

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica



Trabajo de Suficiencia Profesional

“Automatismo de cambio de Ventilador de Aire de una Caldera de Vapor Acuotubular Tipo D”

Para obtener el Título Profesional de:

Ingeniero Petroquímico Elaborado

por:

César Fernando Sarrín Cépeda

 0009-0001-4611-3209

Asesor

M.Sc. Oscar Dante Pissani Castro

 0000-0002-7925-4518

LIMA – PERU

2024

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi madre Angélica que vive en cada uno de mis desafíos, por brindarme sus consejos y valores, los cuales me han permitido ser una persona de bien.

A mi padre César por haberme brindado su apoyo incondicional a lo largo de los años y ser un ejemplo de constancia.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los docentes de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería por sus enseñanzas en mi etapa universitaria.

Agradezco a mis compañeros del área de Optimización y Control de Refinería la Pampilla por el intercambio de conocimientos en el tiempo que llevo laborando en la compañía.

Agradezco a mi asesor y revisor de tesis por haberme guiado e instruido en el proceso de la elaboración del presente trabajo.

RESUMEN

En la refinería La Pampilla en el año 2016 se instaló una caldera de vapor acuotubular de tipo D la cual incluía dos ventiladores de aire de tiro forzado, uno para operar de forma continua mediante una turbina a vapor (VAT) y otro de reserva que operaba con un motor eléctrico (VAM). En el contexto de la reducción de emisiones de la compañía, se planteó utilizar el VAM en operación continua, mientras que el VAT quedaría como equipo de reserva.

El principal desafío asociado a este cambio es la posible interrupción del suministro eléctrico, lo que ocasionaría el paro de diferentes equipos eléctricos y unidades de proceso, por ello, para mitigar el escenario del paro súbito del VAM se ha propuesto modificar el automatismo existente, de tal forma que se ejecute de forma rápida y segura el cambio automático de VAM al VAT. En ese sentido, el objetivo del presente trabajo es asegurar la continuidad de operación del ventilador accionado por motor eléctrico.

Luego de la implementación de los cambios propuestos, se logró superar los problemas identificados, así como las pruebas en la puesta en servicio del nuevo automatismo.

Finalmente, la implementación del trabajo conlleva un aumento de eficiencia energética y reducción de emisiones que se producen por operar de forma continua un equipo eléctrico, en lugar de una turbina de vapor.

ABSTRACT

At the La Pampilla refinery in 2016, a type D water-tube steam boiler was installed, which included two forced draft air fans, one to operate continuously through a steam turbine (VAT) and another as a reserve that operated with an electric motor (VAM). In the context of the company's emissions reduction, it was proposed to use the VAM in continuous operation, while the VAT would remain as reserve equipment.

The main challenge associated with this change is the possible interruption of the electricity supply, which would cause the stoppage of different electrical equipment and process units, therefore, to mitigate the scenario of sudden stoppage of the VAM it has been proposed to modify the existing automation, so that the automatic change from VAM to VAT is executed quickly and safely. In this sense, the objective of this work is to ensure the continuity of operation of the fan driven by an electric motor.

After the implementation of the proposed changes, the identified problems were overcome, as well as the tests in the commissioning of the new automation.

Finally, the implementation of the work leads to an increase in energy efficiency and reduction of emissions that are produced by continuously operating an electrical equipment, instead of a steam turbine.

PRÓLOGO

El trabajo de suficiencia profesional está dividido en cuatro capítulos.

El Capítulo I es una introducción del trabajo desarrollado, explicando la problemática que motivó la investigación, así también se describen los objetivos que se desean lograr con el estudio.

El capítulo II es el desarrollo del marco teórico y conceptual, donde en el marco teórico se describen los conceptos en los cuales se fundamentará la investigación, tales como calderas y sus tipos, conceptos básicos de control de procesos y la secuencia para el cambio de ventiladores, mientras que en el marco conceptual se describirán las herramientas que se utilizaron para realizar el trabajo, así como también conceptos de control secuencial de procesos.

El capítulo III es el desarrollo del trabajo de investigación, aquí se discutirán los problemas del automatismo configurado, las mejoras propuestas para el automatismo, el simulador para operación y los posibles escenarios de riesgo durante el cambio de ventilador, así como también se describe el proceso a seguir para la modificación de los tags y orden de carga al sistema de control y finalmente se enumeran los pasos para las pruebas de funcionamiento que se propusieron durante el comisionado del automatismo modificado.

El capítulo IV es el análisis y discusión de resultados, donde se discutirá la puesta en marcha del nuevo automatismo, así como el resultado de las pruebas de funcionamiento que se realizaron, también se cuantificará el ahorro de energético y reducción de emisiones por la implementación del trabajo.

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
PRÓLOGO.....	v
ÍNDICE.....	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS	xi
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del Problema de Investigación	2
1.2.1. Problema General.....	2
1.2.2. Problemas Específicos	2
1.3 Objetivos del Estudio	2
1.3.1. Objetivo General.....	2
1.3.2. Objetivos Específicos.....	2
1.4 Antecedentes Investigativos	3
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	6
2.1 Marco Teórico.....	6
2.1.1 Caldera de vapor	6
2.1.2 Clasificación de calderas de acuerdo con la circulación de los fluidos interiormente de los tubos.....	6
2.1.2.1 Calderas Pirotubulares	6
2.1.2.2 Calderas Acuotubulares	7
2.1.3 Seguridades en una caldera convencional de quemadores de gas combustible.....	8
2.1.4. Sistema de Control Distribuido	8
2.1.4.1. Interfaz al Proceso.....	10
2.1.4.2. Interfaz al Operador.....	11
2.1.4.3. Vía de datos	11
2.1.5. Jerarquía de Control Industrial.....	11
2.1.6. Lenguajes de programación en los PLC y DCS.....	13
2.1.7 Cambio de titularidad de los Ventiladores de Aire	17

2.1.7.1	Secuencia de cambio de VAT a VAM.....	18
2.1.7.2	Secuencia de cambio de VAM a VAT.....	23
2.2	Marco Conceptual.....	27
2.2.1.	Experion PKS	27
2.2.2.	Controlador C300	27
2.2.3.	HMIWeb Display Builder.....	28
2.2.4.	Function Blocks (FB).....	29
2.2.5.	Control Module (CM).....	30
2.2.6.	Control Builder	31
2.2.7.	Control Secuencial de Procesos.....	32
2.2.8.	Sequence Control Module (SCM)	33
CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....		35
3.1	Problemas asociados al automatismo configurado.....	35
3.2	Cambios en el automatismo y optimización de ejecución de secuencia	42
3.3	Escenarios de riesgo durante cambio de ventilador	45
3.4	Nuevas secuencias de cambio de ventilador.....	48
3.5	Desarrollo del simulador de operación.....	52
3.5.1.	Nueva interfaz de Operación	55
3.5.1.1.	Selector de Titularidad de Ventilador.....	55
3.5.1.2.	Selector Ventilador Disponible/Fuera de Servicio.....	56
3.5.1.3.	Interpretación de secuencias.....	57
3.5.1.4.	Paso	59
3.5.1.5.	Transición	61
3.5.1.6.	Bypasses	63
3.5.1.7.	Botón de abortar secuencia a demanda	64
3.6	Procedimiento de modificación y carga de tags.....	65
3.6.1.	El orden de modificación de tags existentes.....	65
3.6.2.	Orden de carga de tags	66
3.7	Comisionado del nuevo automatismo	66
3.7.1.	Prueba de secuencia de barrido del caldero con VAM	66
3.7.2.	Prueba de secuencia de cambio a demanda de VAM a VAT	67
3.7.3.	Prueba de secuencia de cambio a demanda de VAT a VAM.	68
3.7.4.	Prueba de secuencia de cambio automático de VAM a VAT.....	69

3.7.5. Prueba de secuencia de cambio automático de VAT a VAM.....	70
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	71
4.1 Puesta en marcha de las secuencias	71
4.1.1. Prueba de la rampa de aire en secuencias a demanda.....	71
4.1.2. Prueba de cambio automático VAT a VAM por pulsador de paro local de emergencia del VAT	73
4.1.3. Prueba de cambio automático VAM a VAT por pulsador de paro de local del VAM.....	74
4.1.4. Prueba de cambio automático VAT a VAM por alarma de altas vibraciones en el VAT	74
4.1.5. Prueba de cambio automático VAM a VAT por orden de paro remoto del VAM	75
4.1.6. Pruebas mecánicas en los ventiladores.....	76
4.2 Cuantificación de ahorro energético y reducción de emisiones.....	78
4.2.1. Cálculo de consumo energético y de emisiones VAT	78
4.2.2. Cálculo de consumo energético y de emisiones VAM	80
4.2.3. Ahorro energético	81
4.2.4. Reducción de emisiones.....	81
CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
ANEXOS	87
A. Glosario de Términos.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de calderas acuotubulares	7
Figura 2: Principales Suministradores de sistemas de control distribuido	9
Figura 3: Elementos de un Sistema de Control Distribuido.....	10
Figura 4: Niveles de control de una planta.....	12
Figura 5: Ejemplo de Structured Text	13
Figura 6: Ejemplo de Function Block Diagram.....	14
Figura 7: Comparativa de lógica Ladder, lógica de relés y lógica Booleana	15
Figura 8: Ejemplo de Instruction List.....	15
Figura 9: Ejemplo de Sequential Function Chart.....	16
Figura 10: Sistema de ventiladores de la caldera de estudio.....	17
Figura 11: Antigua secuencia VAT a VAM.....	22
Figura 12: Antigua secuencia VAM a VAT	26
Figura 13: Controlador C300	27
Figura 14: Vista del HMIWeb Display Builder	29
Figura 15: Vista del Control Builder con un Control Module	31
Figura 16: Estados del Control Secuencial de Procesos	32
Figura 17: Librería de function blocks para un SCM	33
Figura 18: Esquema simplificado de un SCM	34
Figura 19: Esquemático antiguo de secuencia VAM a VAT.....	40
Figura 20: Esquemático antiguo de secuencia VAT a VAM.....	41
Figura 21: Nueva secuencia a demanda de VAM a VAT.....	48
Figura 22: Nueva secuencia a demanda de VAT a VAM.....	49
Figura 23: Nueva secuencia automática de VAM a VAT	50
Figura 24: Nueva secuencia automática de VAT a VAM	51
Figura 25: Gráfico de simulación de secuencia de cambio VAM a VAT	53
Figura 26: Gráfico de simulación de secuencia de cambio VAT a VAM	54
Figura 27: Selector de titularidad	55
Figura 28: Selector de ventilador Disponible / Fuera de Servicio	56
Figura 29: Interpretación de secuencias	57
Figura 30: Tooltip de las secuencias.....	58
Figura 31: Detalle de pasos de una secuencia	59
Figura 32: Detalle de pasos en una secuencia en ejecución	60
Figura 33: Detalle de una transición falsa de una secuencia	61
Figura 34: Detalle de una transición verdadera en una secuencia	62
Figura 35: Bypasses de secuencia	63
Figura 36: Botón Abortar secuencia.....	64
Figura 37: Prueba de rampa de aire con desviación PV - SP de 500 kg/h ..	71
Figura 38: Prueba de rampa de aire con desviación PV - SP de 750 kg/h ..	72
Figura 39: Prueba de cambio automático VAT a VAM por pulsador de paro local	73
Figura 40: Pruebas de cambio automático por altas vibraciones del VAT ...	75

Figura 41: Prueba de cambio automático VAM a VAT por orden de paro remoto.....	76
Figura 42: Pruebas mecánicas en los ventiladores.....	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Cambios del automatismo.....	42
Tabla 2: Posibles situaciones anormales en secuencias a demanda y soluciones.....	45
Tabla 3: Posibles situaciones anormales en secuencias automáticas y soluciones.....	46

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

En el año 2016 mediante el proyecto adecuaciones a las nuevas especificaciones de combustibles (RLP 21) se construyó la caldera de vapor 63B200 siendo por diseño acuotubular de tipo D, la cual cuenta con 2 ventiladores de tiro forzado de aire: uno accionado por turbina de vapor (VAT) y el otro accionado por motor eléctrico (VAM). Donde el VAT se diseñó para operación en continuo y el VAM de reserva.

Debido a que se requiere incrementar la eficiencia energética y reducir emisiones de CO₂ como objetivo corporativo (cero emisiones netas al 2050), en el año 2019 se planteó tener el VAM en operación continua y dejar al VAT como reserva y de esta forma reducir las emisiones a través de la reducción del consumo de vapor.

Ante el escenario de tener el VAM en operación continua la mayor limitante es un evento de fallo eléctrico general, hasta que se re establezca el suministro eléctrico en la refinería, se debe asegurar el resto de los servicios industriales: agua de calderas, agua de enfriamiento, aire de instrumentos y principalmente vapor.

Por ello para cubrir este escenario, se realizaron mejoras y modificaciones del automatismo existente para que el cambio del VAM al VAT sea de forma automática; pues siendo una emergencia operativa con riesgo de paro total de la refinería, se requiere que las turbinas arranquen de forma rápida para luego aumentar la producción de vapor del caldero y re establecer las condiciones normales en el resto de las unidades de proceso.

1.2 Descripción del Problema de Investigación

1.2.1. Problema General

¿Cuál es la mejor manera de asegurar la continuidad de operación del ventilador accionado por motor eléctrico?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Por qué no se tiene en operación continua el ventilador accionado por motor eléctrico?
- ¿El automatismo actual de cambio de ventilador es el adecuado?
- ¿La configuración usada en el automatismo es la óptima?
- ¿Qué posibles escenarios de riesgo se pueden presentar en un cambio de ventilador?
- ¿De qué manera se puede aumentar el aprendizaje y operación del automatismo?
- ¿Se puede realizar una simulación del nuevo automatismo?
- ¿Cuánto es el ahorro energético y reducción de emisiones?

1.3 Objetivos del Estudio

1.3.1. Objetivo General

Asegurar la continuidad de operación del ventilador accionado por motor eléctrico.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar escenarios de falla del ventilador accionado por motor eléctrico.
- Identificar los problemas del automatismo actual.
- Identificar la forma óptima de configurar el automatismo.
- Identificar los escenarios de riesgo durante un cambio de ventilador.
- Identificar métodos para mejorar el aprendizaje y la operación del automatismo de los ventiladores.
- Simular el nuevo automatismo para probar la nueva lógica.

- Cuantificar el ahorro energético y reducción de emisiones que se logra al tener en operación continua el ventilador accionado por motor eléctrico.

1.4 Antecedentes Investigativos

- A Combustion Air Changeover Control for Heat Recovery Boilers (Kano, 1992)

En este artículo el autor tiene como objetivo mantener en servicio una caldera de recuperación de calor (CRC), cuando se da un paro de emergencia de su turbina de cogeneración asociada, pues sus humos de combustión aportan el calor para generar vapor en la CRC, por ello el autor propone el arranque automático del sistema de combustión auxiliar el cual cuenta con un ventilador de aire de tiro forzado (Forced Draft Fan o FDF por sus siglas en inglés), así mismo también plantea el retorno automático de la CRC con la turbina de cogeneración y apagado del FDF.

El autor detalla las secuencias utilizadas para el cambio. Así mismo muestra como resultado las tendencias del cambio automático ante el paro de la turbina de cogeneración y arranque del FDF, mientras que concluye que un controlador lógico programable (Programmable Logic Controller o PLC por sus siglas en inglés) es capaz de resolver efectivamente el problema de mantener en servicio la CRC a pesar del paro de la turbina de cogeneración.

- Oil and gas pathway to net-zero: Review and outlook (Wang et al., 2023)

En este este artículo los autores discuten las tendencias de las empresas grandes del sector Oil & Gas en reducción de emisiones, así como sus objetivos a largo plazo (la mayoría con objetivo de cero emisiones en 2050), ello se plantea mediante proyectos de renovación tecnológica de las operaciones prefiriendo los de bajo consumo energético y de bajas emisiones,

tecnologías de captura, almacenamiento y uso del carbono (CCUS por sus siglas en inglés), uso de biocombustibles (reciclo de CO₂), electrificación de equipos industriales basados en combustión o vapor, incorporación de energías renovables en las operaciones y descarbonización de combustibles mediante el uso de gas natural como reducción de emisiones respecto a los combustibles líquidos y sólidos, así también uso de hidrógeno apuntando a las cero emisiones.

Finalmente, los autores concluyen que, al aumentar el desarrollo y la utilización de fuentes de energía limpias, de alta calidad y con bajas emisiones de carbono, puede promover y construir un sistema energético moderno, seguro y eficiente. Así mismo, la tecnología CCUS se puede utilizar en la recuperación de petróleo crudo por inyección de CO₂, donde se puede recuperar del petróleo crudo dejando espacio de almacenamiento en el suelo para que el CO₂ pueda almacenarse bajo tierra y reducir la contaminación.

- Instrument Engineers' Handbook Fourth Edition, Volume Two: Process Control and Optimization (Liptak, 2006)

El handbook está centrado en conceptos y teoría de automatización, optimización y control de procesos donde se cubre tanto el hardware como las estrategias de control, siendo uno de los trabajos más completos y respetados en el área de instrumentación y control de procesos.

Entre los principales temas que se utilizarán para el presente trabajo se encuentran la teoría de control, jerarquía de control, programación en equipos industriales (IEC 61131-3), control de calderas industriales, control de ventiladores, control de turbinas de vapor, control batch (ISA 88) y control secuencial de procesos.

- Programming of sequential control systems using functional block diagram language (Wcislik et al., 2015)

En este artículo los autores abordan una metodología de creación de programas de control secuencial utilizando el lenguaje de diagramas de bloques de funciones (FBD por sus siglas en inglés), ello se logra después de analizar los bloques básicos del lenguaje diagrama de funciones secuenciales (SFC por sus siglas en inglés) y sus rutas de ramificación, para luego crear la secuencia con lenguaje FBD teniendo en cuenta el tiempo de ejecución de los bloques (sincronización).

Finalmente, dicho método garantiza una forma compacta del programa final y es particularmente útil para programas y controladores PLC pequeños, debido a que para secuencias más complejas es más fácil usar el lenguaje SFC. Así también la metodología puede ser usada para traducir entre los diferentes lenguajes del estándar IEC 61131-3 (Ladder Diagram, Instruction List y Structured Text).

- On the execution of sequential function charts (Hellgren et al., 2005)

En este artículo los autores discuten la transición entre la teoría del control de supervisión (SCT por sus siglas en inglés) y su implementación compleja en los PLC's, esto se debe principalmente al hecho de que el SCT se establece en una configuración asíncrona basada en eventos, mientras que los PLC están basados en señales, son síncronos y secuenciales. En la programación de PLC's, el lenguaje SFC parece ser la opción ideal para esta transición, por ello se analizan diferentes modelos de ejecución para SFC y se comparan con la norma internacional IEC 61131-3.

Finalmente, se requiere un conocimiento detallado del modelo de ejecución del SFC, por lo que un programa SFC que exhibe un determinado comportamiento en un PLC puede comportarse de manera diferente en otro.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Caldera de vapor

Una caldera de vapor es un recipiente cerrado en el cual se genera vapor de agua por aplicación del calor resultante de la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos o por utilización de la energía nuclear o eléctrica. (Kohan, 2000)

2.1.2 Clasificación de calderas de acuerdo con la circulación de los fluidos interiormente de los tubos

2.1.2.1 Calderas Pirotubulares

Una caldera pirotubular o de tubos de humos, es la que más común y se utiliza para aplicaciones de calentamiento de proceso y aplicaciones industriales y comerciales. En las calderas pirotubulares los gases de combustión transitan dentro de los tubos que están rodeados por agua de tal forma que la transferencia de calor es función de la conductividad del material del tubo, de la diferencia de temperatura entre el agua y los gases de combustión, del área de transferencia, del tiempo de contacto, etc. (Kohan, 2000)

Las calderas pirotubulares se clasifican en:

- Caldera tubular horizontal.
- Calderas Económicas o caja de humos.
- Caldera Caja de fuego tipo locomotora.
- Caldera Tipo marina escocesa.
- Caldera tubular vertical.
- Caldera vertical sin tubos.

2.1.2.2 Calderas Acuotubulares

La diferencia principal entre las calderas acuotubulares y pirotubulares es que en la primera el agua fluye internamente en los tubos en lugar de alrededor de ellos como en las pirotubulares. (Kohan, 2000)

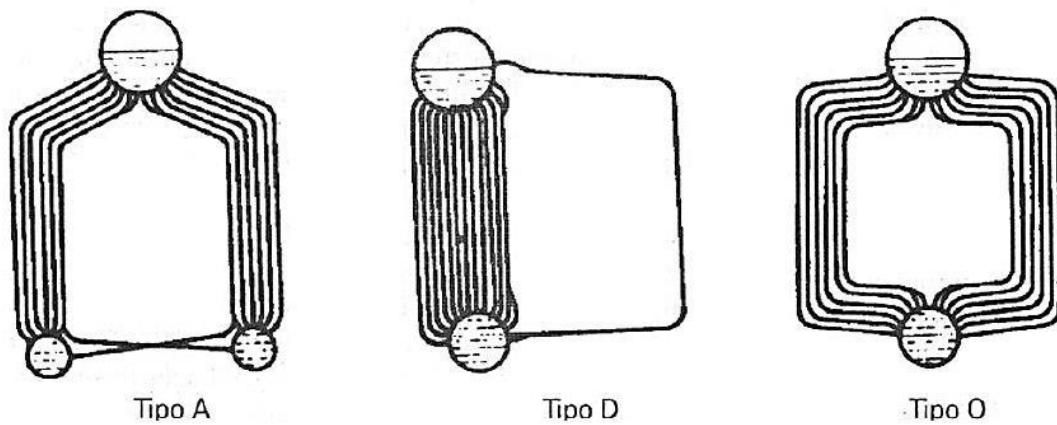
Las ventajas de la caldera acuotubular son:

- Puede obtenerse mayor capacidad aumentando el número de tubos, siendo independiente del diámetro del calderín de vapor.
- El calderín no está expuesto al calor radiante de las llamas.

En los diseños modernos de calderas acuotubulares se usan 3 tipos según su disposición de los tubos y el calderín que se conocen como: tipos "A", "D" y "O". (Kohan, 2000)

Figura 1:

Tipos de calderas acuotubulares



Fuente: Tomado de (Kohan, 2000)

2.1.3 Seguridades en una caldera convencional de quemadores de gas combustible

Según la norma (NFPA, 2015) si se presenta alguna de las siguientes condiciones se ejecuta el paro total de una caldera convencional de quemadores de gas combustible:

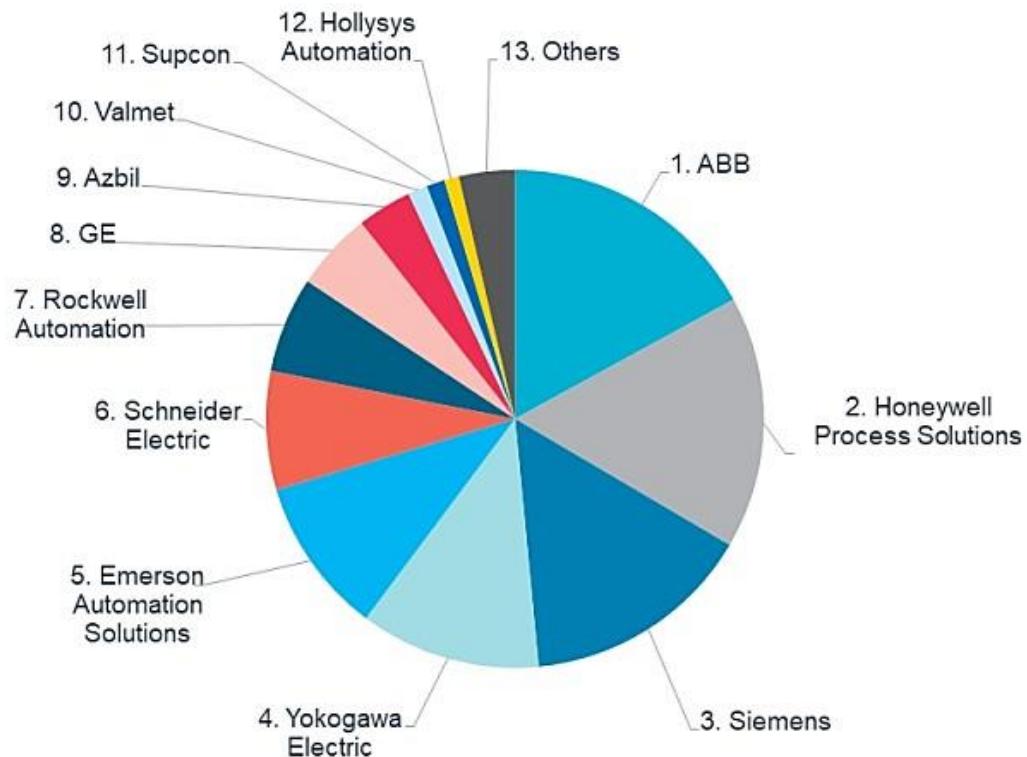
- ✓ Paro a demanda de los operadores.
- ✓ Muy alta o baja presión en la cámara de combustión (tiro).
- ✓ Pérdida de ambos ventiladores de aire de tiro forzado.
- ✓ Muy bajo flujo de aire.
- ✓ Pérdida total de las detecciones de llama de los quemadores o pérdida de un número que genere una situación insegura.
- ✓ Muy bajo nivel de agua en el calderín.
- ✓ Muy alta o baja presión de gas combustible.
- ✓ Todas las válvulas de combustible cerradas.

