicos. Por otro lado se ha se ha integrado la información de las siete unidades térmicas en un sistema SCADA local desarrollado en Intouch 10.1, herramienta que permite al equipo de operación encender o apagar las unidades térmicas de acuerdo a un criterio de reserva rodante del sistema, adicional aquí pueden controlar la repartición de carga activa y reactiva de los grupos térmicos, entre otros.

En la Figura 2.27, Figura 2.28 y Figura 2.29 se puede observar el resultado de la implementación realizada.

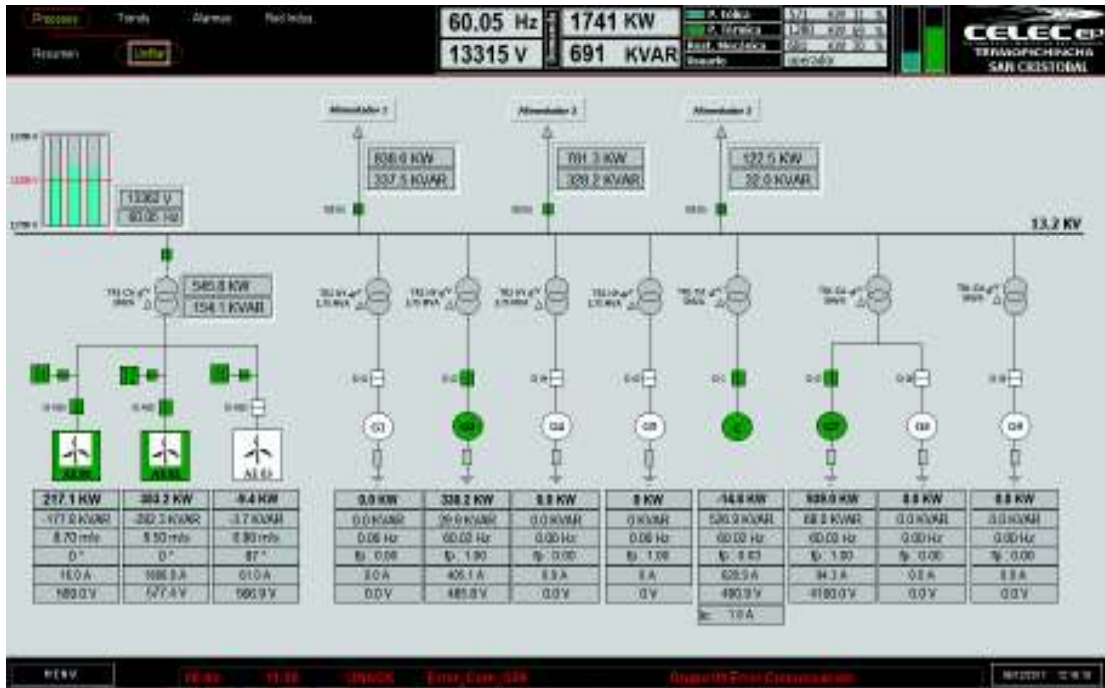


Figura 2.27: SCADA, Diagrama unifilar, compensador, generadores térmicos y generadores eólicos integrados.

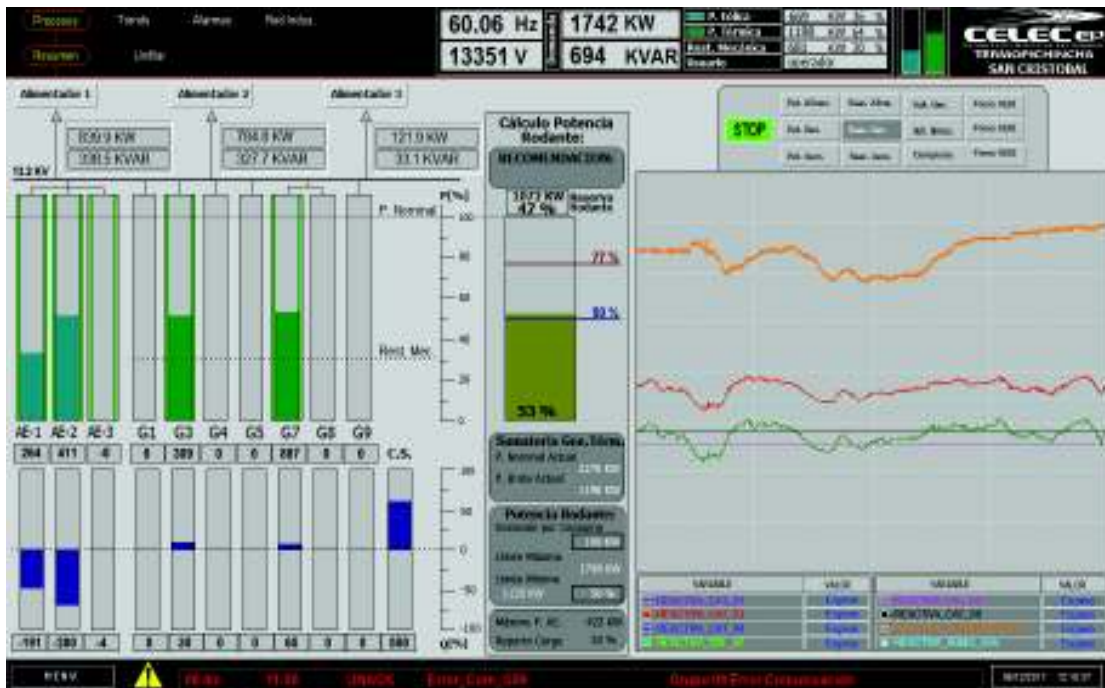


Figura 2.28: SCADA, Pantalla de operación principal, repartición de carga activa y reactiva

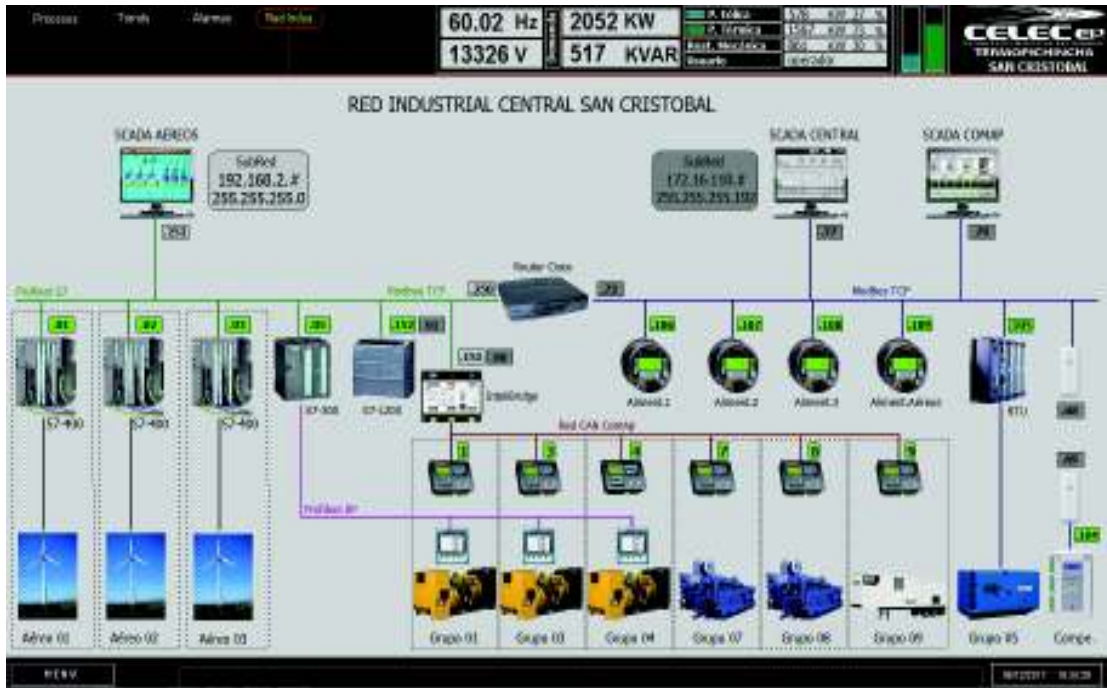


Figura 2.29: SCADA, Arquitectura de control implementada.

### 3. ANÁLISIS ENERGÉTICOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

#### 3.1. Análisis

Se determinan dos escenarios básicos que permiten evaluar la cantidad de recurso eólico que no ha sido aprovechado de manera eficiente y la cantidad de combustible que ha sido utilizado para reemplazar esta falta de suministro energético. Ambos escenarios son evaluados en el período de mayor recurso eólico en la isla San Cristóbal durante el año 2016, es decir los meses de julio a noviembre. El primer escenario obedece a estimaciones teóricas de la potencia que se pudo haber generado de acuerdo a la velocidad de viento medida, y el segundo escenario obedece a la potencia real que se generó en un período de tiempo.

En la Figura 3.1 se observa el comportamiento de la potencia del parque eólico, entre los meses de julio a noviembre del 2016, la potencia real está muy por debajo de la potencia teórica esperada.



Figura 3.1: Comparación de potencia real vs potencia esperada en el parque eólico.  
Fuente [24, p. 5]

En la Figura 3.2 se observa el porcentaje de penetración de energía eólica teórica respecto al real, se aprecia que la energía real está muy por debajo de la energía esperada.

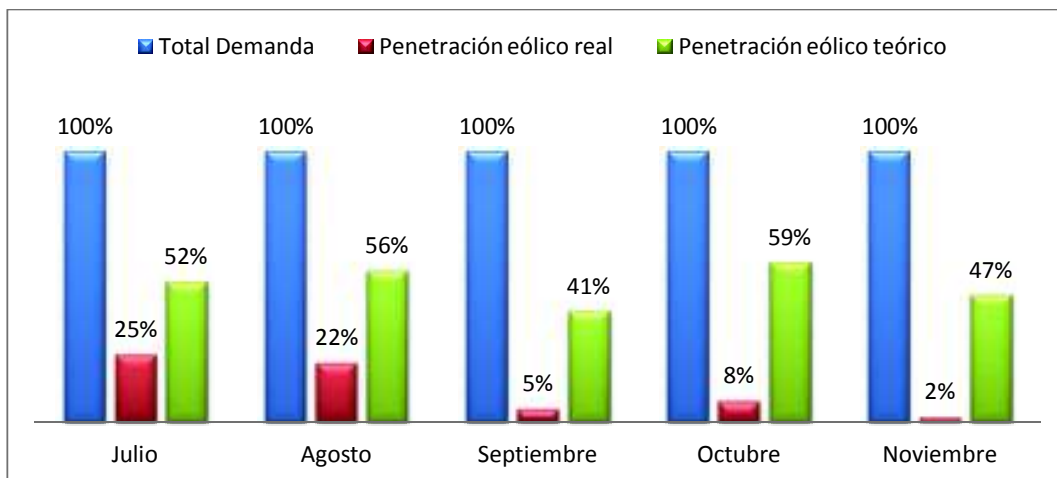


Figura 3.2: Comparación del aporte de energía eólica real vs energía eólica esperada. (Año 2016)  
Fuente [24, p. 6]

En la Tabla 3.1 se presentan las diferencias en la penetración de energía eólica generada en el escenario real en relación con la energía teórica que se estima se hubiera producido, el recurso eólico disponible en los meses analizados.

Tabla 3.1: Comparación de energía teórica respecto a energía real (2016).

	Energía que generó el parque eólico	Energía que debió haber generado el parque eólico	Energía que generó el parque térmico	Demanda de la isla	Aporte real de generación eólica	Aporte teórico de generación eólica
FECHA	kWh	kWh	kWh	kWh	%	%
<b>Jul,16</b>	256.840	544.359	782.297	1'039.137	25%	52%
<b>Aug,16</b>	222.804	571.022	805.601	1'028.405	22%	56%
<b>Sep,16</b>	42.862	385.395	888.840	931.702	5%	41%
<b>Oct,16</b>	81.418	586.893	909.838	991.256	8%	59%
<b>Nov,16</b>	22.521	493.908	1'027.430	1'049.951	2%	47%
<b>Total</b>	<b>626.446</b>	<b>2'581.577</b>	<b>4'414.006</b>	<b>5'040.452</b>	<b>12,40%</b>	<b>51,20%</b>

(Fuente: [24, p. 6])

Se esperaba producir 2'581.577,00 kWh de energía eólica y así evitar quemar 224.485,00 galones de combustible diésel que sustituyan a esta generación, sin embargo de esta proyección únicamente se generó 626.446,00 kWh con recurso eólico, es decir un 24,3% de lo esperado.

Respecto a la demanda del sistema, en la Figura 3.3 se muestra mes a mes las pérdidas de energía disponible. Todas estas pérdidas fueron asumidas por generación térmica.

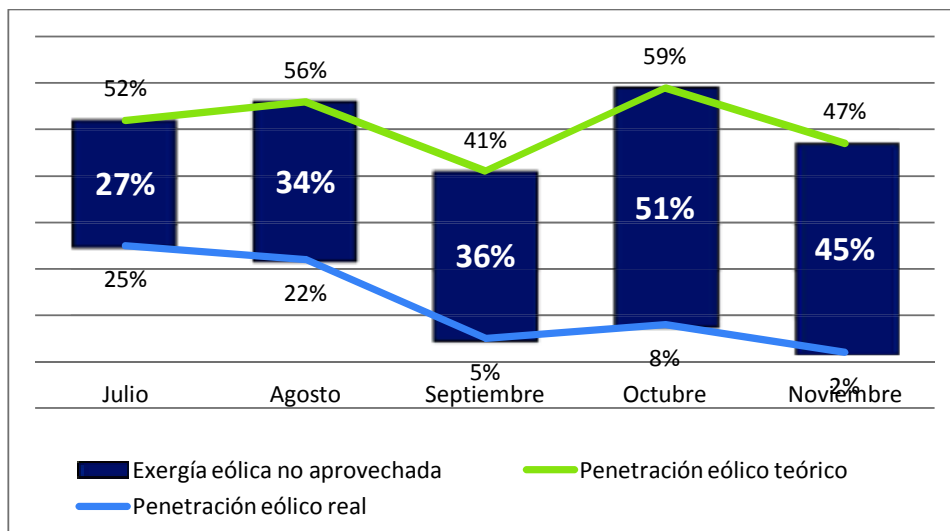


Figura 3.3: Energía desperdiciada en el año 2016

En la Figura 3.4 se observa la penetración de energía teórica y real durante los meses de julio a noviembre del año 2016, se observa que no se aprovechó adecuadamente el recurso eólico ya que de un posible 51% de recurso eólico, únicamente se alcanzó un 12%.

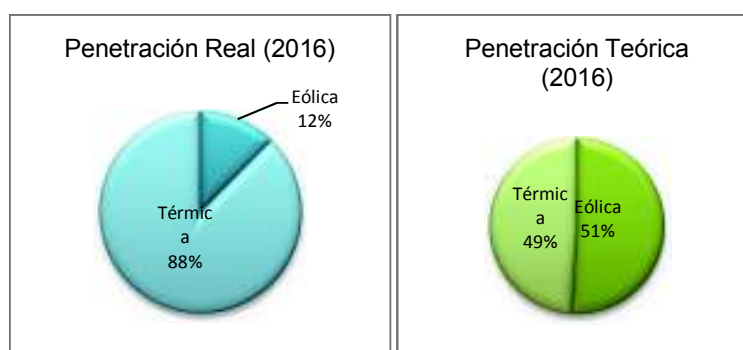


Figura 3.4: Porcentaje de penetración de energía renovable y no renovable durante julio a noviembre del 2016

En la Tabla 3.2 se presenta la cantidad de combustible diésel que se evitó consumir durante el período junio – noviembre 2016, también la cantidad de CO2 que se evitó emitir al medio ambiente durante el mismo período.



Tabla 3.2: Combustible no consumido y CO2 no emitido respecto a la generación real.

Fecha	Generación Real (kWh)			Combustible que se evitó consumir por uso de energía eólica (Gal)	CO2 que no fue emitido a la atmósfera por uso de energía eólica (Ton)
	Térmico	Eólico	Total		
<b>Jul.16</b>	782.297	256.840	1'039.137	22.334	205
<b>Aug.16</b>	805.601	222.804	1'028.405	19.374	178
<b>Sep.16</b>	888.84	42.862	931.702	3.727	34
<b>Oct.16</b>	909.838	81.418	991.256	7.08	65
<b>Nov.16</b>	1027.43	22.521	1'049.951	1.958	18
<b>Total</b>	<b>4'414.006</b>	<b>626.446</b>	<b>5'040.452</b>	<b>54.474</b>	<b>501</b>

(Fuente [24, p. 6])

Considerando un rendimiento de los generadores diésel de 11,5 kWh/galón, se determina que 54.474 galones de combustible evitaron ser consumidos en los meses de análisis, y así 501 toneladas de CO2 no fueron emitidos a la atmósfera.

En la Tabla 3.3 se muestra los resultados de un análisis similar para la generación de energía teórica.

Tabla 3.3: Combustible no consumido y CO2 no emitido respecto a la generación teórica.

Fecha	Energía que generó el parque eólico kWh	Energía que debió haber generado el parque eólico kWh	Combustible que teóricamente se pudo evitar consumir por el adecuado uso de energía eólica Gal	CO2 que teóricamente se pudo evitar emitir a la atmósfera por adecuado uso de energía eólica Ton
<b>Jul.16</b>	256.840	544.359	47.336	435
<b>Aug.16</b>	222.804	571.022	49.654	457
<b>Sep.16</b>	42.862	385.395	33.513	308
<b>Oct.16</b>	81.418	586.893	51.034	470
<b>Nov.16</b>	22.521	493.908	42.948	395
<b>Total</b>	<b>626.446</b>	<b>2'581.577</b>	<b>224.485</b>	<b>2.065</b>

(Fuente [24, p. 7])

En teoría se hubiera podido evitar consumir un aproximado de 224.485 galones de combustible diésel con un equivalente a 2.065 toneladas de CO2.

En la Tabla 3.4 se presentan los valores comparativos entre los datos reales de producción del parque eólico y los datos que en teoría se podrían haber obtenido si el sistema híbrido aprovecharía el recurso eólico registrado en el sitio de emplazamiento del parque eólico durante el periodo de análisis.

Tabla 3.4: Facturación de ELECGALÁPAGOS.

