



“MIGRACIÓN TECNOLÓGICA DE LOS CIRCUITOS DE FUERZA Y CONTROL DEL SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO PARA BARRA SEGURA Y CONTROL DIGITAL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SAN FRANCISCO”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Electromecánica

Autor: Arizaga Jupiter, Richard Steven

Tutor: Ing. Sánchez Ocaña, Wilson Edmundo, MSc.



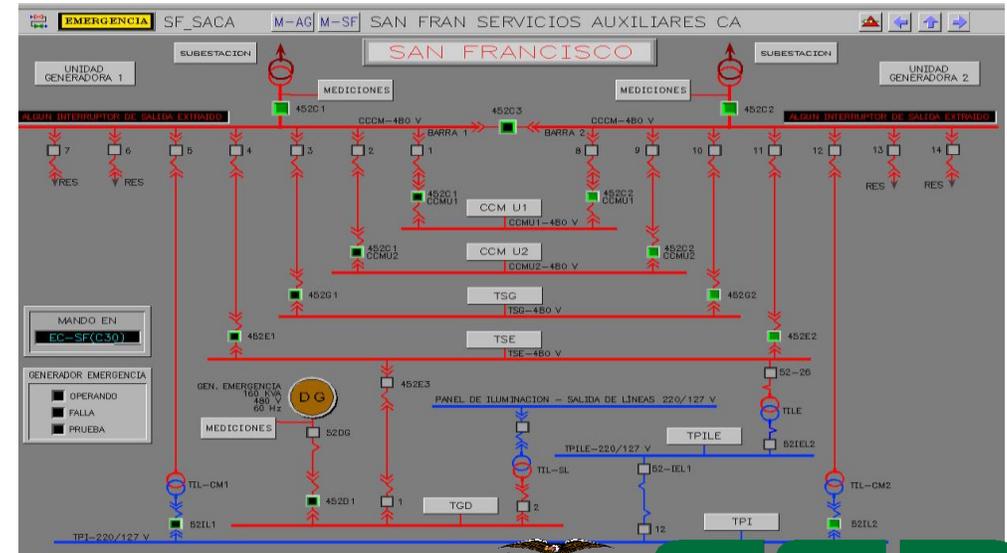
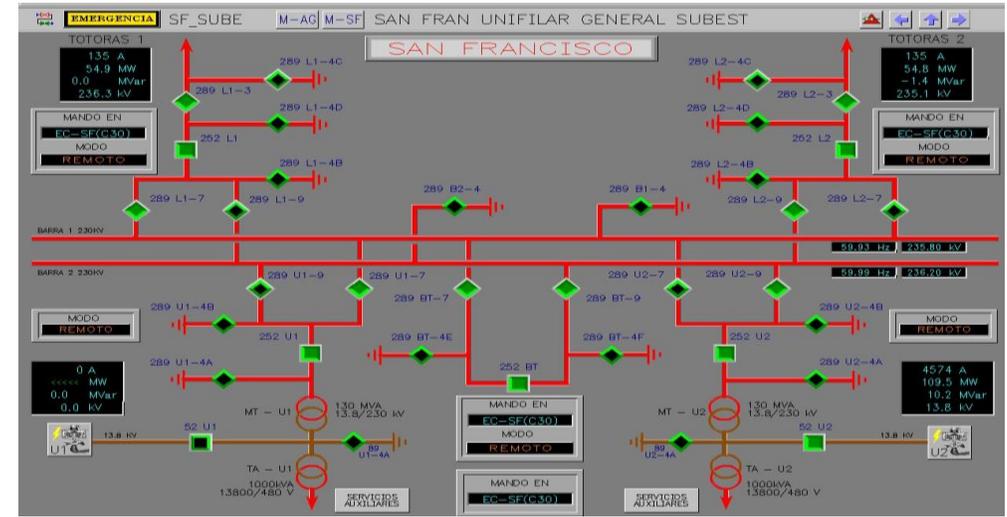
AGENDA:

- **MOTIVACIÓN**
- **OBJETIVOS**
- **THEORETICAL BACKGROUND**
- **METODOLOGÍA**
- **OBJETO DE ESTUDIO**
- **ANÁLISIS DE RESULTADOS**
- **CONCLUSIONES**
- **RECOMENDACIONES**



MOTIVACIÓN

- La central hidroeléctrica San Francisco cuenta con dos unidades de generación de 115MW de potencia nominal con turbinas de tipo Francis para un caudal de $58 m^3/s$ obteniendo una velocidad de 327rpm.
- De cada unidad se desprende un transformador reductor para servicios auxiliares de 13800/480V y 1000kVA de potencia, los cuales alimentan el centro de carga de casa de máquinas(CCCM).
- Existen cuatro barras que provienen del CCCM, siendo dos de ellas las cuales alimentan el tablero de servicios esenciales y servicios generales de 480V los cuales permiten la energización de la unidad 1 y 2 del sistema de aire acondicionado controlador por el tablero de control TSAC.

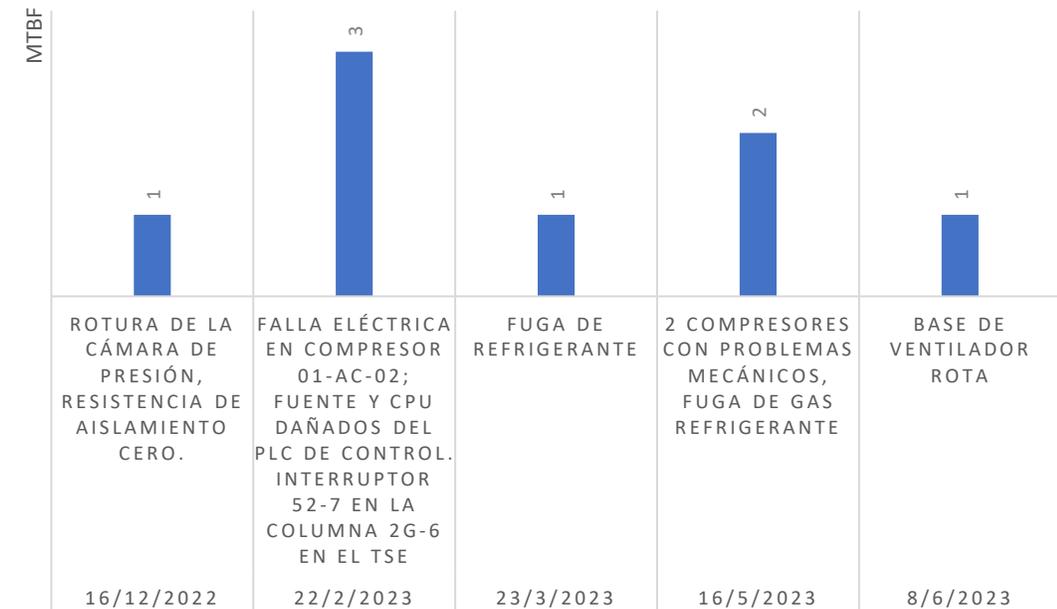


- Desde el año 2021 una serie de eventos de falla se han presentado en las unidades de acondicionamiento del aire, por lo cual el área de mantenimiento eléctrico emite un informe de técnico de fallas concluyendo con el requerimiento de un mantenimiento correctivo integral.