2.1.4. Sistema de Control Distribuido

Un Sistema de Control Distribuido o también por sus siglas en inglés DCS por Distributed Control System, es un sistema de control aplicado a procesos industriales generalmente con muchos lazos de control. El concepto DCS aumenta la confiabilidad y reduce los costos de instalación al ubicar las funciones de control cerca de la planta de proceso, con monitoreo y supervisión remotos centralizados. (Liptak, 2006)

Figura 2:

Principales Suministradores de sistemas de control distribuido



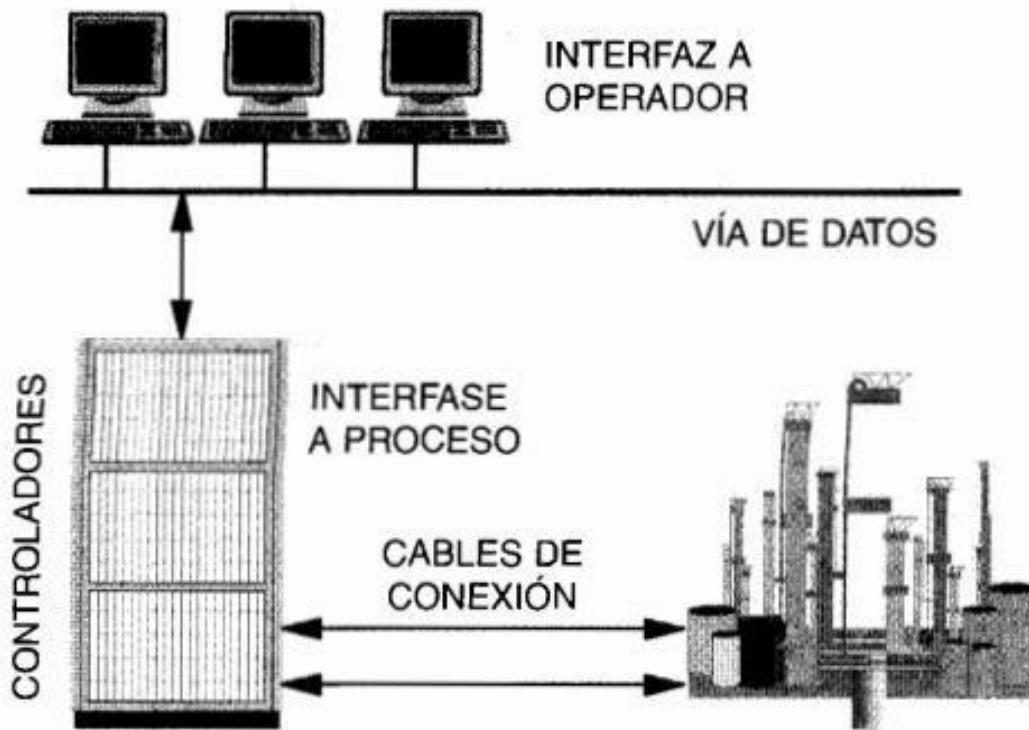
© 2018 Interact Analysis

Fuente: Tomado de (Interact Analysis, 2018)

Los elementos fundamentales de un DCS son: (Acedo, 2002)

- ✓ Interfaz al Proceso.
- ✓ Interfaz al Operador.
- ✓ Vía de datos

Figura 3:
Elementos de un Sistema de Control Distribuido



Fuente: Tomado de (Acedo, 2002)

2.1.4.1. Interfaz al Proceso

También se denomina controlador donde se usan diferentes módulos. Algunos de ellos se dedican al procesamiento de lazos de control con entradas proveniente de instrumentos y salida hacia elementos finales de control como válvulas de control; mientras que otros se dedican al procesamiento de entradas que serán solo indicaciones. Otros módulos tienen la posibilidad de programación en lenguajes de alto nivel o en algunos casos lenguajes especializados, y están destinados a control avanzado. (Acedo, 2002)

2.1.4.2. Interfaz al Operador

También se denomina interfaz Humano-Máquina o HMI (Human-Machine Interface) por sus siglas en inglés. El sistema proporciona un medio para supervisar y manipular las variables del proceso desde una sala de control, a través de una consola de operación donde se encuentra representada una sección de la planta con las variables de proceso en tiempo real. (Acedo, 2002)

2.1.4.3. Vía de datos

El sistema dispone de una vía principal para comunicación de datos y otra como reserva. Cada vía está compuesta por un cable coaxial y toda la electrónica asociada, por donde fluye la comunicación a lo largo de todos los elementos del sistema de control. (Acedo, 2002)

2.1.5. Jerarquía de Control Industrial

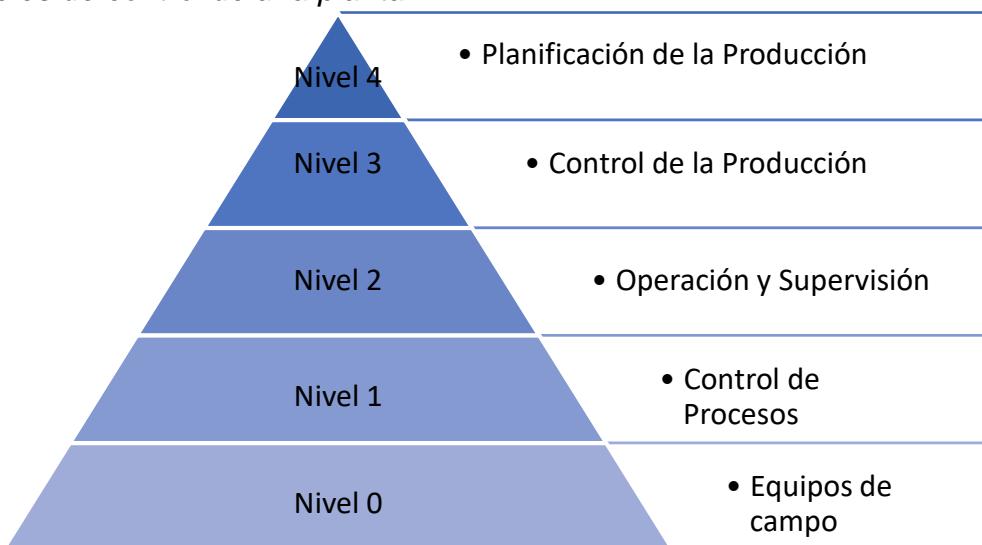
- **El nivel 0**, contiene los dispositivos de campo como los sensores de flujo, nivel, presión y temperatura, y los elementos de control finales, como las válvulas de control.
- **El nivel 1**, contiene módulos industriales de señales de entrada / salida (I/O) y sus procesadores electrónicos asociados (controladores industriales), así como la parte software asociada al controlador y señales (control regulatorio, lógica booleana, etc).
- **El nivel 2**, contiene las estaciones de supervisión, que recopilan información de los nodos del procesador en el sistema y proporcionan las pantallas de control del operador.
- **El nivel 3**, es el nivel de control de producción, que puede o no controlar el proceso, pero se preocupa por el monitoreo de la producción y los objetivos de monitoreo.

- **El nivel 4**, es el nivel de planificación de la producción.

Los niveles 1 y 2 son los niveles funcionales de un DCS tradicional, en el que todos los equipos forman parte de un sistema integrado de un único fabricante. (ISA, 2000)

Figura 4:

Niveles de control de una planta



Fuente: Elaboración propia basada en ISA 95. (ISA, 2000)

El automatismo del trabajo está configurado en el Nivel 1 y es supervisado desde el nivel 2.

2.1.6. Lenguajes de programación en los PLC y DCS

En 1993 se publicó el estándar de lenguajes de programación en Controladores Lógicos Programables (PLC por sus siglas en inglés) y fue designado como IEC 61131-3, en este estándar se tienen 5 lenguajes de programación hasta la última revisión del 2013. Además, es cumplido por los principales fabricantes de PLC y DCS. (Hanssen, 2015)

- **Structured Text (ST)**, es un lenguaje textual considerado de alto nivel y diseñado para automatización de procesos. Este lenguaje se utiliza principalmente para implementar procedimientos complejos que no se pueden expresar fácilmente con lenguajes gráficos. Un programa basado en ST es una lista de sentencias, cada sentencia termina con un separador de punto y coma (;). Los comentarios podrán insertarse libremente en el texto, un comentario debe comenzar con (*) y terminar con (*). Las sentencias básicas en ST son: (Liptak, 2006)
 - a) Sentencia de asignación de variables
 - b) Sentencias de selección (IF, THEN, ELSE, CASE)
 - c) Sentencias de Iteración (FOR, WHILE, REPEAT)

Figura 5:

Ejemplo de Structured Text

```

PROGRAM PLC_PRG
VAR
    Index      : INT := 1;
    Parameter  : ARRAY [0..10] OF REAL;
    Data AT %MW5 : ARRAY [0..10] OF REAL;
END_VAR

IF %MX0.1 THEN
    %MWO := 0;
    %MX0.2 := %MX20.0;
ELSIF NOT %MX3.0 THEN
    %MWO := 10;
ENDIF;

FOR Index := 1 TO 10 BY 1 DO
    Parameter[Index] := Data[Index];
    Index := Index - 1;
END_FOR;

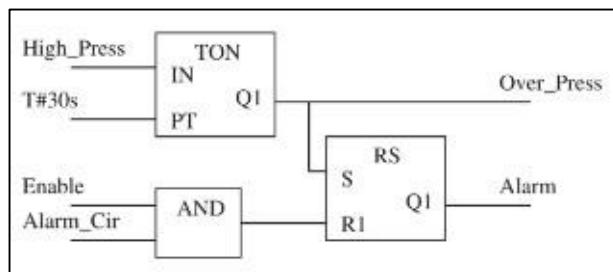
```

Fuente: Tomado de (Hanssen, 2015)

- **Function Block Diagram (FBD)**, es un lenguaje gráfico el cual consiste en diagramas de bloques de funciones, es utilizado para construir gráficamente procedimientos complejos tomando funciones existentes y conectándolas. Un bloque de funciones está representado por un solo rectángulo, donde las entradas están conectadas en su borde izquierdo y las salidas están conectadas en su borde derecho. (Liptak, 2006)

Figura 6:

Ejemplo de Function Block Diagram

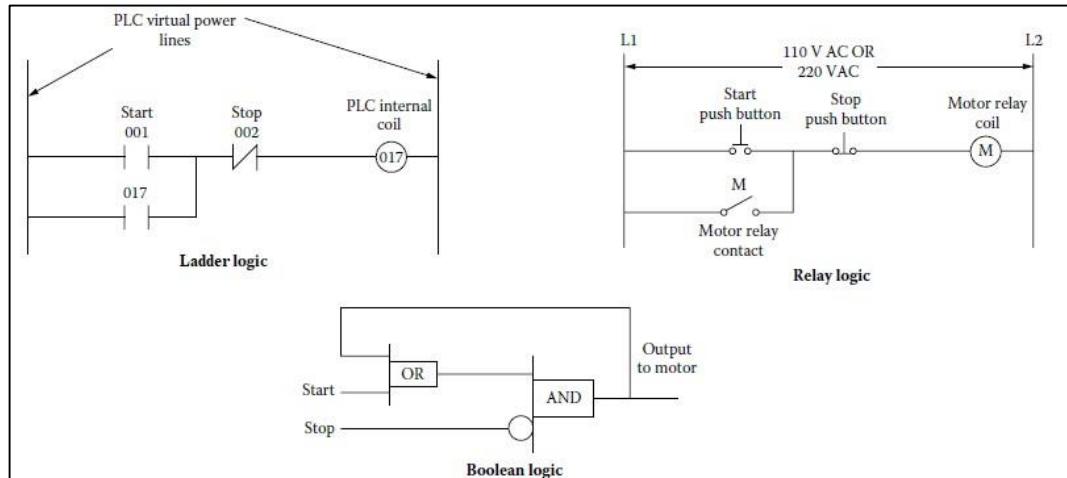


Fuente: Tomado de (Hanssen, 2015)

- **Ladder Diagram (LD)**, es un lenguaje gráfico y es una extensión de la lógica de relés (relay logic), por ello es muy popular entre electricistas y programadores. Además, una comprensión básica de la lógica booleana ayudará a escribir la lógica ladder, ya que muchas veces un esquema de control se desarrolla primero utilizando lógica booleana y luego se convierte en una lógica ladder en un PLC. (Liptak, 2006)

En la Figura 7 se muestran diferentes representaciones de una lógica simple de marcha/paro de un motor.

Figura 7:

Comparativa de lógica Ladder, lógica de relés y lógica Booleana

Fuente: Tomado de (Liptak, 2006)

- Instruction List (IL), es un lenguaje textual considerado de bajo nivel, usada principalmente en aplicaciones pequeñas o para optimizar partes de una aplicación. Un programa basado en IL es una lista de instrucciones donde cada instrucción debe comenzar en una nueva línea y debe contener un operador y, si es necesario más operandos, estos siendo separados por comas (,). Una etiqueta seguida de dos puntos (:) puede preceder a la instrucción. Si se adjunta un comentario a la instrucción, debe ser el último componente de la línea. Comentarios siempre comienza con (*) y termina con (*). Las líneas vacías pueden ser ingresadas entre instrucciones. (Liptak, 2006)

Figura 8:

Ejemplo de Instruction List

```

LD    run
ST    timer1.IN
LD    counter
GE    5 (* IF counter >= 5, *)
JMPC next (* jump to next *)
CAL   timer1(
      PT:=t#10m)
LD    timer1.Q
  
```

Fuente: Tomado de (Hanssen, 2015)

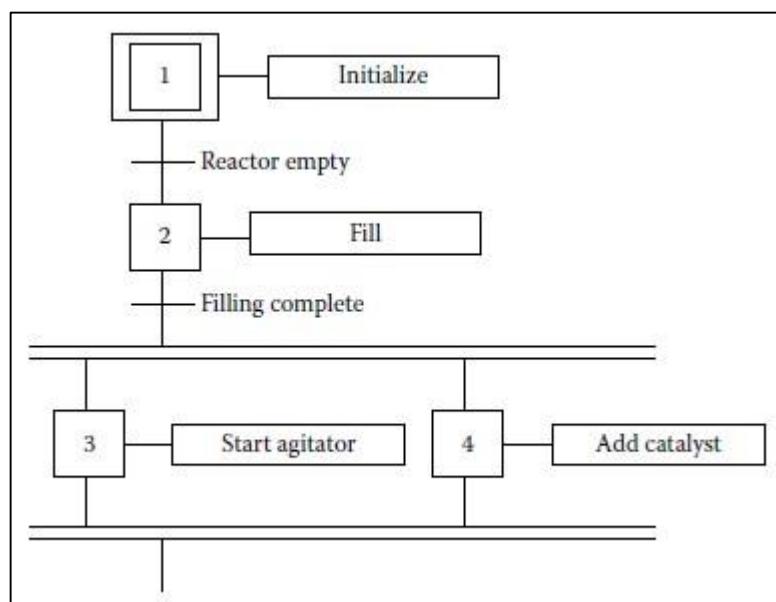
Sequential Function Chart (SFC), es un lenguaje gráfico tipo diagrama de flujo, su objetivo es proporcionar un lenguaje de programación relacionado al mantenimiento fácil de secuencias de operaciones. Debido a esto, a menudo no se adaptan muy bien al control continuo del proceso.

Como el origen de la lógica ladder está en los relés y por su naturaleza funcionan de manera no secuencial, ello aumenta la dificultad de una secuencia basada en lenguajes con ejecución continua como Ladder o FBD, pues determinar el orden de la secuencia suele ser difícil. (Liptak, 2006)

En el marco conceptual se abarcará el Sequence Control Module (SCM) de Experion y se dará mayor alcance de como se puede programar en este lenguaje.

Figura 9:

Ejemplo de Sequential Function Chart



Fuente: Tomado de (Liptak, 2006)

2.1.7 Cambio de titularidad de los Ventiladores de Aire

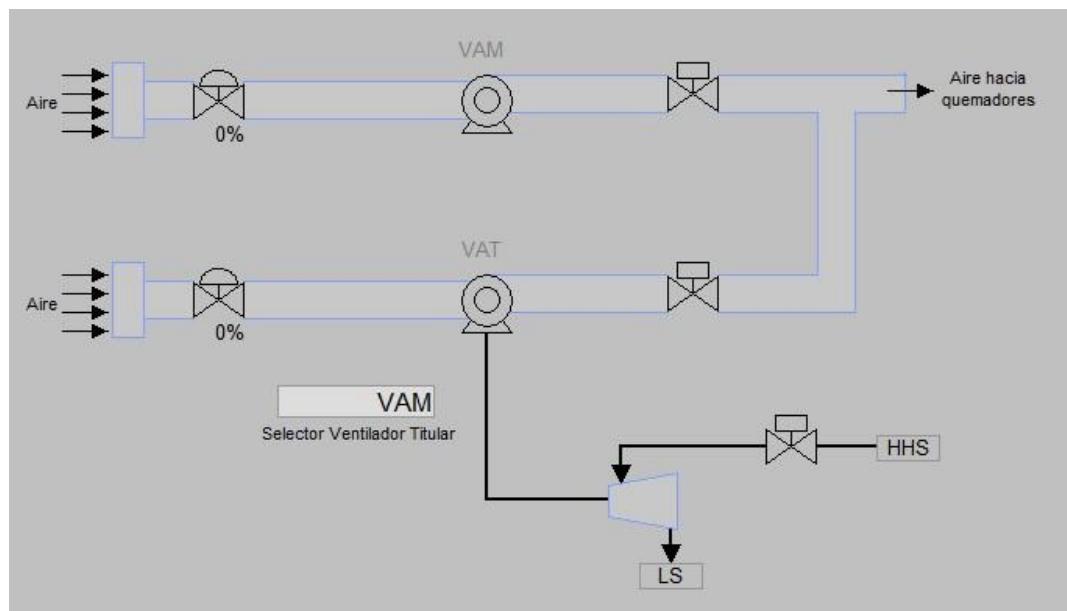
El automatismo de cambio de titularidad de ventiladores de aire se ha diseñado con la intención de ejecutar el cambio sin llegar a condiciones inseguras que puedan desencadenar un paro total de la caldera.

Se cuenta con un selector ubicado en los esquemáticos de operación, el cual permite al operador de panel de control iniciar a demanda la secuencia de cambio de titularidad de los ventiladores de aire.

Al arrancar el caldero si no se dispone de vapor el operador debe seleccionar el VAM como titular. (Ayesa España, 2016)

Figura 10:

Sistema de ventiladores de la caldera de estudio



Fuente: Elaboración propia basada en (Ayesa España, 2016).

2.1.7.1 Secuencia de cambio de VAT a VAM

La secuencia original de cambio VAT a VAM está diseñada con los siguientes pasos:

a) Inicio de secuencia VAT a VAM

El ventilador en servicio es el VAT, y en reserva es el VAM. En esta situación, las condiciones que provocan el inicio de la secuencia de cambio de VAT a VAM son las siguientes: (Ayesa España, 2016)

- ✓ Cambio de selector a VAM titular.
- ✓ Bajo flujo de aire de combustión.
- ✓ Ambos ventiladores parados por 2 segundos.
- ✓ Baja presión de vapor a turbina.
- ✓ Alarma de protecciones mecánicas de la turbina.

Donde las alarmas de protecciones mecánicas son las siguientes:
(Ayesa España, 2016)

- ✓ Altas vibraciones radiales en cojinetes de la turbina.
- ✓ Altas vibraciones axiales en cojinetes de la turbina.
- ✓ Alta temperatura en cojinetes de la turbina.
- ✓ Alta temperatura en cojinetes lado reductor, eje de alta velocidad de la bomba aceite.
- ✓ Alta temperatura en cojinetes lado reductor, eje de baja velocidad de la bomba aceite.