	REAL		TEÓRICO	
	Facturación de parque eólico	Ahorro por combustible no consumido	Facturación de parque eólico	Ahorro por combustible no consumido
Fecha	USD	USD	USD	USD
<b>Jul.16</b>	32.927	20.885	69.787	44.265
<b>Aug.16</b>	28.564	18.117	73.205	46.433
<b>Sep.16</b>	5.495	3.485	49.408	31.338
<b>Oct.16</b>	10.438	6.62	75.24	47.723
<b>Nov.16</b>	2.887	1.831	63.319	40.162
Total	<b>80.311</b>	<b>50.94</b>	<b>330.958</b>	<b>209.921</b>
	<b>131.249</b>		<b>540.879</b>	

(Fuente [24, p. 8])

Considerando un valor comercial de 0,1282 dólares para la compra del kWh eólico y un valor de 0,9351 dólares para la compra del galón de diésel se observa que el parque eólico ha generado un ahorro económico real de 80.310 dólares por producción de energía eléctrica y un ahorro por combustible no quemado de 50.940 dólares, dando un total de 131.249 dólares. Al analizar los datos teóricos se concluye que idealmente se podía haber generado un monto de 330.958 dólares por generación renovable y un monto por la compra de combustible de 209.921 dólares lo que representaría un ahorro total aproximado de 540.879 dólares. Es decir que de acuerdo con lo reportado por ELECGALÁPAGOS pudo haber existido un ahorro aproximado de 409.630 dólares durante el año 2016.

En la Tabla 3.5 se muestra la generación histórica que ha tenido el parque eólico desde el inicio de su operación en octubre de 2007 y como los valores de producción han ido decreciendo conforme el aumento en la demanda y los problemas mencionados que restringen la normal operatividad de las maquinas. (En el año 2007 se inicia el registro en octubre y en el año 2016 se termina el registro en noviembre). Como se observa la mayor facturación se alcanzó en el año 2014, con un monto de USD 495.415 y la más baja facturación hasta la actualidad es en el 2016, año en que los problemas en de energía reactiva aportada por los aerogeneradores.

Tabla 3.5: Histórico de generación Central San Cristóbal.

	Térmico	Eólico	Total	Térmico	Viento	CO2 evitado	Ahorro de diésel	Valor facturado
Año	kWh	kWh	kWh	%	%	Ton	Gal	USD
<b>2007</b>	975.858	790.398	1'766.256	55.3	44.7	632	68.73	101.329
<b>2008</b>	5'834.693	2'682.461	8'517.153	68.5	31.5	2.146	233.257	343.892
<b>2009</b>	5'882.731	3'204.436	9'087.167	64.7	35.3	2.564	278.647	410.809
<b>2010</b>	5'919.000	3'434.854	9'353.853	63.3	36.7	2.748	298.683	440.348
<b>2011</b>	6'745.046	3'344.625	10'089.672	66.9	33.1	2.676	290.837	428.781
<b>2012</b>	8'752.958	2'398.372	11'151.330	78.5	21.5	1.919	208.554	307.471
<b>2013</b>	7'984.046	3'451.451	11'435.497	69.8	30.2	2.761	300.126	442.476
<b>2014</b>	9'956.002	3'864.394	13'820.396	72.0	28	3.092	336.034	495.415
<b>2015</b>	12'425.816	3'396.364	15'822.180	78.5	21.5	2.717	295.336	435.414
<b>2016</b>	11'835.828	1'443.390	13'279.217	89.1	10.9	1.155	125.512	185.043
<b>TOTAL</b>	<b>76'311.977</b>	<b>28'010.745</b>	<b>104'322.722</b>	<b>73.1</b>	<b>26.9</b>	<b>22.409</b>	<b>2'435.717</b>	<b>3'590.978</b>

(Fuente [24, pp. 10,11])

Tabla 3.6: Consumo de combustible

Rendimiento térmico unidades de San Cristóbal:	11,50	kWh/Gal
Precio de importación de DIÉSEL 2:	64,80	USD/barril
	1,54	USD/Gal
Costo de transporte de DIÉSEL a San Cristóbal:	5.600,00	USD/3000 Gal
	1,87	USD/Gal

Combustible												
FECHA	Consumió Parque Térmico Gal	Se debió haber consumido Parque Térmico Gal	Lo que se ahorró por el uso de los aerogeneradores Gal	Lo que se pudo ahorrado si se hubiera optimizado el recurso eólico Gal	Posible ahorro de combustible Parque Térmico Gal	Lo que se ahorró por el uso de los aerogeneradores			Lo que se pudo haber ahorrado si se hubiera optimizado el recurso eólico			Ahorro TOTAL (En caso de haber aprovechado al 100% el viento) USD
						Por importación USD	Por transporte USD	TOTAL USD	Por importación USD	Por transporte USD	TOTAL USD	
<b>Jul,16</b>	68.025	43.024	22.333	47.335	25.001	34.458	41.689	76.148	73.032	88.359	161.391	85.243
<b>Aug,16</b>	70.052	39.772	19.374	49.654	30.279	29.891	36.165	66.057	76.609	92.687	169.296	103.239
<b>Sep,16</b>	77.290	47.504	3.727	33.512	29.785	5.750	6.957	12.707	51.705	62.556	114.262	101.554
<b>Oct,16</b>	79.116	35.162	7.079	51.034	43.954	10.923	13.215	24.138,84	78.738	95.263	174.002	149.863
<b>Nov,16</b>	89.341	48.351	1.958	42.948	40.990	3.021	3.655	6.677	66.263	80.170	146.434	139.756
<b>Total</b>	383.826	213.815	54.473	224.484	170.011	84.044	101.683	185.728	346.348	419.038	765.386	579.658

En la Tabla 3.6 se resume el ahorro generado gracias al uso del recurso eólico y el combustible consumido por los grupos térmicos en los dos escenarios planteados durante el año 2016 (de julio a noviembre), el primero, el real, en el cual se evidencia un consumo de combustible de 383.826,61 galones de diésel y un ahorro de 185.728,62 dólares gracias al uso del recurso eólico, el segundo escenario, el teórico, el cual está basado en la curva de rendimiento del aerogenerador, la cual relaciona la potencia en función de la velocidad del viento, se evidencia que se pudo haber consumido únicamente 213.815,13 galones de diésel y ahorrado 765.386,80 dólares gracias al uso del recurso eólico. Es decir, que mediante el uso adecuado del recurso eólico se pudo haber ahorrado 579.658,18 dólares adicionales a los ahorrados en el 2016.

En lo referente al combustible diésel se considera el precio de importación de 1,54 dólares por galón, precio publicado por Petroecuador en su página web, y el precio del transporte de combustible diésel desde continente a las islas Galápagos que es de 1,87 dólares por galón, adicional se considera un rendimiento promedio de 11,5 kWh/gal, datos obtenidos del departamento de producción de CELEC EP Termopichincha.

### **3.2. Resultados**

En el mes de mayo del año 2017 se puso en operación el compensador sincrónico y se habilitó el sistema de control que permite que el parque eólico trabaje con conjunto con todos los generadores térmicos.

El compensador sincrónico opera de manera isócrona realizando un control de voltaje, es decir, automáticamente compensa potencia reactiva al sistema para mantener los niveles de voltaje en los adecuados.

El compensador sincrónico compensa la potencia reactiva de los generadores térmicos, manteniendo el factor de potencia de los mismos en uno, ahorrando combustible.

Los sistemas de control implementados permiten despachar desde la sala de control las unidades térmicas, mismas que reparten carga activa y reactiva, optimizando la operación conjunta del parque térmico y eólico.

Se llevó el compensador sincrónico hasta los 600 kVAr aproximadamente y se registró una temperatura de 41.4°C en las bobinas del rotor, lo cual está por debajo de lo establecido en el manual del generador STAMFORD el cual hace referencia a lo indicado

en la norma “BS EN 60085 (≡ IEC 60085) Electrical insulation – Thermal Evaluation and Designation”.

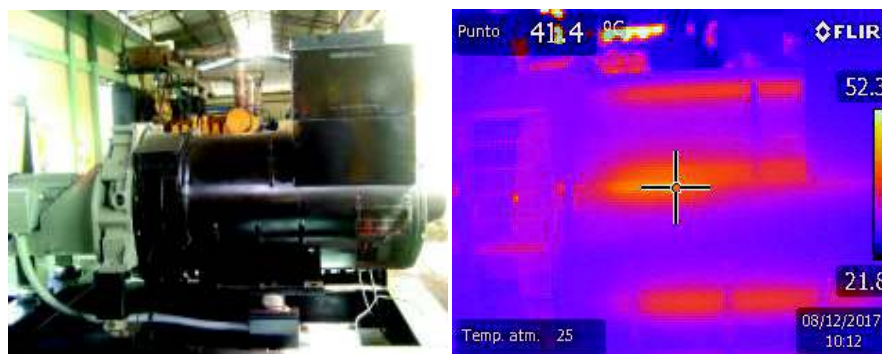


Figura 3.5: Temperatura de las bobinas del rotor del compensador a 600 kVAr

Con estos antecedentes, se evaluará los registros de energías obtenidos durante los meses de junio a noviembre del año 2017, y se compararán con los datos de energía del año 2016 durante el mismo periodo.

En la Tabla 3.7 se puede observar la energía producida por los parques térmico y eólico durante los meses de mayor viento en la Isla San Cristóbal.

Tabla 3.7: Energía año 2017, meses de mayor viento en San Cristóbal

Mes	Energía generada por el parque eólico	Energía generada por el parque térmico	Demanda	Penetración eólica
	kWh	kWh	kWh	%
Julio	195.753,05	961.817,79	1.157.570,84	17%
Agosto	217.262,82	888.948,58	1.106.211,40	20%
Septiembre	230.840,13	805.198,99	1.036.039,12	22%
Octubre	188.632,38	875.361,47	1.063.993,85	18%
Noviembre	346.804,13	688.947,49	1.035.751,62	33%
Diciembre	192.554,13	968.145,14	1.160.699,27	17%
<b>Total</b>	<b>1.371.846,64</b>	<b>5.188.419,46</b>	<b>6.560.266,10</b>	<b>21%</b>

En la Tabla 3.8 se puede observar que la demanda de energía en el 2017 subió en aproximadamente 7% respecto al 2016, también se observa que durante los meses que existe mayor recurso eólico, la penetración de energía eólica aumentó del 12% en el 2016 a 22% en el 2017. Cabe señalar que durante estos meses del 2017, el aerogenerador No. 3 se encontró con una falla mecánica, es decir no operó, caso contrario se habría alcanzado una penetración eólica aproximada del 31%.

Tabla 3.8: Comparación de la energía generada en el 2016 y 2017

Fecha	2016				2017			
	Eólico	Térmico	Demanda	Penetración eólica	Eólico	Térmico	Demanda	Penetración eólica
	kWh	kWh	kWh	%	kWh	kWh	kWh	%
Julio	256.840	782.297	1.039.137	25%	195.753	961.818	1.157.571	17%
Agosto	222.804	805.601	1.028.405	22%	217.263	888.949	1.106.211	20%
Septiembre	42.862	888.840	931.702	5%	230.840	805.199	1.036.039	22%
Octubre	81.418	909.838	991.256	8%	188.632	875.361	1.063.994	18%
Noviembre	22.521	1.027.430	1.049.951	2%	346.804	688.947	1.035.752	33%
<b>Total</b>	<b>626.445</b>	<b>4.414.006</b>	<b>5.040.451</b>	<b>12%</b>	<b>1.179.293</b>	<b>4.220.274</b>	<b>5.399.567</b>	<b>22%</b>

En la Tabla 3.9 se describe la energía generada por el parque térmico y eólico durante los años 2016 y 2017, se considera que el combustible diésel tiene un precio de importación de 1,54 dólares por galón, precio publicado por Petroecuador en su página web, y el precio del transporte de combustible diésel desde el continente a las islas Galápagos que es de 1,87 dólares por galón, adicional se considera un rendimiento promedio de 11,5 kWh/gal, datos obtenidos del departamento de producción de CELEC EP Termopichincha.

Tabla 3.9: Ahorro por reducción de uso de combustible entre el 2017 respecto al 2016

	Aporte de Energía				Consumo de Combustible					
	2016		2017		2016	2017	Ahorro de combustible	Lo que se ahorró por el uso de los aerogeneradores		
	Parque Eólico	Parque Térmico	Parque Eólico	Parque Térmico	Parque Térmico	Parque Térmico	Parque Térmico	Importación	Transporte	TOTAL
	kWh	kWh	kWh	kWh	Gal	Gal	Gal	USD	USD	USD
Jul	256.840	782.297	195.753	961.818	68.025	83.636	-	-	-	-
Aug	222.804	805.601	217.263	888.949	70.052	77.299	-	-	-	-
Sep	42.862	888.840	230.840	805.199	77.290	70.017	7.273	11.221	13.576	24.797
Oct	81.418	909.838	188.632	875.361	79.116	76.118	2.997	4.625	5.596	10.221
Nov	22.521	1.027.430	346.804	688.947	89.341	59.908	29.433	45.411	54.942	100.353
<b>Tot</b>	<b>626.445</b>	<b>4.414.006</b>	<b>1.179.292</b>	<b>4.220.274</b>	<b>383.826</b>	<b>366.980</b>	<b>39.704</b>	<b>61.258</b>	<b>74.114</b>	<b>135.372</b>

Se observa que la reducción de combustible diésel entre el año 2016 y 2017 fue de 39.704,35 galones, lo que produjo un ahorro de 135.372,93 dólares al estado ecuatoriano y la disminución de 942 toneladas de CO2. Vale la pena indicar que durante el año 2017, uno de los tres aerogeneradores estuvo con un problema mecánico, por lo

cual, de haberse tenido operativo este tercer aerogenerador se hubieran reducido 68.119,82 galones de diésel, produciendo un ahorro de **232.256,15** dólares y una disminución de 1414 toneladas de CO2.



## **4. CONCLUSIONES**

La implementación de este proyecto en el año 2017 permitió ahorrar aproximadamente 135.000,00 dólares en comparación al año 2016, este ahorro está asociado a la reducción de consumo de diésel usado para las unidades térmicas, que pasó de 383.826,00 galones en el 2016 a 366.980,00 en el 2017. Estos 30.704,00 galones de diferencia, ahorran al estado ecuatoriano tanto por conceptos de importación de diésel como por transporte de diésel desde el continente, motivo por el cual este proyecto de eficiencia energética genera una ganancia medible y comparable.

La generación de energía eólica producida por los aerogeneradores pasó de 626,45 GWh en el año 2016 a 1.179,29 GWh en el 2017, lo que evitó que 942 toneladas de CO<sub>2</sub> sean emitidas al medio ambiente, contribuyendo con el ecosistema que es prioridad en las islas Galápagos.

A pesar que la demanda energética en el año 2017 subió en aproximadamente un 7% respecto al año 2016, se tuvo una penetración eólica del 22% (con un aerogenerador menos), lo cual fue muy superior al 12% del año 2016.

La construcción del compensador sincrónico sirve como proyecto piloto para futuras implementaciones, las cuales pueden ser útiles para mejoramiento de la estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia y/o proyectos de eficiencia energética.

### **Trabajos futuros**

Se recomienda optimizar los mantenimientos de los aerogeneradores, ya que esta actividad es parte fundamental para el aporte energético y por ende para el ahorro de combustible. En el año 2017, debido a que uno de los tres aerogeneradores estuvo fuera de operación, únicamente se alcanzó una penetración eólica del 22%, si los tres aerogeneradores hubiesen estado operativos, se hubiera alcanzado un 31% de penetración. Por otra parte, se hubiera podido ahorrar 232.256,15 dólares por concepto de reducción de consumo de combustible y se hubiera podido evitar emitir al medio ambiente 1414 toneladas de CO<sub>2</sub> por concepto de sustitución de generación térmica por generación eólica.

Si bien es cierto, en el año 2017 se mejoró la penetración de energía eólica respecto al año 2016, alcanzando un 31% (si hubieran estado operativos los 3 aerogeneradores), queda lejos todavía del 51% de penetración que se evidencia con un aprovechamiento ideal a través de la curva de potencia de los aerogeneradores respecto a la velocidad del viento. Se recomienda que en un futuro se desarrolle un proyecto en el cual se realice la medición, registro y análisis de las pérdidas que ocasionan esta diferencia. Así mismo, se debe automatizar el despacho de los generadores térmicos para optimizar su operación, con el fin de que trabajen en su mejor punto de eficiencia y no limiten la potencia de los aerogeneradores.