Informe de fallas 2021-2023

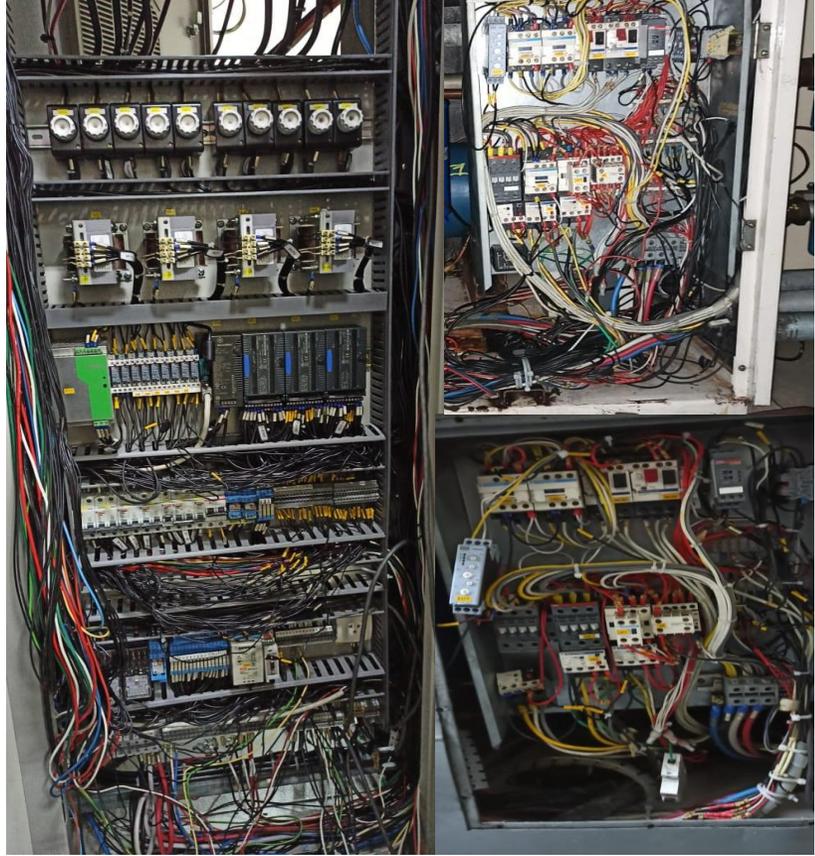
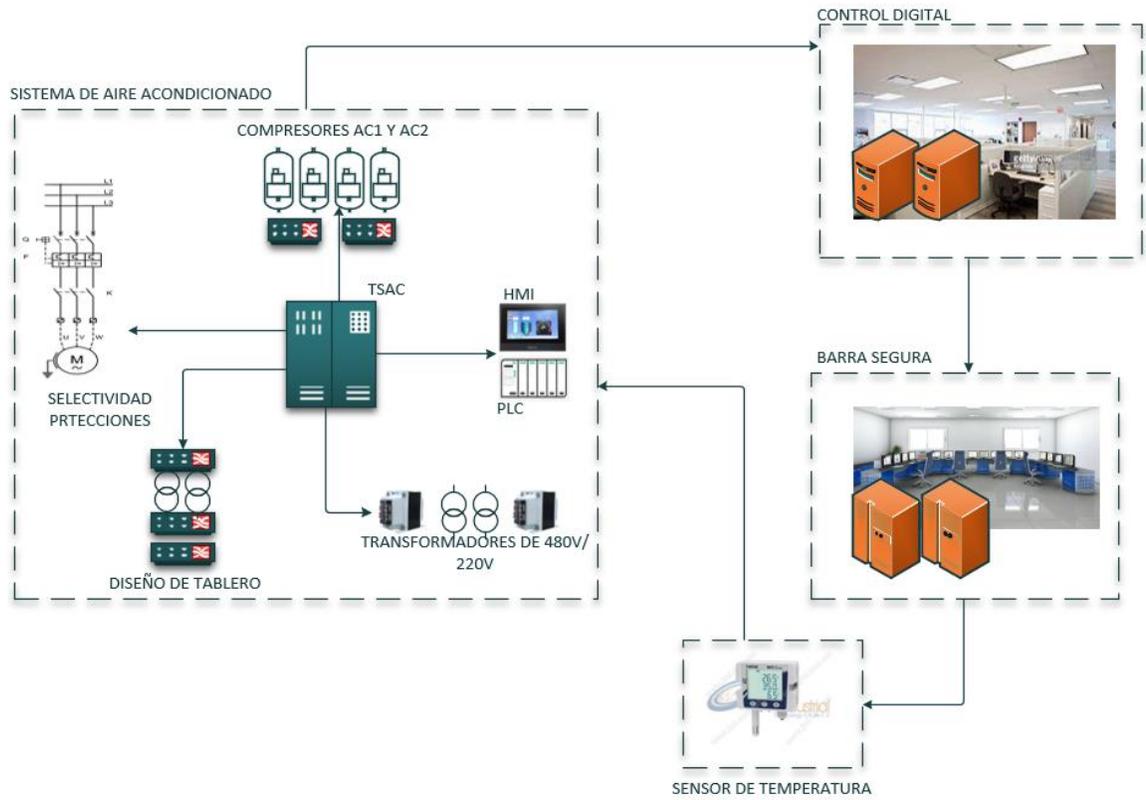
FECHA	CAUSA
14/4/2021	Rotura de la cámara de presión, Resistencia de aislamiento cero.
16/6/2021	Fuga de refrigerante
15/9/2021	Falla eléctrica sobrevoltaje
16/12/2022	Rotura de la cámara de presión, Resistencia de aislamiento Cero.
22/1/2023	Falla Eléctrica en compresor 01-AC-02; Fuente y CPU dañados del PLC de control. Interruptor 52-7 en la columna 2G-6 en el TSE
23/3/2023	Fuga de refrigerante

EVENTOS EN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO



[1] Revelo, R. (2023). Informe Técnico de falla de Sistema de Aire Acondicionado.

- Basado en un análisis del informe de fallas, el sistema de aire acondicionado requiere de un nuevo sistema de control, además de un mantenimiento correctivo integral.



AGENDA:

- MOTIVACIÓN
- OBJETIVOS
- THEORETICAL BACKGROUND
- METODOLOGÍA
- OBJETO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES



Objetivo General

- Migración tecnológica de los circuitos de fuerza y control del sistema de aire acondicionado para mejorar su mantenibilidad y proporcionar una temperatura de funcionamiento adecuada para el sistema de barra segura de supervisión y control digital en la Central Hidroeléctrica San Francisco.

Objetivos Específicos

- Dimensionar de manera adecuada los dispositivos del circuito fuerza de cada módulo que se encuentran mal ubicados para centralizarlos en un tablero general (TSAC) mediante el uso de software.
- Seleccionar los elementos de protección necesarios para cada componente del sistema y prevenir daños causados por eventos inesperados en la central, mediante el uso de los datos de placa de cada uno de los componentes de cada unidad.
- Evaluar la condición de los transformadores de 480V/220V ubicados en la parte inferior de cada unidad para determinar si es necesario reubicarlos o descartarlos en caso de no ser indispensables para el sistema.
- Sustituir los dispositivos de control, e instrumentos deteriorados que no cumplan los requerimientos necesarios para un óptimo funcionamiento, de modo que el suministro de aire acondicionado no deje de ser constante.
- Implementar y programar un PLC con una interfaz gráfica (HMI) brindando una adecuada comunicación industrial con el SCADA y un correcto monitoreo de las señales presentes en el sistema.



AGENDA:

- MOTIVACIÓN
- OBJETIVOS
- THEORETICAL BACKGROUND
- METODOLOGÍA
- OBJETO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES



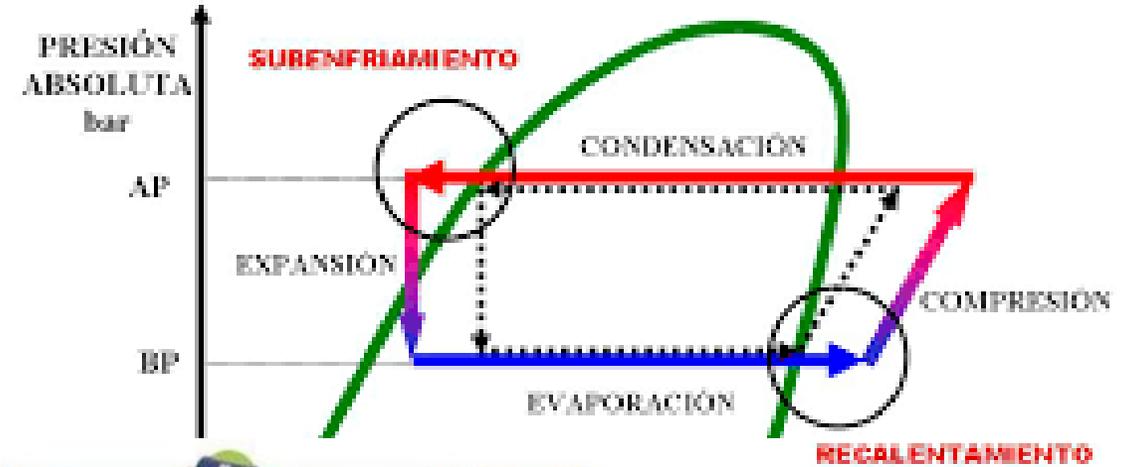
Circuito de Refrigeración.

- El gas aumenta su presión y temperatura al ser comprimido, hasta llegar al condensador lugar en donde este pasa a ser un líquido de alta presión a baja temperatura, una vez que llega a la válvula de expansión disminuye su presión viajando por el evaporador a baja presión y absorbiendo calor del ambiente.

Compresor Copeland

- Presentan una tolerancia a la tensión de +/- 10% y están disponibles para una frecuencia de 60Hz los compresores trifásicos solo pueden girar en un solo sentido de giro, a diferencia de los motores monofásicos.

DIAGRAMA DE MOLLIER: PRÁCTICO

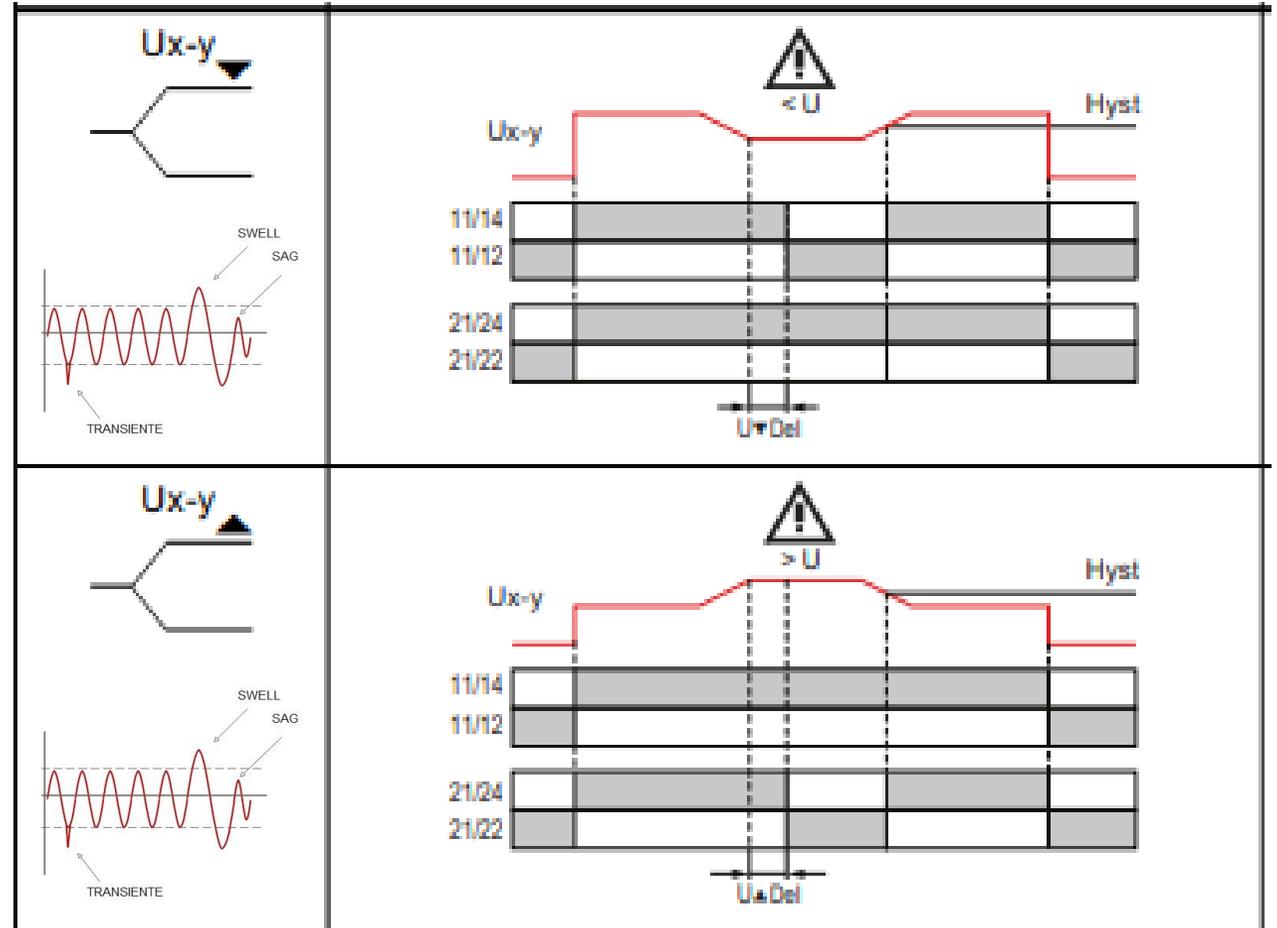


Protecciones Eléctricas en sistemas de aire acondicionado

- Los sistemas de aire acondicionado, al igual que otros motores requieren de protecciones contra sobre cargas y sobre corrientes.