Si la secuencia es iniciada de forma automática por una alarma, esta se anuncia en el panel de control al operador.

b) Minimum Firing

Se le llama minimum firing a la mínima inyección de gas combustible y aire, donde al iniciar la secuencia el automatismo establece el valor teórico de minimun firing en el punto de consigna de los controladores de gas combustible y aire.(Ayesa España, 2016)

c) Evaluación de acumulación de combustible

En el momento de la activación del automatismo se comprobará mediante analizadores en línea las concentraciones de CO y O₂ para detectar una posible acumulación de combustible, pudiendo darse 3 situaciones: (Ayesa España, 2016)

- En el momento de ejecución del automatismo CO < 500 ppm y O₂ > 0,9% (no se detecta acumulación de combustible). El automatismo ejecuta el cambio del ventilador.
- En el momento de ejecución del automatismo CO > 500 ppm o O₂ < 0,9 % (posible acumulación de combustible). El automatismo no ejecuta el cambio del ventilador. Esta situación mantendrá indefinidamente en espera la secuencia, pero se continuará monitorizando los analizadores de CO y O₂ pudiendo darse el caso descrito en la situación “c”.
- Si, durante la situación descrita en el punto “b” (posible acumulación de combustible), se detecta en algún momento que nos encontramos en la situación descrita en el punto “a” (no se detecta acumulación de combustible) y se mantiene por al menos 1 minuto, el automatismo ejecutará el cambio del ventilador.

d) Verificar alineamiento cerrado del VAM

Se verifica que tanto el dámper de descarga del VAM como su dámper de succión se encuentren totalmente cerrados, si no están cerrados se enviará la orden de cierre. (Ayesa España, 2016)

e) Arranque del VAM

Previo al inicio de la ejecución de la secuencia el equipo debe tener el selector para trabajar de forma remota, pues la orden de arranque la ejecutará el automatismo. (Ayesa España, 2016)

f) Apertura del dámper de descarga del VAM

Luego de 8 segundos de confirmarse que el VAM se encuentra en marcha se procederá su abrir el dámper de descarga. (Ayesa España, 2016)

g) Rampa de cambio de dámperes de succión

Simultáneamente se enviará la orden de abrir al posicionador del dámper de succión del VAM y la orden de cerrar al posicionador del dámper de succión del VAT, partiendo la rampa desde el % de apertura con el que empezó el posicionador del VAT, siendo la velocidad de la rampa de 50%/minuto. (Ayesa España, 2016)

h) Cierre del dámper de descarga del VAT

Al terminar la rampa de dámperes de succión y al tener alineado a la caldera el VAM se procede a cerrar el dámper de descarga del VAT. (Ayesa España, 2016)

i) Paro del VAT y Final de secuencia

Finalmente se envía la orden de paro del VAT para finalizar la secuencia de cambio de titularidad y dar fin al minimum firing, para que el operador posteriormente reestablezca las condiciones de producción de la caldera. (Ayesa España, 2016)

j) Arranque de caldera y VAM como titular

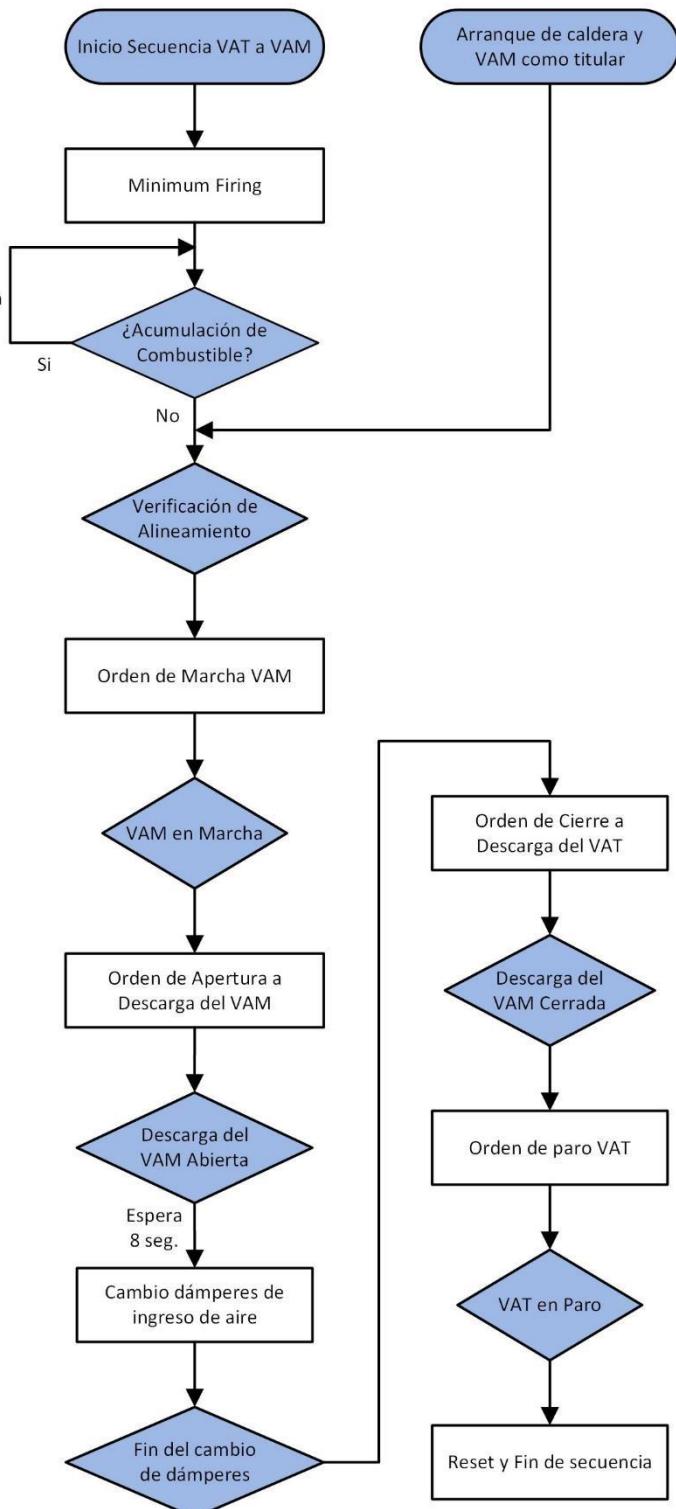
Cuando se necesite arrancar la caldera previamente se deberá realizar una purga con aire, para desplazar los gases que se hayan podido almacenar en la cámara de combustión en el tiempo que la caldera se mantuvo parada, para lo cual se debe arrancar el ventilador que se ha seleccionado como titular y en esta condición ya no es necesario realizar los pasos 1, 2 y 3 de la secuencia. (Ayesa España, 2016)

Figura 11:
Antigua secuencia VAT a VAM

Condiciones de inicio de secuencia, partiendo de VAT como titular:
de VAT como titular:

- Cambio de selector de titularidad a VAM.
- Muy bajo flujo de aire.
- Ambos ventiladores parados por 2 seg.
- Muy baja presión de vapor.
- Alarma de protecciones mecánicas VAT.

Una vez que se detecte acumulación de combustible, se deberá verificar durante 1 minuto que las condiciones de concentración son normales para ejecutar el cambio de ventilador



Fuente: Elaboración propia basada en (Ayesa España, 2016)

2.1.7.2 Secuencia de cambio de VAM a VAT

La secuencia original de cambio VAM a VAT está diseñada con los siguientes pasos:

a) Inicio de secuencia VAM a VAT

El ventilador en servicio es el VAM, y en reserva es el VAT. En esta situación, las condiciones que provocan el inicio de la secuencia de cambio de VAM a VAT son las siguientes: (Ayesa España, 2016)

- ✓ Cambio de selector a VAT titular.
- ✓ Bajo flujo de aire de combustión.
- ✓ Ambos ventiladores parados por 2 segundos.

Si la secuencia es iniciada de forma automática por una alarma, esta se anuncia en el panel de control al operador.

b) Minimum Firing

Se le llama minimum firing a la mínima inyección de gas combustible y aire, donde al iniciar la secuencia el automatismo establece el valor teórico de minimum firing en los controladores de gas combustible y aire. (Ayesa España, 2016)

c) Evaluación de acumulación de combustible

En el momento de la activación del automatismo se comprobará mediante analizadores en línea las concentraciones de CO y O₂ para detectar una posible acumulación de combustible, pudiendo darse 3 situaciones: (Ayesa España, 2016)

- En el momento de ejecución del automatismo CO < 500 ppm y O₂ > 0,9% (no se detecta acumulación de combustible). El automatismo ejecuta el cambio del ventilador.
- En el momento de ejecución del automatismo CO > 500 ppm o O₂ < 0,9 % (posible acumulación de combustible). El automatismo no ejecuta el cambio del ventilador. Esta situación mantendrá indefinidamente en espera la secuencia, pero se continuará monitorizando los analizadores de CO y O₂ pudiendo darse el caso descrito en la situación “c”.
- Si, durante la situación descrita en el punto “b” (possible acumulación de combustible), se detecta en algún momento que nos encontramos en la situación descrita en el punto “a” (no se detecta acumulación de combustible) y se mantiene por al menos 1 minuto, el automatismo ejecutará el cambio del ventilador.

d) Verificar alineamiento cerrado del VAT

Se verifica que tanto el dámper de descarga del VAT como su dámper de succión se encuentren totalmente cerrados, si no están cerrados se enviará la orden de cierre. (Ayesa España, 2016)

e) Arranque del VAT

Previo al inicio de la ejecución de la secuencia el equipo debe tener el selector para trabajar de forma remota, pues la orden de arranque la ejecutará el automatismo. (Ayesa España, 2016)

f) Apertura del dámper de descarga del VAT

Luego de 40 segundos de confirmarse que el VAT se encuentra en marcha se procederá su abrir el dámper de descarga. (Ayesa España, 2016)

g) Rampa de cambio de dámperes de succión

Simultáneamente se enviará la orden de abrir al posicionador del dámper de succión del VAT y la orden de cerrar al posicionador del dámper de succión del VAM, partiendo la rampa desde el % de apertura con el que empezó el posicionador del VAM, siendo la velocidad de la rampa de 50%/minuto. (Ayesa España, 2016)

h) Cierre del dámper de descarga del VAM

Al terminar la rampa de dámperes de succión y al tener alineado a la caldera el VAT se procede a cerrar el dámper de descarga del VAM. (Ayesa España, 2016)

i) Paro del VAM y Final de secuencia

Finalmente se envía la orden de paro del VAM para finalizar la secuencia de cambio de titularidad y dar fin al minimum firing, para que el operador posteriormente reestablezca las condiciones de producción de la caldera. (Ayesa España, 2016)

j) Arranque de caldera y VAT como titular

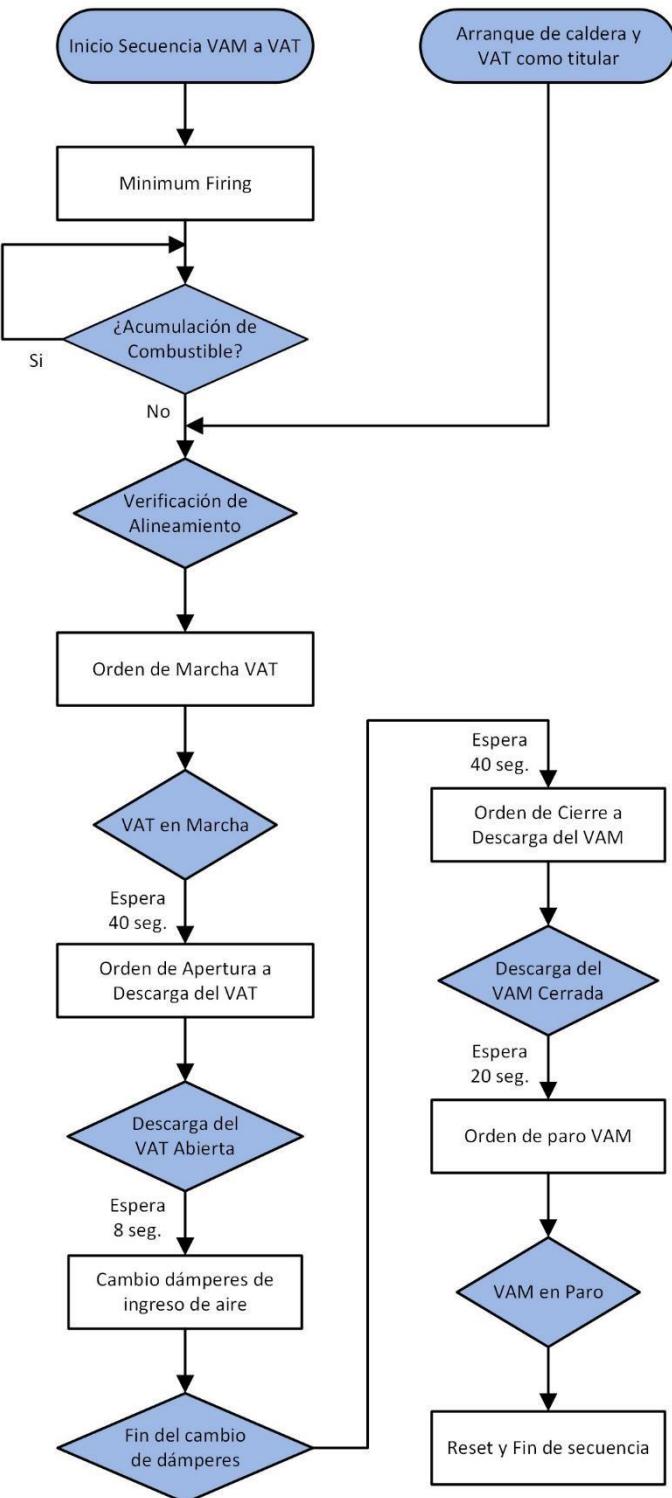
Cuando se necesite arrancar la caldera previamente se deberá realizar una purga con aire, para desplazar los gases que se hayan podido almacenar en la cámara de combustión en el tiempo que la caldera se mantuvo parada, para lo cual se debe arrancar el ventilador que se ha seleccionado como titular y en esta condición ya no es necesario realizar los pasos 1, 2 y 3 de la secuencia. Solamente se arrancará el VAT si se cuenta previamente con vapor. (Ayesa España, 2016)

Figura 12:
Antigua secuencia VAM a VAT

Condiciones de inicio de secuencia, partiendo de VAM como titular:

- Cambio de selector de titularidad a VAT.
- Muy bajo flujo de aire.
- Ambos ventiladores parados por 2 seg.

Una vez que se detecte acumulación de combustible, se deberá verificar durante 1 minuto que las condiciones de concentración son normales para ejecutar el cambio de ventilador



Fuente: Elaboración propia basada en (Ayesa España, 2016)

2.2 Marco Conceptual

2.2.1. Experion PKS

Experion PKS (PKS por Process Knowledge System) es un sistema de control distribuido desarrollado por la empresa Honeywell que aborda objetivos críticos de diferentes industrias para facilitar el intercambio de conocimiento y gestión del flujo de trabajo. Experion proporciona un sistema seguro, robusto y escalable en toda la planta. (Honeywell Process Solutions XX81, 2012).

Experion PKS es el sistema de control con el que cuenta la caldera.

2.2.2. Controlador C300

El controlador C300 es una solución compacta, confiable, robusta y rentable ubicada cerca del proceso con conexiones I/O directas. Es ideal para aplicaciones integradas de control regulatorio, lógica booleana, control secuencial, control batch, entre otras. (Honeywell Process Solutions XX81, 2012)

En un controlador C300 es donde se ejecuta nuestro automatismo.

Figura 13:
Controlador C300



Fuente: Tomado de (Honeywell Process Solutions XX81, 2012)

2.2.3. HMIWeb Display Builder

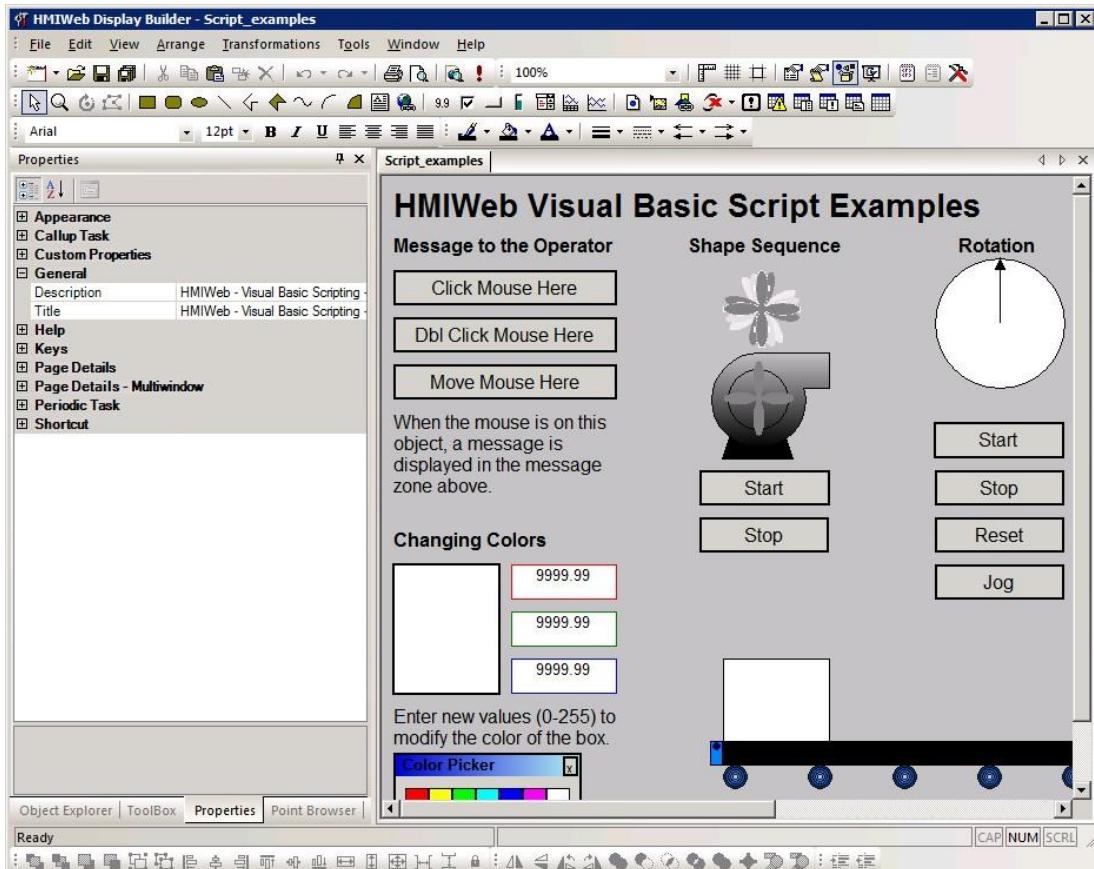
Es una herramienta gráfica de ingeniería para crear esquemáticos de operación utilizando funciones basadas en configuración Web, es por ello su similitud a DHTML (Dynamic HTML). (Honeywell Process Solutions XX81, 2012)

Se utilizará esta herramienta para crear los gráficos de simulación y posteriormente los de operación del automatismo en discusión.

La figura 14 muestra un diseño típico donde: (Honeywell Process Solutions XX54, 2013)

- La pantalla que está editando aparece a la derecha y hay una pestaña para cada pantalla.
- La barra de herramientas aparece en la parte superior e inferior de la ventana.
- Se muestra un explorador de objetos, caja de herramientas, propiedades y explorador de puntos.
- Se cuenta con una librería de objetos predefinidos los cuales representan los controles o estados de los equipos industriales.
- Se muestran botones en la pantalla de edición los cuales tienen como fin el uso de comandos y órdenes del operador de panel.

Figura 14:
Vista del HMIWeb Display Builder



Fuente: Tomado de (Honeywell Process Solutions XX54, 2013)

2.2.4. Function Blocks (FB)

Los Function Blocks de Experion están basados en los Function Block Diagram (FBD) de la norma IEC 61131-3.

Los Function Blocks representan la unidad básica de funcionalidad de control que incluye bloques de control regulatorio, bloques de control de equipos, bloques lógicos, bloques auxiliares, entre otros. Con Control Builder, los bloques de funciones se seleccionan de una "Biblioteca de bloques de funciones" proporcionada por Honeywell y se colocan en un Control Module. Luego, estos bloques de funciones se conectan entre sí para realizar la estrategia de control o lógica deseada. (Honeywell Process Solutions XX81, 2012)

2.2.5. Control Module (CM)

Conjunto de equipos y bloques de funciones (FB) que pueden realizar un control básico. Por ejemplo, un lazo de control consta de uno o más sensores, actuadores y funciones o algoritmos de control es a lo que llamamos un Módulo de control. (Liptak, 2006)

Experion PKS soporta los Módulos de control, los cuales se utilizan para funciones de control continuo. (Honeywell Process Solutions XX81, 2012)

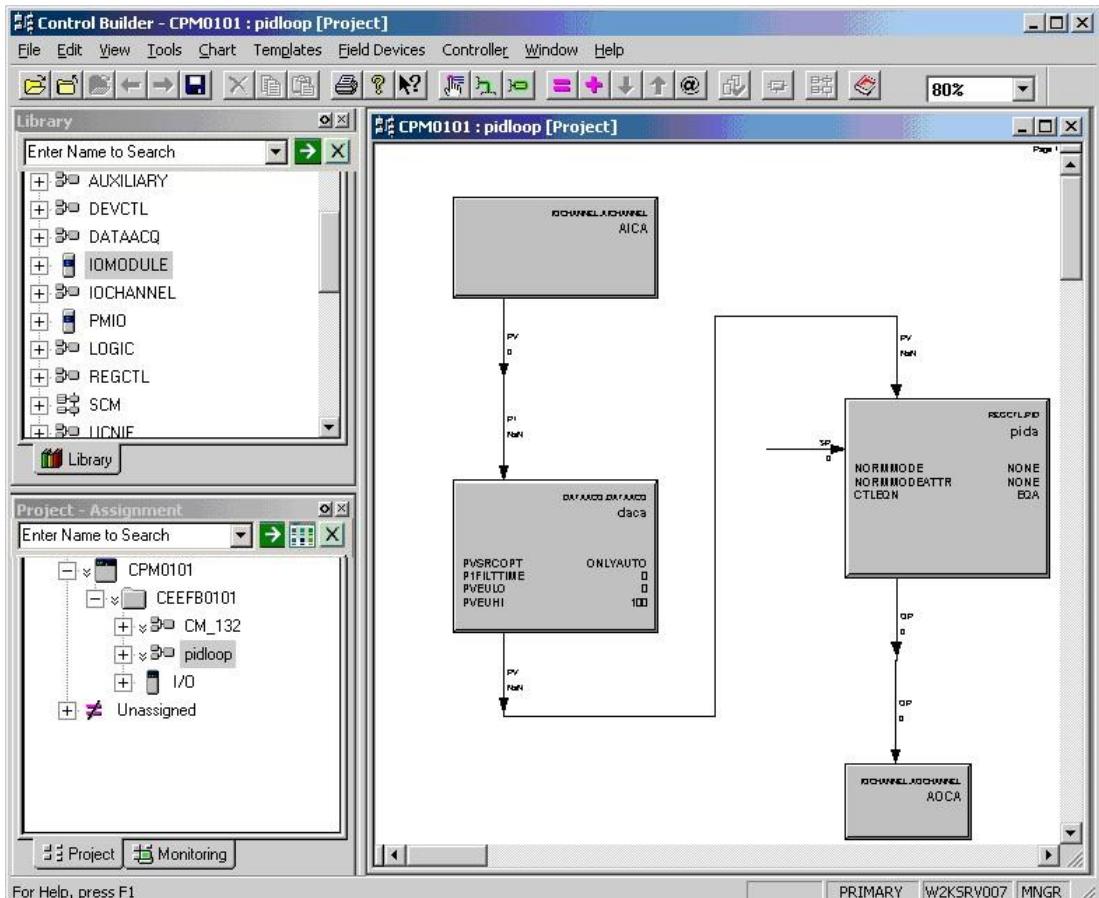
Al ser una representación gráfica de FB, su ejecución en el controlador será de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

La figura 15 muestra la vista de una estrategia en el control builder donde: (Honeywell Process Solutions XX81, 2012)

- El CM que está editando aparece a la derecha.
- La barra de herramientas aparece en la parte superior.
- En la parte izquierda de la ventana, se muestra una librería de FB y una base de datos de CM's llamada "Project". La última cuenta con una pestaña llamada "Monitoring" donde se puede visualizar la ejecución en tiempo real de los CM's.

Figura 15:

Vista del Control Builder con un Control Module



Fuente: Tomado de (Honeywell Process Solutions XX81, 2012)

2.2.6. Control Builder

Es una herramienta de ingeniería usada para construir automatismos, lógicas, estrategias de control entre otros. Su diseño gráfico orientado a objetos reduce drásticamente el esfuerzo necesario para diseñar, implementar y documentar aplicaciones de control. (Honeywell Process Solutions XX81, 2012)

Se utilizará esta herramienta para realizar la modificación de la lógica del automatismo, así como su posterior carga de lógica hacia el controlador de Experion C300.