## Referencias Bibliográficas

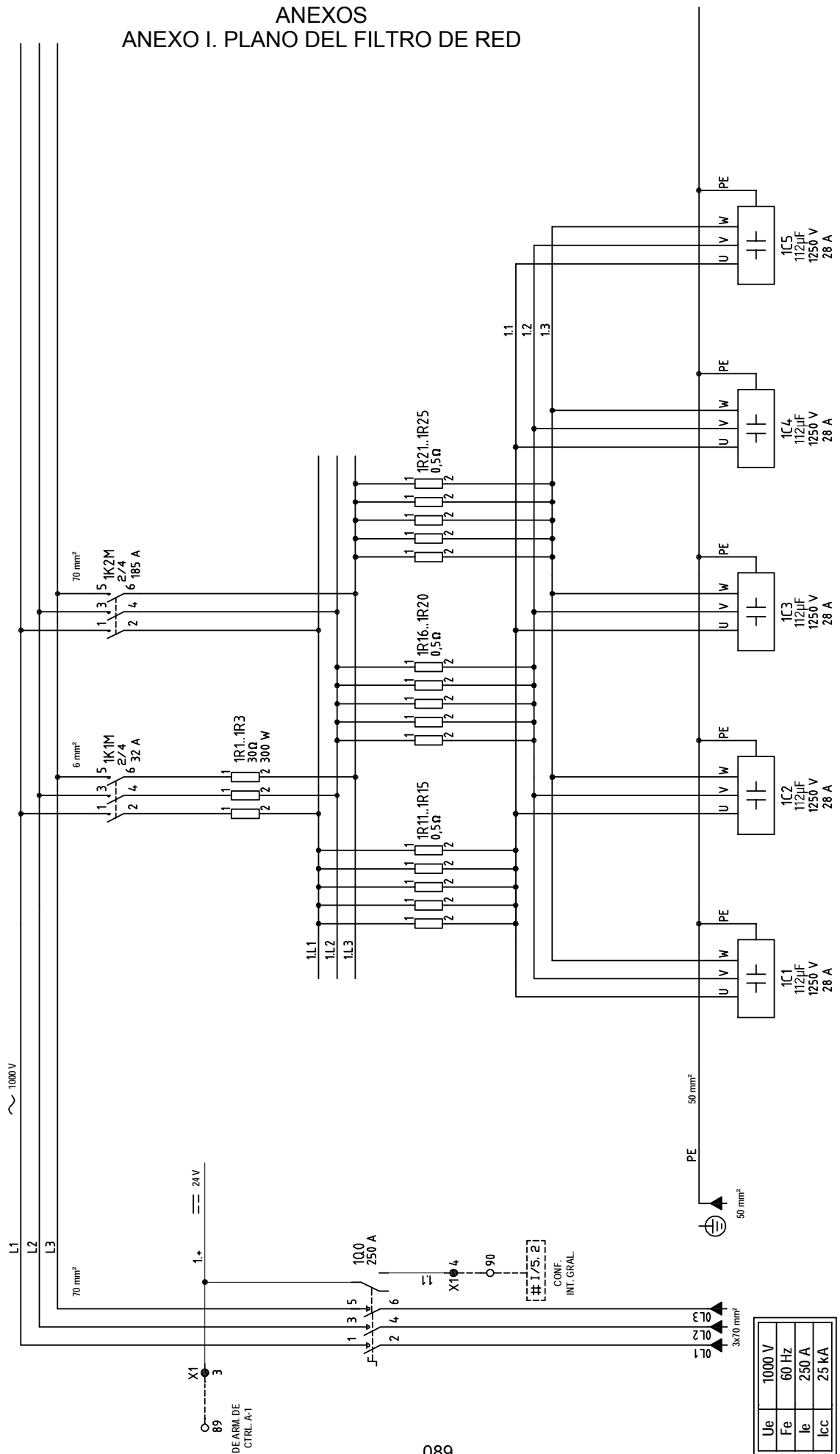
- [1] ELECGALÁPAGOS, «Operación del sistema del aerogenerador (WTG) S800,» 2007.
- [2] ELECGALÁPAGOS, «Aerogenerador AE-59, Manual de Operación y Mantenimiento,» 2007.
- [3] S. J. Chapman, Máquinas eléctricas, Mc Graw Hill, 2012.
- [4] ELECGALÁPAGOS, «Aerogenerador AE-59/PVV, Filtro de Red,» 2007.
- [5] ABB, «Reduciendo armónicos,» *Actualidad, Newsletter de ABB Colombia*.
- [6] J. C. Campos Avelia, U. d. Atlántico, U. A. d. Occidente, UPME y Colciencias, Corrección del factor de potencia y control de la demanda.
- [7] F. Gonzalez Longatt, «Introducción al control de Q - V, potencia reactiva voltaje,» 2004.
- [8] C. A. Mora Miñaca, METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO ELÉCTRICO DE REACTORES DE POTENCIA INCORPORADOS EN LÍNEAS DE 500 kV DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN, Quito: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2017.
- [9] E. S. d. MIT, Circuitos Magnéticos y Transformadores, Reverté, 1943.
- [10] C. A. DÍAZ DUARTE, MODELACIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO PARA EL CONTROL DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA CON ENERGÍAS RENOVABLES, Santiago de Chile, 2009.
- [11] L. GYUGYI, DYNAMIC COMPENSATION OF AC TRANSMISSION LINES BY SOLID, IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 9, NO. 2, 1994.
- [12] E. E. SIERRA RODRÍGUEZ, COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO ( STATCOM ): MODELADO Y SIMULACIÓN, 2006.
- [13] J. H. Walker, Operating characteristics of salient pole machines, Proc. IEE (UK), No. 1411, 1952.
- [14] D. Z. Ñaupari Huatuco y M. F. Bedriñana Aronés, EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL GENERADOR SÍNCRONO BASADO EN LA GENERADOR SÍNCRONO BASADO EN LA CURVA DE CAPABILIDAD, 2011.
- [15] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Guide for Operation and Maintenance of Turbine Generators, New York: Library of Congress Catalog Number 90-055613, 1996.
- [16] I. Nagy, Analysis of Minimum Excitation Limits of Synchronous Machines, IEEE

- Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, no 6, 1970.
- [17] CUMMINS GENERATOR TECHNOLOGIES, STAMFORD HC AC Generators, INSTALLATION, SERVICE AND, 2013.
- [18] Cummins Engine Company, «Engine Performance Curve,» 2012.
- [19] STAMFORD POWER GENERATOR, HCI634K - Technical Data Sheet, 2004.
- [20] I. PRIETO, CENTRALES TÉRMICAS CIRCUITOS DE AIRE HUMOS.
- [21] H. C. Barrera Naranjo, DETERMINACIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL DE LA CAPACIDAD DE POTENCIA REACTIVA DE GENERADORES SÍNCRONOS, 2013.
- [22] Warner Electric, Basic design Chutches/Brakes.
- [23] R. G. Budynas, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, 2008.
- [24] ELECGALÁPAGOS, «Informe técnico estado de la generación en la isla San Cristóbal,» 2017.
- [25] EOLICSA, «Memoria técnica descriptiva del proyecto eólico San Cristóbal,» Rev. 2016.
- [26] ABB, «IGCT, conmutador de semiconductoresde alta potencia para tensiones medias,» *Revista ABB 3, Semiconductores de potencia*, 1997.
- [27] ELECGALÁPAGOS, «Aerogenerador AE-59/PVV, Convertidor de frecuencia,» 2007.
- [28] J. A. Aguirre Díaz y C. A. Chiquito Manso, Análisis y diseño de un puente inversor trifásico VSI controlado mediante SVM, Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- [29] Y. Cengel y M. Boles, Termodinámica, McGRAW-HILL, 2011.
- [30] «<http://j-rpm.com.es/tag/cargador-mechero/>,» [En línea].
- [31] J. C. Martín, Máquinas eléctricas, Editex, 2012.
- [32] H. N.G., FLEXIBLE AC TRANSMISSION, IEEE Spectrum, Vol. 30, No. 4, 1988.
- [33] H. N.G., FACTS-FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS, 1990.
- [34] N. MOHAN, Power Electronics, NEW YORK: JOHN WILEY AND SONS, 1995.
- [35] B. Park y L. Tang, «Examination of three different ACOPF formulations with generator capability curves,» *IEEE*, 2016.
- [36] BASLER ELECTRIC, MANUAL DE INSTRUCCIONES PARA EL SISTEMA DE CONTROL DIGITAL DE EXCITACIÓN DECS-250, 2015.

# ANEXOS

## ANEXO I. PLANO DEL FILTRO DE RED

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9



Ue	1000 V
Fe	60 Hz
Ie	250 A
Icc	25 kA

**PROYECTO:** AEROGENERADOR AE-59/PW

**DENOMINACION:** FILTRO DE RED  
CIRCUITO DE FUERZA

**Nº ESQUEMA:** 7-0008.04

**EDICION:** 01

**HOJA:** E 1

**FICHERO:** FILE

**DIBUJADO:** J. Pérez

**COMPROBADO:** [Signature]

**APROBADO:** [Signature]

**FECHA:** 02/02/2007

**FECHA:** 02/02/2007

**FECHA:** 02/02/2007

**NOMBRE:** J. Pérez

**CONF. INT. GRAL.:** [#1/5.2]

**Ue** 1000 V

**Fe** 60 Hz

**Ie** 250 A

**Icc** 25 kA

**U** V W

**PE**

**1C1** 112μF 1250 V 28 A

**1C2** 112μF 1250 V 28 A

**1C3** 112μF 1250 V 28 A

**1C4** 112μF 1250 V 28 A

**1C5** 112μF 1250 V 28 A

**Ue** 1000 V

**Fe** 60 Hz

**Ie** 250 A

**Icc** 25 kA

**U** V W

**PE**

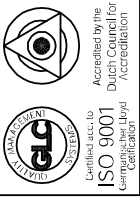
**1C1** 112μF 1250 V 28 A

**1C2** 112μF 1250 V 28 A

**1C3** 112μF 1250 V 28 A

**1C4** 112μF 1250 V 28 A

**1C5** 112μF 1250 V 28 A



**made**

Ctra. 3 Pozuelo, km 1  
47400 Medina del Campo  
VALLADOLID

Accredited by the  
Dutch Council for  
Registration

Certified acc. to  
**ISO 9001**  
Germanischer Lloyd  
Certification

**a bb**

A02-PAZCG018

Date: 03/03/2017 11:42:00  
Referencia: OPP-17-632446  
Revisión 000-03/03/2017**1. DESCRIPCIÓN DE LOS ÍTEMS Y PRECIOS**

ITEM	P/N	DESCRIPTION	QTY	PRICE/UNIT	PRICE TOTAL
001	<b>PCS100 25-05B-A10</b>	PCS100 REACTIVE POWER CONDITIONER INVERTER EN CABINET, TYPE PCS100 25-05B-A10, ENCLOSURE PROTECTION IP20, COOLING FORCED/AIR, AMBIENT TEMPERATURE RANGE 0 - 40 oC, ALTITUDE ABOVE SEA LEVEL MAX. 1000 m WITOUT DERATING, HUMIDITY 0-95% NON-CONDENSING, DIMENSIONS 2154x809x804, WEIGHT APPROX. 680kg + 100kg (packing)	1	155,500.00	155,500.00
				<b>SUBTOTAL 1</b>	<b>155,500.00</b>
				<b>DSCTO.</b>	<b>0% 0.00</b>
				<b>SUBTOTAL 2</b>	<b>155,500.00</b>
				<b>IVA</b>	<b>14% 21,770.00</b>
				<b>TOTAL</b>	<b>177,270.00</b>

No se incluye instalación, comisionamiento & puesta en servicio ni repuestos

Here are main highlights, makes PSC100 exceptional:

- Small footprint: 2154 x 809 x 804
- Modular and scalable design
- Transformer less design
- Advanced in build redundancy (single module failure does not trip the system, only power reduces)
- Harmonic correction: 5th + 7th in standard
- Imbalance current capability: 25% of nominal current
- HTML server & Modbus-TCP for monitoring
- Operating temperature: 0°C to 50°C (de-rate -2% current per 1°C above 40°C)
- Standards: CE, IEC62103 electrical equipment for use in power installations
- Overload and short circuit protection: Current limited output (200%)
- Efficiency: 97,7%

**ABB ECUADOR S.A.**

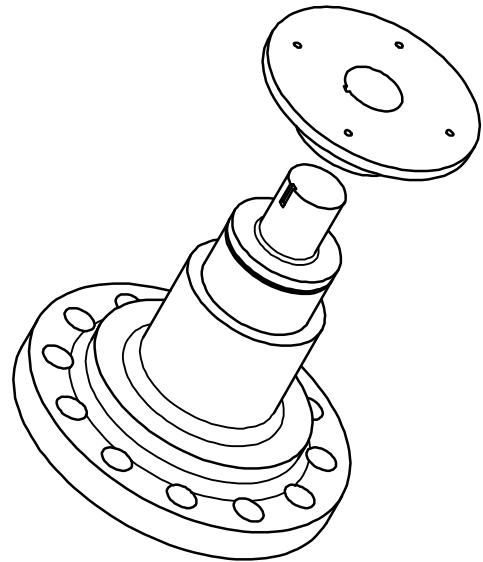
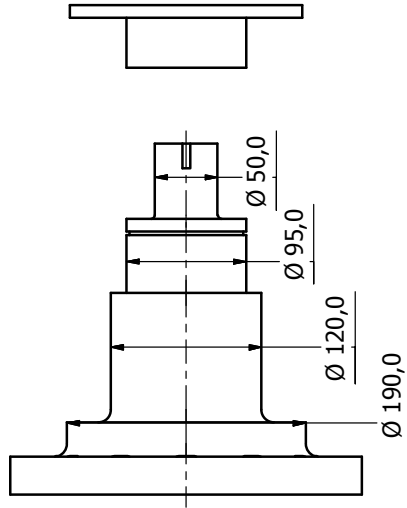
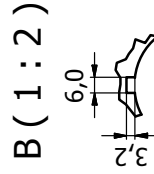
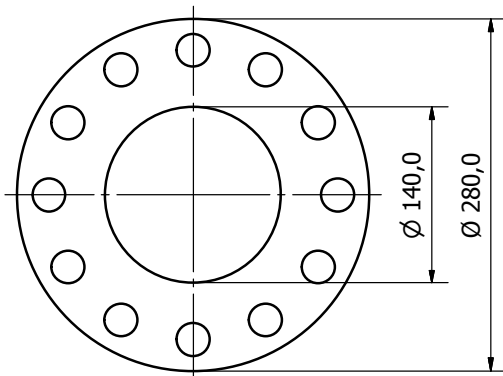
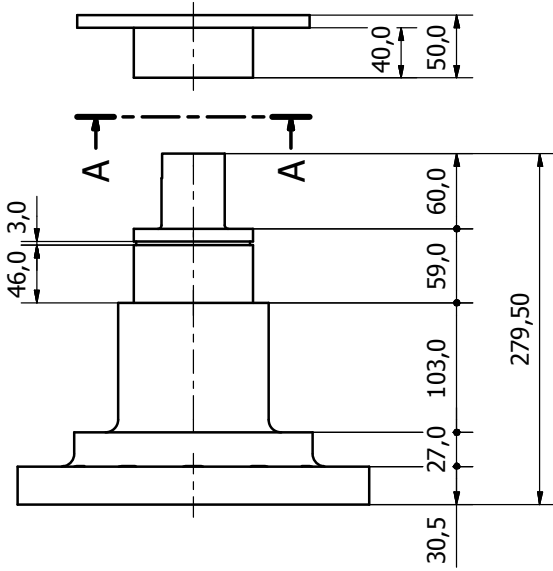
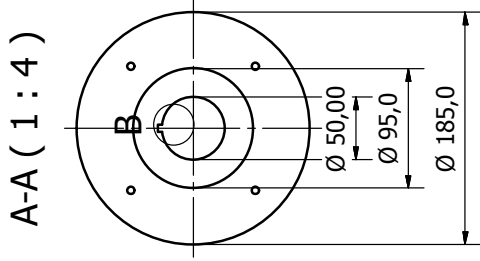
**OFICINA PRINCIPAL**  
Av. Atahualpa OE1-198 y Av. 10 De Agosto  
Edif. Atahualpa Business Center, pisos 10 y 11  
Casilla: 17-08-8431 Quito-Ecuador  
Tel.: +(593) 2 3994 100/199  
Fax: +(593) 2 3994 110/199 Ext. 4110  
Página web: www.abb.com.ec

**OFICINA GUAYAQUIL**  
Av. Constitución y Juan Tanco Marengo  
Edif. Executive Center, Piso 2, Of. 206  
Guayaquil / Ecuador  
Teléfono: +(593) 4 2158 465  
Fax: +(593) 4 2158 443  
Página web: www.abb.com.ec

**ESTACION DE SERVICIO TURBOCARGADORES**  
Vía Interosánica Km. 11,5  
Quito (Cumbayá) / Ecuador  
Tel.: +593 2 289 5260  
Fax: +593 2 289 3981  
e-mail: turbo@ec.abb.com  
Página web: http://www.abb.com/turbocharging

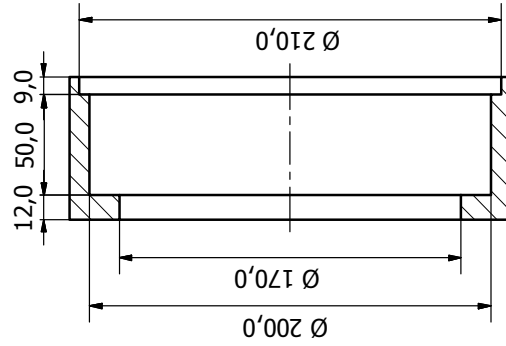
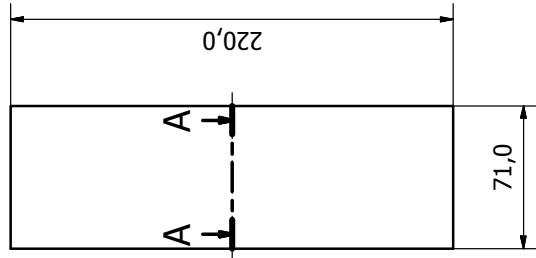
**LINEA DE ATENCION  
AL CLIENTE  
1800-113-344**

ANEXO III. PLANOS MECÁNICOS COMPENSADOR SINCRÓNICO



Designed by Milton Santander	Checked by	Approved by	Date	Date
Compensador Sincrónico San Cristóbal			EJE PRINCIPAL	
Edition			Sheet	
1 / 1			1 / 1	

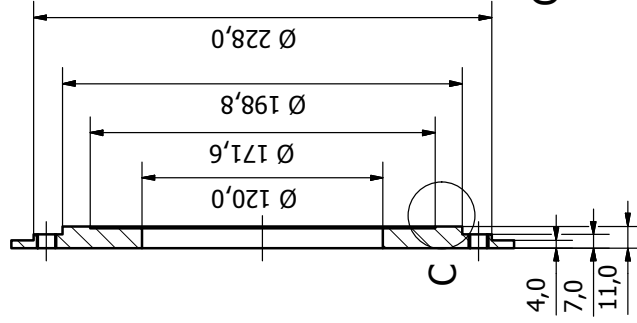
# EJE INTERNO



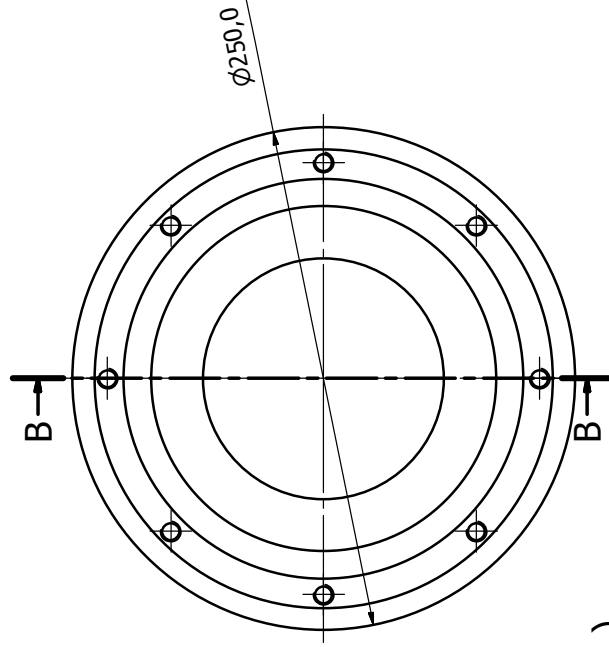
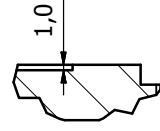
A-A ( 1:2.5 )