Relé Supervisor de Tensión

- La calidad de energía siempre se ve afectada por perturbaciones debido disparos en equipos de seccionamiento automático generando SAGs and SWELLS



[2] E. Roa, C. Caicedo, “Mitigación de sags y swells de una red de distribución IEEE De 30 nodos mediante la ubicación de facts (svc y dstatcom).,” Universidad Distrital Francisco José de Calda, pp17. 2016



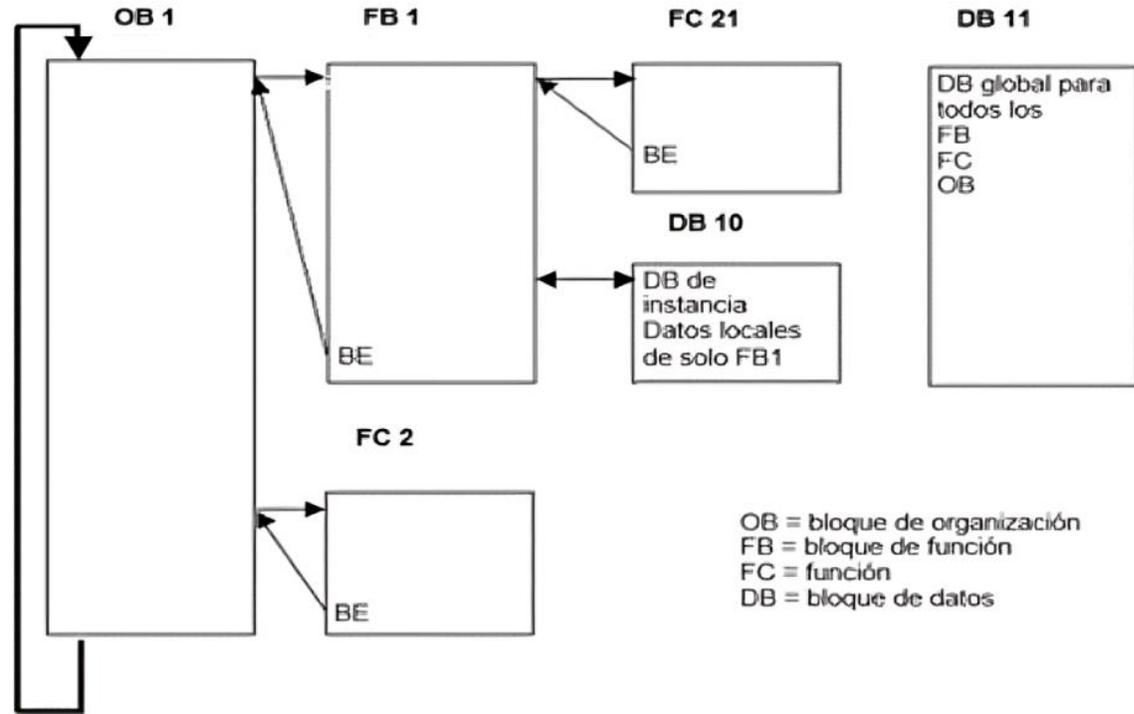
MEJORAMIENTO Y MIGRACIÓN

- Según Borja (2021) es ajustar los procesos para lograr eficiencia y eficacia, además de aumentar la confiabilidad del sistema, mejorar su mantenibilidad y aliviar el estrés de un equipo que no trabaja correctamente.
- El termino migración se utiliza frecuentemente cuando se trata de cambiar la estadía de la información de un controlador programable a otro.



Bloques de programación TIA Portal

- Los bloques de organización no pueden hacer llamados a otros bloques de organización y de igual manera para los bloques de función, solo una alarma de diagnóstico, o un evento de intervalo de tiempo pueden llamar a un bloque de ciclo.

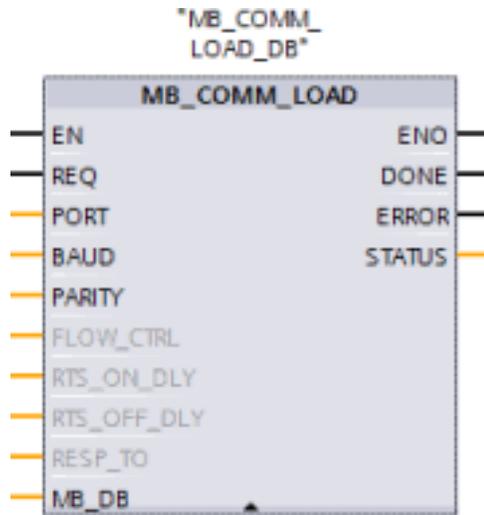


OB = bloque de organización
FB = bloque de función
FC = función
DB = bloque de datos



Comunicación Modbus en TIA Portal

- El entorno del software TIA portal permite configurar un módulo CM124 para realizar una comunicación mediante Modbus y designarlo como un dispositivo maestro o esclavo.



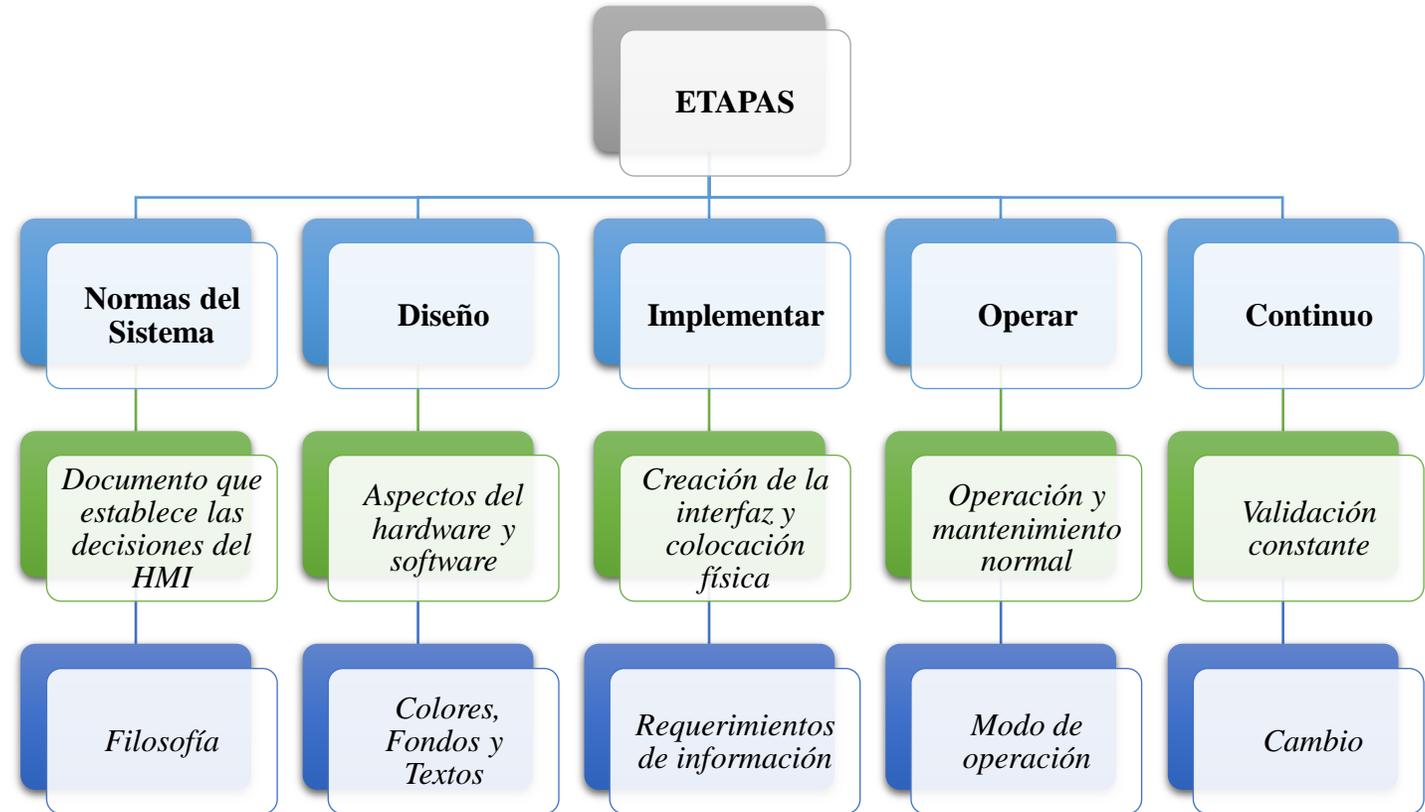
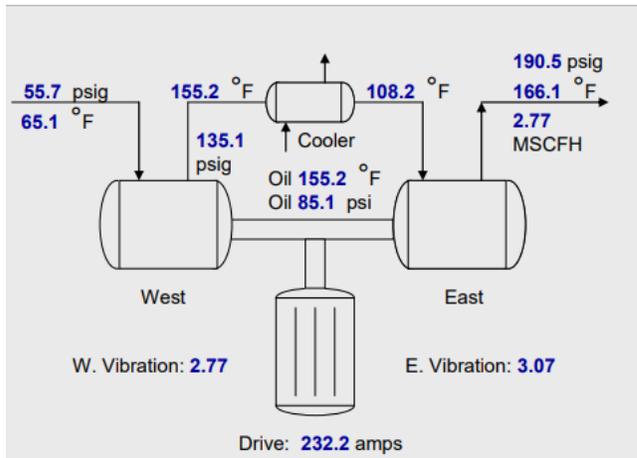
Protocolo	RS232	RS485
Modo Dúplex	Dúplex	Semidúplex
Tipo de señal	Desbalanceado	Balanceado
Transmisión máxima de datos	1Mbps	10 Mbps
Distancia Operativa Max.	Aproximadamente 15,25metros	Aproximadamente 1220 metros
Corriente de salida	500mA	250mA
Voltaje mínimo de entrada	+/- 3V	0,2V diferencial