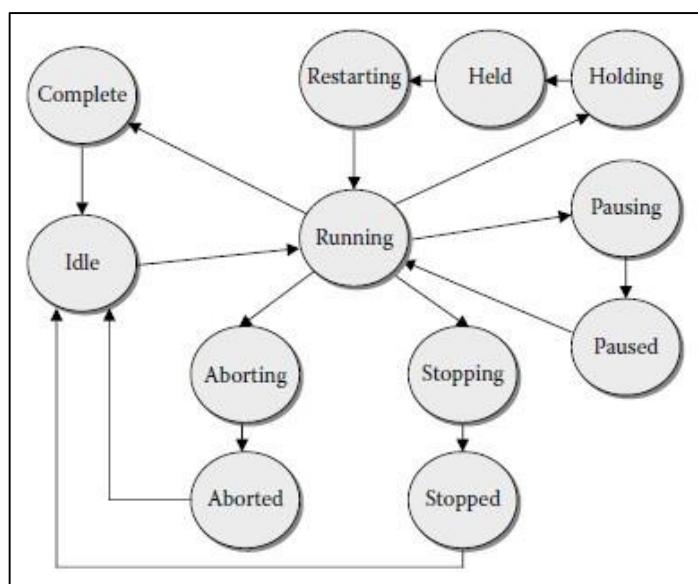
2.2.7. Control Secuencial de Procesos

Considerado uno de los tipos de Control Avanzado de Procesos y usado cuando se requieren acciones de control paso a paso, pues la lógica Ladder o lógica de Bloques puede ser difícil de seguir, además mantener estas lógicas para procesos secuenciales complicados puede resultar complicado para los ingenieros. El control secuencial realiza control en tiempo real a nivel de equipos, ello para mover un proceso a través de una sucesión de estados distintos. (Liptak, 2006)

El control secuencial de Experion está diseñado con opciones para manejar situaciones anormales. Las secuencias se pueden configurar para ingresar estados, puntos de ajuste, etc; en función de un estado anormal, o se puede programar una serie de pasos para manejar el proceso de manera segura. Los dispositivos también se pueden configurar para tomar medidas a prueba de fallas en operaciones de secuencia anormales. La implementación se simplifica y la información se vuelve intuitiva al operador sobre el estado de la secuencia. (Honeywell Process Solutions XX81, 2012)

Figura 16:

Estados del Control Secuencial de Procesos



Fuente: Tomado de (Liptak, 2006)

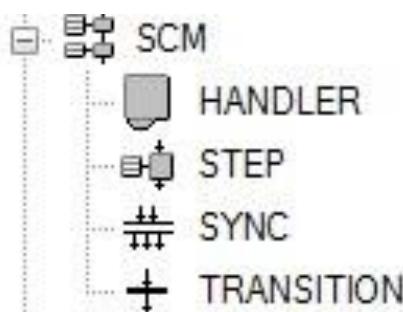
2.2.8. Sequence Control Module (SCM)

Una comprensión completa de las funciones del control module es un requisito previo para crear estrategias efectivas de control secuencial. Los SCM están compuestos por uno o más Handlers. Cada HANDLER puede contener bloques de transición (TRANSITION), paso (STEP) y/o sincronización (SYNC). (Honeywell Process Solutions X122, 2012)

- STEP: Es un paso de la secuencia donde se ejecutan órdenes que cambian los parámetros del proceso ello mediante los Control Module, también se pueden brindar instrucciones al operador.
- TRANSITION: Es una transición en la secuencia donde se verifica o confirma que las órdenes al proceso realizadas en un STEP previo hayan sido ejecutadas correctamente.
- SYNC: Una sincronización permite que el SCM ejecute rutas paralelas contenidas dentro de una secuencia.
- HANDLER: Usado cuando se requiere configurar más de un estado del control secuencial dentro del SCM. Entre los HANDLER se tienen: CHECK, MAIN, INTERRUPT, STOP, HOLD, ABORT y RESTART.

Figura 17:

Librería de function blocks para un SCM

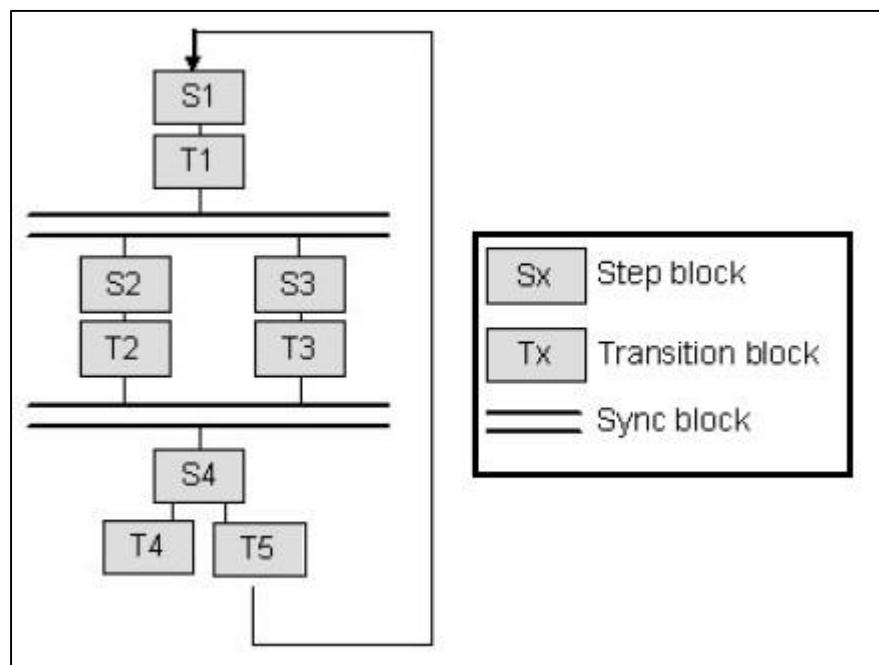


Fuente: Tomado de (Honeywell Process Solutions XX81, 2012)

En la Figura 18 se muestra un esquema simplificado de un SCM, nótese que el orden siempre será primero un Step Block seguido de un Transition Block y así consecutivamente, así también los bloques S2/T2 y S3/T3 al estar entre 2 Sync Block se ejecutarán de forma paralela y ello también condiciona que se tienen que cumplir con T2 y T3 para continuar a S4. Cabe mencionar que, así como el CM el SCM también se ejecuta de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, por ello primero se verifica si T4 es cumplido para finalizar la secuencia, si no es cumplido y T5 si entonces se retornará a S1 a ello se le conoce como bucle de retorno (loop back).

Figura 18:

Esquema simplificado de un SCM con SYNC



Fuente: Tomado de (Honeywell Process Solutions X122, 2012)

CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Problemas asociados al automatismo configurado

Entre los problemas que se identificaron durante la operación de la caldera de estudio, en primer lugar, se tiene que no hay diferencia entre un cambio a demanda (por requerimiento de operaciones) o automático (por condiciones anormales de proceso), pues no se cuenta con una diferencia de condiciones para el inicio, ello implica que, aunque los escenarios de riesgo y operación sean diferentes, las acciones realizadas serán las mismas.

Una de estas diferencias entre un cambio a demanda y automático son los puntos de consigna para el minimum firing al inicio del cambio de ventilador, estos se establecen directamente a los controladores de flujo de aire y gas, pero si el punto inicial del camio de ventilador era una alta producción de vapor se producirá una caída súbita en el vapor producido por la caldera, por ello al requerirse un cambio a demanda los operadores debían de reducir manualmente la producción de vapor para evitar dicha caída, la maniobra operativa previa demoraba alrededor de 2 horas; este cambio súbito de puntos de consigna solo debe ser válido ante un cambio automático pues la producción de vapor pasa a ser segundo plano y siendo la principal evitar un paro de la caldera por muy bajo flujo de aire.

Otro problema de la no diferenciación entre un cambio a demanda y automático se da en la secuencia de cambio de VAM a VAT donde se tiene un retardo de 40 segundos, entre la confirmación de marcha del VAT y la orden de abrir el dámper de descarga, este tiempo es adecuado en un cambio a demanda pues la prioridad es tener la menor perturbación posible en la red de vapor, pero en un cambio

automático donde la prioridad es evitar un paro de caldera, el tiempo de retardo resulta muy grande y ello siempre generó un paro total de la caldera por muy bajo flujo de aire o por no detección de llama en los quemadores o por paro de ambos ventiladores.

Cabe mencionar que el paro de la caldera por ambos ventiladores parados tiene un retardo de 25 segundos, debido a ello es que el automatismo inicia un cambio de ventilador por bajo flujo de aire (un nivel por encima del set que genera el paro por muy bajo flujo de aire) o si se detecta que por 2 segundos ambos ventiladores se encuentran parados, así pues el automatismo debe realizarse en su totalidad en menos de 23 segundos; debido a que no se cuenta con una diferenciación entre un cambio a demanda y automático esto nunca fue posible en un cambio VAM a VAT iniciado de forma automática, en el caso del cambio VAT a VAM al no tener retardos es posible su cambio automático.

Así mismo, el VAT cuenta con alarmas adicionales al VAM como alarmas de alta de protecciones mecánicas (vibración, temperatura y desplazamientos del eje) y alarma de baja presión en la alimentación de vapor a la turbina, por ello es que se inicia de forma automática un cambio VAT a VAM cuando se tiene alguna de estas alarmas, para este caso se identificó que solo se verifica la presión del vapor más no su temperatura, ello puede generar que al no tener vapor sobrecalentado, este pueda llegar con trazas de agua o el vapor condense en la parte interna de la turbina ocasionando daños mecánicos.

Las alarmas de muy alta en protecciones mecánicas del VAT cuentan con acciones de paro en el PLC de seguridad así como ambas

confirmaciones de marcha de los ventiladores, estos a su vez cuentan con bypasses de mantenimiento para evitar paros antes y durante de una intervención a las señales relacionadas, se identificó que estos bypasses no estaban comunicados hacia las secuencias configuradas en el DCS, esto generó problemas al revisar preventivamente los sensores de vibración del VAT, pues los operadores colocaban el bypass de mantenimiento y entregaban el sensor a personal de mantenimiento, pero solo se deshabilitaba la acción de paro pero no la acción automática de cambio de VAT al VAM generando un cambio no deseado.

Así también, en las secuencias de cambio de ventilador se verifica la posición de las válvulas o dámpares asociados a los ventiladores, esto se logra con sensores de posición y siendo otro punto posible de falla se identificó que no cuentan con bypasses de mantenimiento, ello ocasionaba que si fallaban durante la secuencia esta se mantenía esperando la posición requerida para continuar. Ante ello los operadores verifican en campo si la posición de los sensores es real, si fuera real abortan la secuencia y comunican el fallo al área de instrumentación para la revisión de la válvula o dámper y si no fuera real igual podrían abortar la secuencia hasta que se solucione el fallo en el sensor de posición, esto último es habitual en los sensores de posición pues suelen tener una tasa alta de fallas.

Otro problema se da a raíz del anterior y es que los operadores podían abortar la secuencia en cualquier etapa del cambio de ventilador, por ejemplo, podían abortar la secuencia y dejar el ventilador de reserva en marcha sin succión ni descarga presentándose una situación insegura que pueda desencadenar problemas mecánicos en los equipos.

Además, al intervenir el ventilador de reserva como parte del mantenimiento se debía realizar una serie de forzamientos al automatismo para evitar un cambio indebido, pues los operadores no podían deshabilitar a demanda las secuencias de cambio de ventilador.

Adicionalmente, se identificó que el selector de titularidad no solicitaba ninguna confirmación al operador de panel para ejecutar el cambio de ventilador a demanda, por lo cual al no contar con esta opción el operador podría accidentalmente iniciar un cambio de ventilador.

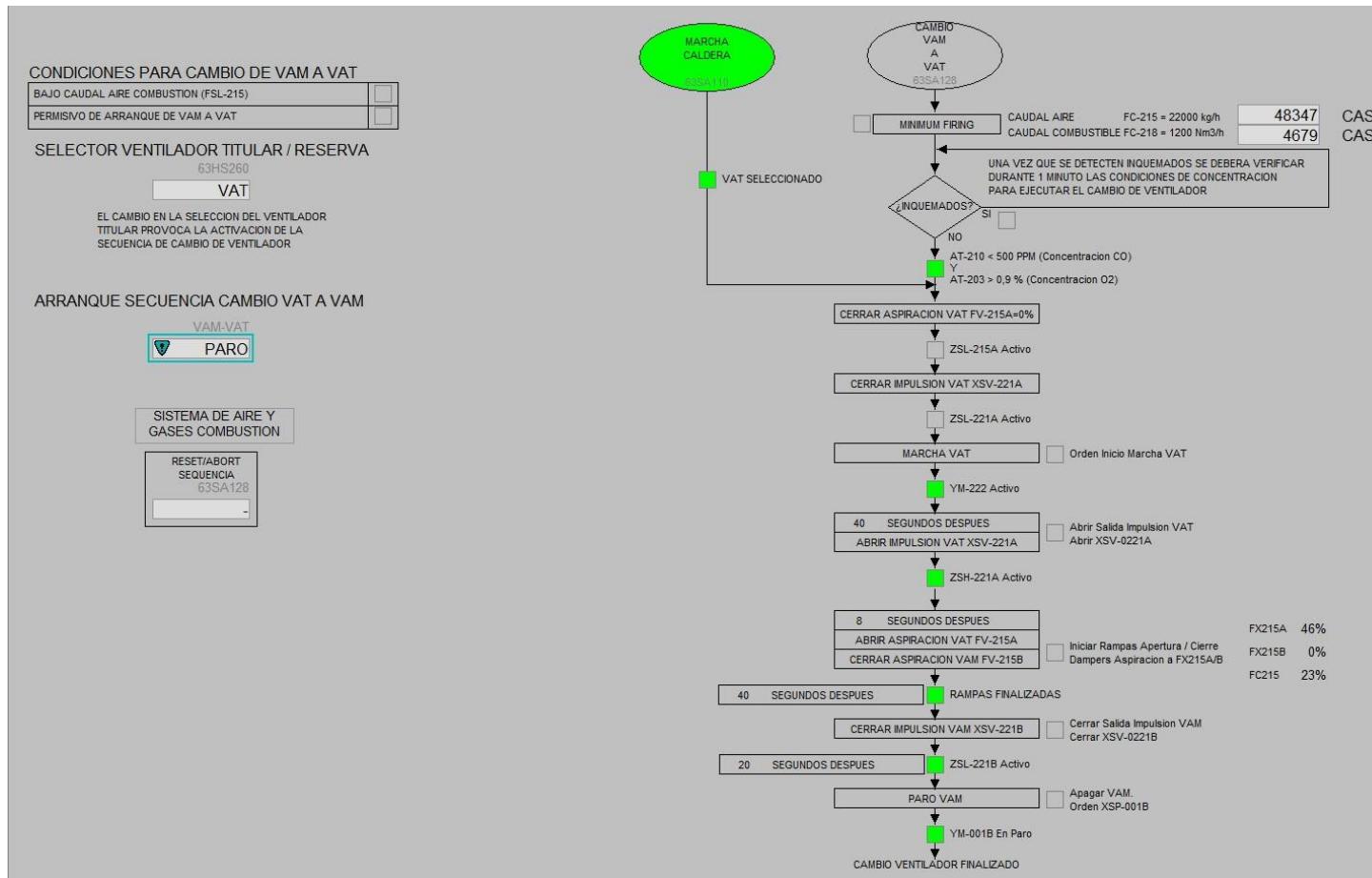
Desde la parte de ingeniería de control de procesos se identificó que la configuración utilizada no era la adecuada, pues fue realizada sobre CM's utilizando solamente FB los cuales se utilizan para control regulatorio o lógica continua, los problemas asociados son los siguientes:

- Una secuencia configurada de este modo, al tener muchos pasos necesita muchos bloques lógicos para poder emular una ejecución paso a paso.
- El exceso de bloques (FB) en un CM produce desorden y difícil entendimiento de otro ingeniero que no haya participado en la configuración.
- Al ser una ejecución continua con muchos bloques lógicos los ingenieros no podían identificar de forma rápida el paso actual de ejecución de la secuencia.
- Si se requieren modificaciones de secuencia o preguntas específicas de la secuencia, el ingeniero tenía que revisar todas las lógicas previamente.

También se identificaron casos cuando a un ventilador se le daba orden de paro desde el PLC de seguridad y el automatismo debía esperar a que se anuncie la alarma de bajo flujo de aire o la condición de ambos ventiladores parados por 2 segundos para realizar un cambio automático, ello no es práctico desde el punto de vista operativo pues el cambio automático podría iniciar con la orden de paro del PLC de seguridad y ahorrar tiempo de cambio de ventilador.

Finalmente, los esquemáticos según las figuras 19 y 20 estaban conformados en su mayoría por texto y condiciones verdaderas o falsas para continuar entre los pasos de la secuencia, si bien esta forma de representar gráficamente las secuencias no es errónea tampoco es la mejor desde el punto de vista operativo, pues el operador de panel no puede saber de forma rápida en que paso de la secuencia se encuentra actualmente. Otra desventaja de estos esquemáticos radica en que no se puede monitorear el cambio, por ello es que se deben de tener 3 pantallas, una con el esquemático de secuencia, la otra con el ingreso de gas y la última con el ingreso de aire y ventiladores.

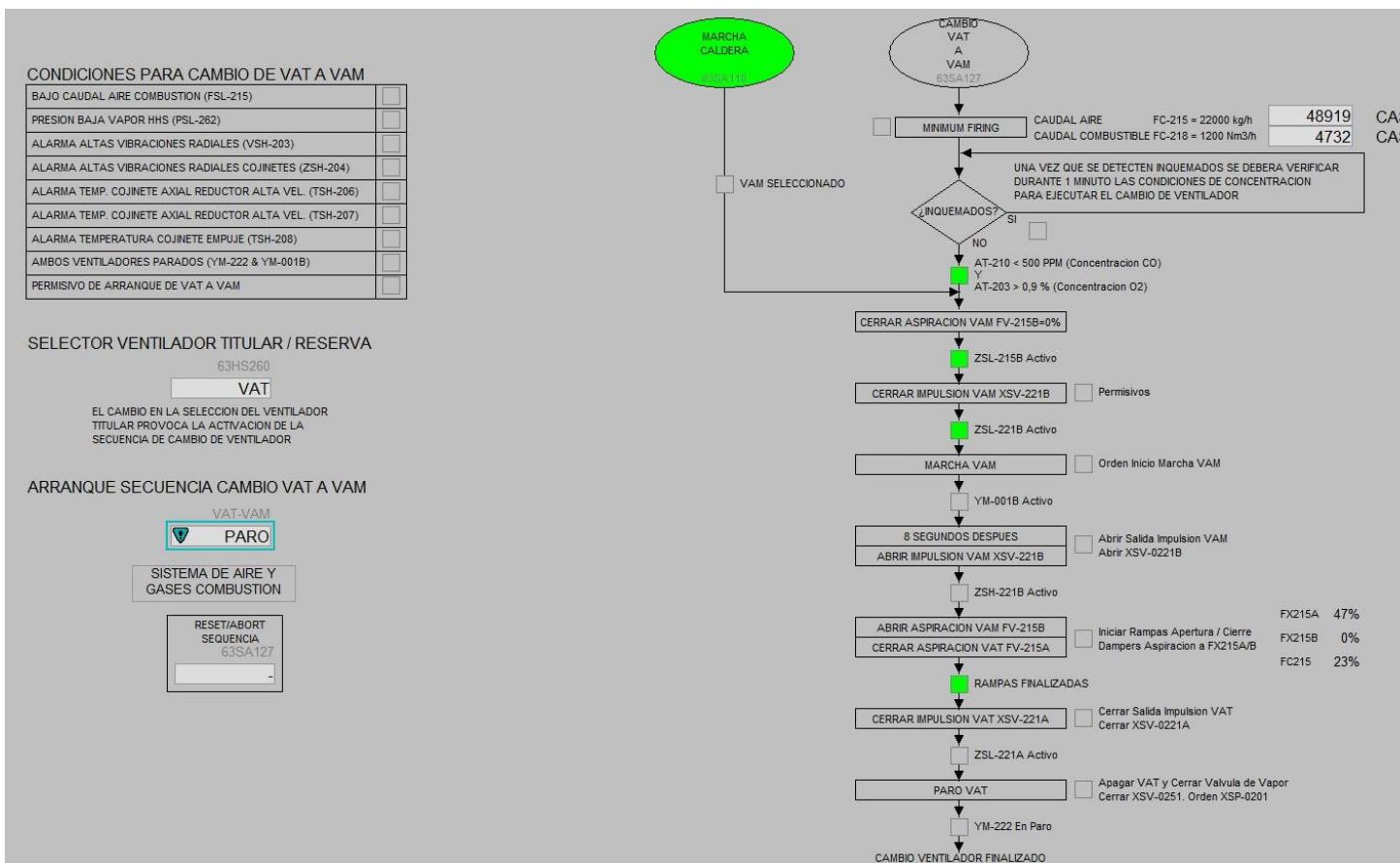
Figura 19:
Esquemático antiguo de secuencia VAM a VAT



Fuente: Esquemático del DCS

Figura 20:

Esquemático antiguo de secuencia VAT a VAM



Fuente: Esquemático del DCS

3.2 Cambios en el automatismo y optimización de ejecución de secuencia

Tabla 1:

Cambios del automatismo

	Antes	Actual
1	Se contaba con 2 secuencias de cambio de ventilador de VAM a VAT y viceversa, usadas a demanda y automática.	Se cuenta con 4 secuencias independientes (2 para las secuencias a demanda y 2 para la automática).
2	Al inicio del cambio de ventilador, los SP de flujos de aire y gas se establecían directamente a los controladores (minimum firing en aire/gas).	En las secuencias a demanda, se implementó una rampa de cambio de SP y un valor de desviación PV-SP, esto con el fin que la disminución de aire y gas combustible sea lo menos perjudicial para la presión de la red de vapor. En las secuencias automáticas los SP se establecen directamente.
3	En la secuencia VAM a VAT se tenía un retardo de 40 segundos, entre la confirmación de marcha del VAT y la orden de abrir el dámper de descarga.	En las secuencias a demanda se mantendrán los tiempos de retardo. En las secuencias automáticas no se tiene ningún retardo.
4	Se iniciaba un cambio de ventilador por bajo flujo de aire o por ambos ventiladores parados al menos 2 segundos.	Estos iniciadores solo son considerados en las secuencias automáticas de ventilador.
5	Se iniciaba un cambio de ventilador de VAT a VAM por alarmas de protecciones mecánicas o por baja presión de vapor en el VAT.	Estos iniciadores son considerados en la secuencia automática de VAT a VAM. Adicionalmente se añadió la condición de Temperatura saturada, es decir ejecuta el cambio VAT a VAM cuando: $P_{vap} < 35 \text{ kg/cm}^2$ o $T_{vap} < T_{sat}$ o Alarma de protecciones mecánicas de turbina.

	Antes	Actual
6	No se tenían los bypasses de mantenimiento relacionados con los enclavamientos comunicados en las secuencias de cambio de ventilador.	Se usan los bypasses de mantenimiento de protecciones mecánicas y de las confirmaciones de marcha de los ventiladores a las secuencias.
7	Los sensores de posición no contaban con bypasses de mantenimiento.	Se crearon los bypasses de mantenimiento de los sensores de posición de los dámperes de aire en las secuencias
8	El operador de panel podía abortar la secuencia en cualquier etapa de la secuencia (condición insegura).	El operador solo puede abortar la secuencia a demanda antes de darse la orden de marcha o confirmar la marcha del ventilador de reserva.
9	No se contaba con la opción de inhabilitar la secuencia de arranque del ventilador de reserva.	El operador dispone de un selector con las opciones “Disponible/Fuera de servicio” para cada ventilador, a fin de inhabilitar la secuencia del ventilador de reserva.
10	Selector de cambio de titularidad no contaba con mensaje de confirmación del cambio.	El operador debe confirmar el cambio, para que este se ejecute (cambio a demanda).
11	Las secuencias estaban configuradas en muchos CM's, en donde las lógicas se ejecutan continuamente y se requieren muchos bloques lógicos.	Las secuencias están configuradas en SCM, esta es una solución robusta de control secuencial basada en ejecución de lógica paso a paso.
12	Cuando a un ventilador se le daba orden de paro desde el PLC de seguridad (enclavamiento de seguridad) se tenía que esperar a que actuara el bajo flujo de aire o la condición de ambos ventiladores parados para realizar un cambio automático.	El enclavamiento de seguridad del equipo titular inicia la secuencia automática de cambio de ventilador.