# TAPA DE COJINETE POSTERIOR

B-B ( 1 : 2.5 )

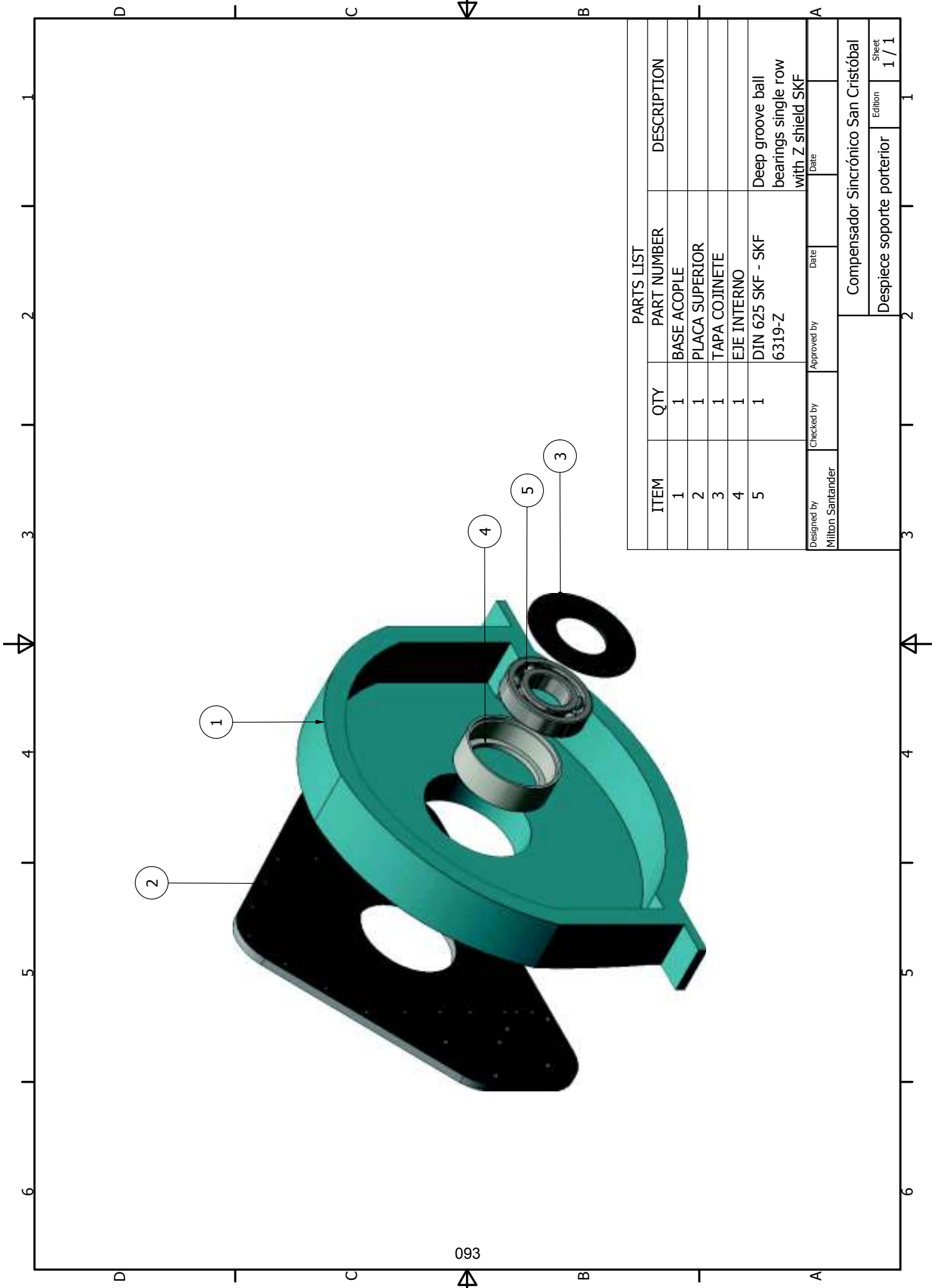


C ( 1 : 1 )



Designed by Milton Santander	Checked by	Approved by	Date	Date
Compensador Sincrónico San Cristóbal			Edition	
Sistema de apoyo posterior			Sheet 1 / 1	

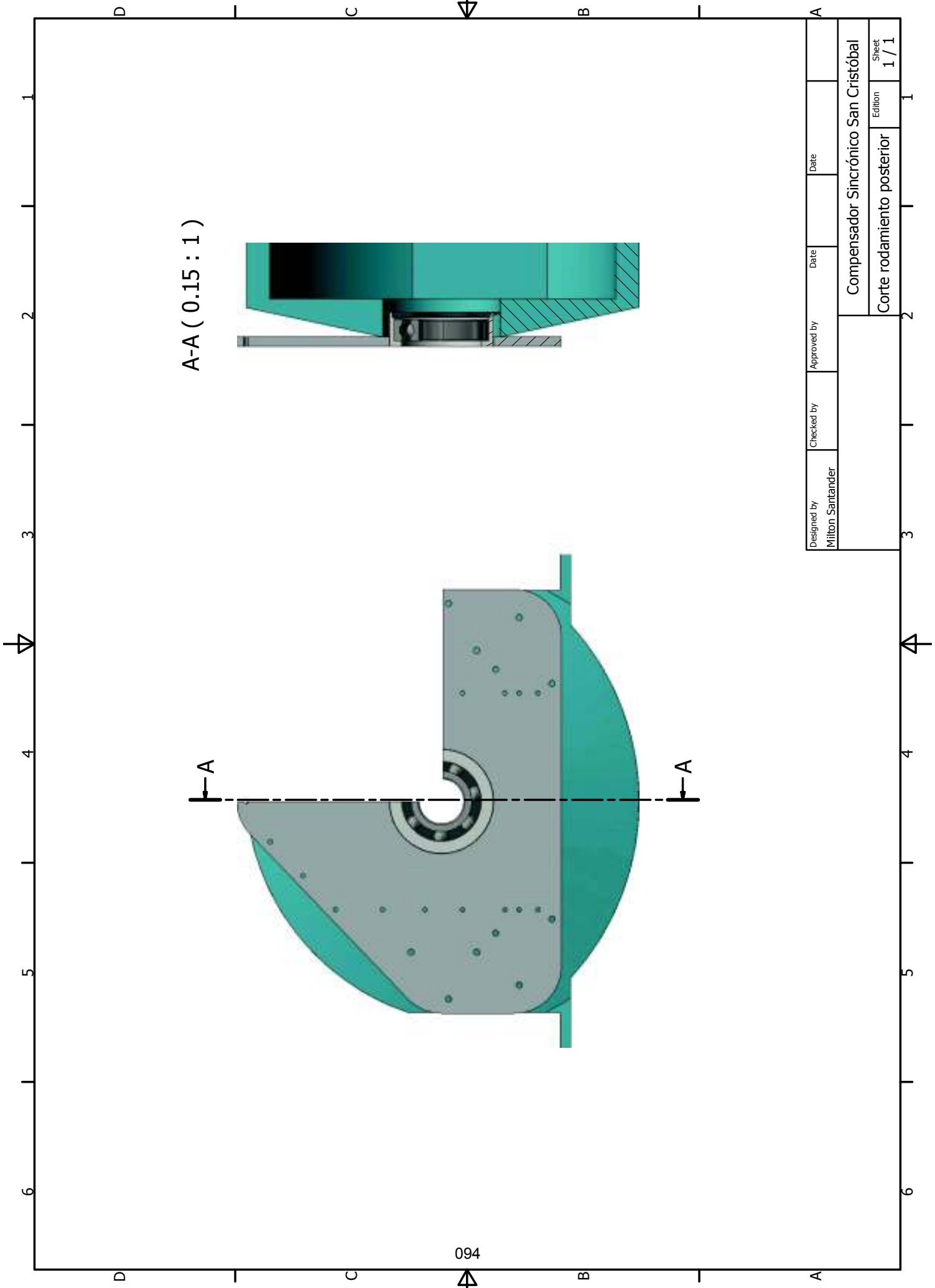




PARTS LIST

ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	BASE ACOPLE	
2	1	PLACA SUPERIOR	
3	1	TAPA COJINETE	
4	1	EJE INTERNO	
5	1	DIN 625 SKF - SKF 6319-Z	Deep groove ball bearings single row with Z shield SKF

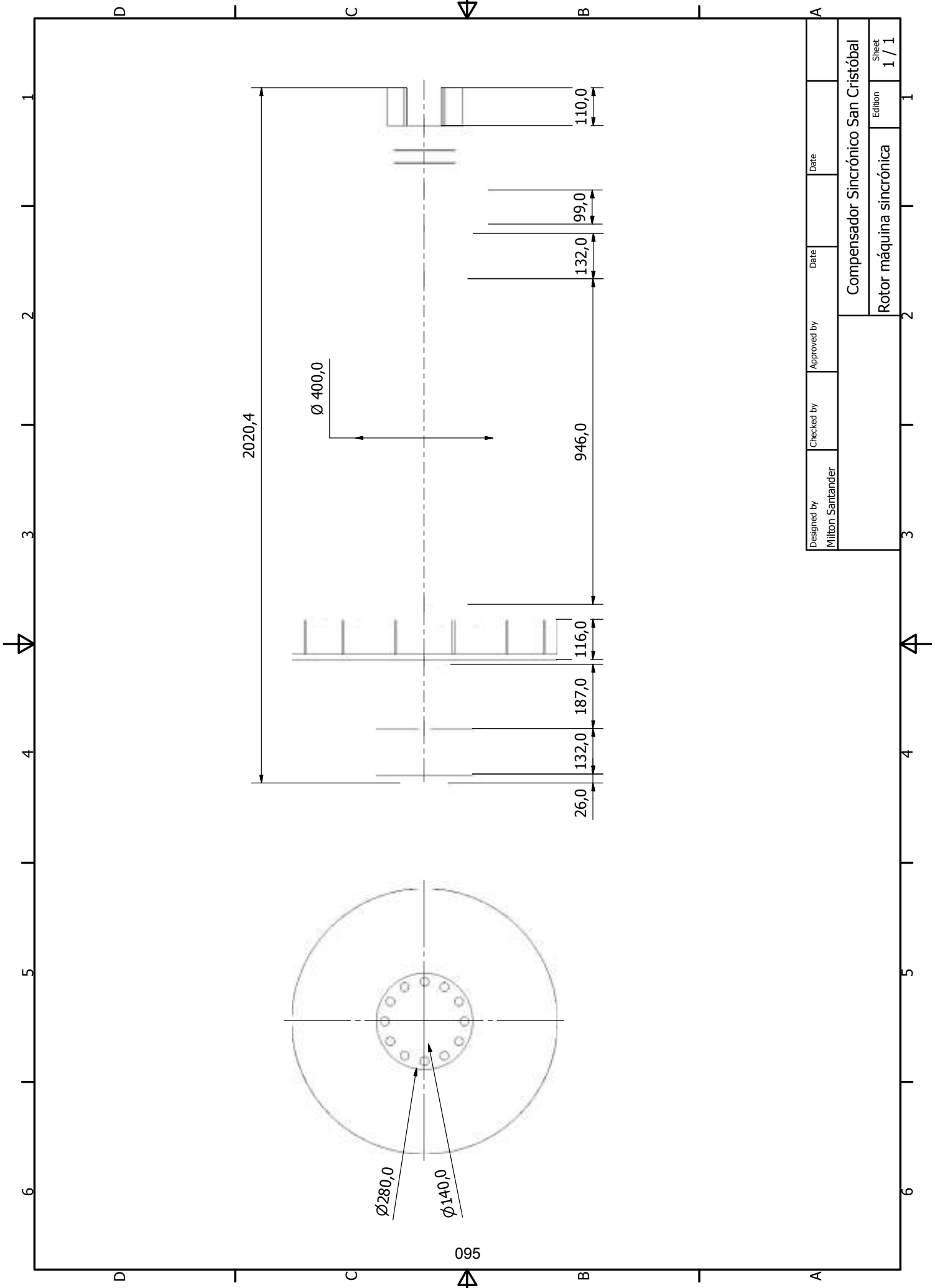
Designed by Milton Santander	Checked by	Approved by	Date
Compensador Sincrónico San Cristóbal			
Despiece soporte posterior		Edition	Sheet
		1 / 1	1 / 1



A-A ( 0.15 : 1 )

Designed by Milton Santander	Checked by	Approved by	Date	Date	A
Compensador Sincrónico San Cristóbal					Sheet
					Corte rodamiento posterior

094



Designed by Milton Santander	Checked by	Approved by	Date	Date	Date
Compensador Sincrónico San Cristóbal			Edition		
			Rotor máquina sincrónica		

## ANEXO IV. CÓDIGO EN MATLAB DE CURVA DE CAPABILIDAD

```
function varargout = Curva_de_Capabilidad_correccion(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Curva_de_Capabilidad_correccion_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Curva_de_Capabilidad_correccion_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    if narginout
        [varargout{1:narginout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
    else
        gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
    end
end
function Curva_de_Capabilidad_correccion_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
set(handles.radiobutton1,'Enable','off');
set(handles.radiobutton2,'Enable','off');
set(handles.radiobutton3,'Enable','off');
set(handles.radiobutton4,'Enable','off');
set(handles.radiobutton7,'Enable','off');
set(handles.radiobutton8,'Enable','off');
set(handles.radiobutton9,'Enable','off');
set(handles.radiobutton10,'Enable','off');
set(handles.radiobutton11,'Enable','off');
global aux; global cont; global cont1; global cont2; global cont3; global cont4; global
cont5; global cont6; global cont7; global cont8; aux=0; cont=0; cont1=0; cont2=0; cont3=0;
cont4=0; cont5=0; cont6=0; cont7=0; cont8=0;
handles.output = hObject; guidata(hObject, handles);
function varargout = Curva_de_Capabilidad_correccion_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global S;
S=str2double(get(hObject,'String'));
function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
global SB;
SB=str2double(get(hObject,'String'));
function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
global fp; global P; global S;
fp=str2double(get(hObject,'String'));
P=S*fp;
set(handles.text32, 'String', int2str(P));
function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
global P;
P=str2double(get(hObject,'String'));
function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
global V;
V=str2double(get(hObject,'String'));
function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)
global xd;
xd=str2double(get(hObject,'String'));
function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
global MSlex;
MSlex=str2double(get(hObject,'String'));
function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
global xq;
xq=str2double(get(hObject,'String'));
function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
global MSles;
MSles=str2double(get(hObject,'String'));
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
global S; global SB; global P; global Q; global V; global Ia; global fp; global xd; global
xq; global s; global n; global m; global kl; global Ppu; global Qpu; global phi; global Epu;
```

```

global MSles; global MSlex; global aux; global x; global y; global x11; global y11; global
x1; global y1; global x2; global y2; global x3; global y3; global x4; global x5; global x6;
global y5; global x4I; global y4I; global x5I; global y5I; global x6I; global y6I; global
x7I; global y7I; global x8I; global y8I; global x9I; global y9I;
axes(handles.axes2);
cla;
pw = msgbox('Por favor espere...');
s=(1/2)*((xd-xq)/(xd*xq))
n=(1/2)*((xd+xq)/(xd*xq))
k1=n+s
IB=(SB*1000)/(V*sqrt(3))
Ia=(S*1000)/(V*sqrt(3))
Ipu=Ia/IB
XqIr=xq*Ipu
XqIa=(pi/2)-(acos(fp))
[XqIx,XqIy]=pol2cart(XqIa,XqIr)
Eqx=1+XqIx
Eqy=XqIy
[Eqa,Eqr]=cart2pol(Eqx,Eqy)
phi=Eqa
Ppu=P/S
Q=sqrt((S^2)-(P^2))
Qpu=Q/S
syms E QAx1 t1 X1 Y1 X2 Y2;
Epu=(Ppu-(0.5*((xd-xq)/(xd*xq))*sin(2*phi)))*xd/sin(phi)
m=Epu/xd
aux=1;
hold on;
x=-1:0.001:1;
y=sqrt(((S/SB)^2)-(x.^2));
x11=0:0.001:pi;
y11=sqrt(((S/SB)^2)-(x11.^2));
handles.x=x;
handles.y=y;
t=0:0.001:pi;
x1=(m.*cos(t))+(s.*cos(2.*t))-n;
y1=(m.*sin(t))+(s.*sin(2.*t));
handles.x1=x1;
handles.y1=y1;
x2=[-1:0.001:1];
y2=Ppu+(0.*x2);
handles.x2=x2;
handles.y2=y2;
x3=-s-n:0.0001:s-n;
y3=sqrt(((x3+k1).^3)/(s-n-x3));
x4=x3+(2*MSles/100);
y4=y3;
x5=-n-s:0.0001:-n-s;
y5=sqrt((s^2)-((x5+n).^2));
x6=x5+(2*MSlex/100);
y6=y5;
Y=Ppu;
t2=solve([Y==(m*sin(t1))+(s*(sin(2*t1)))]);
x4I=(m*cos(t2))+(s*cos(2*t2))-n;
y4I=(m*sin(t2))+(s*sin(2*t2));
Sol3=solve([Y1==(m*sin(t1))+(s*(sin(2*t1))),X1==(m*cos(t1))+(s*cos(2.*t1))-n,Y1==sqrt(1^2-
X1^2)]);
x5I=Sol3.X1;
y5I=Sol3.Y1;
Sol4=solve([Y1==sqrt(1^2-(X1+(2*MSles/100))^2),Y1==sqrt(((X1+k1)^3)/(s-n-X1))]);
x6I=Sol4.X1(2)+(2*MSles/100);
y6I=Sol4.Y1(2);
Sol5=solve([Y==sqrt(((X1+k1)^3)/(s-n-X1))]);
x7I=Sol5(1)+(2*MSles/100);
y7I=Y;
Sol6=solve([Y2==sqrt((s^2)-((X2+n)+(2*MSles/100)-(2*MSlex/100))^2),Y2==sqrt(((X2+k1)^3)/(s-
n-X2))]);
x8I=Sol6.X2(2)+(2*MSles/100);
y8I=Sol6.Y2(2);
y9I=0;
Sol7=solve(y9I==sqrt((s^2)-((X2+n)^2)));