[3] N. Hatziargyriou, J. Milanovic, C. Rahmann, V. Ajarapu, C. Canizares, I. Erlich, D. Hill, I. Hiskens, I. Kamwa, B. Pal, et al., "Definition and classification of power system stability–revisited & extended," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 4, pp. 3271–3281, 2020



Diseño de HMI y normas ISA101

Las normas ISA101 estipulan pautas con muchos detalles para que el diseño de interfaces gráficas hombre-máquina sea más efectivo y mucho más eficiente



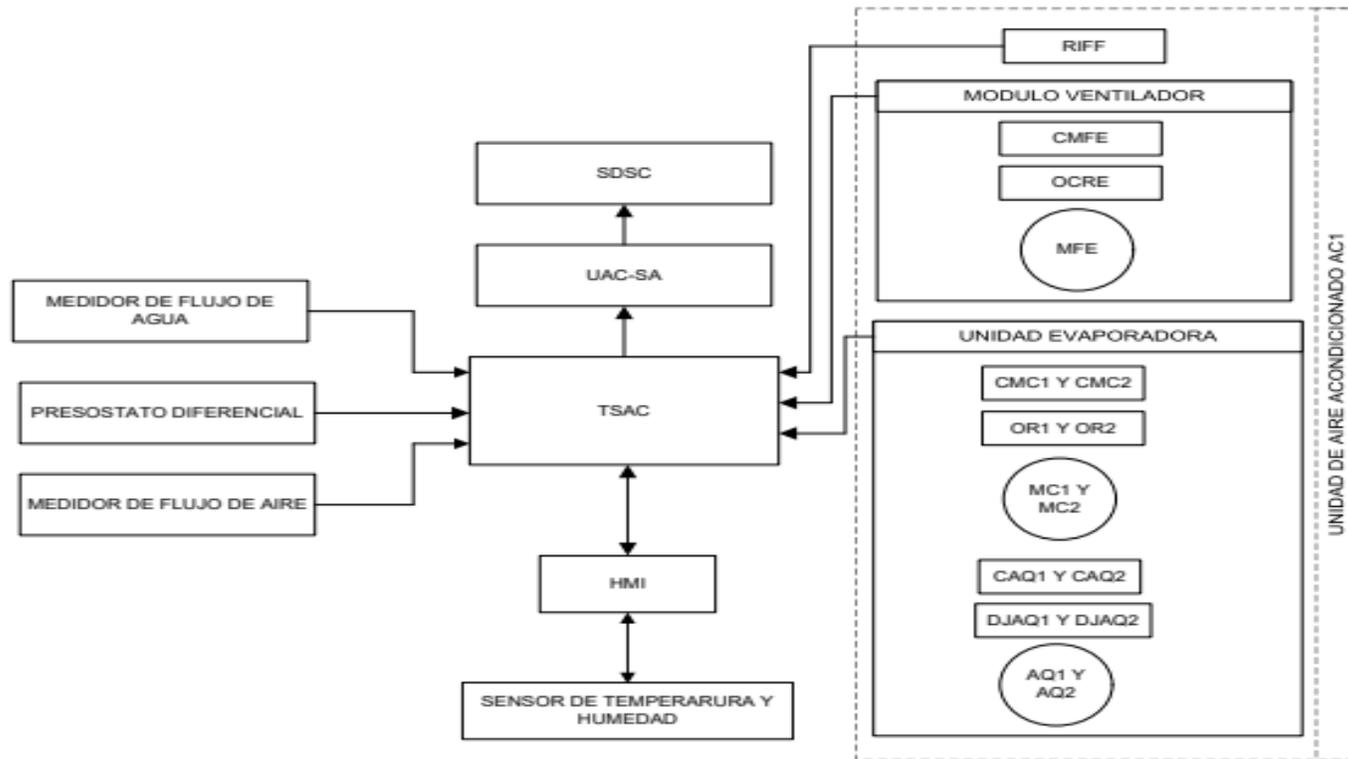
AGENDA:

- MOTIVACIÓN
- OBJETIVOS
- THEORETICAL BACKGROUND
- METODOLOGÍA
- OBJETO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES



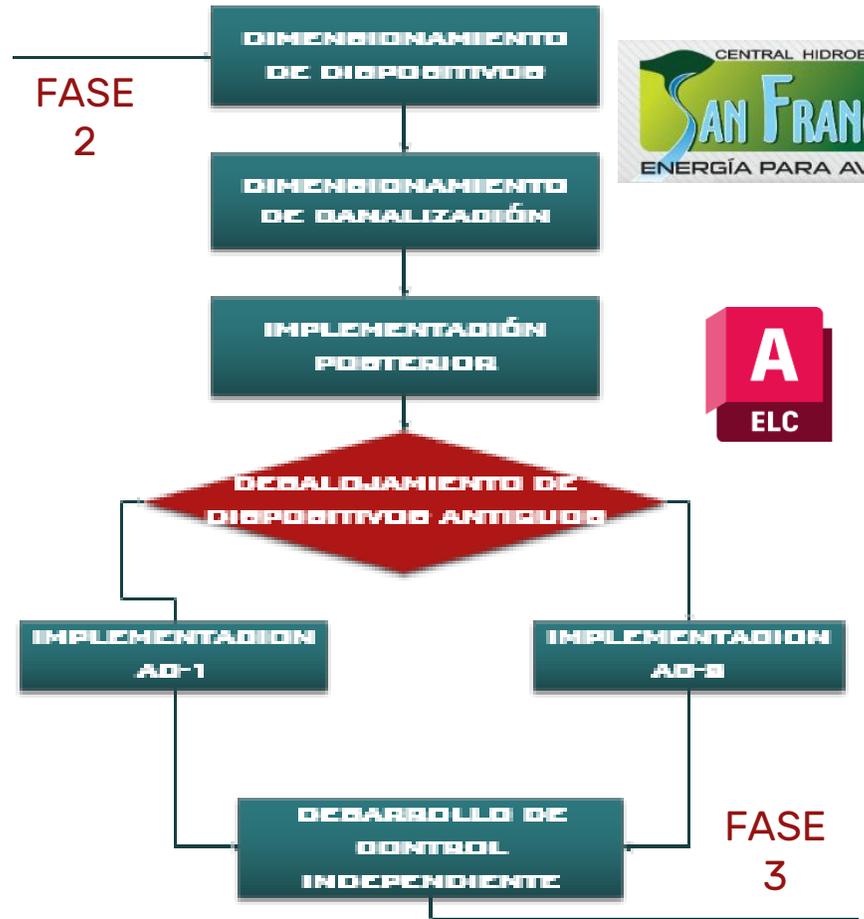
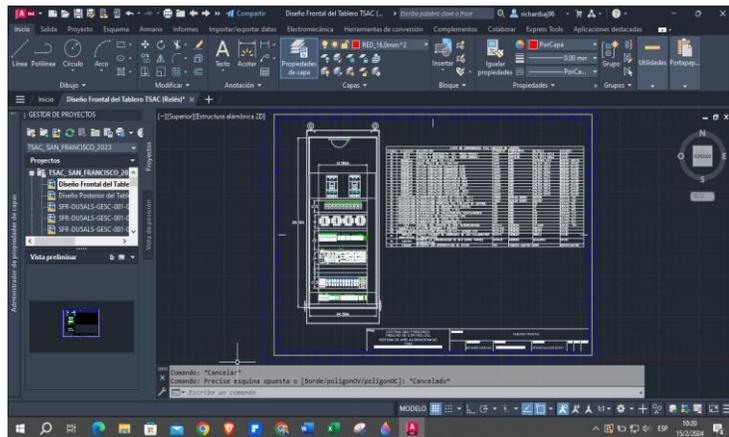
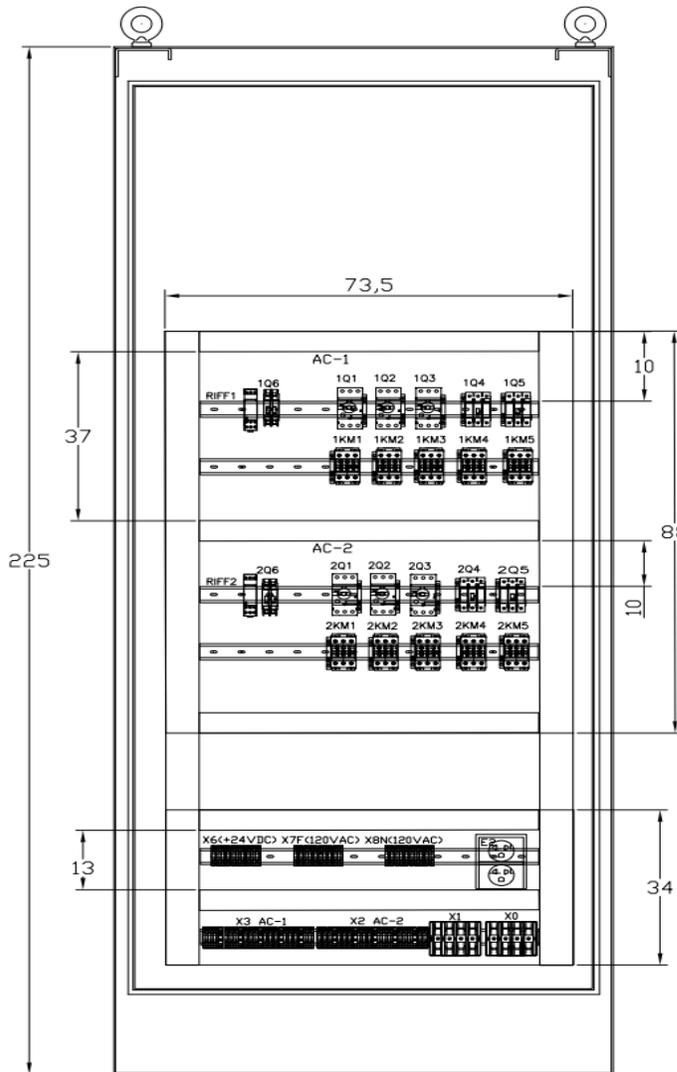
Investigación de Campo