	Antes	Actual
13	<p>Sí durante un cambio automático se llega a detectar una situación de in quemados (defecto de oxígeno o exceso de CO) y debido al tiempo de espera de 1 min no se termina de cambiar de ventilador a caldera.</p>	<p>En un cambio automático con una situación de in quemados se reduce por debajo del minimum firing de tal forma que el gas combustible disminuirá a razón de la caída del aire manteniendo el ratio de control habitual, si el cambio no es exitoso este se detendrá con las seguridades del PLC que paran totalmente la caldera: muy bajo flujo de aire, muy baja presión de gas combustible, pérdida de detección de llama y ambos ventiladores parados por 25 seg.</p>
14	<p>Se utilizaban esquemáticos de tipo texto y condiciones verdadero/falso para las secuencias.</p>	<p>Se elaboraron esquemáticos basados en control secuencial, así mismo en estos se tienen los controles principales de la caldera a fin de solo utilizar un solo esquemático para realizar el cambio de ventilador.</p>

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Escenarios de riesgo durante cambio de ventilador

Tabla 2:

Posibles situaciones anormales en secuencias a demanda y soluciones

	Situación	Estado de la secuencia	Solución Operativa
Antes del cambio	Problemas en alineamiento.	Secuencia en ejecución y siguiente paso en espera.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Colocar bypass al sensor de posición. ✓ Abortar secuencia con botón.
Durante el cambio	Problemas en alineamiento.	Secuencia en ejecución y siguiente paso en espera.	Colocar bypass al sensor de posición.
	No se llega a confirmar marcha del ventilador de reserva.	Secuencia en ejecución y siguiente paso en espera.	Colocar bypass a la confirmación de marcha.
	En el cambio de VAM a VAT se presenta alguna de las siguientes condiciones: alarma de protecciones mecánicas en el VAT o baja presión de HHS o $T_{vap} < T_{sat}$.	La secuencia aborta el cambio, manteniendo al VAM como titular.	Ninguna.
	Bajo flujo de aire durante la rampa de cambio de dámperes de ingreso de aire.	La secuencia aborta el cambio y se inicia la secuencia automática para retornar al anterior ventilador.	Ninguna.
Después del cambio	Ventilador que estuvo de titular no confirma el paro.	Secuencia en ejecución y siguiente paso en espera.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Para el VAT, cortar vapor a turbina. ✓ Para el VAM, revisar con electricidad.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3:

Posibles situaciones anormales en secuencias automáticas y soluciones

Situación		Estado de la secuencia	Solución operativa
Antes del cambio	Acumulación de combustible	<p>La situación se produce por una combustión incompleta en la caldera; la secuencia reducirá el gas combustible de acuerdo con la relación gas/aire definido por operaciones.</p> <p>Si el problema persiste por 30 segundos, la secuencia se aborta.</p>	Si la secuencia aborta, los operadores deben confirmar en campo que la situación de riesgo es real, si fuera así parar la caldera si ningún enclavamiento llegase a actuar antes.
	Problemas en alineamiento.	Secuencia en ejecución y siguiente paso en espera.	Colocar bypass al sensor de posición.
Durante el cambio	Problemas en alineamiento.	Secuencia en ejecución y siguiente paso en espera.	Colocar bypass al sensor de posición.
	No se llega a confirmar marcha del ventilador de reserva.	<p>Secuencia en ejecución y siguiente paso en espera.</p> <p>Si se llega a tener por 25 segundos ambos ventiladores parados, se ejecuta el enclavamiento de paro total de la caldera.</p>	Colocar bypass a la confirmación de marcha, previa confirmación que arrancó realmente en campo.
	Se presenta alguna alarma o enclavamiento sobre el ventilador de reserva a arrancar.	La secuencia aborta el cambio, y se mantiene la titularidad previa.	Si la secuencia aborta, los operadores deben confirmar en campo que la situación de riesgo es real, y proceder a parar la caldera si ningún enclavamiento llegase a actuar antes.

Situación	Estado de la secuencia	Solución operativa
Después del cambio, titular no confirma el paro.	Ventilador que estuvo de Secuencia en ejecución y siguiente paso en espera.	Para el VAT, cortar vapor a turbina. Para el VAM, revisar con electricidad.
Fuente: Elaboración propia.		

En las secuencias automáticas y basándose en (NFPA, 2015) las seguridades que paran totalmente a la caldera y también abortan las secuencias son:

- Muy bajo flujo de aire.
- Muy baja presión de gas en quemadores.
- Pérdida de detección de llama de quemadores.
- Ambos ventiladores parados por 25 segundos.

3.4 Nuevas secuencias de cambio de ventilador

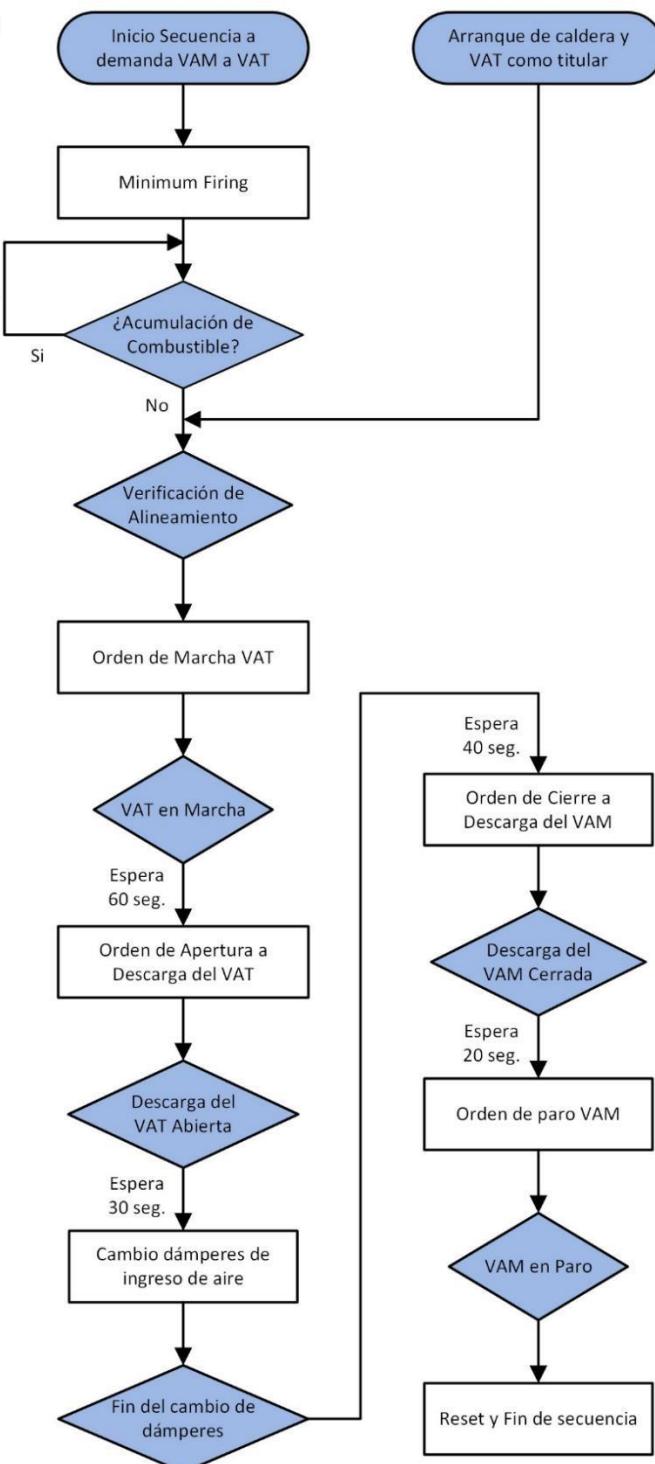
En las figuras 21, 22, 23 y 24 se pueden observar las nuevas secuencias.

Figura 21:

Nueva secuencia a demanda de VAM a VAT

Condiciones de inicio de secuencia, partiendo de VAM como titular:
 - Cambio de selector de titularidad a VAT.

Una vez que se detecte acumulación de combustible, se deberá verificar durante 1 minuto que las condiciones de concentración son normales para ejecutar el cambio de ventilador

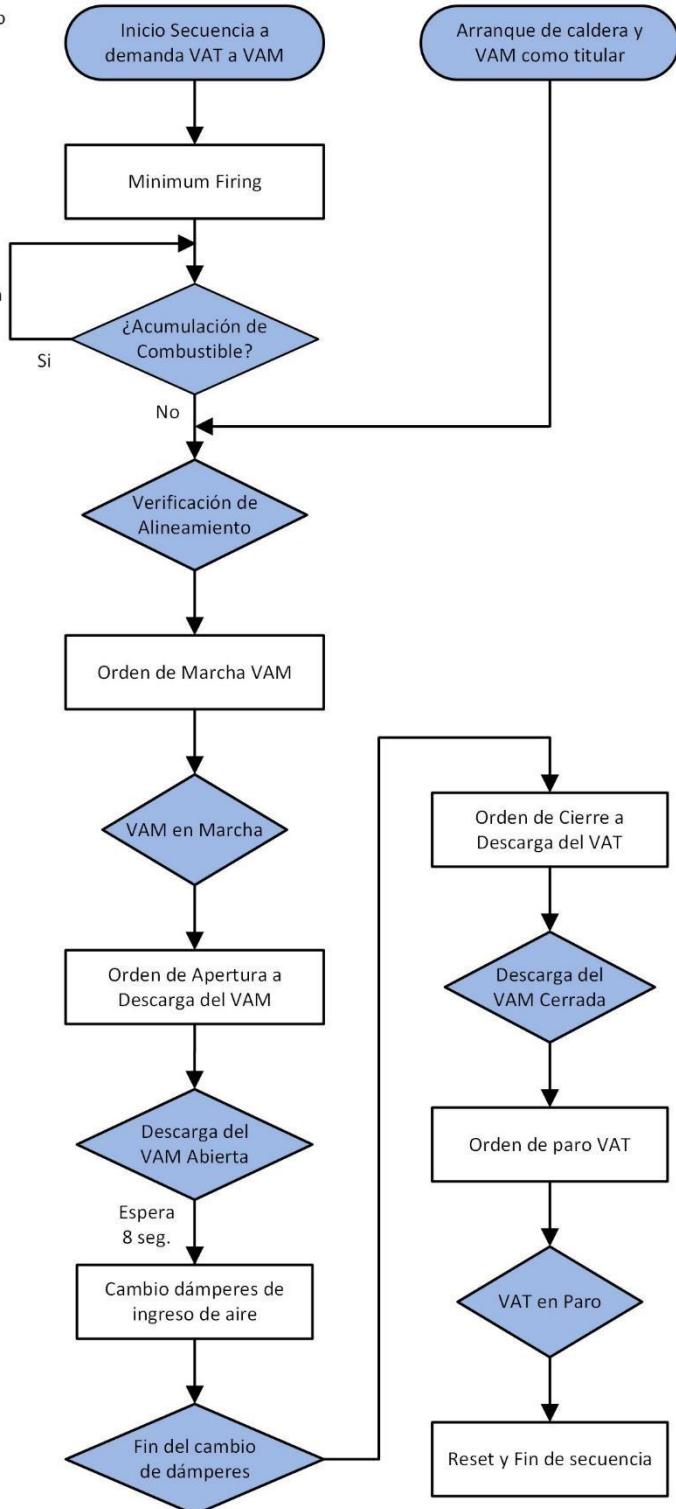


Fuente: Elaboración propia

Figura 22:
Nueva secuencia a demanda de VAT a VAM

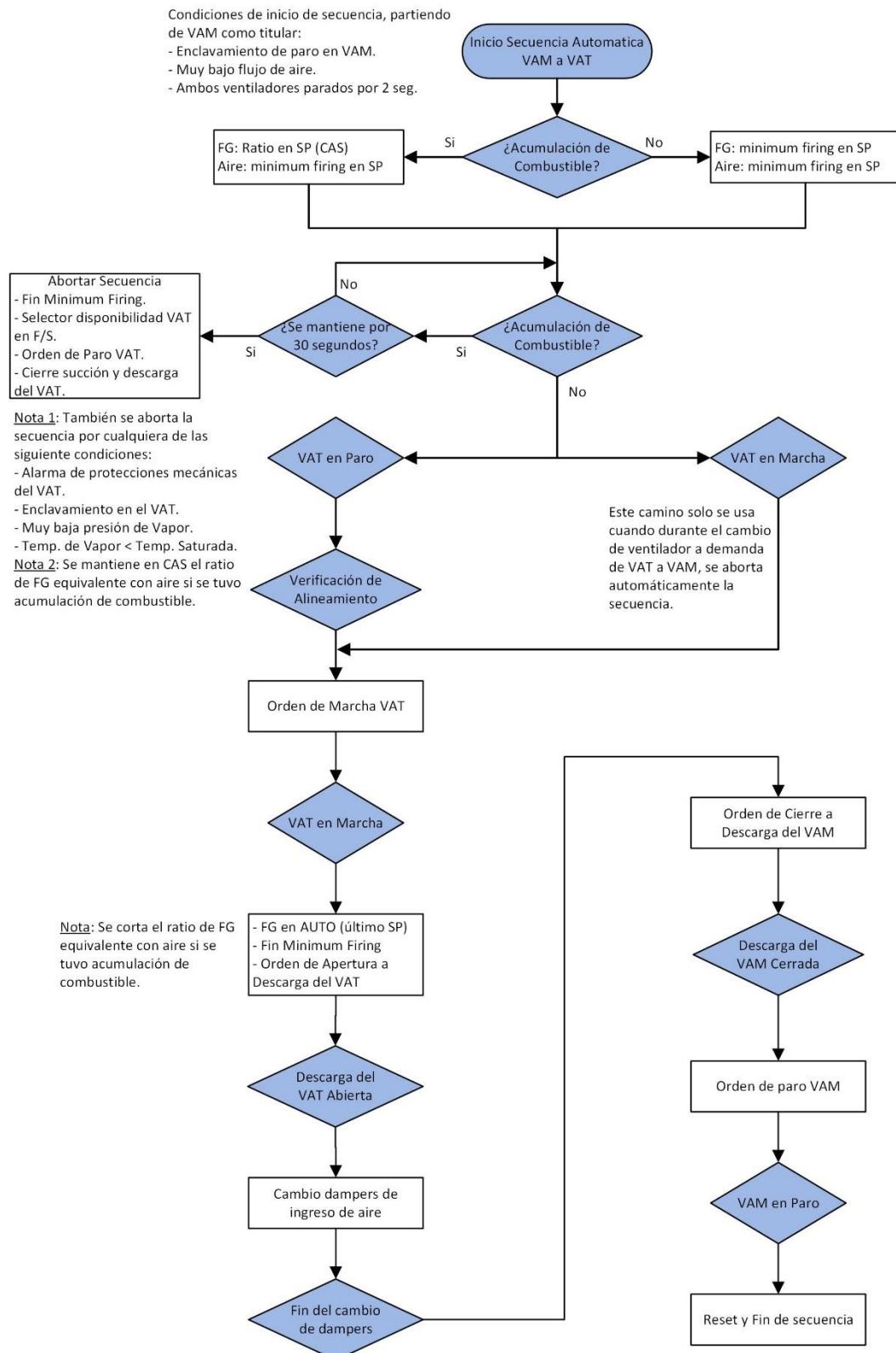
Condiciones de inicio de secuencia, partiendo de VAT como titular:
- Cambio de selector de titularidad a VAM.

Una vez que se detecte acumulación de combustible, se deberá verificar durante 1 minuto que las condiciones de concentración son normales para ejecutar el cambio de ventilador



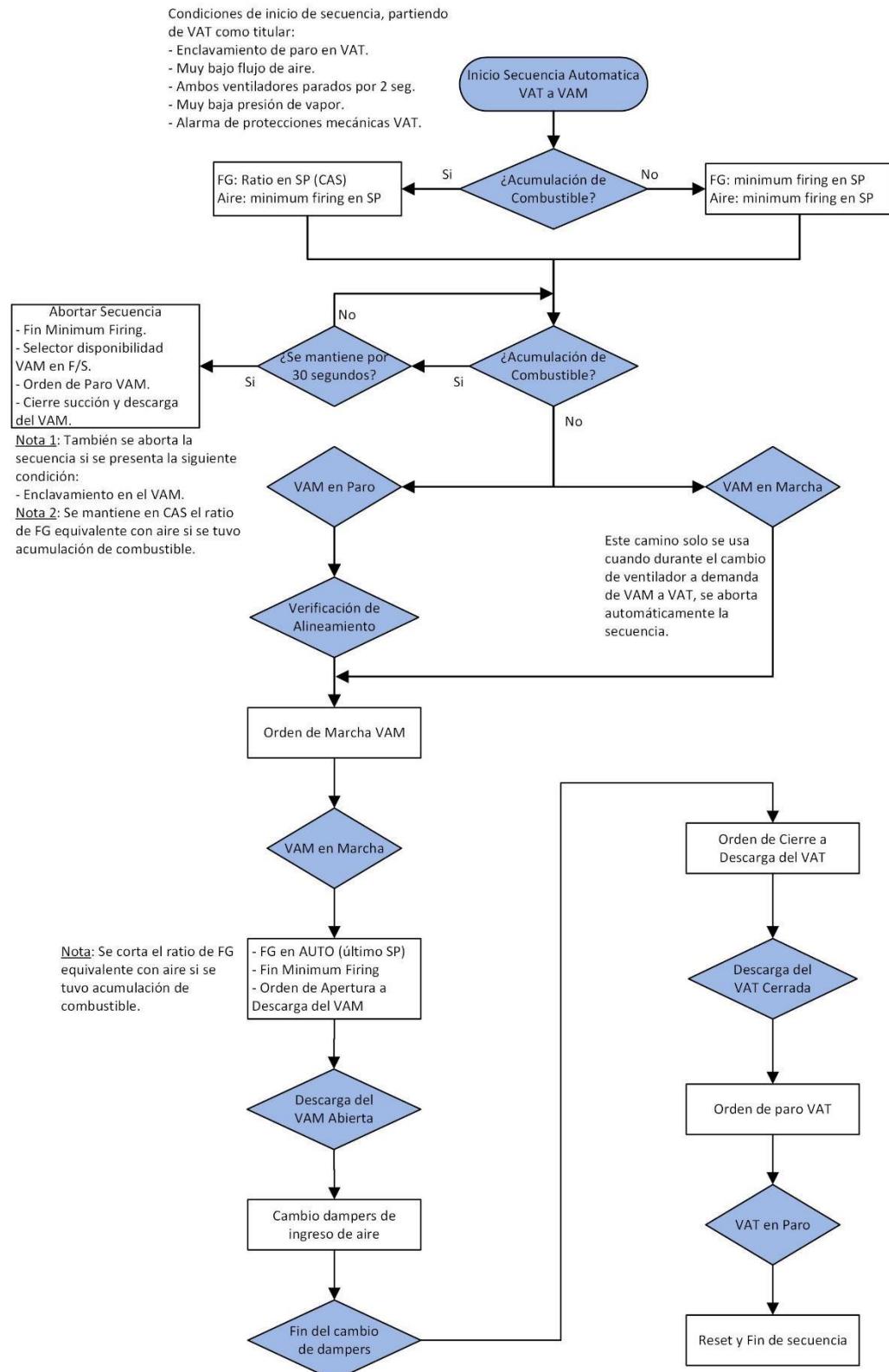
Fuente: Elaboración propia

Figura 23:
Nueva secuencia automática de VAM a VAT



Fuente: Elaboración propia

Figura 24:
Nueva secuencia automática de VAT a VAM



Fuente: Elaboración Propia

3.5 Desarrollo del simulador de operación

El desarrollo del software para un determinado proyecto definido y especificado se considera terminado cuando todos los programas están depurados y se ejecutan dentro de las limitaciones del sistema operativo y la configuración del hardware. Para evitar interacciones de control inesperadas durante la puesta en marcha, una simulación completa de las funciones de control secuencial (ejecutadas usando la interfaz de operador diseñada) es una ayuda de depuración esencial para procesos complejos. (Liptak, 2006)

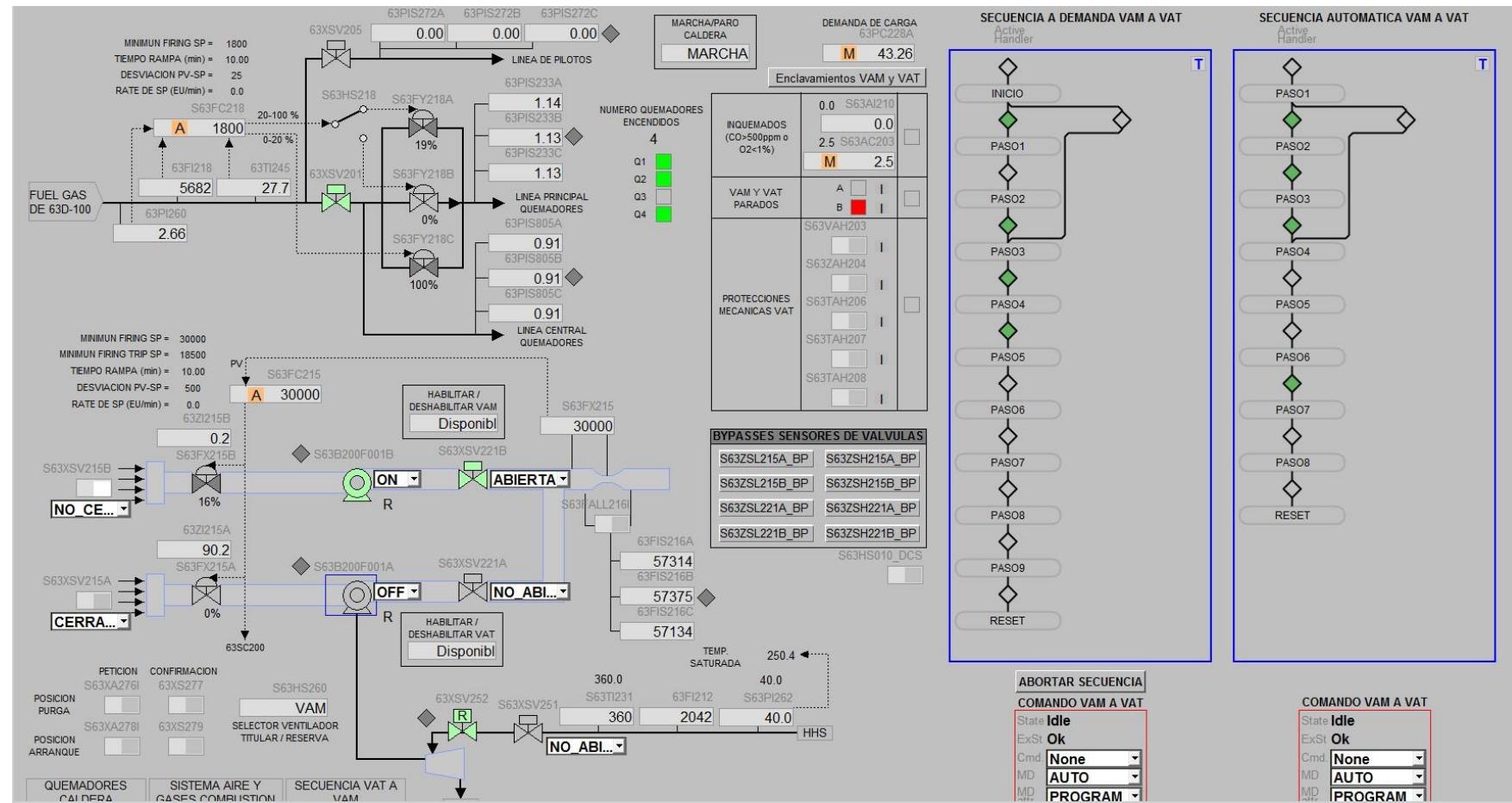
Todos los programas de control deben probarse en condiciones de planta simuladas antes de conectar la secuencia al proceso y se debe realizar una simulación paso a paso y una verificación para garantizar la validez de todas las estrategias diseñadas, ya sean estrategia básicas o avanzadas.

Para el caso de nuestra simulación fue necesario un entorno de simulación de C300, en donde se cargó una copia de los CM con una “S” como prefijo de cada tag, para diferenciar del tag real con su contra parte de simulación. Antes de poder empezar a modificar los CM's de simulación se debe verificar que no se tenga ninguna referencia conectada hacia los CM's que pertenecen a los tags reales, además se deben cambiar los bloques que tienen referencias de bloques I/O (transmisores, válvulas, equipos).