```

```

x9I=Sol7(2)+(2*MSlex/100);
axes(handles.axes3);
path = 'leyenda.png';
imag = imread(path);
imshow(imag);
set(handles.radiobutton1,'Enable','on');
set(handles.radiobutton2,'Enable','on');
set(handles.radiobutton3,'Enable','on');
set(handles.radiobutton4,'Enable','on');
set(handles.radiobutton7,'Enable','on');
set(handles.radiobutton8,'Enable','on');
set(handles.radiobutton9,'Enable','on');
set(handles.radiobutton10,'Enable','on');
set(handles.radiobutton11,'Enable','on');
delete(pw);
msgbox('Escoga entre valores reales o valores por unidad');
set(handles.radiobutton1,'Value',0);
set(handles.radiobutton2,'Value',0);
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global S; global x; global y; global Ppu; global Qpu; global x11; global y11; global x4I;
global y4I; global x5I; global y5I; global x6I; global y6I; global x7I; global y7I; global
x8I; global y8I; global x9I; global y9I; global x1; global y1; global x2; global y2; global
x3; global y3; global x4; global x5; global x6; global y5; global xR; global yR; global
x11R; global y11R; global x1R; global y1R; global x2R; global y2R; global x3R; global y3R;
global x4R; global x5R; global x6R; global y5R; global px; global py; global px1; global
y1; global px2; global py2; global px3; global py3; global px4; global py4; global px5;
global py5; global px6; global py6; global px7; global py7; global px8; global py8;
xR=x*S;
yR=y*S;
x11R=x11*S;
y11R=y11*S;
x1R=x1*S;
y1R=y1*S;
x2R=x2*S;
y2R=y2*S;
x3R=x3*S;
y3R=y3*S;
x4R=x4*S;
x5R=x5*S;
x6R=x6*S;
y5R=y5*S;
PpuR=Ppu*S;
QpuR=Qpu*S;
idx = find(y1R - 0 < eps, 1);
px = x1R(idx);
py = y1R(idx);
px1 = x5I*S;
py1 = y5I*S;
py2 = y4I*S;
px2 = x4I*S;
py3 = PpuR;
px3 = QpuR;
px4 = -px3;
py4 = py3;
px5 = x6I*S;
py5 = y6I*S;
px6 = x7I*S;
py6 = y7I*S;
px7 = x8I*S;
py7 = y8I*S;
px8 = x9I*S;
py8 = y9I*S;
set(handles.text11, 'String', int2str(py));
set(handles.text20, 'String', int2str(px));
set(handles.text12, 'String', double(py1));
set(handles.text21, 'String', double(px1));
set(handles.text15, 'String', double(py4));
set(handles.text24, 'String', double(px4));
set(handles.text16, 'String', double(py5));
set(handles.text25, 'String', double(px5));
set(handles.text17, 'String', double(py6));

```

```

set(handles.text26, 'String', double(px6));
set(handles.text18, 'String', double(py7));
set(handles.text27, 'String', double(px7));
set(handles.text19, 'String', double(py8));
set(handles.text28, 'String', double(px8));
set(handles radiobutton2, 'Value', 0);
axes(handles.axes2);
cla;
plot(xR, yR, 'g', 'linewidth', 2);
hold on;
plot(x1R, y1R, 'b', 'linewidth', 2);
plot(x2R, y2R, 'r', 'linewidth', 2);
plot(x3R, y3R, '--m', 'linewidth', 2);
plot(x4R, y3R, 'm', 'linewidth', 2);
plot(x5R, y5R, '--k', 'linewidth', 2);
plot(x6R, y5R, 'k', 'linewidth', 2);
xlim([-S, S]);
ylim([0, S]);
S1=floor(S/100);
set(gca, 'xtick', [-S1*100:200:S1*100]);
set(gca, 'ytick', [0:100:S]);
xlabel('Potencia Reactiva (kVAR)');
ylabel('Potencia Activa (kW)');
function radiobutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
global x; global y; global S; global x4I; global y4I; global x5I; global y5I; global x6I;
global y6I; global x7I; global y7I; global x8I; global y8I; global x9I; global y9I; global
1; global y1; global x2; global y2; global x3; global y3; global x4; global x5; global x6;
global y5; global px; global py; global px1; global py1; global px2; global py2; global px3;
global py3; global px4; global py4; global px5; global py5; global px6; global py6; global
x7; global py7; global px8; global py8; global Ppu; global Qpu;
set(handles radiobutton1, 'Value', 0);
axes(handles.axes2);
cla;
plot(x, y, 'g', 'linewidth', 2);
hold on;
plot(x1, y1, 'b', 'linewidth', 2);
plot(x2, y2, 'r', 'linewidth', 2);
plot(x3, y3, '--m', 'linewidth', 2);
plot(x4, y3, 'm', 'linewidth', 2);
plot(x5, y5, '--k', 'linewidth', 2);
plot(x6, y5, 'k', 'linewidth', 2);
xlim([-1, 1]);
ylim([0, 1]);
set(gca, 'xtick', [-1:0.1:1]);
set(gca, 'ytick', [0:0.1:1]);
xlabel('Potencia Reactiva (pu)');
ylabel('Potencia Activa (pu)');
idx = find(y1 - 0 < eps, 1);
px = x1(idx);
py = y1(idx);
px1 = x5I;
py1 = y5I;
py2 = y4I;
px2 = x4I;
px3 = Qpu;
py3 = Ppu;
px4 = -px3;
py4 = py3;
px5 = x6I;
py5 = y6I;
px6 = x7I;
py6 = y7I;
px7 = x8I;
py7 = y8I;
px8 = x9I;
py8 = y9I;
set(handles.text11, 'String', int2str(py*S));
set(handles.text20, 'String', int2str(px*S));
set(handles.text12, 'String', double(py1*S));
set(handles.text21, 'String', double(px1*S));
set(handles.text13, 'String', double(py2*S));

```

```

set(handles.text22, 'String', double(px2*S));
set(handles.text14, 'String', double(py3*S));
set(handles.text23, 'String', double(px3*S));
set(handles.text15, 'String', double(py4*S));
set(handles.text24, 'String', double(px4*S));
set(handles.text16, 'String', double(py5*S));
set(handles.text25, 'String', double(px5*S));
set(handles.text17, 'String', double(py6*S));
set(handles.text26, 'String', double(px6*S));
set(handles.text18, 'String', double(py7*S));
set(handles.text27, 'String', double(px7*S));
set(handles.text19, 'String', double(py8*S));
set(handles.text28, 'String', double(px8*S));
function radiobutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
global cont; global p1; global px; global py; cont=cont+1;
if mod(cont,2)==0
    axes(handles.axes2);
    set(p1,'visible','off');
else
    axes(handles.axes2);
    p1=plot(px, py, 'k.', 'MarkerSize', 20);
end
function radiobutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
global cont1; global p2; global px1; global py1;
cont1=cont1+1;
if mod(cont1,2)==0
    axes(handles.axes2);
    set(p2,'visible','off');
else
    axes(handles.axes2);
    p2=plot(px1, py1, 'k.', 'MarkerSize', 20);
end
function radiobutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
global cont4; global p5; global px4; global py4;
cont4=cont4+1;
if mod(cont4,2)==0
    axes(handles.axes2);
    set(p5,'visible','off');
else
    axes(handles.axes2);
    p5=plot(px4, py4, 'k.', 'MarkerSize', 20);
end
function radiobutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
global cont5; global p6; global px5; global py5;
cont5=cont5+1;
if mod(cont5,2)==0
    axes(handles.axes2);
    set(p6,'visible','off');
else
    axes(handles.axes2);
    p6=plot(px5, py5, 'k.', 'MarkerSize', 20);
end
function radiobutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
global cont6;
global p7; global px6; global py6; cont6=cont6+1;
if mod(cont6,2)==0
    axes(handles.axes2);
    set(p7,'visible','off');
else
    axes(handles.axes2);
    p7=plot(px6, py6, 'k.', 'MarkerSize', 20);
end
function radiobutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)
global cont7; global p8; global px7; global py7;
cont7=cont7+1;
if mod(cont7,2)==0
    axes(handles.axes2);
    set(p8,'visible','off');
else
    axes(handles.axes2);
    p8=plot(px7, py7, 'k.', 'MarkerSize', 20);
end

```

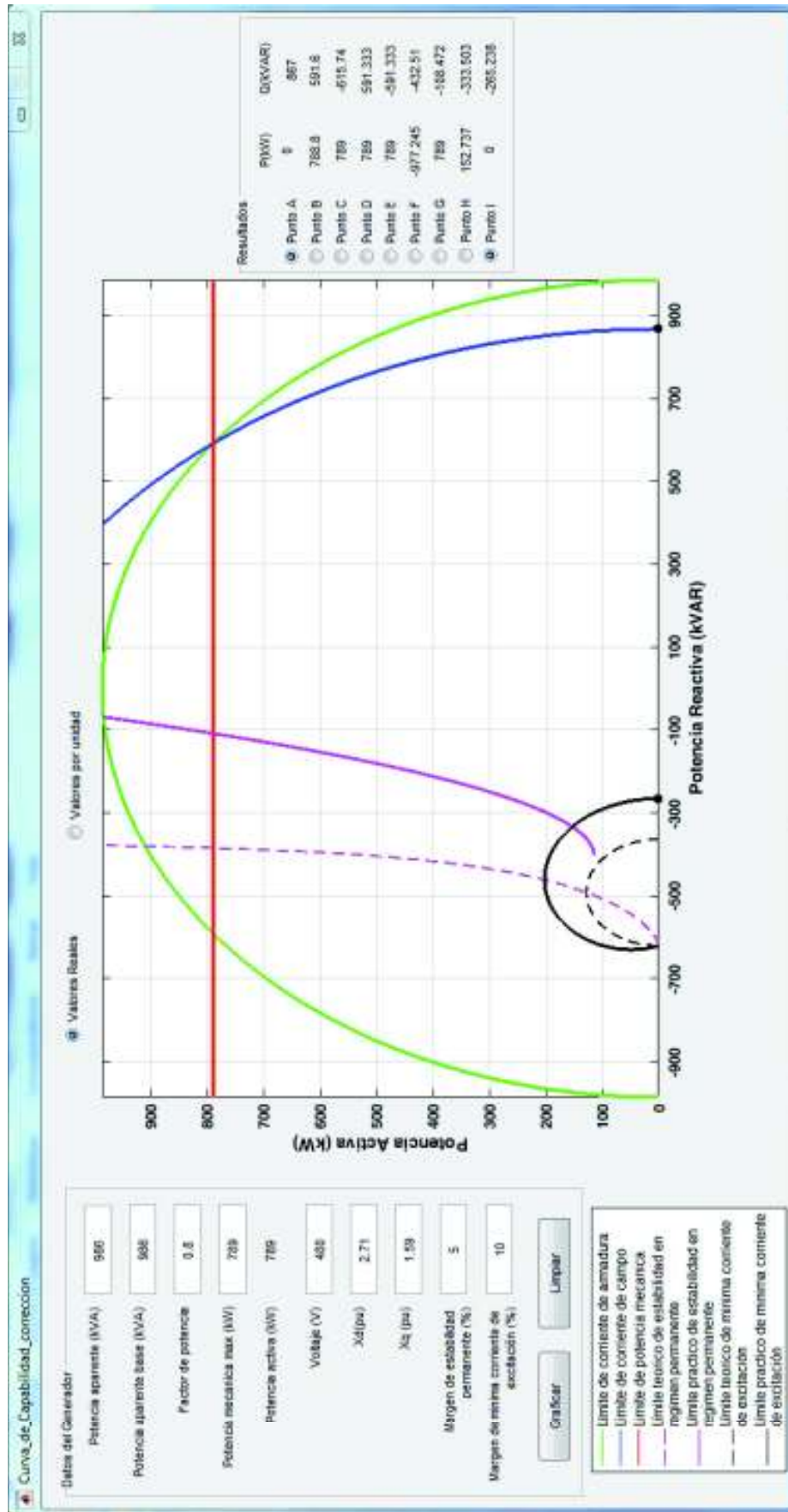


```

end
function radiobutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)
global cont8; global p9; global px8; global py8; cont8=cont8+1;
if mod(cont8,2)==0
    axes(handles.axes2);
    set(p9,'visible','off');
else
    axes(handles.axes2);
    p9=plot(px8, py8, 'k.', 'MarkerSize', 20);
end
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.radiobutton1,'Value',0);
set(handles.radiobutton2,'Value',0);
set(handles.radiobutton3,'Value',0);
set(handles.radiobutton4,'Value',0);
set(handles.radiobutton5,'Value',0);
set(handles.radiobutton6,'Value',0);
set(handles.radiobutton7,'Value',0);
set(handles.radiobutton8,'Value',0);
set(handles.radiobutton9,'Value',0);
set(handles.radiobutton10,'Value',0);
set(handles.radiobutton11,'Value',0);
set(handles.text11, 'String', '-');
set(handles.text20, 'String', '-');
set(handles.text12, 'String', '-');
set(handles.text21, 'String', '-');
set(handles.text13, 'String', '-');
set(handles.text22, 'String', '-');
set(handles.text14, 'String', '-');
set(handles.text23, 'String', '-');
set(handles.text15, 'String', '-');
set(handles.text24, 'String', '-');
set(handles.text16, 'String', '-');
set(handles.text25, 'String', '-');
set(handles.text17, 'String', '-');
set(handles.text26, 'String', '-');
set(handles.text18, 'String', '-');
set(handles.text27, 'String', '-');
set(handles.text19, 'String', '-');
set(handles.text28, 'String', '-');
set(handles.edit13, 'String', ' ');
set(handles.edit1, 'String', ' ');
set(handles.edit4, 'String', ' ');
set(handles.edit5, 'String', ' ');
set(handles.edit7, 'String', ' ');
set(handles.edit8, 'String', ' ');
set(handles.edit10, 'String', ' ');
set(handles.edit11, 'String', ' ');
set(handles.edit9, 'String', ' ');
axes(handles.axes2);
cla;
axes(handles.axes3);
cla;
clear all;

```

# ANEXO V. RESULTADO OBTENIDO DE LA SIMULACIÓN DE LA CURVA DE CAPABILIDAD



## ANEXO VI. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL COMPENSADOR SINCRÓNICO



Placa de la unidad de generación térmica a utilizarse como compensador sincrónico



Generador sincrónico desacoplado



Motor de combustión interna siniestrado, eje de acople al generador sincrónico



Construcción de la pieza de la Figura 2.17



Máquina sincrónica, eje de acople al MCI



Construcción de la pieza de la Figura 2.17



Pieza de unión entre el MCI y el generador sincrónico



Construcción de la pieza de la Figura 2.17



Pieza de la Figura 2.17 finalizada



Pieza de la Figura 2.17 finalizada



Construcción de la pieza de la Figura 2.17



Plancha y tapa de la Figura 2.19



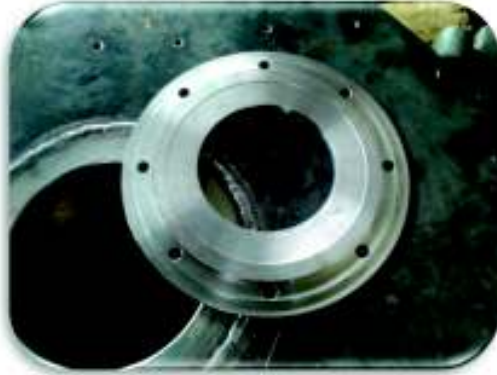
Construcción de la pieza de la Figura 2.19



Construcción de la pieza de la Figura 2.17



Construcción de la pieza de la Figura 2.19



Construcción de la pieza de la Figura 2.19



Pieza de la Figura 2.17 c) finalizada y unida al embrague magnético (Vista anterior)



Construcción de la pieza de la Figura 2.19



Pieza de la Figura 2.17 c) finalizada y unida al embrague magnético (Vista posterior)



Motor eléctrico de arranque acoplado parcialmente al embrague mecánico (Figura 2.18 Conector)



Embrague magnético (anillos rozantes) y acople hacia motor eléctrico



Acople de la Figura 2.18



Conector a eje de motor de arranque (Figura 2.18)



Acople de las piezas de las Figuras 2.17 y 2.19 (Vista frontal)



Construcción de la pieza de la Figura 2.19



Acople de las piezas de las Figuras 2.17 y 2.19 (Vista posterior)



Pieza de la Figura 2.17 finalizada y acoplada al rodamiento de la Figura 2.19



Acople de la pieza de la Figura 2.17 al eje del generador síncrono



Pieza especial construida para medir el torque necesario para sacar el conjunto rotórico de la inercia



Compensador sincrónico (Vista lateral)



Acople del motor eléctrico al embrague magnético



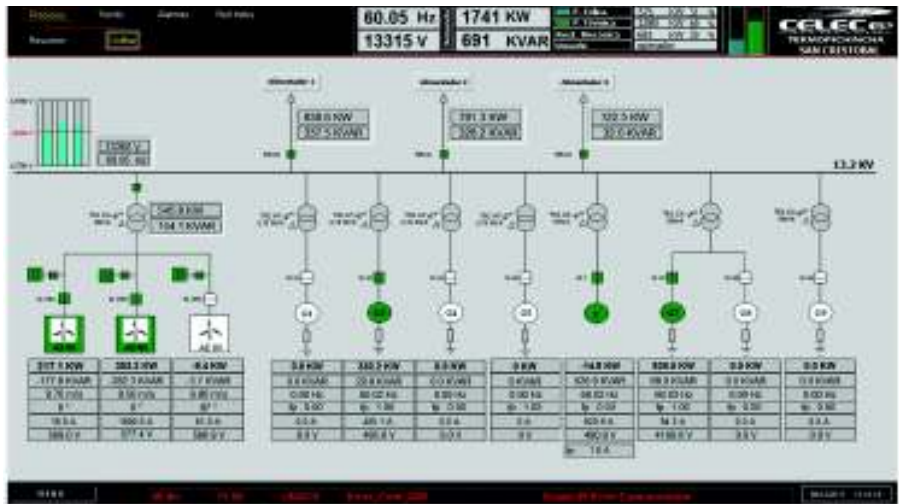
Compensador sincrónico (Vista superior)