- La información necesaria para determinar las condiciones del equipo y su operación se obtiene mediante investigaciones de campo.



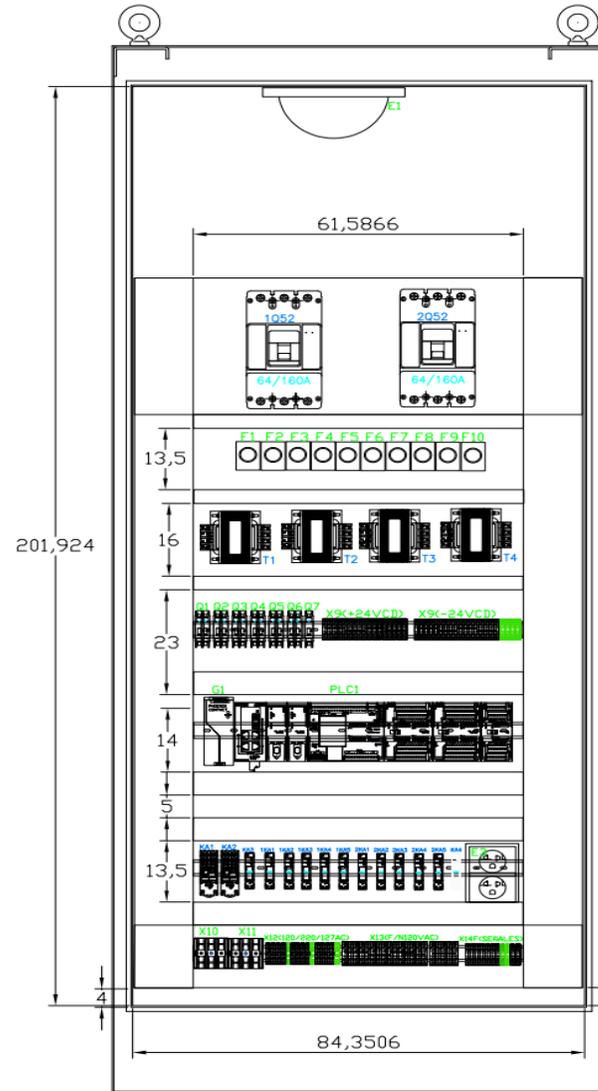
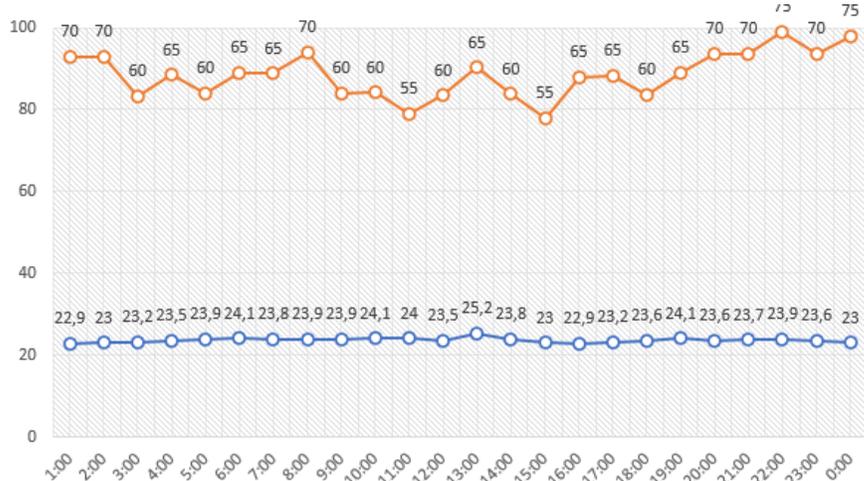
Observación Participante

- La participación debe ser de manera activa y enfocada en la recolección de información, la estrategia para la formulación de preguntas debe ser de una manera libre sin presión de responder ya que la información puede verse frustrada



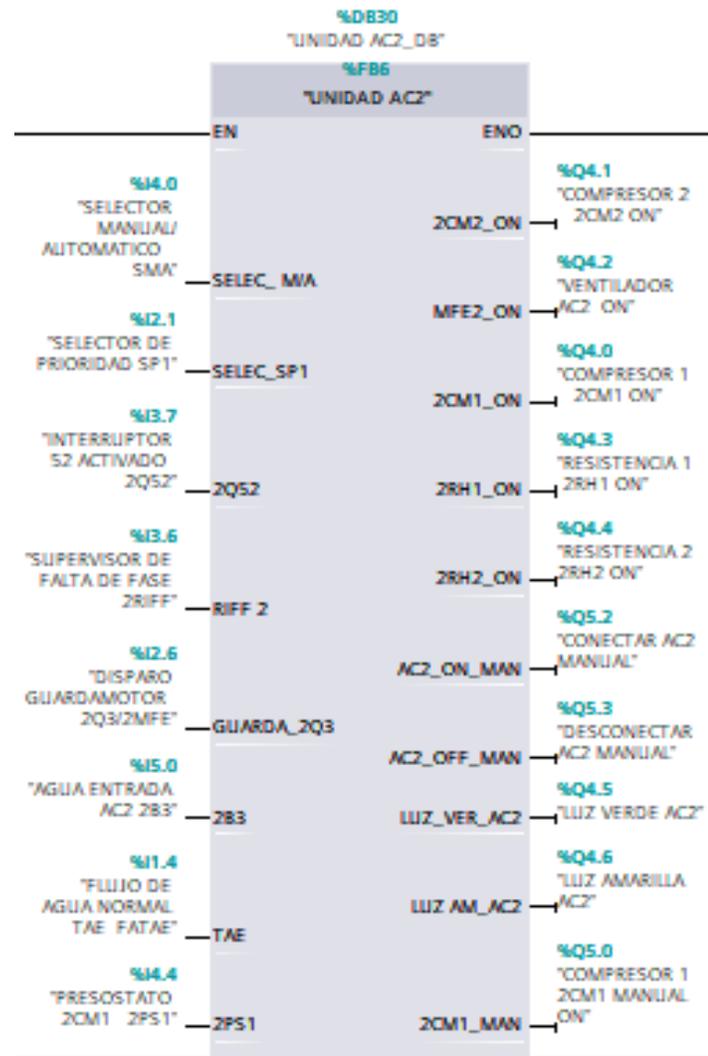
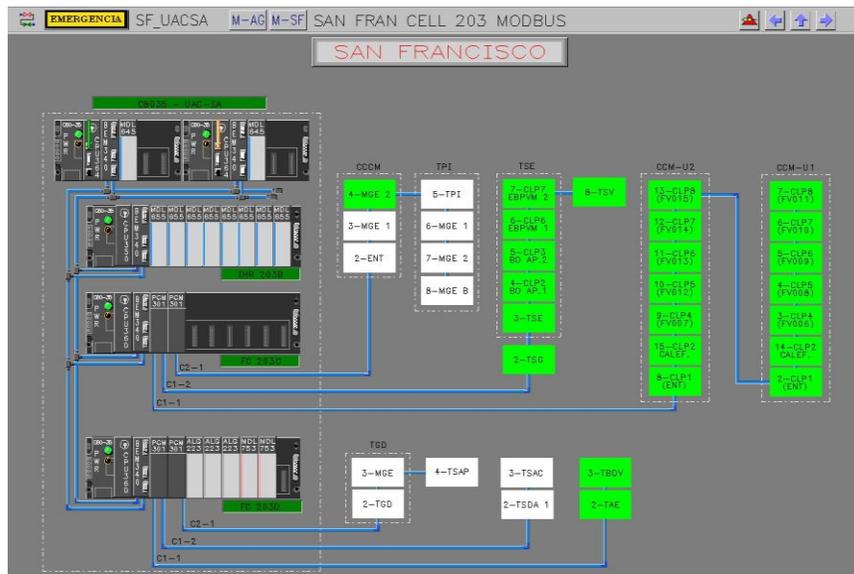
Análisis de datos

- Para plantear la nueva propuesta del sistema de control se requiere de un flujograma del proceso que muestre el comportamiento del sistema ante las variaciones de temperatura en el recinto del tablero de barra segura.



Investigación Descriptiva

- El desarrollo de la programación de un nuevo sistema de control como menciona la norma IEC 61850 proporciona información detallada como el estado de cada uno de los sensores conectados al sistema.