También se crearon los siguientes esquemáticos en HMIWeb Display Builder para probar paso a paso las nuevas secuencias, una vez finalizada la configuración y sus respectivas pruebas se usó para entrenar al personal de operaciones. Así también este esquemático se utiliza como plantilla para el esquemático final, ello luego de consolidar las observaciones de los operadores.

Figura 25:

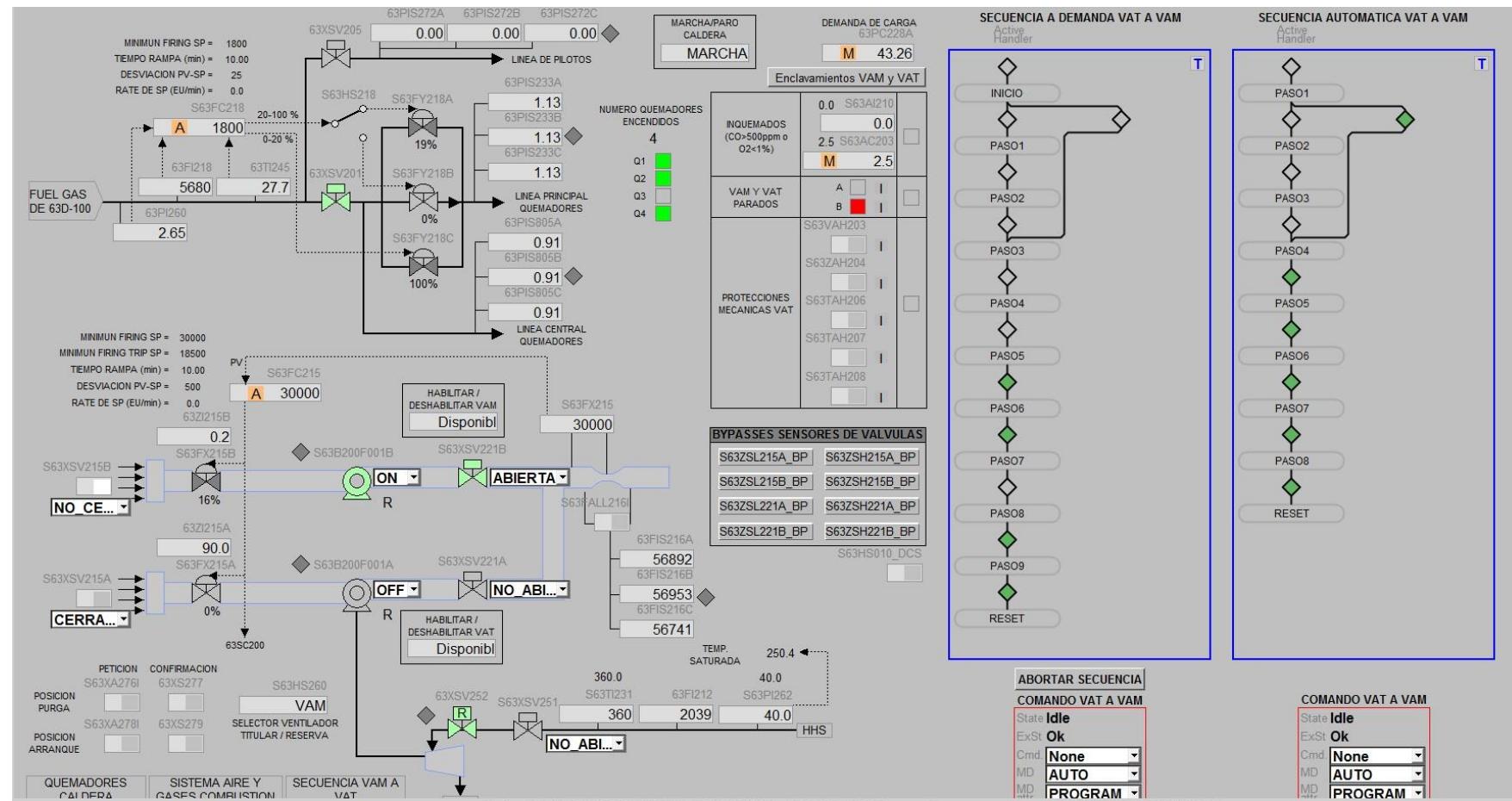
Gráfico de simulación de secuencia de cambio VAM a VAT



Fuente: Esquemático del DCS

Figura 26:

Gráfico de simulación de secuencia de cambio VAT a VAM



Fuente: Esquemático del DCS

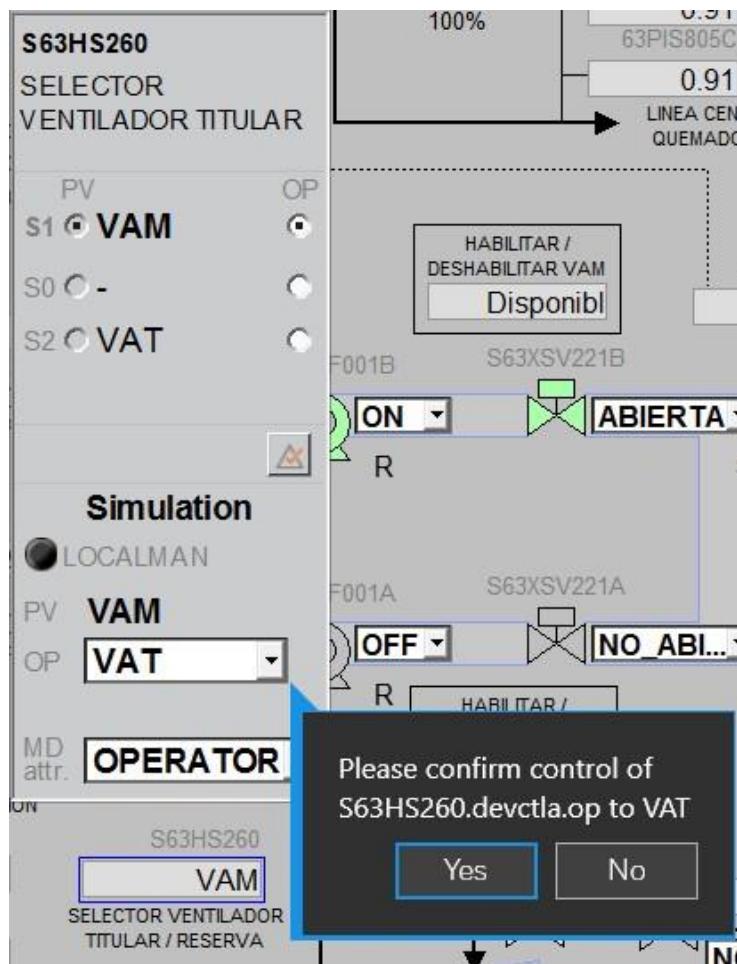
3.5.1. Nueva interfaz de Operación

3.5.1.1. Selector de Titularidad de Ventilador

Para ejecutar un cambio de ventilador a demanda mediante el selector de titularidad el operador debe previamente confirmar el cambio.

Figura 27:

Selector de titularidad



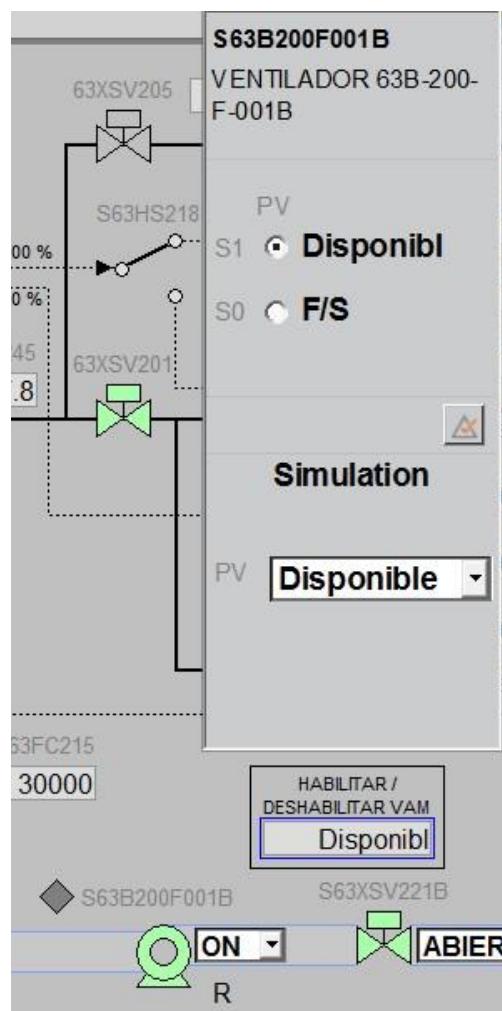
Fuente: Esquemático del DCS

3.5.1.2. Selector Ventilador Disponible/Fuera de Servicio

Selector usado para habilitar/inhabilitar el arranque por secuencia a demanda o automática del ventilador de reserva. Este selector no genera el cambio al ventilador de reserva, aunque se seleccione “Fuera de servicio” en el ventilador titular.

Figura 28:

Selector de ventilador Disponible / Fuera de Servicio



Fuente: Esquemático del DCS

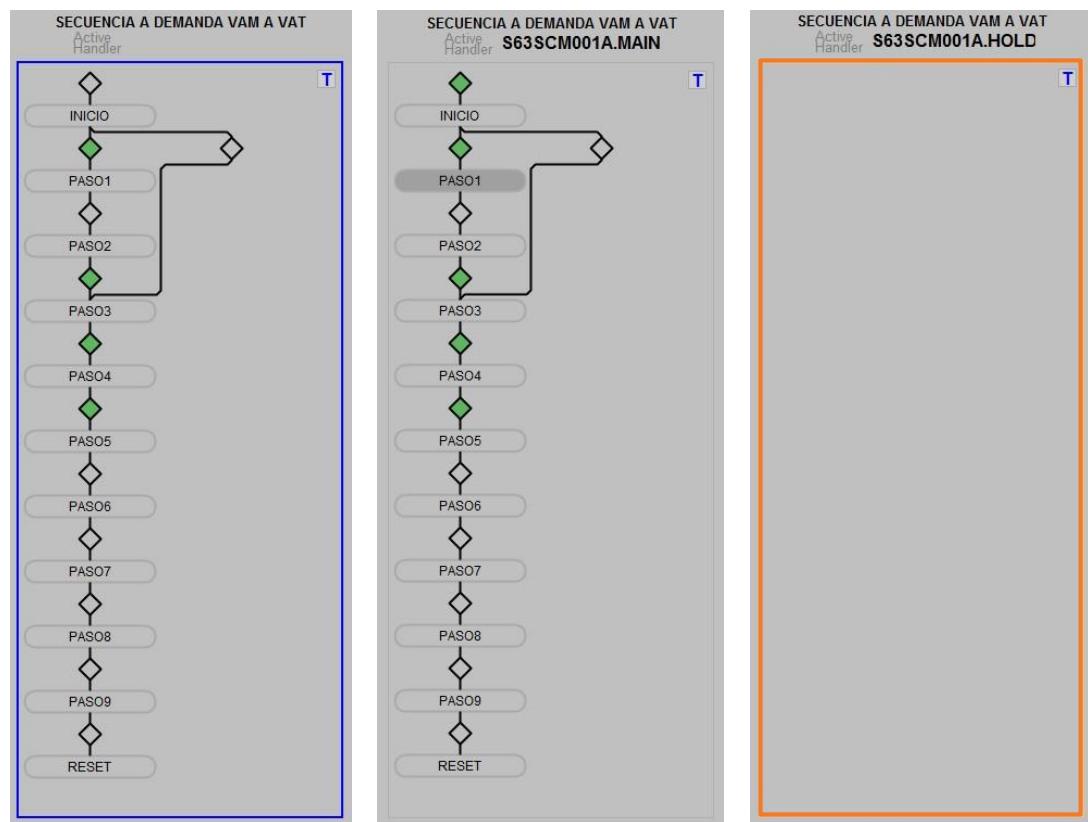
3.5.1.3. Interpretación de secuencias

Hay 3 estados de secuencia:

- **Secuencia en Espera**, si se encuentra con borde de color azul.
- **Secuencia en Ejecución**, sin color de bordes y con un Paso en color gris oscuro.
- **Secuencia en Detención**, si se encuentra con borde de color anaranjado.

Figura 29:

Interpretación de secuencias

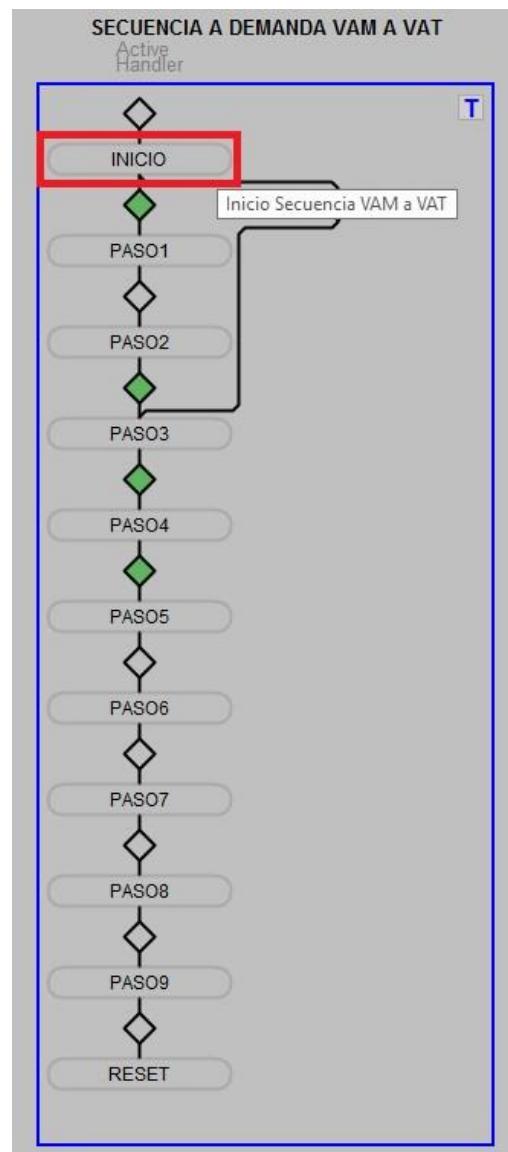


Fuente: Esquemático del DCS

Posicionando el clic sobre los pasos o transiciones se podrá observar su descripción de cada uno, a esto se le conoce comúnmente como información sobre herramientas o Tooltip:

Figura 30:

Tooltip de las secuencias



Fuente: Esquemático del DCS

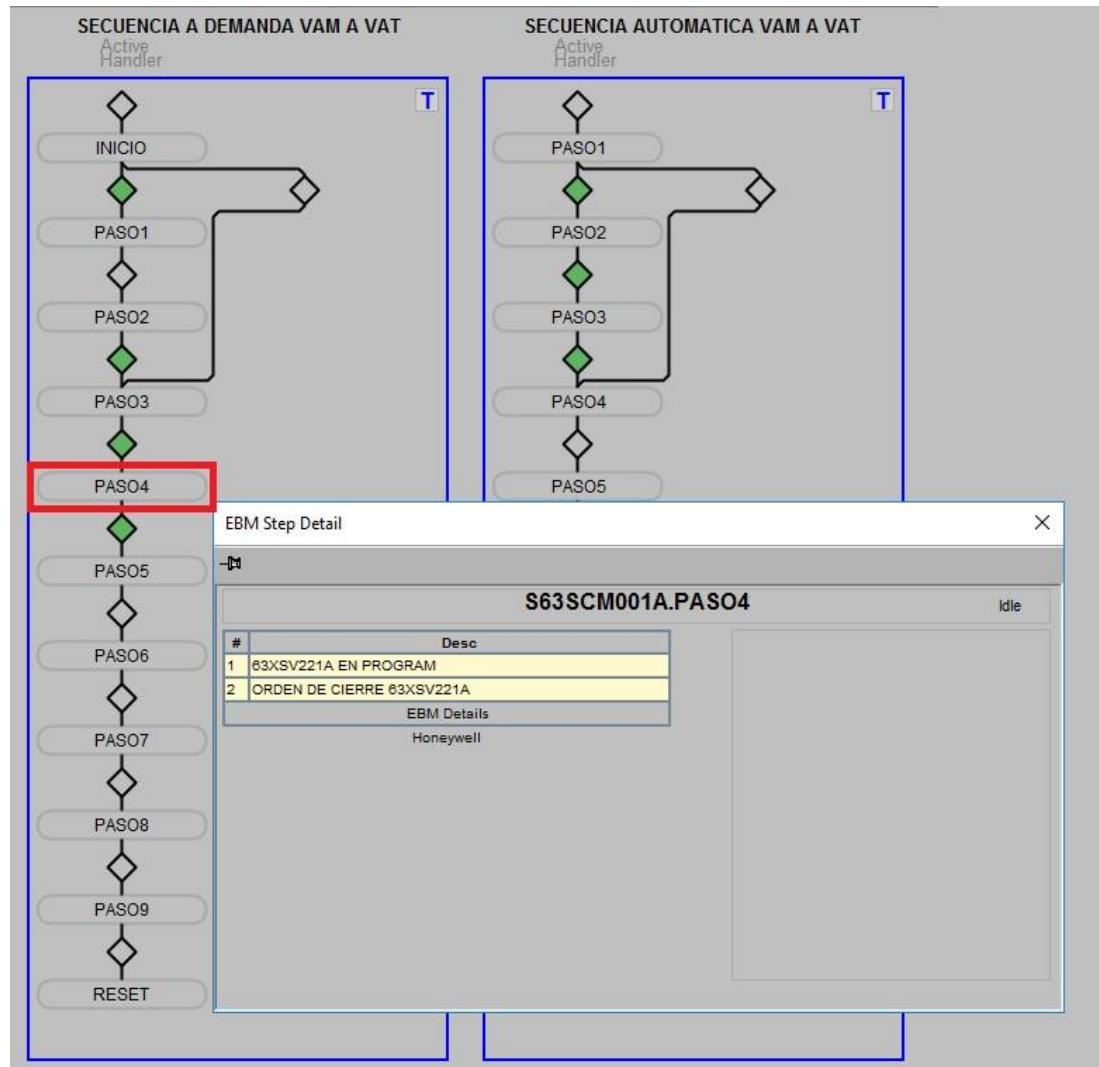
3.5.1.4. Paso

Representados en la secuencia como rectángulos, las cuales son órdenes de la secuencia a ejecutarse y posteriormente confirmar la ejecución de la orden en una “Transición”.

Al hacer clic sobre un “Paso” se podrán observar todas las órdenes a ejecutarse:

Figura 31:

Detalle de pasos de una secuencia

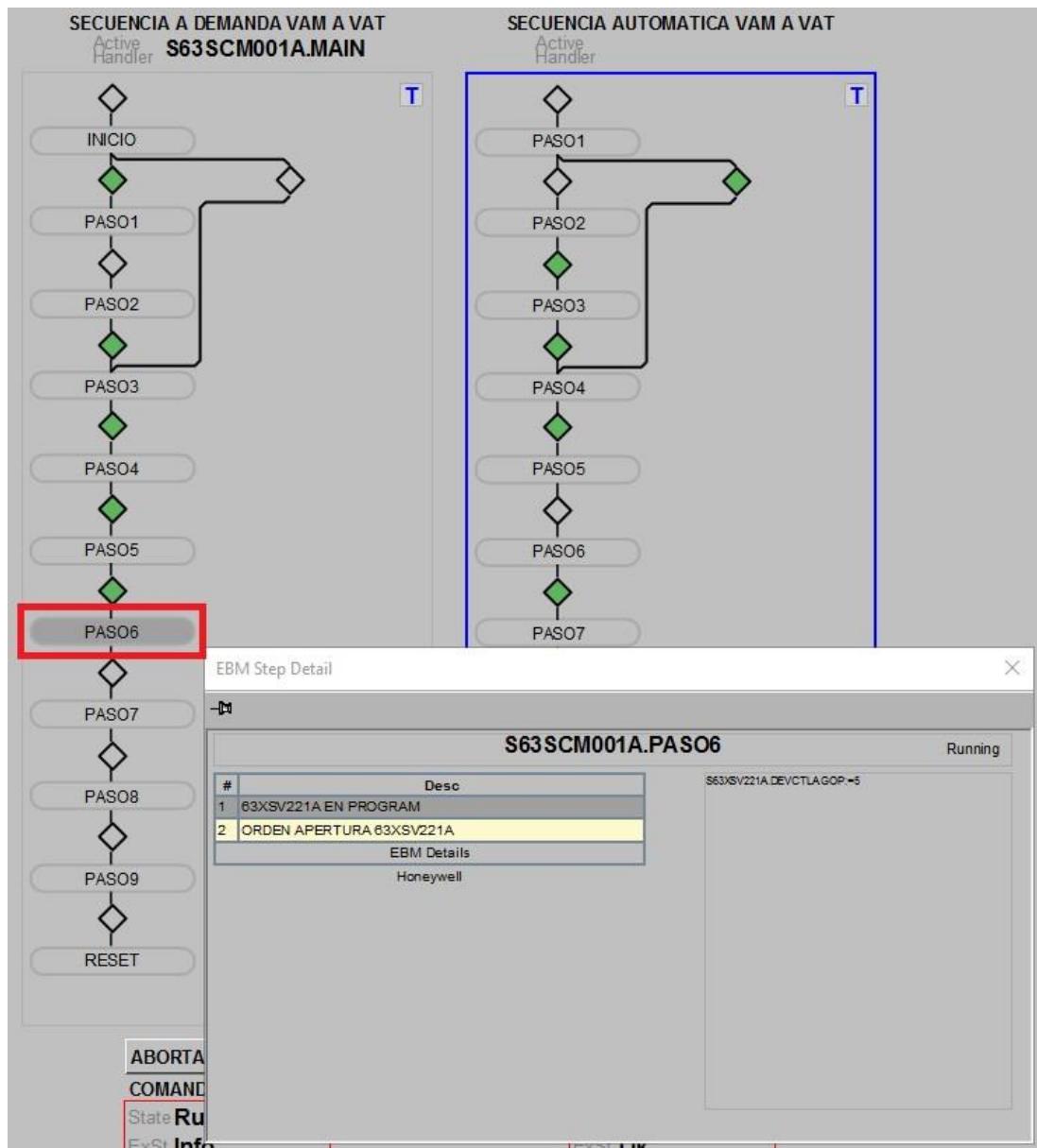


Fuente: Esquemático del DCS

Al estar ejecutándose la secuencia, el “Paso” en el que se encuentre se pinta de color gris oscuro y al hacerle clic, se observará que las órdenes ya ejecutadas se pintan de color gris oscuro y las pendientes de amarillo:

Figura 32:

Detalle de pasos en una secuencia en ejecución



Fuente: Esquemático del DCS

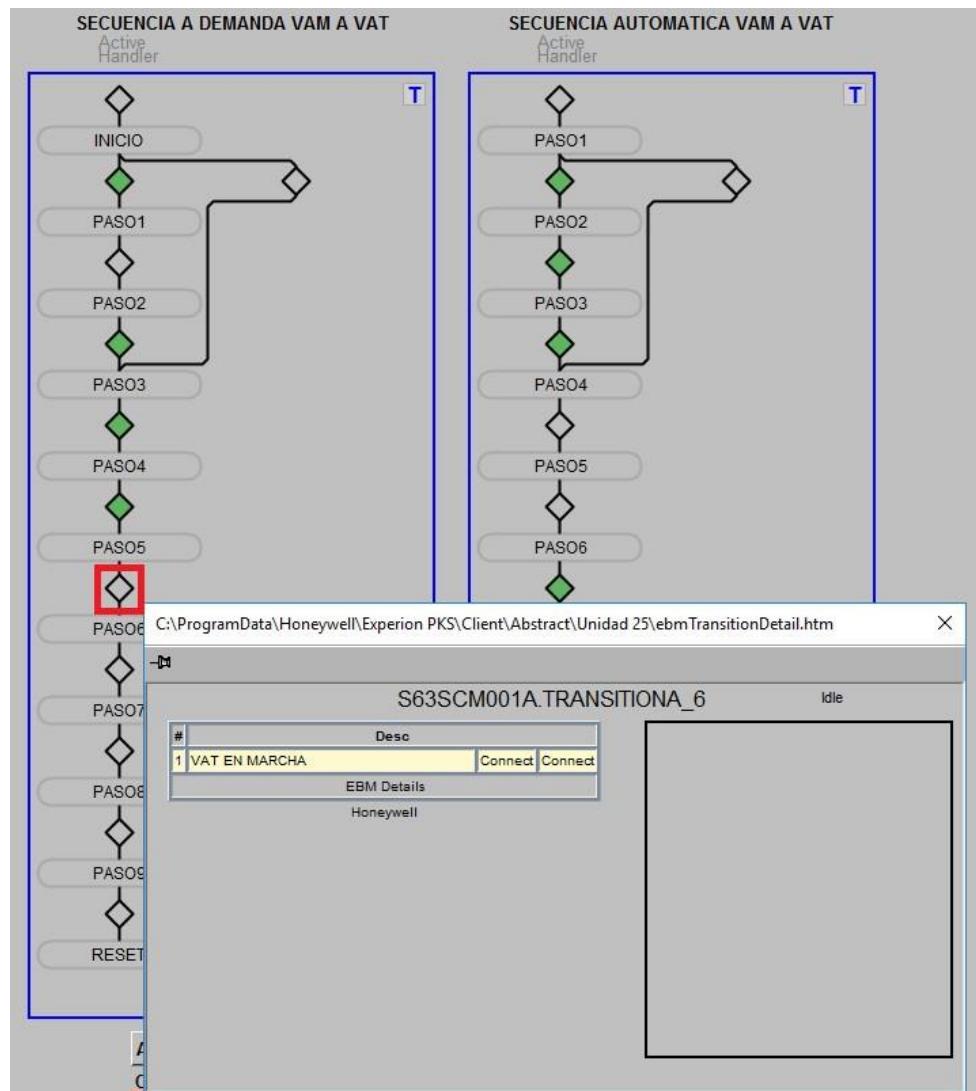
3.5.1.5. Transición

Representados en la secuencia como rombos, el primero contiene las condiciones para empezar la ejecución de la secuencia y los siguientes son condiciones para continuar con la secuencia previa ejecución de un “Paso”.