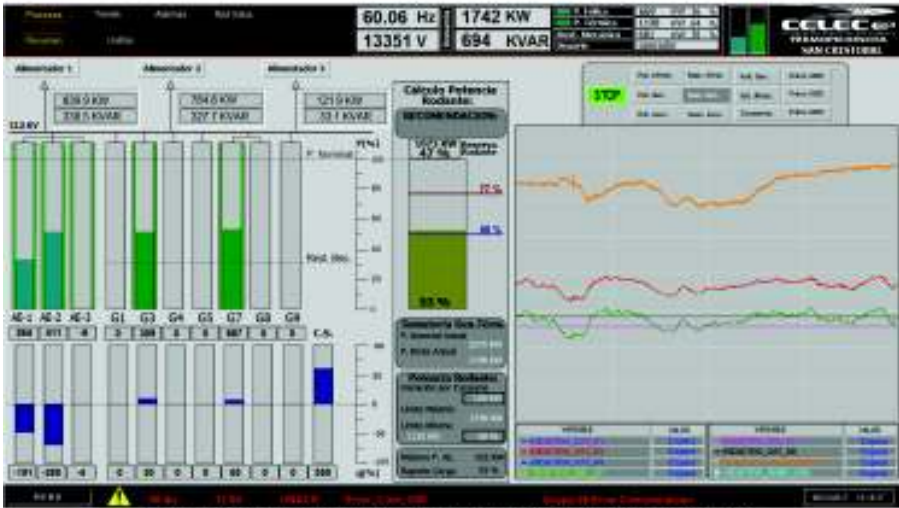
Soporte del motor eléctrico



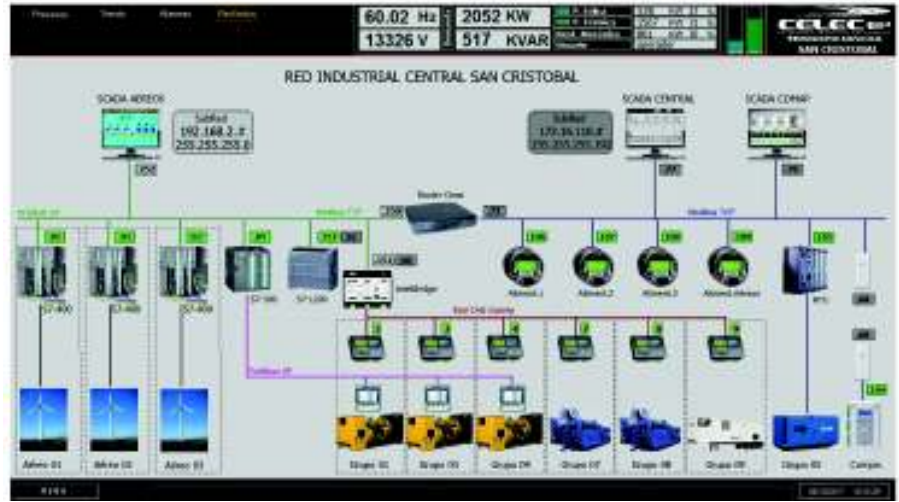
Tablero de control



Integración del compensador sincrónico al SCADA (Diagrama unifilar)



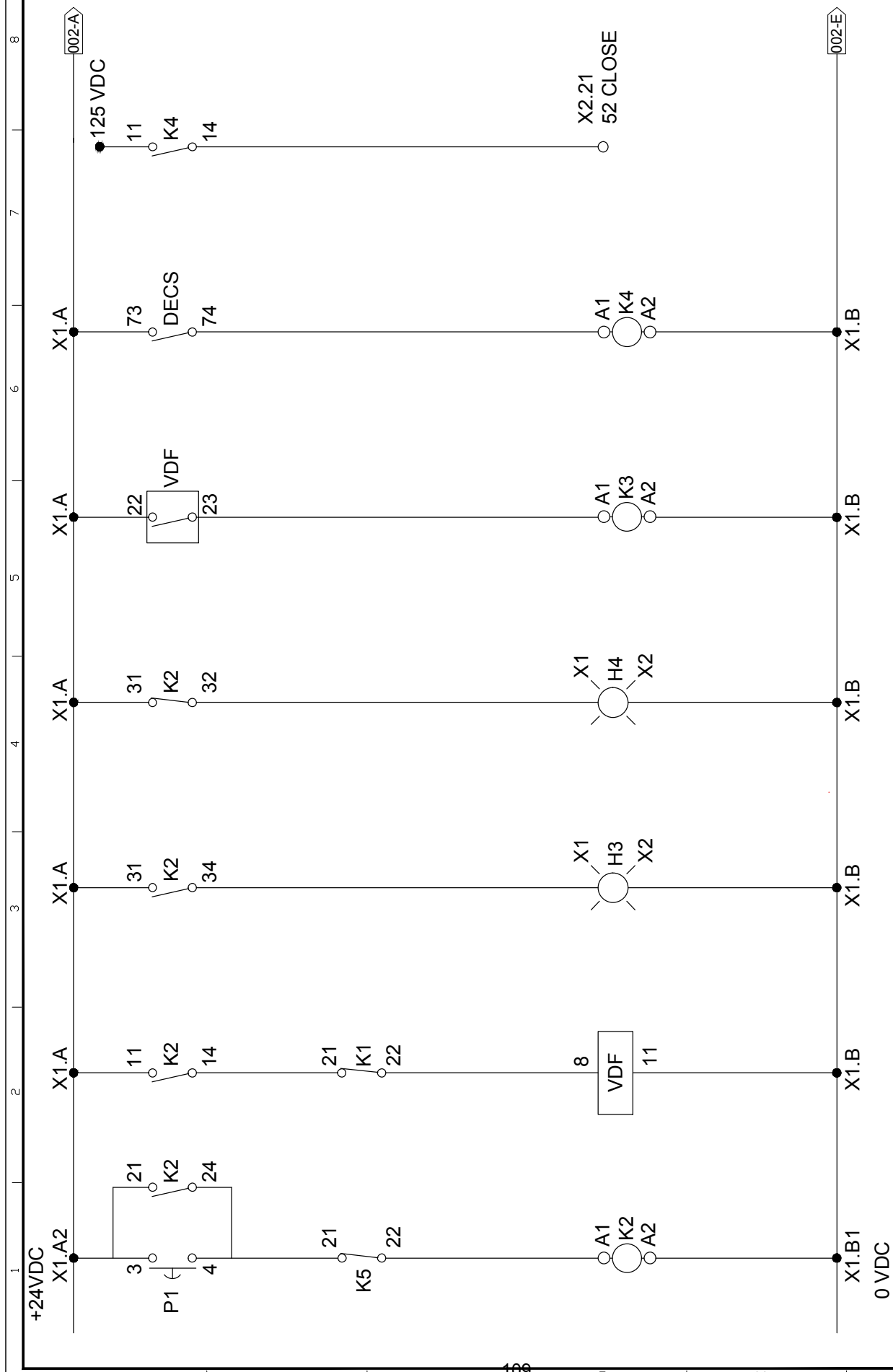
Integración del compensador sincrónico al SCADA (Control principal)



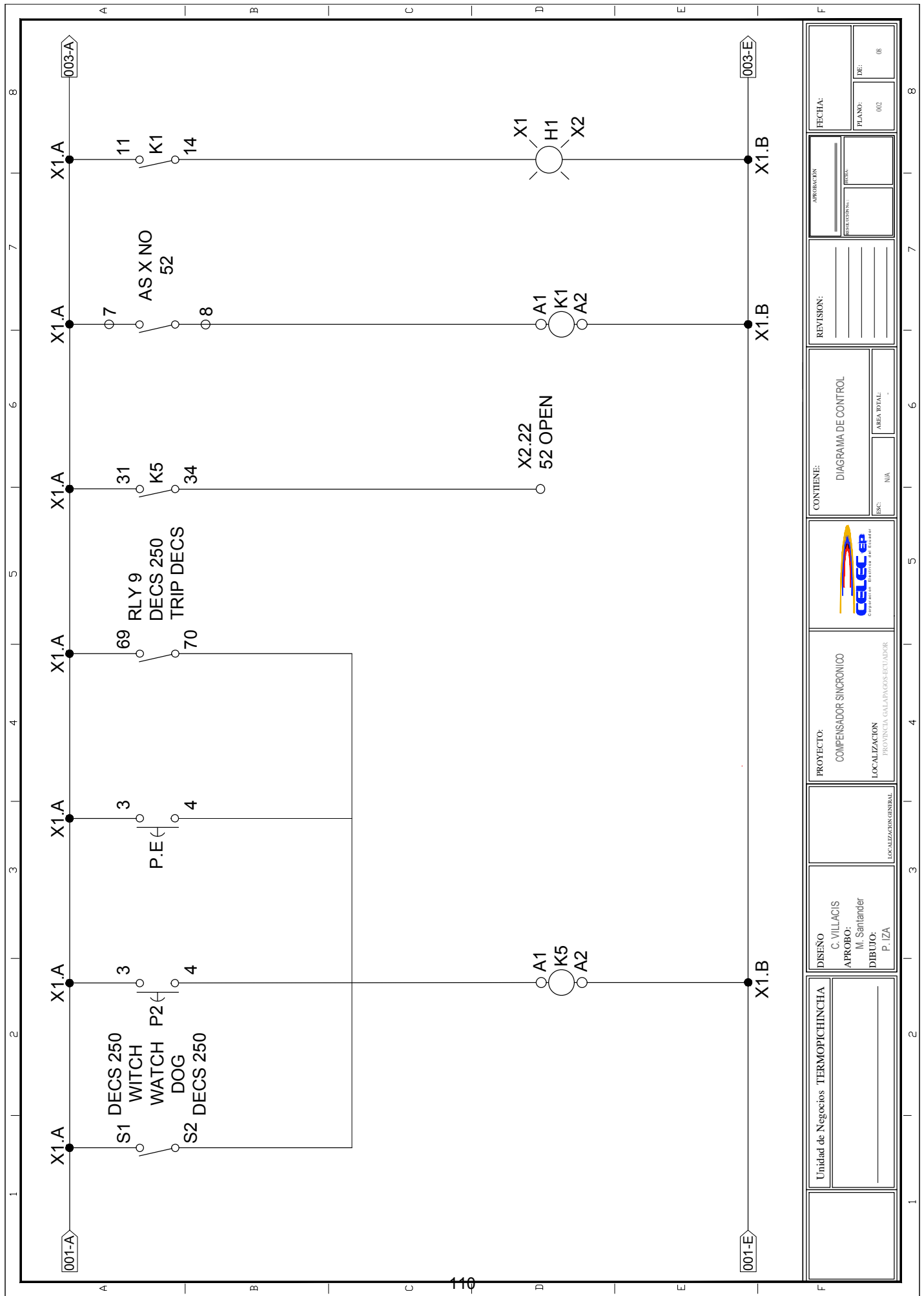
Integración del compensador sincrónico al SCADA (Red industrial)



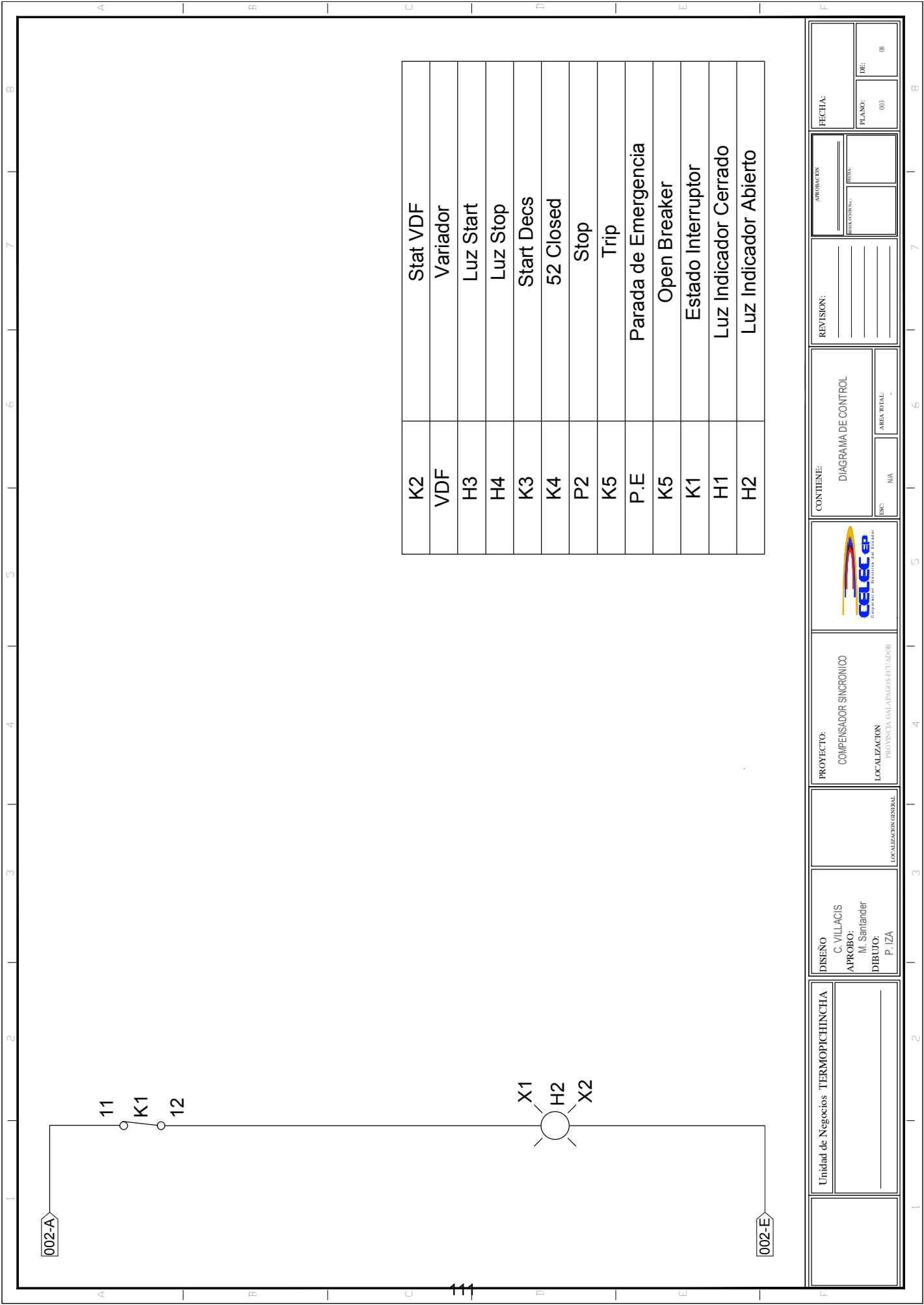
ANEXO VII. PLANOS ELÉCTRICOS DEL COMPENSADOR SINCRÓNICO




Unidad de Negocios		TERMOPICHINCHA		DISEÑO C. VILLACIS		LOCALIZACIÓN GENERAL		PROYECTO: COMPENSADOR SINCRÓNICO		CONTIENE: DIAGRAMA DE CONTROL		REVISION:		FECHA:	
				APROBO: M. Santander		LOCALIZACIÓN FREQUENCIA CALLE ALVARO GONZALEZ		LOCALIZACIÓN TOTAL		ESC: N/A				RESOLUCIÓN:	
				DIBUJO: P. IZA										PLANO: 001	
														DE: 08	

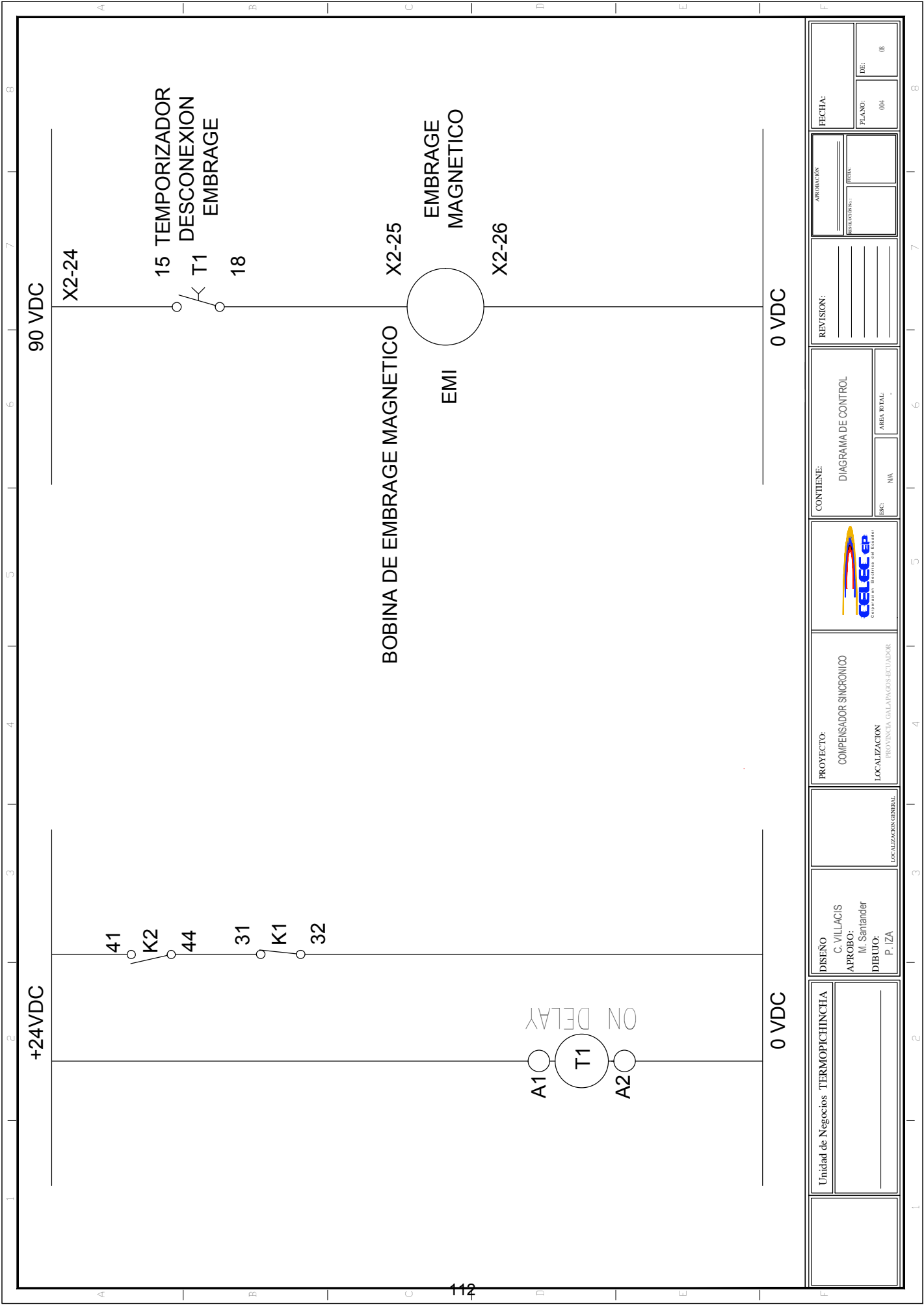


Unidad de Negocios	TERMOPICHINCHA	DISEÑO	C. VILLACIS	PROYECTO:	COMPENSADOR SINCRONICO	CONTIENE:	DIAGRAMA DE CONTROL	REVISION:	ABRIL 2008	FECHA:
		APROBO:	M. Santander	LOCALIZACION:	REGIENCIA GALAPAGOS ECTADOR	ESC:	N/A		RESOLUCION:	
		DIBUJO:	P. IZA	LOCALIZACION GENERAL:					FECHA:	
									PLANO:	002
									DE:	08