FASE 4

TIA V16



La IEC60300 establece un marco para la gestión de la confiabilidad, en donde recomienda varios métodos para su comprobación y como mejorarla.

ITEM	FECHA	EQUIPO EN FALLA	CAUSA	ODT
1	14/4/2021	Compresor 01-AC-02	Rotura de la cámara de presión, Resistencia de aislamiento cero.	695925
2	16/6/2021	Tuberías 01- AC-01	Fuga de refrigerante	83427
3	15/9/2021	Supervisor de Voltaje TSAC	Falla eléctrica sobrevoltaje	58715
4	16/12/2022	Compresor 01-AC-02	Rotura de la cámara de presión, Resistencia de aislamiento Cero.	83427

Las ecuaciones principales, se definen de la siguiente forma:

Mantenibilidad

$$M = 1 - e^{-\left(\frac{T}{MTTR}\right)}$$

Confiabilidad

$$C = e^{-\left(\frac{T}{MTBF}\right)}$$



AGENDA:

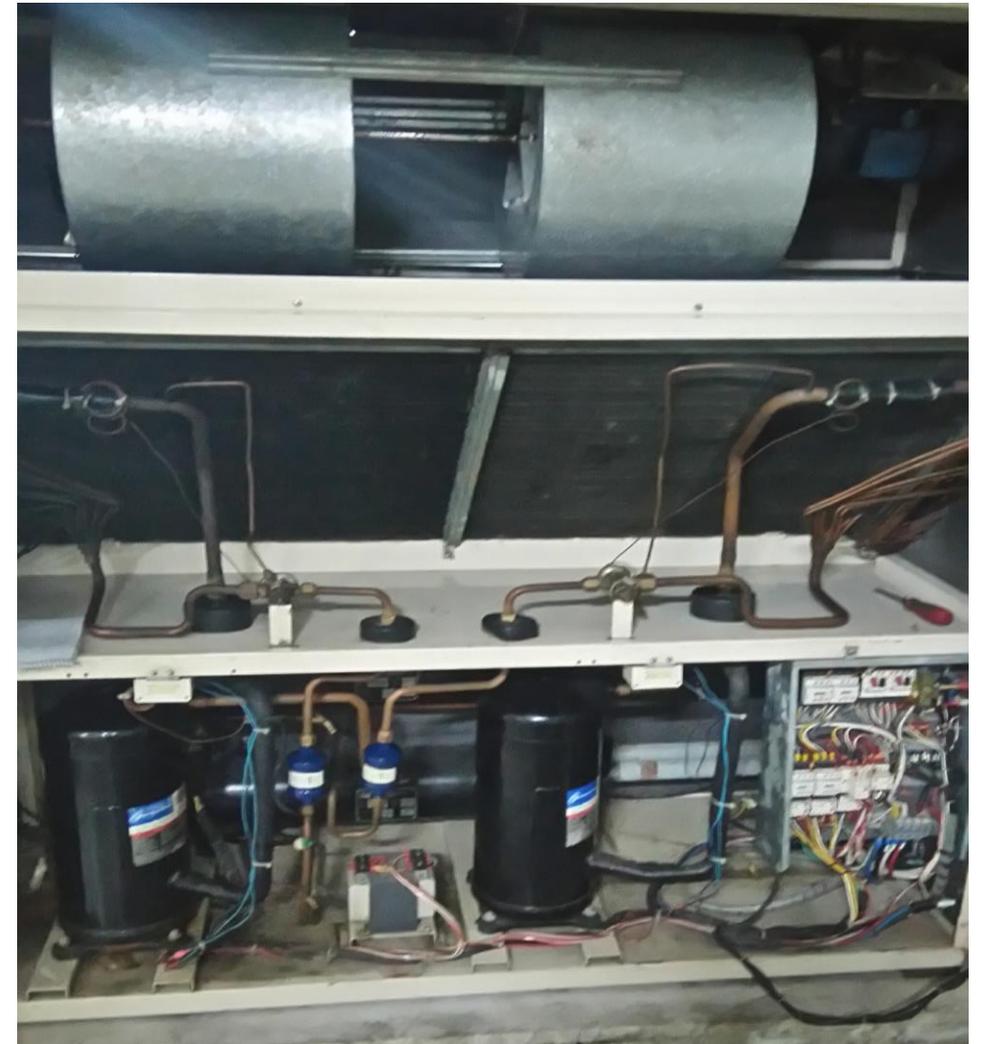
- MOTIVACIÓN
- OBJETIVOS
- THEORETICAL BACKGROUND
- METODOLOGÍA
- OBJETO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES



EQUIPO	POTENCIA (KW)	CORRIENTE(A)
MOTOR VENTILADOR EVAPORADOR	3,7	6,7
MOTOR COMPRESOR 1 CMC1	9	19,2
MOTOR COMPRESOR 2 CMC2	9	19,2
RESISTENCIAS DE CALENTAMIENTO 1	6	7,6
RESISTENCIAS DE CALENTAMIENTO 2	6	7,6
MÓDULO HITACHI COMPLETO	33,7	60,3

Módulos Acondicionadores HITACHI

- Circuito de refrigeración compuesto por dos compresores de tipo caracol, un ventilador para el evaporador, un condensador refrigerado por agua y un par de resistencias de calentamiento, todo en un módulo de acero galvanizado con pintura electrostática y aislamiento de ruido.



- Dentro de cada unidad se encuentra un transformador de 0.4kVA con reducción de 480/220V utilizado como señal para el control industrial y para alimentar las resistencias de calentamiento internas de los ventiladores, estos transformadores también se encuentran expuestos a la corrosión y las filtraciones.

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	FABRICANTE	MODELO	SELECCIÓN
 MÓDULO HITACHI COMPLETO UNIDAD AC-1 60.3A	SUPERVISOR DE TENSIÓN, INVERSIÓN Y FALTA DE FASE 600 VAC, 3P	SIEMENS	3UG4615	
 MOTOR COMPRESOR 1 CMC1 9KW 19.2 A	CONTACTOR TRIPOLAR 600 VAC/26A, A1-A2: 24-500 V AC/DC	ABB	AF26-30	
	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO PARA MOTOR 690 VAC, IN: 16-20A	ABB	MS132-20	
	CONTACTOS AUXILIAR 1N, 1NC PARA CONTACTOR	ABB	CAL4-11	



ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	FABRICANTE	MODELO	SELECCIÓN
 MOTOR VENTILADOR CMFE 3,7 KW 6.7A	CONTACTOR TRIPOLAR 600 VAC/9A, A1-A2: 24-500 V AC/DC	ABB	AF09-30	
	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO PARA MOTOR 690 VAC, IN: 6.3-10A	ABB	MS132-10	
	CONTACTO AUXILIAR PARA INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 1NA+1NC	ABB	SK1-11	
 RESISTENCIAS DE CALENTAMIENTO 1 AQ1 6KW 7.6A	CONTACTOR TRIPOLAR 600 VAC/12A, A1-A2: 24-500 V AC/DC	ABB	AF12-30	
	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 690 VAC, IN:16A	ABB	S203-C16	





Equipo	Detalles
Versión firmware	V4.3
Tensión de alimentación	120VAC/230VAC
Entradas digitales	14
Interfaz	PROFINET
Grado de protección	IP20
Peso	455g
Modbus	SI



Controlador Lógico S7-1200 1214C

- El sistema posee 44 señales digitales, 6 entradas analógicas de 4-20mA y dos módulos de comunicación Modbus destinadas al sensor principal de temperatura-humedad y a la comunicación con sala de control, mediante protocolo RS485.

AGENDA:

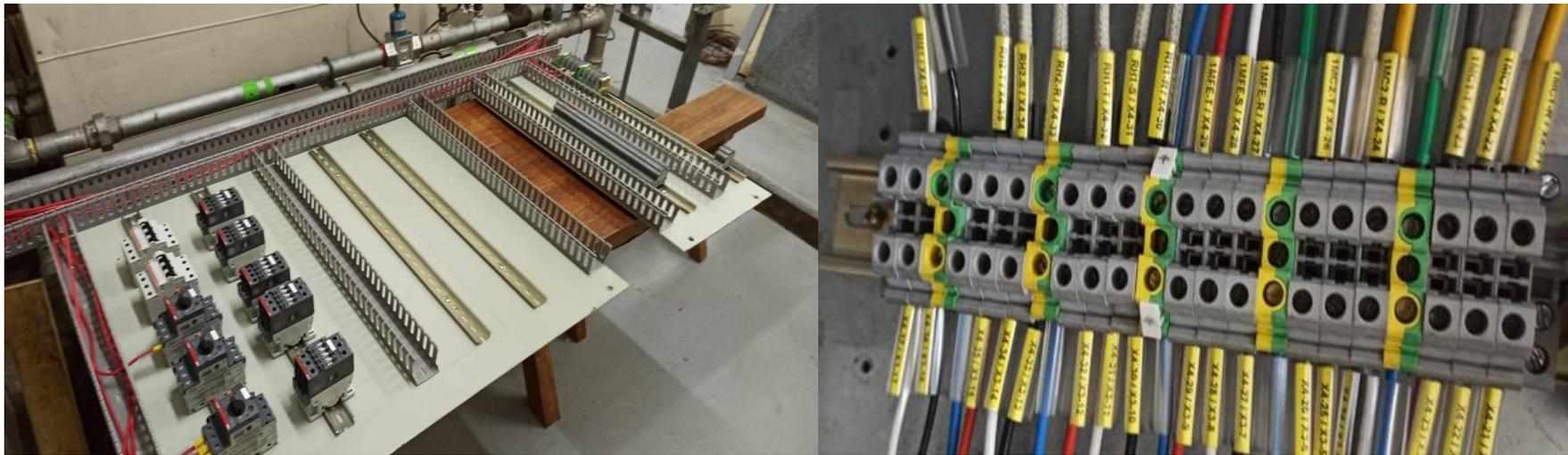
- MOTIVACIÓN
- OBJETIVOS
- THEORETICAL BACKGROUND
- METODOLOGÍA
- OBJETO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES

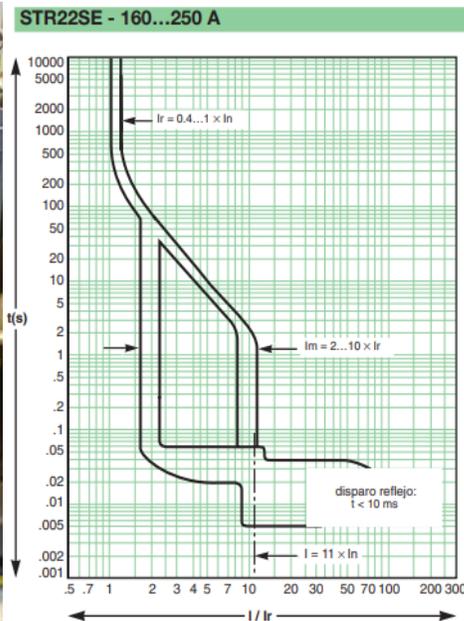
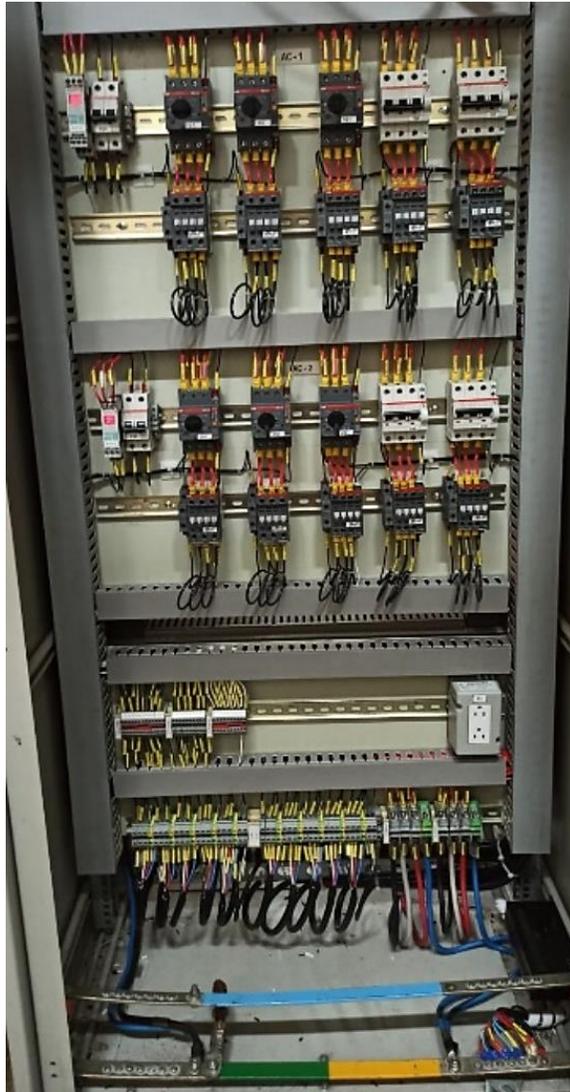


Tipo de Conductor	Área con aislamiento (mm ²)	Cantidad
Conductor 10AWG THHN 30A	15.28	3x2 circuitos
Conductor encauchetado THHN 4x12 AWG 30 ^a 90°C	186.02	5x2 circuitos
Sección Total	1951.88	

Circuito de Fuerza

La norma IEC 1082-1 se encarga de la normalización de esquemas eléctricos, el etiquetado dentro de los estándares de la IEC permite el uso y protección libre





MCCB

Los ajustes en el interruptor de caja moldeada se debería multiplicar la corriente nominal de interruptor (160A) por 0.5 para ajustar una corriente de salida (I_o) a 80 A y posteriormente multiplicar la corriente de salida por 0.8 para obtener 64 A como corriente de sobrecarga (I_r).

Elemento	Corriente	Corriente de arranque
	nominal (A)	(A)
Motor de Ventilador	6.7	7.2
Resistencias de calentamiento	7.6 x2	7.6 x2
Compresores Copeland	19.2 x2	20.5 x2
Corriente Total	60.3	63.4



Filosofía de Control

- Conocer la filosofía de control resulta ser una de las premisas principales para comenzar con la programación, el desarrollo de la filosofía de control del sistema de aire acondicionado está compuesto por varias secciones para desarrollar una lógica de programación adecuada y optimizada

Arquitectura de Control

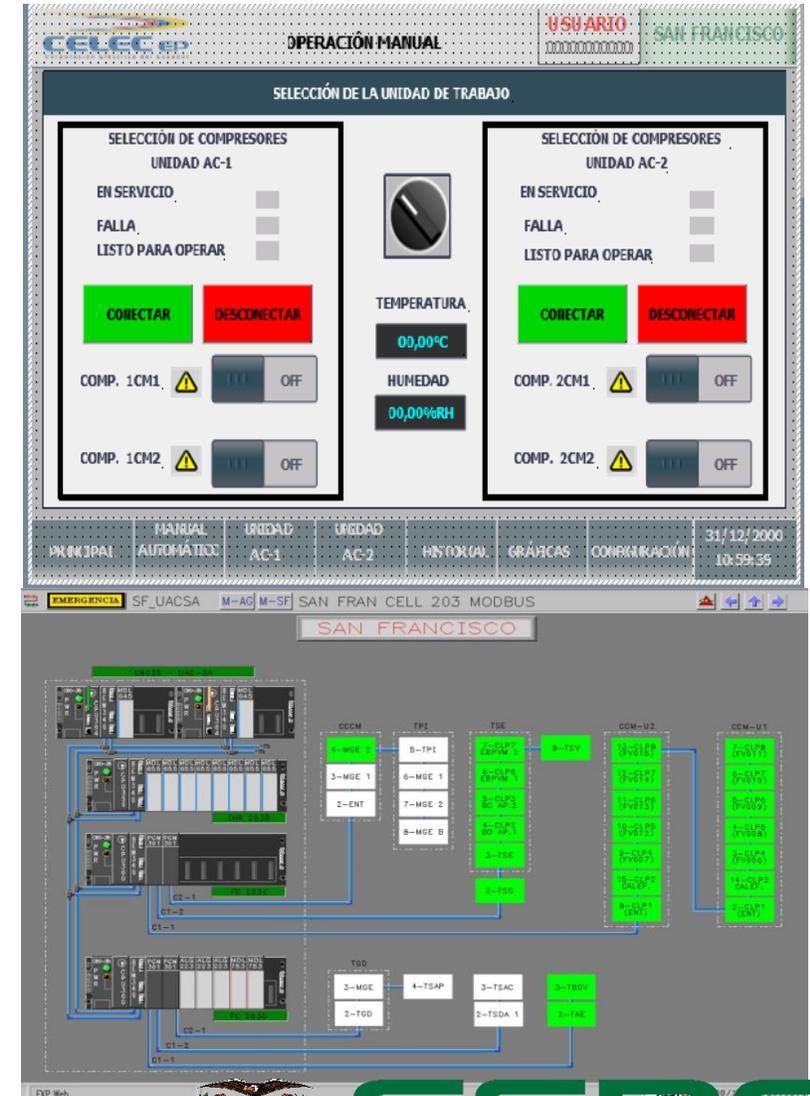
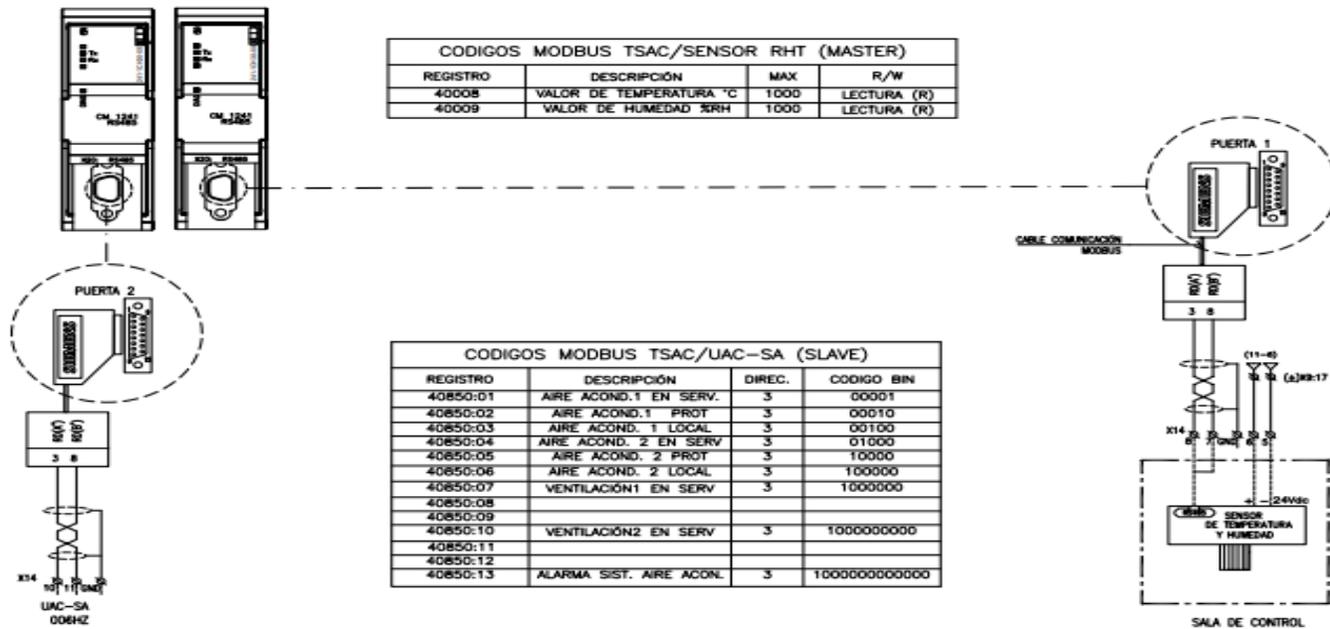
- Los sensores que están implementados, les corresponde el nivel cero de control y el controlador el primer nivel de control, ya que la unidad de adquisición (UAC -SA) es la que le solicita los datos de estado del sistema para transmitirlos al SDSC.