Si aún no se cumple con el total de las condiciones el rombo seguirá de color gris claro, al hacerle clic se podrán observar todas las condiciones para poder continuar con la secuencia, y se pintarán de color amarillo las condiciones que falten:

Figura 33:

Detalle de una transición falsa de una secuencia

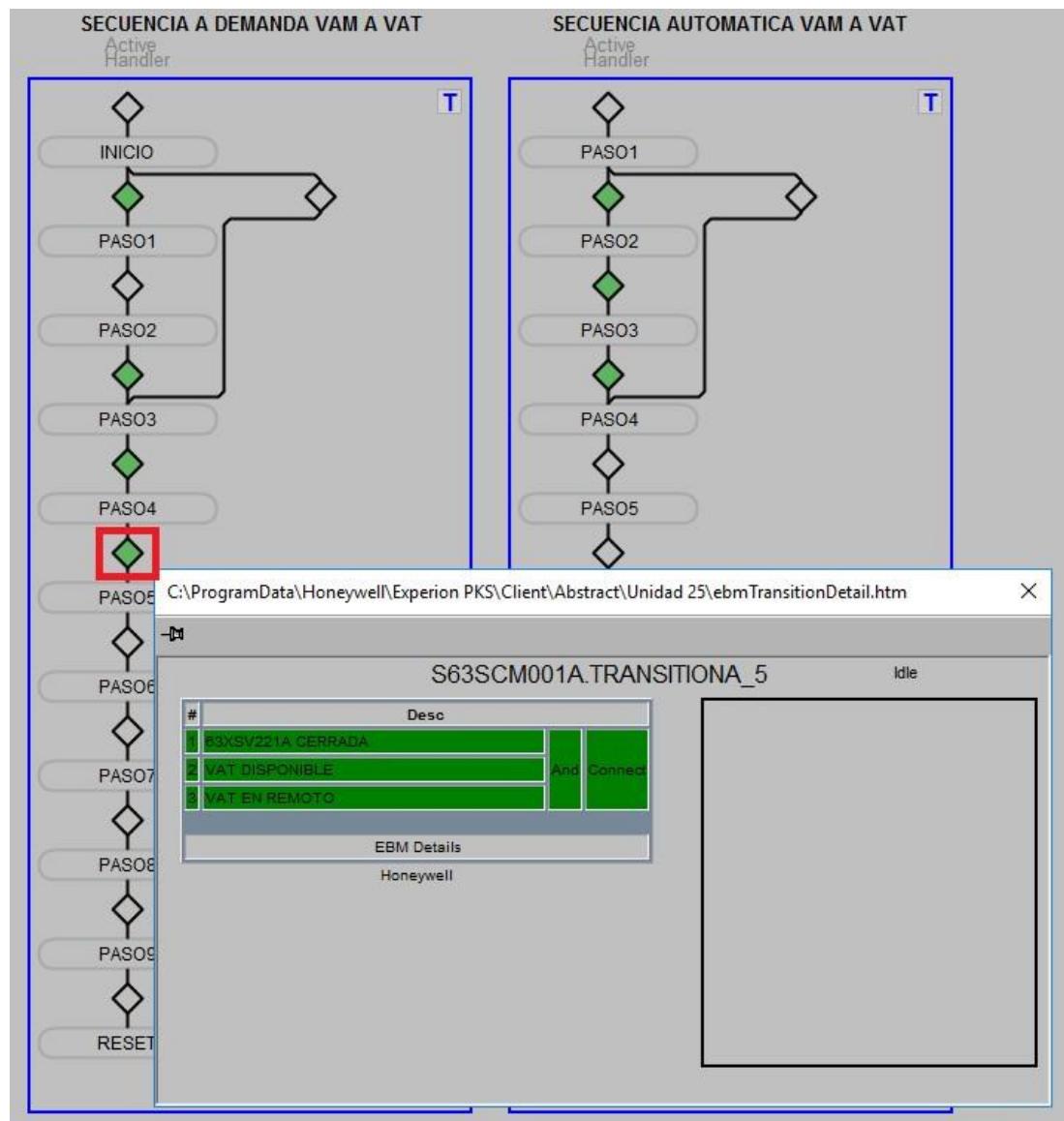


Fuente: Esquemático del DCS

El rombo se pintará de color verde si se cumple con el total de condiciones:

Figura 34:

Detalle de una transición verdadera en una secuencia



Fuente: Esquemático del DCS

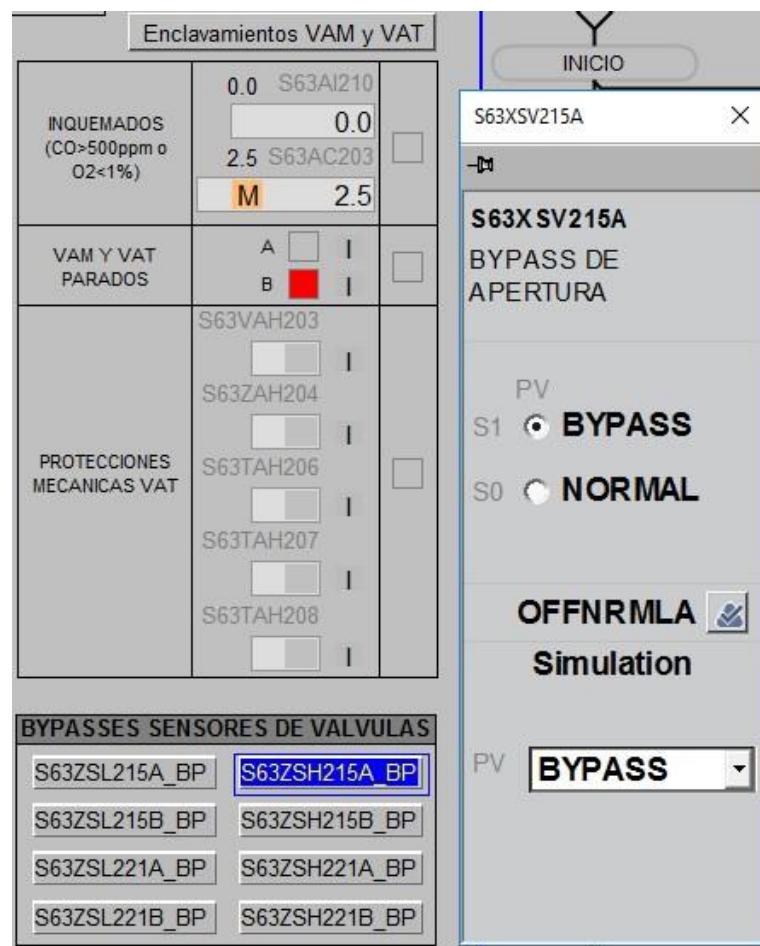
3.5.1.6. Bypasses

Se tendrán nuevos bypasses para sensores de posición de díámperes de aire, los cuales se podrán colocar desde el mismo gráfico de secuencias.

Se comunicaron desde el PLC de seguridad al DCS los bypasses ya existentes de protecciones mecánicas del VAT y de confirmación de marcha de los ventiladores, lo cuales se seguirán colocando desde el gráfico de enclavamientos tipo matriz causa-efecto.

Figura 35:

Bypasses de secuencia



Fuente: Esquemático del DCS

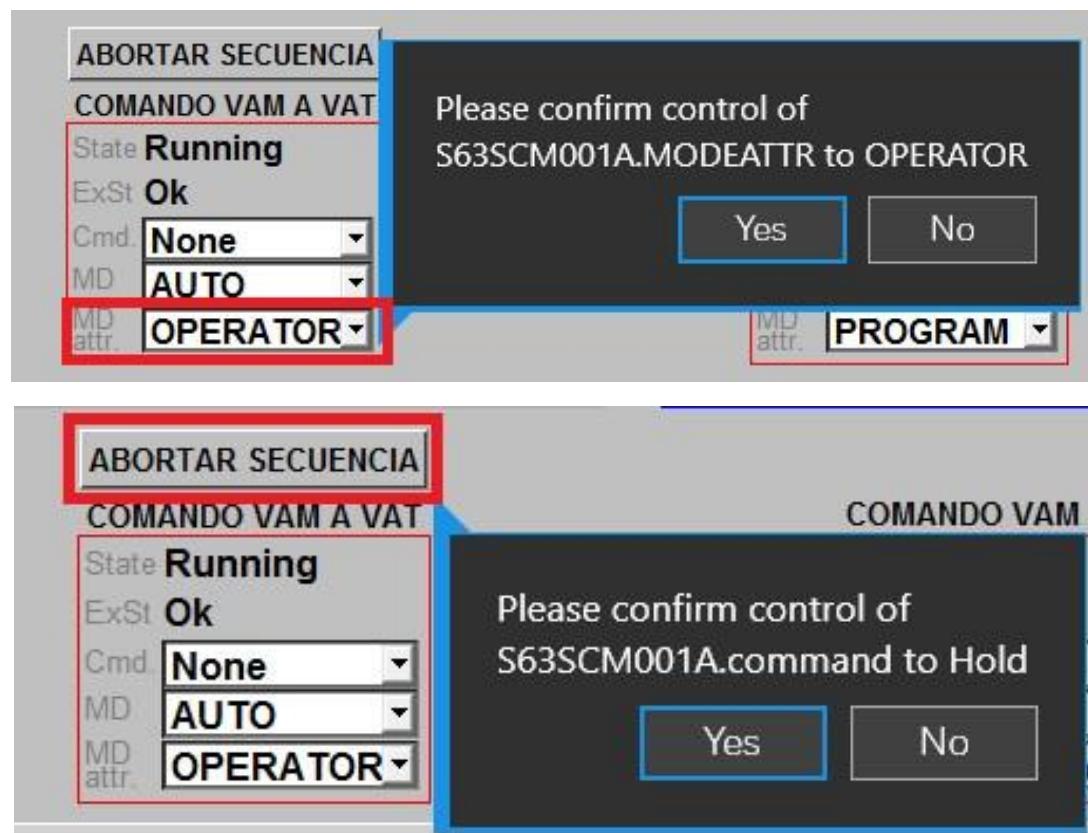
3.5.1.7. Botón de abortar secuencia a demanda

El operador solo podrá abortar la secuencia a demanda hasta antes de darse de orden de marcha o confirmar la marcha del ventilador de reserva.

Para poder abortar primero se debe colocar la secuencia en "Operator" y luego confirmar el aborto de la secuencia.

Figura 36:

Botón Abortar secuencia



Fuente: Esquemático del DCS

3.6 Procedimiento de modificación y carga de tags

Previamente se realizó una copia de seguridad o backup de los tags que se modifican o eliminan, por si se necesita regresar a la configuración anterior o se necesite verificar alguna configuración previa al cambio.

El tiempo de modificación aproximado previo a la carga de lógica fue de 2 días, esto se realizó con anticipación al paro de la caldera.

3.6.1. El orden de modificación de tags existentes

1. Eliminar las referencias y conexiones de tags dedicados a la secuencia anterior.
2. Protecciones mecánicas VAT. (inclusión de bypasses)
3. Selector de titularidad, selector arranque de caldera y condición de ambos ventiladores parados.
4. Tags de presión y temperatura del vapor al VAT.
5. Ventiladores.
6. Válvulas.
7. Analizadores de O₂, CO y condición de acumulación de combustible.
8. Controladores de aire y gas.
9. SCMs.

3.6.2. Orden de carga de tags

1. Se eliminan los tags dedicados a la secuencia anterior.
2. Protecciones mecánicas VAT, selector de titularidad, selector arranque de caldera, condición de ambos ventiladores parados, presión y temperatura del vapor al VAT.
3. Ventiladores y válvulas.
4. Analizadores de O₂, CO, condición de acumulación de combustible, controladores de aire y gas.
5. SCMs.

3.7 Comisionado del nuevo automatismo

Las pruebas en la caldera se realizaron sin ingreso de fuel gas y para el arranque de la turbina (VAT) se recibirá vapor de la red de HHS. Previamente a las pruebas se debe probar el correcto accionamiento de las válvulas y sensores de posición en los dámpères. Se realizaron las siguientes pruebas:

3.7.1. Prueba de secuencia de barrido del caldero con VAM

1. Partiendo de caldera parada y con el circuito de aire asociado al VAM completamente cerrado.
2. Verificar condiciones previas de inicio de secuencia.
3. El operador seleccionará al VAM como titular.
4. El operador seleccionará la opción marcha de la caldera.
5. Verificar el correcto arranque del VAM.

6. Verificar el circuito de aire asociado al VAM correctamente alineado y fin de secuencia.

3.7.2. Prueba de secuencia de cambio a demanda de VAM a VAT

1. Previamente se deberá incrementar el aire a una situación que simule un consumo real de aire con 4 quemadores.
2. Se debe forzar las condiciones para simular entrada de gas con 4 quemadores en servicio.
3. Verificar que el circuito de aire asociado al VAT se encuentre completamente cerrado.
4. Verificar condiciones previas de inicio de secuencia.
5. El operador seleccionará al VAT como titular.
6. Antes de que entre en servicio el VAT se prueba el botón “ABORTO SECUENCIA”, no debería realizar el cambio (VAM a VAT).
7. Luego volver a seleccionar el VAT y dejar que se realice el cambio.
8. Verificar la correcta rampa en el paso “inicio de minimun firing”. Para la prueba se configurará un tiempo de 10 min.
9. Verificar el correcto arranque del VAT.
10. Verificar el circuito de aire asociado al VAT correctamente alineado y fin de secuencia.
11. Verificar eventos.

3.7.3. Prueba de secuencia de cambio a demanda de VAT a VAM.

1. Previamente se deberá incrementar el aire a una situación que simule un consumo real de aire con 4 quemadores.
2. Se debe forzar las condiciones para simular entrada de gas con 4 quemadores en servicio.
3. Verificar que el circuito de aire asociado al VAM se encuentre completamente cerrado.
4. Verificar condiciones previas de inicio de secuencia.
5. El operador seleccionará al VAM como titular.
6. Antes de que entre en servicio el VAM se prueba el botón “ABORTO SECUENCIA”, no debería realizar el cambio (VAT a VAM).
7. Luego volver a seleccionar el VAM y dejar que se realice el cambio.
8. Verificar la correcta rampa en el paso “inicio de minimun firing”. Para la prueba se configurará un tiempo de 10 min.
9. Verificar el correcto arranque del VAM.
10. Verificar el circuito de aire asociado al VAM correctamente alineado y fin de secuencia.
11. Verificar eventos.

3.7.4. Prueba de secuencia de cambio automático de VAM a VAT.

Esta es la prueba más importante porque va a representar una secuencia de cambio automático real. Para esta prueba es necesario tener la turbina fría.

1. Previamente se deberá incrementar el aire a una situación que simule un consumo real de aire con 4 quemadores.
2. Verificar que el circuito de aire asociado al VAT se encuentre completamente cerrado.
3. Verificar condiciones previas de inicio de secuencia.
4. Para iniciar la secuencia el operador de campo deberá accionar el paro local de emergencia del VAM.
5. Al cabo de 2 segundos de confirmado el paro se debe iniciar automáticamente la secuencia.
6. Verificar que la secuencia termina antes de 25 segundos (paro de ambos ventiladores en el PLC de seguridad).
7. Se revisarán los tiempos de eventos entre órdenes y confirmaciones de la secuencia, ello con el fin de determinar delays si fueran necesarios.

3.7.5. Prueba de secuencia de cambio automático de VAT a VAM.

1. Previamente se deberá incrementar el aire a una situación que simule un consumo real de aire con 4 quemadores.
2. Verificar que el circuito de aire asociado al VAM se encuentre completamente cerrado.
3. Verificar condiciones previas de inicio de secuencia.
4. Para iniciar la secuencia el operador de campo deberá accionar el paro local de emergencia del VAT o se forzarán los sensores de vibración para simular una condición anormal.
5. Al cabo de 2 segundos de confirmado el paro se debe iniciar automáticamente la secuencia.
6. Verificar que la secuencia termina antes de 25 segundos (paro de ambos ventiladores en el PLC de seguridad).
7. Se revisarán los tiempos de eventos entre órdenes y confirmaciones de la secuencia, ello con el fin de determinar delays si fueran necesarios.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Puesta en marcha de las secuencias

La primera prueba de barrido de gases del caldero resultó exitosa, las otras pruebas se detallan a continuación.

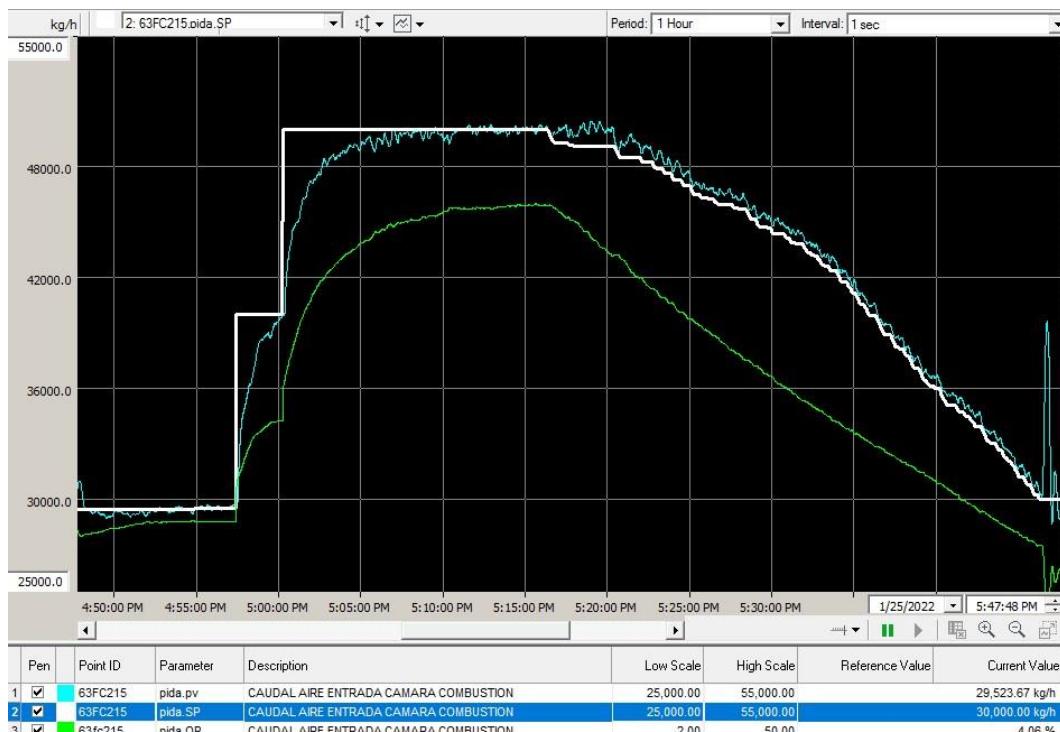
4.1.1. Prueba de la rampa de aire en secuencias a demanda

Para estas pruebas solo se probarán las rampas de aire, la rampa de gas combustible se probó en operación normal.

Se inició la prueba de cambio a demanda de VAT a VAM a las 6:16 pm con una desviación PV - SP de 500 kg/h con una duración de 10 minutos de rampa, las cuales fueron propuestas inicialmente para las pruebas, según se observa en la Figura 37 el tiempo total de rampa de aire fue de 30 minutos. Luego de terminada la rampa el cambio a demanda fue exitoso.

Figura 37:

Prueba de rampa de aire con desviación PV - SP de 500 kg/h



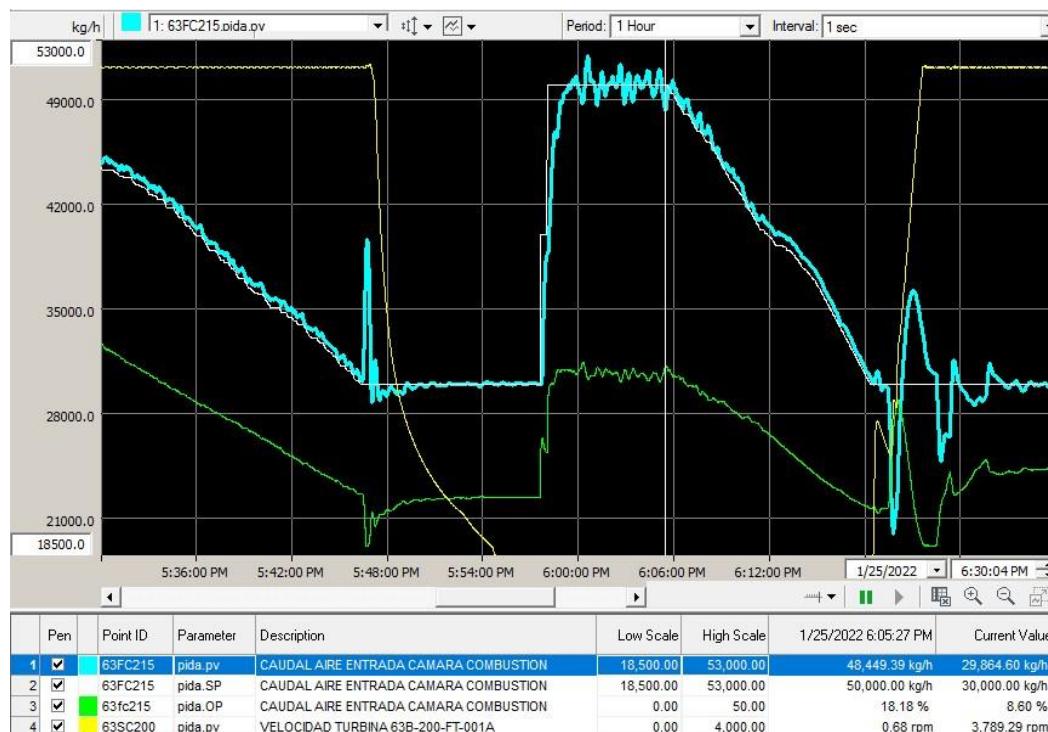
Fuente: Tendencia del DCS

Al evidenciarse el problema de la lentitud de la rampa se modificaron las secuencias y se cambió la desviación PV - SP a 750 kg/h, para que la secuencia sea efectuada en 10 minutos. Mientras se modificaba la configuración, los operadores llevaron el aire a 50000 kg/h.