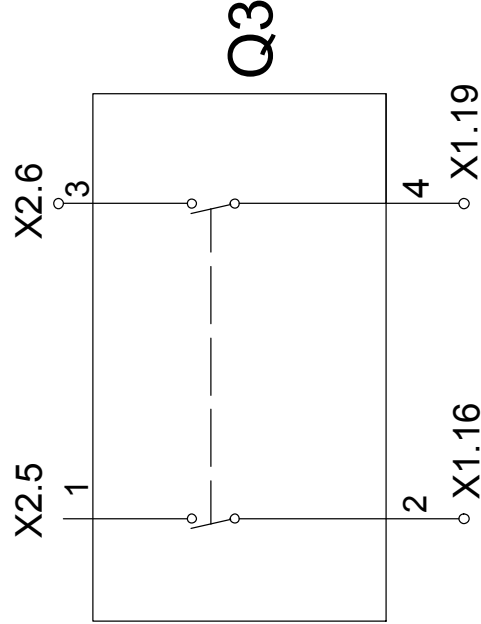
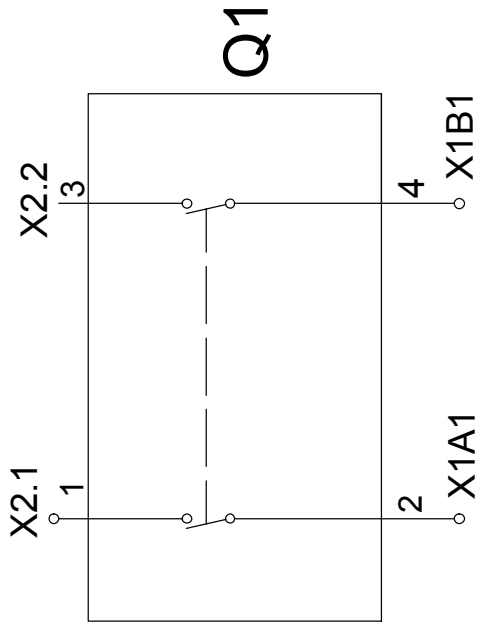
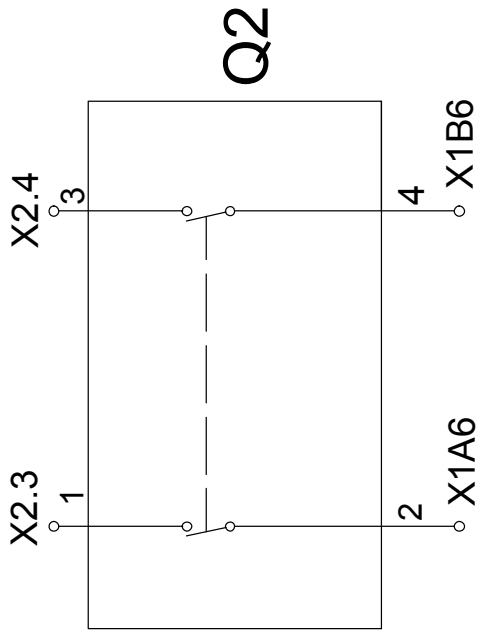


K2	Stat VDF
VDF	Variador
H3	Luz Start
H4	Luz Stop
K3	Start Decs
K4	52 Closed
P2	Stop
K5	Trip
P.E	Parada de Emergencia
K5	Open Breaker
K1	Estado Interruptor
H1	Luz Indicador Cerrado
H2	Luz Indicador Abierto


Unidad de Negocios	TERMOPICHINCHA	DISEÑO C. VILLACIS	PROYECTO: COMPENSADOR SINCRONICO	 <b>CELEC</b> <small>COMPANIA ECUATORIANA DE ELECTRICIDAD</small>	CONTIENE: DIAGRAMA DE CONTROL	REVISION:	ABRILACION FECHA:
		APROBO: M. Santander DIBUJO: P. IZA	LOCALIZACION: FREQUENCIA GALAPAGOS EJECTADOR		ESC: N/A AREA TOTAL: ..	RESOLUCION: FECHA:	PLANO: 003

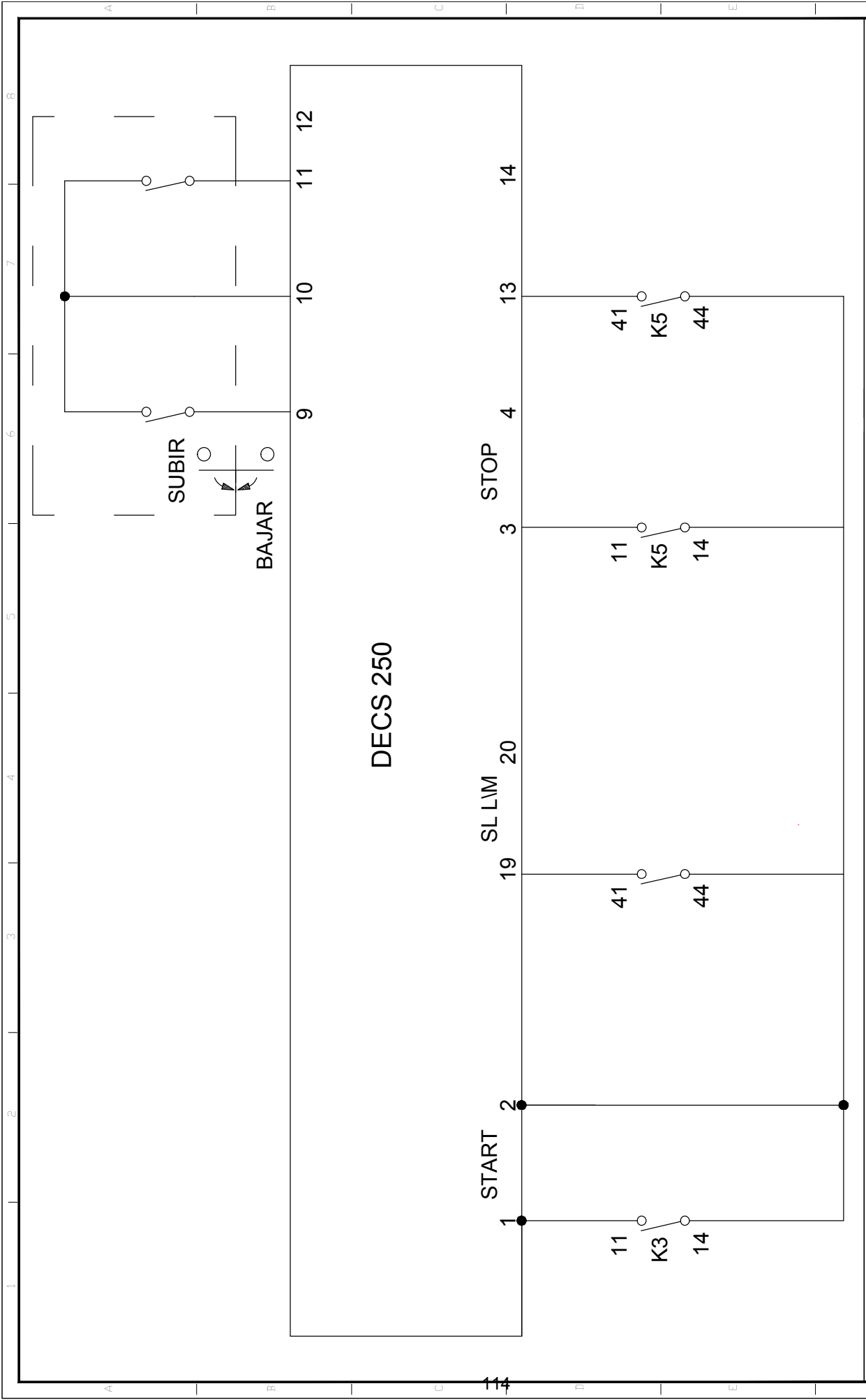


Unidad de Negocios	TERMOPICHINCHA	DISEÑO	C. VILLACIS	PROYECTO:	COMPENSADOR SINCRONICO	CONTIENE:	DIAGRAMA DE CONTROL	REVISION:	ABRIL 2008	FECHA:
		APROBO:	M. Santander	LOCALIZACION	REGISTRO DE CALIDAD Y CONTROL	ESC:	MA		RESOLUCION:	
		DIBUJO:	P. IZA	LOCALIZACION GENERAL					FECHA:	
									PLANO:	004
									DE:	08




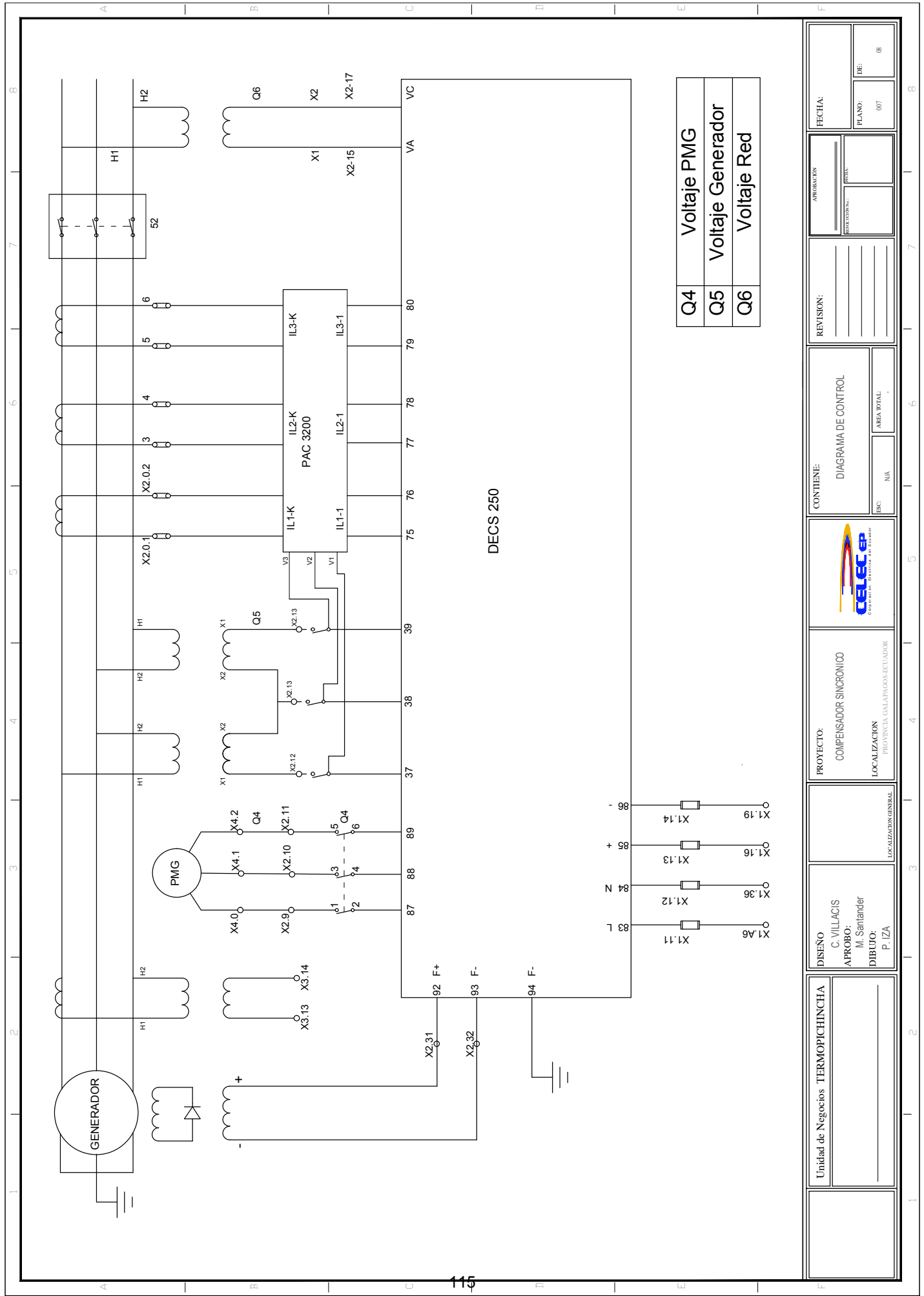
Q1	240 VDC
Q2	110 VAC
Q3	125 VDC

Unidad de Negocios	TERMOPICHINCHA	DISEÑO C. VILLACIS APROBO: M. Santander DIBUJO: P. IZA	LOCALIZACION GENERAL	LOCALIZACION FRECUENCIA CALAPUQUENSECTADOR	 <b>CELEC</b> <small>COMPANIA ELECTRICA DEL ECUADOR</small>	CONTIENE:	DIAGRAMA DE CONTROL	REVISION:	ABRILACION	FECHA:
	ESC: N/A					AREA TOTAL: ..	REVISION:	REVISION:	REVISION:	REVISION:




DECS 250

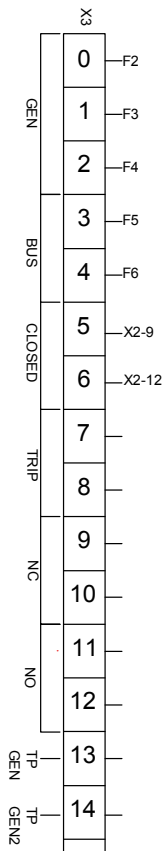
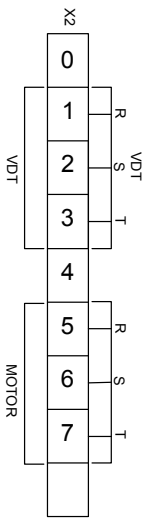
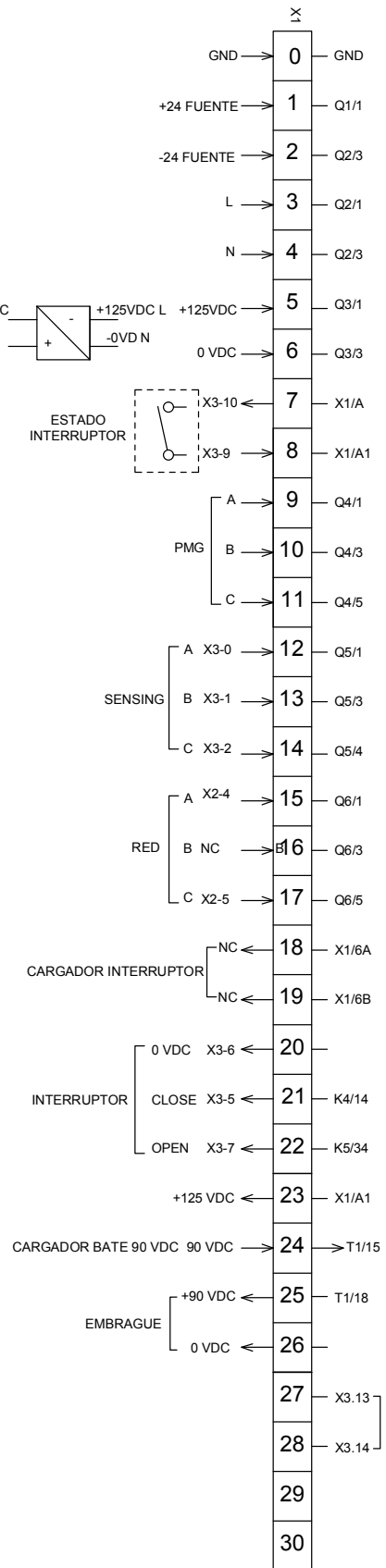
Unidad de Negocios TERMOPICHINCHA	DISEÑO C. VILLACIS APROBO: M. Santander DIBUJO: P. IZA	LOCALIZACION GENERAL LOCALIZACION FRECUENCIA GALAPAGOS EJECTADOR	PROYECTO: COMPENSADOR SINCRONICO LOCALIZACION FRECUENCIA GALAPAGOS EJECTADOR	 CELEC COMPAÑIA ELECTRICA DEL ECUADOR	CONTENIDO: DIAGRAMA DE CONTROL ESC: N/A AREA TOTAL: .	REVISION: FECHA:	APROBACION FECHA:
						PLANOS: 006 DE: 08	



DECS 250

Q4	Voltaje PMG
Q5	Voltaje Generador
Q6	Voltaje Red

Unidad de Negocios	TERMOPICHINCHA	DISEÑO C. VILLACIS	APROBO: M. Santander	DIBUJO: P. IZA	LOCALIZACION GENERAL	LOCALIZACION FRECUENCIA CALLE ALVARO GONZALEZ GONZALEZ	PROYECTO: COMPENSADOR SINCRONICO	 COMPAÑIA ECUATORIANA DE ELECTRICIDAD	CONTIENE: DIAGRAMA DE CONTROL	REVISION:	ABRILACION FECHA:
	ESC: N/A								AREA TOTAL: .	RESOLUCION:	FECHA:
											PLANO: 007
											DE: 08