Especificaciones Generales	
Tensión de funcionamiento	24VDC +/- 10%
Consumo	1VA Max.
Salida	4...20Ma y PNP (400mA)
Rango de punto de ajuste	0,2...2m/s (Agua)
Precisión	+/- 10%
Indicador de Velocidad	8LED's
Aplicación	Flujo de Líquidos



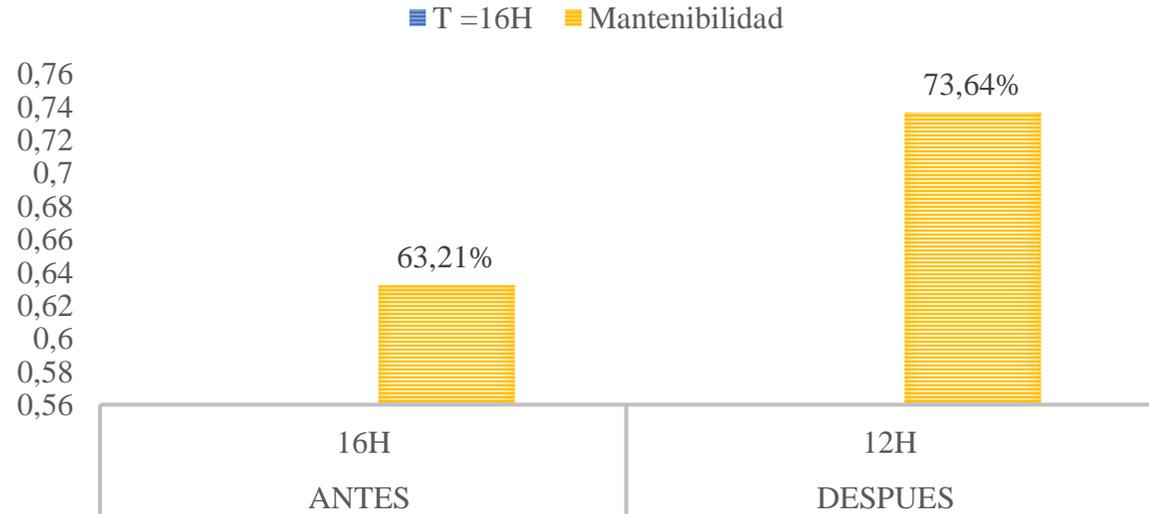
Interfaz Gráfica

- La norma ISA 101, la cual brinda recomendaciones para el correcto uso de colores, fondos e imágenes dentro de una interfaz gráfica que no dificulte la comprensión del operador, permiten desarrollar un modelo de HMI bastante adecuado a las necesidades del sistema.



Mantenibilidad

El resultado obtenido tras la aplicación de la fórmula es positivo a la comprobación de la hipótesis planteada, con un 10.4% el índice de mantenibilidad ha mejorado gracias a la migración tecnológica de los circuitos de fuerza.



	ANTES	DESPUÉS
MTTR	16H	12H
T = 16horas	$Mantenibilidad = 1 - e^{-\frac{T}{MTTR}}$	
Mantenibilidad	63,21%	73,64%

Descripción de actividades	Tiempo Max de Ejecución
Inspeccionar y limpiar borneras, carcasa, y soportes de contactores	60min/ 0min
Verificar Operación de Compresores	60min
Medir voltajes y corrientes de entrada y salida	60min
Medir resistencia Óhmica y de aislamiento para cada compresor.	60min
Verificar operación del acondicionador de aire	60min / 0min
Inspeccionar, Limpiar, ajustar conexiones y anclajes.	60min
Total, por unidad de aire acondicionado.	360min = 6h

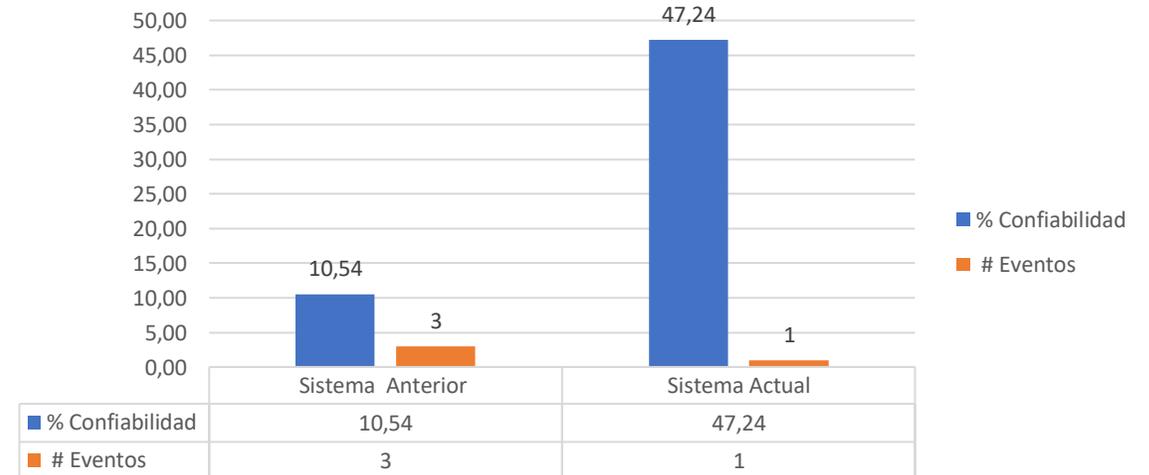


Confiabilidad

Mediante el cálculo realizado las expectativas de mejorar la confiabilidad dan buen resultado, ya que el incremento del índice actual supera al anterior por más de 30%

	Nº Eventos (n)	Línea de Tiempo (t)	Tiempo medio entre fallas (MTBF)	Tiempo de proyección (T)	Confiabilidad $e^{-\frac{T}{MTBF}}$
Sistema Anterior	Evento 1 (15/9/2021)				
	Evento 2 (16/12/2022)	2880 horas 4 meses	$\frac{2880h}{3 \text{ eventos}}$	2160h 3 meses	10.54%
	Evento 3 (22/1/2023)				
Sistema Actual	Evento 1 (15/12/2023)	2880 horas 4 meses	$\frac{2880h}{1 \text{ evento}}$	2160h 3 meses	

$MTBF = \frac{t}{n}$ $Confiabilidad = e^{-\frac{T}{MTBF}}$



FECHA	EQUIPO EN FALLA	CAUSA
15/9/2021	Supervisor de Voltaje TSAC	Falla eléctrica sobrevoltaje
16/12/2022	Compresor 01-AC-02	Rotura de la cámara de presión, Resistencia de aislamiento Cero.
22/1/2023	Compresor 01-AC-02	Falla Eléctrica en compresor 01-AC-02; Fuente y CPU dañados del PLC de control. Interruptor 52-7 en la columna 2G-6 en el TSE



AGENDA:

- MOTIVACIÓN
- OBJETIVOS
- THEORETICAL BACKGROUND
- METODOLOGÍA
- OBJETO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES



- La evaluación de la función que cumplían los transformadores ubicados en los módulos de aire acondicionado dejó como conclusiones que la capacidad de estos transformador de 0.4 KVA es muy elevada para ser utilizada en el sistema de control del equipo, y la necesidad de una fuente de 220 VAC puede ser remplazada con la alimentación que proviene del tablero de telecomunicaciones, la misma que sirve para alimentar la resistencia de calentamiento interna que viene instalada en los motores WEG y la resistencia de calefacción que mantiene libre de humedad el tablero de control TSAC.
- Tras la ejecución de la programación de control para el sistema de aire acondicionado se concluye que el bloque de inicio startup resulta ser de gran importancia para el sistema de control, ya que sin este los valores de setpoint se vuelven cero tras cada desconexión que presenta el PLC. Además, el uso de bloques de función resulta ser necesario para utilizar el control del tiempo a favor de conocer mejor el estado de los equipos..
- Tras calcular la confiabilidad del nuevo sistema para un periodo de 3 meses se concluye que, gracias a la migración tecnológica del sistema de aire acondicionado, la confiabilidad aumento significativamente en un 36 % optimizando el uso del sistema y mejorando la mantenibilidad de este en un 10.54%, ya que, gracias a la sustitución del circuito de fuerza, ahora las actividades de reparación y mantenimiento se ejecutan en menor tiempo y con mayor facilidad.



AGENDA:

- MOTIVACIÓN
- OBJETIVOS
- THEORETICAL BACKGROUND
- METODOLOGÍA
- OBJETO DE ESTUDIO
- ANÁLISIS DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES



- Para realizar rediseños de tableros eléctricos se recomienda hacer las mediciones de cada uno de los elementos que se van a incluir dentro del tablero para que la falta de espacio no sea problema cuando se proceda con la implementación.
- Como un proyecto adicional se recomienda el uso del software Inventor de Autodesk para emitir una imagen en tres dimensiones, a partir del diseño en AutoCAD Electric, del tablero que pretenda ser diseñado.
- Se recomienda que para la selección de equipos de protección y de arranque, estos también presenten la disponibilidad de accesorios que pueden ser requeridos según la conexión de cada uno de ellos, los cuales en muchas ocasiones necesitan de contactos auxiliares para transmitir el estado de los equipos.
- La sustitución de los elementos de control deja como recomendaciones, analizar el funcionamiento de cada uno de los sensores que utiliza el sistema para obtener información real, además de un diagnóstico de la instrumentación que no está aportando señales correctas y pueden alterar el funcionamiento del sistema.



Gracias



ANÁLISIS DE RESULTADOS (RESPALDO)