Luego se realizó el cambio a demanda VAT a VAM a las 6:05 pm resultando la rampa una duración de 10 minutos, presentándose ahora el problema de la pobre calidad de vapor de muy alta presión (42 kg/cm²) por lo cual las revoluciones del VAT que debieron subir con pendiente, desciden y luego de unos segundos la pendiente de subida se reanuda según se aprecia en la tendencia de color amarillo en la Figura 38, ello produce una caída del flujo de aire durante el alineamiento del VAT con sus revoluciones en descenso; aún con este problema el cambio de ventilador fue exitoso. Por el problema descrito se aumentó el tiempo de espera entre la confirmación de marcha del VAT y su alineamiento de 40 a 60 segundos.

Figura 38:

Prueba de rampa de aire con desviación PV - SP de 750 kg/h



Fuente: Tendencia del DCS

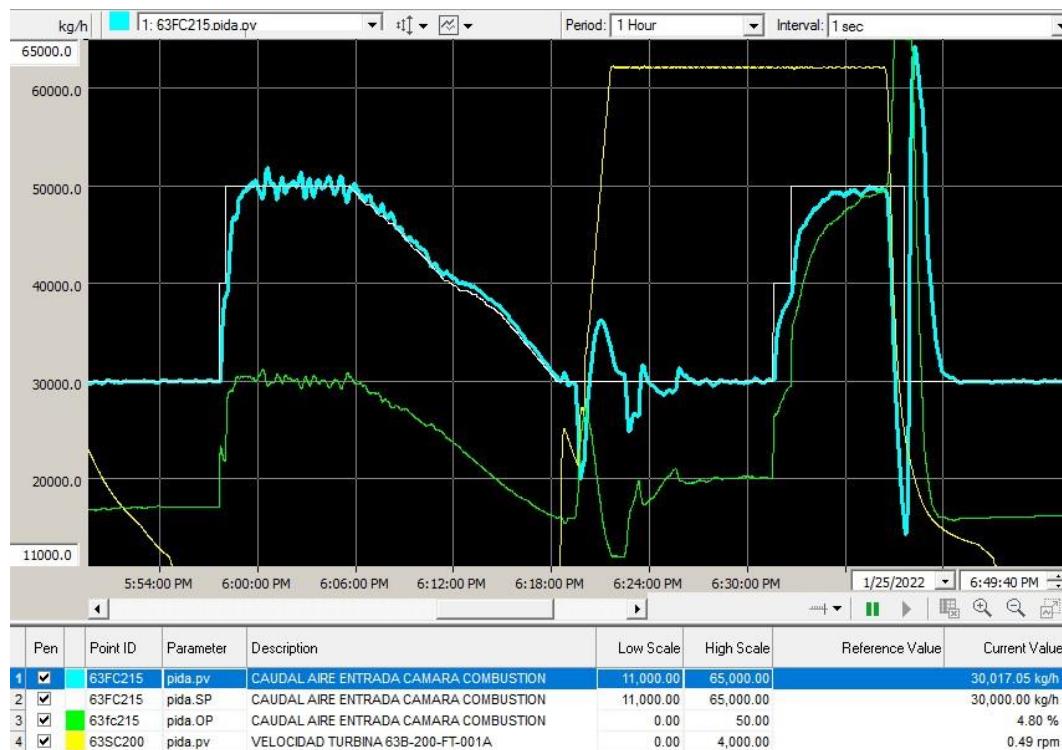
4.1.2. Prueba de cambio automático VAT a VAM por pulsador de paro local de emergencia del VAT

Luego de haber probado las secuencias a demanda y que los operadores hayan normalizado las condiciones de aire (50000 kg/h), a las 6:39 pm se pulsa en campo el paro de emergencia del VAT, observándose que la secuencia debe esperar a la alarma de bajo flujo de aire para poder realizar el cambio de ventilador, lo cual ocurrió a las 6:40 pm y produciéndose una caída de aire innecesaria hasta el alineamiento y arranque del VAM.

Ante este problema se agregó el enclavamiento del ventilador titular como condición de ambos cambios automáticos. Luego de modificadas las secuencias, estas se cargaron y se continuó con las pruebas.

Figura 39:

Prueba de cambio automático VAT a VAM por pulsador de paro local de emergencia del VAT



Fuente: Tendencia del DCS

4.1.3. Prueba de cambio automático VAM a VAT por pulsador de paro de local del VAM

Para esta prueba se comenzó sobre 30000 kg/h de aire y se pulsó el paro local del VAM a las 6:52 pm presentándose el mismo problema del vapor que se observó en el cambio a demanda VAM a VAT según se observa en la Figura 40.

4.1.4. Prueba de cambio automático VAT a VAM por alarma de altas vibraciones en el VAT

Para esta prueba también se comenzó sobre 30000 kg/h de aire y se simuló altas vibraciones en el VAT a las 6:58 pm obteniéndose un cambio exitoso al VAM según se observa en la Figura 40.

Finalmente se paró la caldera hasta el día siguiente para ejecutar la prueba de cambio automático VAM a VAT con monitoreo de los sensores mecánicos.

Figura 40:

Pruebas de cambio automático por pulsador de paro de local del VAM y altas vibraciones del VAT.



Fuente: Tendencia del DCS

4.1.5. Prueba de cambio automático VAM a VAT por orden de paro remoto del VAM

En el día 2 de las pruebas se arrancó y se hizo el barrido de gases de la caldera a las 10:47 am, los operadores normalizaron las condiciones de aire a 50000 kg/h para verificar si durante el problema de la caída de vapor y descenso de revoluciones en el arranque del VAT, se llegase a alcanzar el set de disparo de encendido por muy bajo flujo de aire (11000 kg/h).

Con presencia de mecánica a las 11:02 am se dio orden remota de paro del VAM y se verificó que el mínimo de aire registrado fue de 12934 kg/h, siendo un valor cercano al set de disparo, pero siendo un cambio de

ventilador exitoso pues en la condición de no tener ningún ventilador en marcha se reducirá el gas combustible juntamente con el aire a lo que le llamamos minimum firing.

Figura 41:

Prueba de cambio automático VAM a VAT por orden de paro remoto del VAM



Fuente: Tendencia del DCS

4.1.6. Pruebas mecánicas en los ventiladores

Durante la anterior prueba, el personal de mecánica se encontraba monitoreando el arranque de la turbina donde no se evidenció alguna anomalía del equipo, después de finalizada la anterior prueba a las 11:27 am se procedió a activar el gobernador de la turbina del VAT para poder incrementar las revoluciones al 100% y monitorear en el tiempo los sensores de protecciones mecánicas, una vez finalizado el monitoreo a las 11:50 am se realizó un cambio automático por paro local de emergencia del VAT donde se pudo evidenciar la mejora encontrada en la prueba 4.1.2 (

Prueba de cambio automático VAT a VAM por pulsador de paro local de emergencia del VAT).

Durante el monitoreo del arranque del VAM no se evidenció alguna anomalía del equipo, luego los operadores llevaron al 100% de capacidad al VAM monitorear en el tiempo los sensores de protecciones mecánicas, una vez finalizado el monitoreo se procedió a parar el caldero.

Figura 42:

Pruebas mecánicas en los ventiladores



Fuente: Tendencia del DCS

4.2 Cuantificación de ahorro energético y reducción de emisiones

Para realizar la cuantificación se tomará como caso una situación habitual de operación, el 75% de la capacidad total de producción de vapor de la caldera y solo gas natural combustible, según (Ayesa España, 2015):

Producción de la caldera (75% de capacidad) = 54.45 ton vapor/h

Uso de Gas Natural (75% de capacidad) = 3.3 ton gas/h

Para el gas natural se tomará en cuenta el valor calórico neto de la tabla 1.2 del (IPCC, 2006) y para el factor de emisión de la tabla 2.2 del (IPCC, 2006):

Valor calórico neto de Gas Natural = 48 GJ/ton gas

Factor de Emisión Gas Natural = 56.1 kg CO₂/GJ

Para la electricidad se tomará en cuenta el factor de emisión el cual se puede encontrar en (MINAM, 2022):

Factor de Emisión Energía Eléctrica = 0.1733 kg CO₂/kWh

4.2.1. Cálculo de consumo energético y de emisiones VAT

Para los cálculos asociados al VAT se utilizará el flujo nominal de vapor, según (Ayesa España P&ID, 2015):

Flujo de vapor nominal VAT = 1.8 ton vapor/h = 1296 ton vapor/mes

Para el cálculo del valor calórico neto de la caldera se usa el caso de 75% de producción, descrito previamente:

$$\frac{\text{Valor Calórico neto}}{\text{de la caldera}} = \frac{\text{Valor calórico neto}}{\text{de Gas Natural}} \times \frac{\text{Uso de Gas natural}}{\text{Producción de la caldera}}$$

$$\frac{\text{Valor Calórico neto}}{\text{de la caldera}} = \frac{48 \text{ GJ/ton gas}}{54.45 \text{ ton vapor/h}} \times \frac{3.3 \text{ ton gas/h}}{}$$

$$\frac{\text{Valor Calórico neto}}{\text{de la caldera}} = \frac{2.91 \text{ GJ/ton vapor}}{}$$

Para calcular el consumo energético mensual del VAT se multiplica el flujo de vapor nominal VAT con el valor calórico neto de la caldera, pues el vapor requerido para el accionamiento del VAT es el mismo que produce la caldera.

$$\text{Consumo energético VAT} = \text{Flujo de vapor nominal VAT} \times \frac{\text{Valor Calórico neto}}{\text{de la caldera}}$$

$$\text{Consumo energético VAT} = 1296 \text{ ton vapor/mes} \times 2.91 \text{ GJ/ton vapor}$$

$$\boxed{\text{Consumo energético VAT} = 3770.18 \text{ GJ/mes}}$$

Para calcular las emisiones mensuales del VAT se multiplica el consumo energético mensual del VAT con factor de emisión del gas natural.

$$\text{Emisiones VAT} = \text{Consumo energético VAT} \times \text{Factor de Emisión Gas Natural}$$

$$\text{Emisiones VAT} = 3770.18 \text{ GJ/mes} \times 56.1 \text{ kg CO}_2/\text{GJ}$$

$$\text{Emisiones VAT} = 211507.20 \text{ kg CO}_2/\text{mes}$$

Las emisiones se expresan en toneladas entonces:

$$1 \text{ ton CO}_2$$

$$\text{Emisiones VAT} = 211507.20 \text{ kg CO}_2/\text{mes} \times \frac{1}{1000 \text{ kg CO}_2}$$

$$\boxed{\text{Emisiones VAT} = 211.51 \text{ ton CO}_2/\text{mes}}$$

4.2.2. Cálculo de consumo energético y de emisiones VAM

Para los cálculos asociados al VAM se utilizará la potencia nominal del motor, según (Ayesa España, 2015):

$$\text{Potencia nominal VAM} = 200 \text{ kW}$$

Para el calcular el consumo energético mensual se debe convertir la potencia (kW) a la usada para expresar el consumo eléctrico la cual es kWh/mes:

$$\begin{array}{l} \text{Consumo} \quad \text{Potencia} \quad \frac{24}{\text{h}} \quad \frac{30 \text{ d}}{\text{mes}} \quad \frac{24}{\text{h}} \quad \frac{30 \text{ d}}{\text{mes}} \\ \text{energético VAM} = \text{nominal VAM} \times \frac{1 \text{ d}}{1 \text{ mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{1 \text{ mes}} = 200 \text{ kW} \times \frac{1 \text{ d}}{1 \text{ mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{1 \text{ mes}} \end{array}$$

$$\text{Consumo energético VAM} = 144000 \text{ kWh/mes}$$

Este último se debe transformar a unidades de GJ/mes para luego calcular el ahorro energético:

$$\text{Consumo energético VAM} = 144000 \text{ kWh/mes} \times 0.0036 \text{ GJ/kWh}$$

$$\boxed{\text{Consumo energético VAM} = 518.40 \text{ GJ/mes}}$$

Para calcular las emisiones mensuales del VAM se multiplica el consumo energético mensual del VAM con factor de emisión de la electricidad.

$$\text{Emisiones VAM} = \text{Consumo energético VAM} \times \frac{\text{Factor de Emisión}}{\text{Energía Eléctrica}}$$

$$\text{Emisiones VAM} = 144000 \text{ kWh/mes} \times 0.1733 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$$

$$\text{Emisiones VAM} = 24955.20 \text{ kg CO}_2/\text{mes}$$

Las emisiones se expresan en toneladas entonces:

$$1 \text{ ton CO}_2$$

$$\text{Emisiones VAT} = 24955.20 \text{ kg CO}_2/\text{mes} \times \frac{1}{1000 \text{ kg CO}_2}$$

$$\boxed{\text{Emisiones VAT} = 24.96 \text{ ton CO}_2/\text{mes}}$$

4.2.3. Ahorro energético

Para el ahorro energético mensual se restarán los consumos energéticos del VAT – VAM:

$$\text{Ahorro energético} = \text{Consumo energético VAT} - \text{Consumo energético VAM}$$

$$\text{Ahorro energético} = 3770.18 \text{ GJ/mes} - 518.40 \text{ GJ/mes}$$

$$\boxed{\text{Ahorro energético} = 3251.78 \text{ GJ/mes}}$$

4.2.4. Reducción de emisiones

Para la reducción de emisiones mensual se restarán las emisiones del VAT – VAM:

$$\text{Reducción de emisiones} = \text{Emisiones VAT} - \text{Emisiones VAM}$$

$$\text{Reducción de emisiones} = 211.51 \text{ ton CO}_2/\text{mes} - 24.96 \text{ ton CO}_2/\text{mes}$$

$$\boxed{\text{Reducción de emisiones} = 186.55 \text{ ton CO}_2/\text{mes}}$$

CONCLUSIONES

- Mediante la implementación de los nuevos automatismos se evita alguna situación insegura o paro de la caldera asegurando de esta forma la operación en continuo del Ventilador accionado por motor eléctrico.
- Se identificó el principal motivo potencial de falla del ventilador accionado por motor eléctrico, el cual es un fallo súbito de la red eléctrica de la planta, ello fue superado a través de la discriminación de escenarios de cambio de ventilador (a demanda o automático), pues se ha logrado ejecutar de forma rápida y segura cambios de ventilador por situaciones anormales del proceso entre ellas un fallo eléctrico.
- Se listaron los problemas que tenía el automatismo y fueron implementadas las correcciones, pero durante la puesta en marcha de los nuevos automatismos se adicionó el enclavamiento del ventilador titular como condición de cambio automático de ventilador, ello significó un ahorro del tiempo de cambio de ventilador, pues significa que el equipo titular se ha mandado a parar por el PLC de seguridad y como condición brinda un adelanto a las otras condiciones de proceso que también inician un cambio de ventilador, entre ellas el bajo flujo de aire o ambos ventiladores parados por 2 segundos.
- Se identificó que la forma óptima de configuración para el automatismo por su dificultad era usando control secuencial de procesos, en nuestro caso usando los Sequence Control Modules de Experion (SCM), pues el automatismo se puede desarrollar como una secuencia siendo mucho más fácil de configurar y mantener en el tiempo que usando solo lógica de bloques en Control Modules de Experion (CM).
- Se ha logrado identificar correctamente los escenarios anormales que podrían generarse durante un cambio de ventilador, de tal forma que las acciones automáticas y de parte de operador queden registradas

en el manual de operación del caldero y sean practicadas usando el simulador de cambio de ventilador.

- Se ha mejorado el aprendizaje de las secuencias mediante el cambio de esquemáticos de secuencias de tipo texto a tipo interactivo, pues estas últimas requieren de la manipulación del operador de panel sobre el gráfico de secuencia para brindar información detallada al usuario; también al ser un gráfico interactivo el operador puede saber en todo momento en que paso de la secuencia se encuentra, mientras que en el pasado el operador tenía que relacionar el paso actual con el alineamiento de las válvulas o ventiladores. Así también se ha optimizado la operatividad en un cambio de ventilador, debido a que se ha unificado en un solo esquemático las secuencias a demanda y automática, el sistema de aire y el sistema de gas combustible, antes para lograr una correcta supervisión de las variables más importantes durante el cambio se debían usar 3 esquemáticos, uno para las secuencias y los otros 2 para los sistemas de aire y gas combustible.
- El simulador desarrollado es una herramienta básica para el entrenamiento de operadores de panel de la caldera, pues el cambio de ventilador al no ser una operación rutinaria, la experiencia adquirida era limitada a los operadores de panel con mayor tiempo en el puesto, mientras que ahora con el simulador los operadores de panel nuevos también pueden adquirir el mismo conocimiento y estar preparados para operar la caldera en menor tiempo, pues en el simulador pueden probar las diferentes situaciones anómalas identificadas que se pueden dar durante un cambio de ventilador.
- Se ha podido cuantificar la reducción de emisiones y el ahorro energético de utilizar el VAM en operación continua en lugar del VAT, logrando sumar de esta forma un ahorro más al objetivo corporativo de reducción de emisiones.

RECOMENDACIONES

- Automatizar el cambio de titularidad de equipos críticos para la operación para evitar error humano en algún alineamiento que desencadene una condición insegura.
- Cambiar los esquemáticos de secuencias de tipo texto a interactivos, debido al mayor aprendizaje en menor tiempo que se pueda llegar a adquirir.
- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero usando equipos eléctricos en lugar de turbinas a vapor, ello también libera de carga de vapor a los calderos para usarse en otra necesidad en la planta.
- Incluir condiciones de cambio ventilador que precedan a otras que originen un cambio automático como en nuestro caso el enclavamiento de un equipo titular como condición de arranque del equipo de reserva.
- Se recomienda usar control secuencial en lugar de control continuo para automatismos complejos, pues el control secuencial funciona en base a condiciones anormales de proceso y su ejecución es paso a paso.
- Previamente a cualquier modificación o creación de nuevas estrategias de control, automatismos, lógicas, etc; se debe desarrollar una filosofía o criterios de configuración para lograr un solo estándar de configuración y que equipos similares de diferentes entornos de la planta no tengan diferentes criterios lógicos.
- Se recomienda desarrollar simuladores basados en estrategias de control o automatismos complejos primeramente para probar la configuración a nivel lógico y luego para el entrenamiento de operadores de panel.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acedo. (2002). *Control avanzado de procesos: teoría y práctica*.
- Ayesa España. (2015). V-P-V0P21-0063-B0-0301-A-O-077: *Manual de operación y mantenimiento de la Caldera de Vapor 63B200*.
- Ayesa España. (2016). V-P-V0P21-0063-B0-0301-A-O-059: *Descripción Funcional de la Caldera de Vapor 63B200*.
- Ayesa España P&ID. (2015). 63-A-R LP21-Y-46266-H10-R2: *Diagrama de tuberías e instrumentación, turbina del ventilador de la caldera*.
- Hanssen, D. H. (2015). *Programmable Logic Controllers: A Practical Approach to IEC 61131-3 Using CODESYS*. John Wiley & Sons.
- Hellgren, A., Fabian, M., & Lennartson, B. (2005). On the execution of sequential function charts. *Control Engineering Practice*, 1283–1293. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2004.11.011>
- Honeywell Process Solutions X122. (2012). EPDOC-X122-en-410A: *Honeywell Experion PKS - Sequential Control User's Guide*.
- Honeywell Process Solutions XX54. (2013). EPDOC-XX54-en-410B: *Honeywell Experion PKS - HMIWeb Display Builder Guide*.
- Honeywell Process Solutions XX81. (2012). EPDOC-XX81-en-410A: *Honeywell Experion PKS - Overview*.
- Interact Analysis. (2018). *Who Were the Leading Vendors of Industrial Controls in 2017?* <https://www.interactanalysis.com/who-were-the-leading-vendors-of-industrial-controls-in-2017/>
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volumen 2: Energy*.
- ISA. (2000). *ANSI/ISA-95.00.01-2000, Enterprise-Control System Integration - Part 1: Models and Terminology*.
- Kano, M. (1992). A Combustion Air Changeover Control for Heat Recovery Boilers. *IFAC Proceedings Volumes*, 69–74. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)50431-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)50431-0)
- Kohan. (2000). *Manual de Calderas* (Vol. 1). McGraw-Hill.
- Liptak. (2006). *Instrument Engineers' Handbook Fourth Edition, Volume Two: Process Control and Optimization* (4th ed., Vol. 2). CRC Pres.
- MINAM. (2022). *Plataforma Huella de Carbono Perú*. <https://huellacarbonoperu.minam.gob.pe/huellaperu/#/inicio>

- NFPA. (2015). *NFPA 85: Boiler and Combustion Systems Hazards Code*.
- Wang, Z., Li, S., Jin, Z., Li, Z., Liu, Q., & Zhang, K. (2023). Oil and gas pathway to net-zero: Review and outlook. *Energy Strategy Reviews*, 45, 101048. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101048>
- Wcislik, M., Suchenia, K., & Łaskawski, M. (2015). Programming of sequential control systems using functional block diagram language. *IFAC-PapersOnLine*, 330–335.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.07.056>

ANEXOS

Anexo 1. Glosario de Términos 1

A. Glosario de Términos

- ✓ C300: Controlador de procesamiento de lazos de control o indicaciones utilizado en el Sistema de control distribuido Experion PKS.
- ✓ CM: Control module de Experion, usado para control continuo.
- ✓ Control Builder: herramienta de ingeniería de Experion PKS que usa programación en bloques para crear estrategias de control, lógicas, etc.
- ✓ DCS: Sistema de control distribuido.
- ✓ Experion PKS: Sistema de control distribuido desarrollado por Honeywell.
- ✓ FB: Function Block de Experion, los bloques pueden ser de control regulatorio, lógicos, auxiliares, matemáticos, etc.
- ✓ FBD: Function Block Diagram, lenguaje de programación industrial tipo gráfico.
- ✓ FDF: Forced Draft Fan en inglés o Ventilador de Tiro Forzado.
- ✓ IL: Instruction List, lenguaje de programación industrial de tipo texto y de bajo nivel.
- ✓ HMIWeb: editor de esquemáticos de operación de Experion PKS, basado en DHTML.
- ✓ LD: Ladder Diagram, lenguaje de programación industrial tipo gráfico.
- ✓ OP: Salida de proceso, usado en control regulatorio.
- ✓ PID: algoritmo de control regulatorio que consta de 3 parámetros: proporcional, integral y derivativo.
- ✓ PLC: Programmable Logic Controller en inglés o Controlador lógico programable.
- ✓ PV: Variable de proceso, usado en control regulatorio.

- ✓ SCM: Sequential Control Module de Experion, usado para control secuencial y basado en Sequential Function Chart.
- ✓ SFC: Sequential Function Chart, lenguaje de programación industrial tipo diagrama de flujo.
- ✓ SP: Punto de consigna, usado en control regulatorio.
- ✓ IL: Structured Text, lenguaje de programación industrial de tipo texto y de alto nivel.
- ✓ VAM: Ventilador de tiro forzado Accionado por Motor eléctrico.
- ✓ VAT: Ventilador de tiro forzado Accionado por Turbina de vapor.