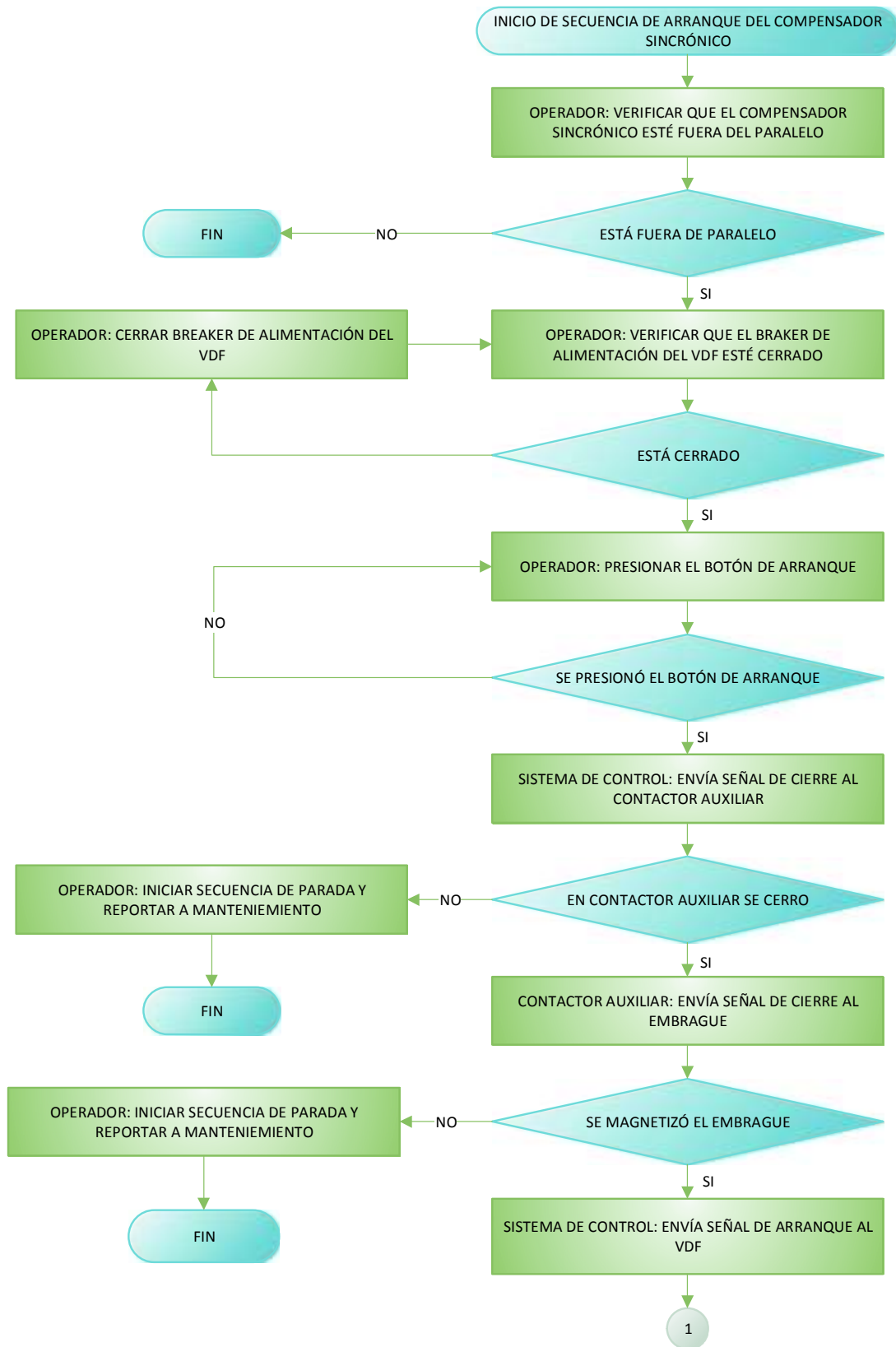


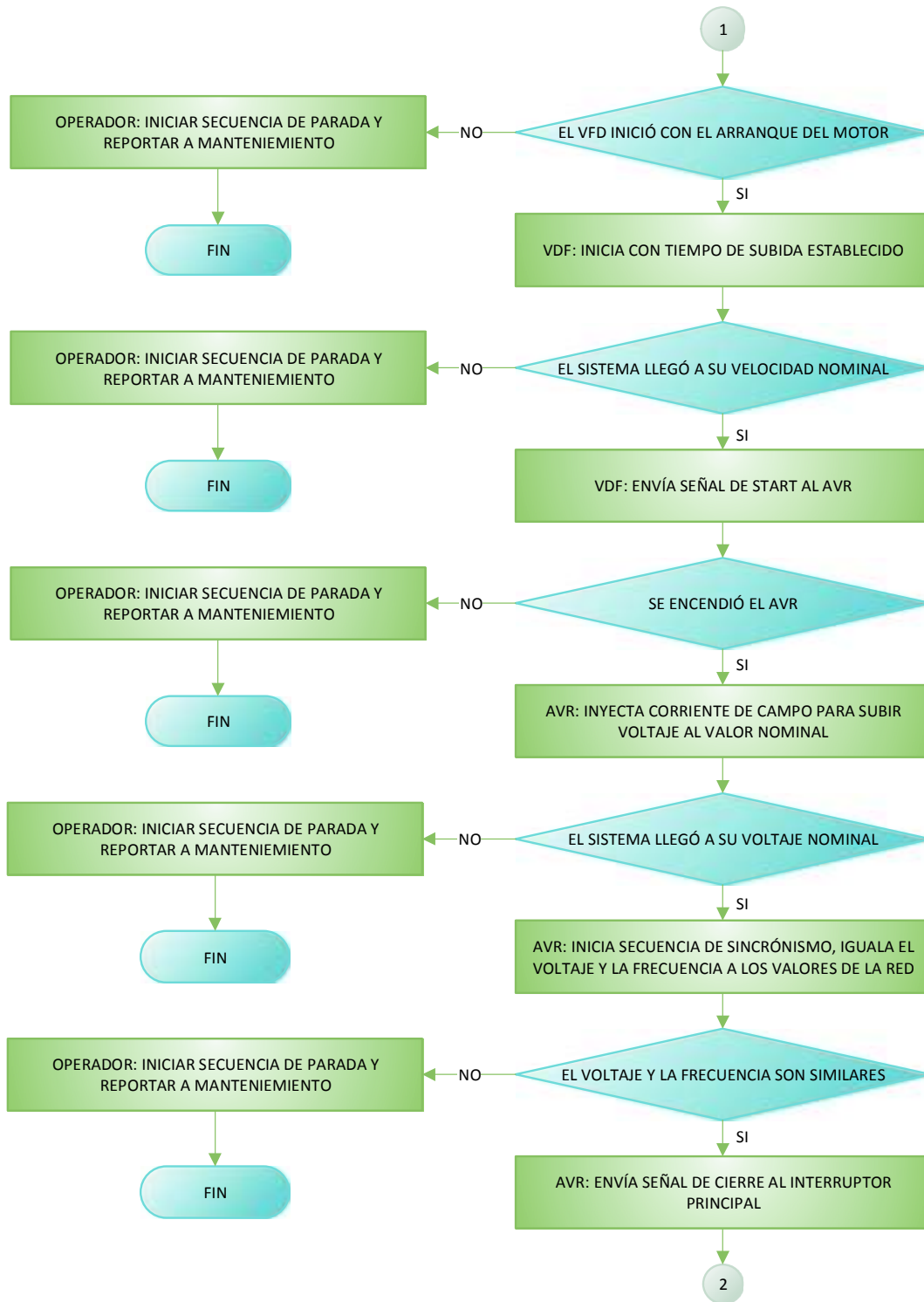
X1	Panel Local
X2	Panel Local
X3	Panel

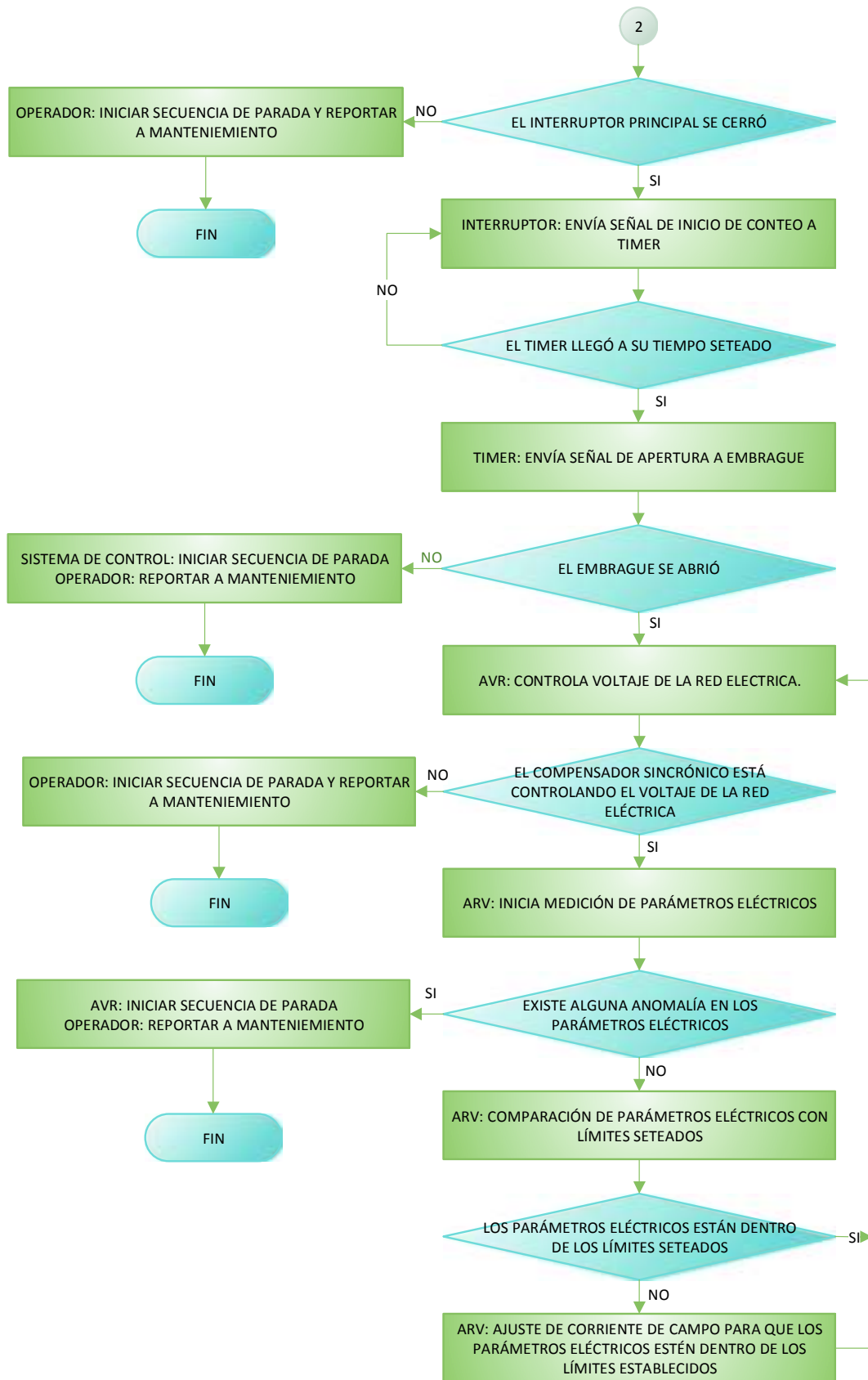
Unidad de Negocios <b>TERMOPICHIHCHA</b>	DISEÑO C. VILLACIS	PROYECTO: COMPENSADOR SINCRONICO	CONTENIDO: DIAGRAMA DE CONTROL	REVISION:	APROBACION:	FECHA:
APROBADO: M. Santander	LOCALIZACION: TROVINGA CALABARON SECCIONADOR	LOCALIZACION: TROVINGA CALABARON SECCIONADOR	INSC: N/A	INSC: N/A	INSC: N/A	INSC: N/A
DIBUJADO: P. IZA	LOCALIZACION: GENERAL	LOCALIZACION: GENERAL	ABAJ TOTAL:	PLANO: 008	DIB: 08	DIB: 08



## ANEXO VIII. FLUJO DE INFORMACIÓN PARA LA OPERACIÓN DEL COMPENSADOR SINCRÓNICO







## ANEXO IX. PROCEDIMIENTO DE ARRANQUE Y PARADA DEL COMPENSADOR SINCRÓNICO

PROCEDIMIENTO PARA ENCENDER EL COMPENSADOR SINCRÓNICO	
1	En el SCADA pasar el control del compensador a "Manual"
2	Sobre el compensador, verificar que el compensador esté totalmente detenido, es decir que no esté girando.
3	Sobre el compensador, verificar que las fajas térmicas se encuentren apagadas.
4	Sobre el tablero auxiliar, verificar que el disyuntor del compensador esté abierto.
5	Sobre el tablero auxiliar, verificar que el disyuntor del compensador se encuentra cargado, de no ser así cargarlo manualmente con la perilla del disyuntor.
6	Sobre el compensador, verificar que el breaker del compensador esté cerrado.
7	Sobre el tablero de control, verificar que el variador de velocidad se encuentre energizado (pantalla frontal encendida)
8	Sobre el tablero de control, verificar que el AVR se encuentre encendido (pantalla frontal encendida)
9	Sobre el tablero de control, verificar que el medidor de energía se encuentre encendido (pantalla frontal encendida)
10	Sobre el variador de velocidad con la ayuda del botón "flecha izquierda" desplazarse hasta que aparezca el menú "M"
11	Sobre el variador de velocidad con la ayuda del botón "flecha superior" desplazarse hasta que aparezca el menú "M1."
12	Sobre el variador de velocidad con la ayuda del botón "flecha derecha" desplazarse hasta que aparezca el menú "V1.1."
13	Sobre el tablero de control del compensador, verificar que la perilla de "sincronoscópio" se encuentra en posición "OFF"
14	Sobre el tablero de control del compensador, verificar que la perilla de "cerrar 52" se encuentra en posición "OFF"
15	Sobre el tablero de control del compensador, verificar que el botón de "emergency stop" se encuentra desactivado
16	Sobre el medidor de energía, con la ayuda de las flechas de desplazamiento ubicarse en la pantalla "2.0"
17	Sobre el tablero de control, presionar el botón "START", y verificar sobre la pantalla del variador de velocidad que la velocidad del compensador comienza a subir progresivamente hasta los 60.7 Hz. (Aproximadamente durará unos 5 minutos)
18	Sobre el medidor de energía verificar que el voltaje es de 480 V aproximadamente en las 3 líneas.
19	Sobre el AVR, con la ayuda del botón "flecha izquierda" desplazarse hacia el menú principal "DECS-250 Digital Excitation Control System"
20	Sobre el AVR, con la ayuda del botón "flecha derecha" y "flechas superior e inferior" desplazarse hacia el menú: "Settings", "Sync/Voltage Matching", "Synchronizer", "Sync Enable/Disable"
21	Sobre el AVR, una vez que se encuentre en el menú: "Sync Enable/Disable", presionar el botón "Edit"
22	Sobre el AVR, con la ayuda del botón "flechas superior" ingresar como "username" la letra A y presionar "Edit"
23	Sobre el AVR, con la ayuda del botón "flechas superior" ingresar como "password" la letra A y presionar "Edit"
24	Sobre el AVR, una vez que se encuentre en el menú: "Sync Enable/Disable", presionar el botón "Edit"
25	Sobre el AVR, con la ayuda del botón "flechas superior" cambiar a "disabled" y presionar "Edit"
26	Sobre el AVR, una vez que se encuentre en el menú: "Sync Enable/Disable", presionar el botón "Edit"
27	Sobre el AVR, con la ayuda del botón "flechas superior" cambiar a "enabled" y presionar "Edit"
28	Sobre el AVR, con la ayuda del botón "flecha izquierda" desplazarse hacia el menú principal "DECS-250 Digital Excitation Control System"
29	Sobre el medidor de energía, con la ayuda de las flechas de desplazamiento ubicarse en la pantalla "7.0"
30	Sobre el tablero de control, encender el "sincronoscópio"
31	Sobre el variador de velocidad con la ayuda del botón "flecha izquierda" desplazarse hasta que aparezca el menú "M"
32	Sobre el variador de velocidad con la ayuda del botón "flecha superior" desplazarse hasta que aparezca el menú "M2."
33	Sobre el variador de velocidad con la ayuda del botón "flecha derecha" desplazarse hasta que aparezca el menú "G2.1."
34	Sobre el variador de velocidad con la ayuda del botón "flecha derecha" desplazarse hasta que aparezca el menú "P2.1.1."
35	Sobre el variador de velocidad, en el menú de "Frecuencia mínima", presionar una vez el botón "flecha derecha", el valor comenzará a titilar.
36	Sobre el variador de velocidad, en el menú de "Frecuencia mínima", presionar una vez el botón "flecha derecha", el valor comenzará a titilar.  Sobre el variador de velocidad, en el menú de "Frecuencia mínima" titilando, presionar una vez el botón "flecha derecha", el valor podrá ser ajustado (con las flechas) con el objetivo de subir o bajar la velocidad del compensador (Al final presionar el botón "enter". Se recomienda manejar el valor entre 60.8 y 60.6. (Ajustar este valor hasta que el "sincronoscópio" gire lentamente en sentido horario.
37	Sobre el tablero de control, y una vez que el "sincronoscópio" gire lentamente en sentido horario, ativar el switch "Cerrar 52".
38	Sobre el tablero de control, apagar el "sincronoscópio"
39	Sobre el tablero de control, apagar "Cerrar 52"
40	Sobre el tablero de control, apagar "Cerrar 52"
41	En el SCADA pasar el control del compensador a "Automático"

PROCEDIMIENTO PARA APAGAR EL COMPENSADOR SINCRÓNICO	
1	En el SCADA pasar el control del compensador a "Manual"
2	Sobre el tablero de control, ajustar lentamente la potencia reactiva hasta un valor aproximado de "cero" a través de los comandos "subir" o "bajar"
3	Sobre el tablero de control, presionar el botón "STOP".
4	Sobre el tablero auxiliar, verificar que el disyuntor se encuentre abierto.
5	Sobre el compensador, abrir el breaker del compensador.
6	Sobre el compensador, encender las fajas térmicas.

PROCEDIMIENTO PARA CONFIGURAR EL VARIADO DE VELOCIDAD DEL COMPENSADOR SINCRÓNICO	
1	Con el botón "flecha izquierda" desplazarse hasta que aparezca el menú "M"
2	Con del botón "flecha superior" desplazarse hasta que aparezca el menú "M2."

3	Con el botón "flecha derecha" desplazarse hasta que aparezca el menú "G2.1."
4	Con el botón "flecha superior" desplazarse hasta que aparezca el menú "G2.1.2." "Frecuencia máxima"
5	Presionar el botón "flecha derecha" una vez, el valor comenzará a titilar
6	Usando los botones "izquierda", "derecha", "subir" y "bajar", cambiar el valor a 65.00 Hz, una vez finalizado presionar el botón "enter"
7	Seguir el mismo procedimiento para:
8	P2.1.1. Frecuencia mínima: 60.7 Hz
9	P2.1.3. Tiempo de aceleración: 188.4 s
10	P2.1.5. Límite de intensidad: 40 A
11	P2.1.9. Intensidad nominal motor: 40 A
12	P2.6.5. Voltaje punto desconexión: 80%
13	P2.7.14. Intensidad de bloqueo: 38 A
14	P3.1. Lugar de control: bornes