



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROPUESTA DE APLICACIÓN DEL ESTÁNDAR ISA-95 Y SISTEMA DE
DIAGNÓSTICO Y MONITOREO PARA INSTRUMENTACIÓN EN PLANTA DE
ENDULZAMIENTO DE GAS**

Tulio René Contreras Rivera

Asesorado por el Ing. Marco Antonio Mendoza Leonardo

Guatemala, julio de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE APLICACIÓN DEL ESTÁNDAR ISA-95 Y SISTEMA DE DIAGNÓSTICO Y
MONITOREO PARA INSTRUMENTACIÓN EN PLANTA DE ENDULZAMIENTO DE GAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

TULIO RENÉ CONTRERAS RIVERA

ASESORADO POR EL ING. MARCO ANTONIO MENDOZA LEONARDO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, JULIO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonzo Rivera Carrillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA DE APLICACIÓN DEL ESTÁNDAR ISA-95 Y SISTEMA DE DIAGNÓSTICO Y MONITOREO PARA INSTRUMENTACIÓN EN PLANTA DE ENDULZAMIENTO DE GAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 7 de noviembre de 2016.

Tulio René Contreras Rivera

Guatemala, 09 de noviembre de 2017

Ingeniero
Julio Solares
Coordinador Área de Electrónica
Presente

Estimado Ingeniero Solares:

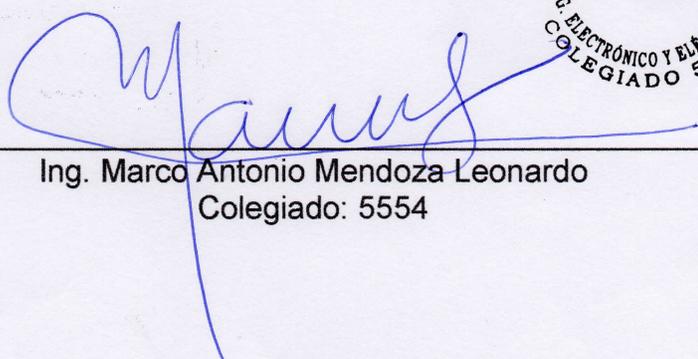
Me dirijo a usted, saludándolo e informándole que he dado el visto bueno al trabajo de Tesis titulado: **PROPUESTA DE APLICACIÓN DEL ESTÁNDAR ISA-95 Y SISTEMA DE DIAGNÓSTICO Y MONITOREO PARA INSTRUMENTACIÓN EN PLANTA DE ENDULZAMIENTO DE GAS**, del estudiante; TULIO RENÉ CONTRERAS RIVERA, con carné No. 2006-14815.

Agradeciendo su atención.

Atentamente,



Vo.Bo.


Ing. Marco Antonio Mendoza Leonardo
Colegiado: 5554



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 13 de febrero de 2018

Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

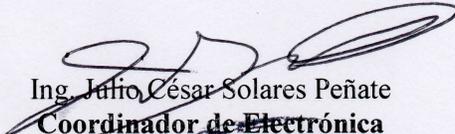
Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE APLICACIÓN DEL ESTÁNDAR ISA-95 Y SISTEMA DE DIAGNÓSTICO Y MONITOREO PARA INSTRUMENTACIÓN EN PLANTA DE ENDULZAMIENTO DE GAS**, desarrollado por el estudiante **Tulio René Contreras Rivera**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica





REF. EIME 13. 2018.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **TULIO RENÉ CONTRERAS RIVERA** titulado: **PROPUESTA DE APLICACIÓN DEL ESTÁNDAR ISA-95 Y SISTEMA DE DIAGNÓSTICO Y MONITOREO PARA INSTRUMENTACIÓN EN PLANTA DE ENDULZAMIENTO DE GAS**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Otto Fernando Andrino González

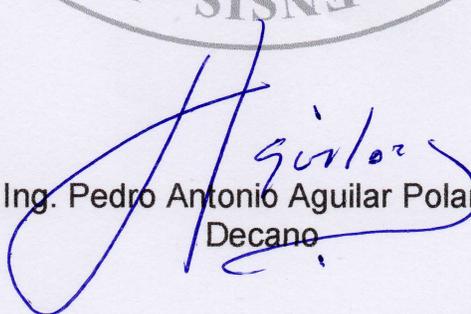


GUATEMALA, 5 DE MARZO 2018.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE APLICACIÓN DEL ESTÁNDAR ISA-95 Y SISTEMA DE DIAGNÓSTICO Y MONITOREO PARA INSTRUMENTACIÓN EN PLANTA DE ENDULZAMIENTO DE GAS**, presentado por el estudiante universitario: **Tulio René Contreras Rivera**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, julio de 2018

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la sabiduría necesaria para comprender que todo lo ocurrido en mi camino fue lo correcto y en su debido tiempo.
- Mis padres** Tulio Contreras Cáceres y Susana Rivera Hernández de Contreras que siempre estuvieron apoyándome en todos los aspectos y que sin importar las circunstancias siempre encontraban la forma de ayudarme, sin ellos no hubiera sido posible alcanzar esta meta.
- Mis hermanos** Angel, Susan y Renato Contreras Rivera por siempre estar dispuestos a ayudarme en lo que pudieran sin importar si estaba de buenas o de malas.
- Mis abuelos** Emma Hernández, María Cáceres (q. e. p. d.), Miguel Contreras (q. e. p. d.) y René Rivera (q. e. p. d.), que fueron parte importante de mi infancia y que sin sus consejos y sabiduría no fuera la persona que soy hoy.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una gran influencia en mi desarrollo profesional.
Facultad de Ingeniería	Por darme los conocimientos necesarios para desenvolverme como un profesional correcto y capaz.
Mi familia	Tíos, tías y primos que siempre estuvieron pendientes, apoyando y presionando para que finalizara la carrera.
Mis amigos	Josué Collado, Sergio Quintana, Samuel Batz, Oscar Salguero y David Salguero con los que ya tengo más de 10 años de conocerlos, en los que puedo confiar completamente y siempre me brindarán su ayuda.
Perenco Guatemala Limited	Por abrirme las puertas no solo al ámbito laboral sino también para desarrollar este trabajo de tesis.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
OBJETIVOS	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. ESTÁNDAR ISA-95	1
1.1. Partes del estándar ISA-95	3
2. EVALUACIÓN	7
2.1. Descripción del proceso	7
2.2. Descripción de la planta de endulzamiento de gas con amina	8
2.3. Parámetros del proceso	10
2.4. Instrumentación	12
3. IMPLEMENTACIÓN DE ESTANDAR ISA-95	15
3.1. Intercambio de información	16
3.1.1. Aplicación de conceptos en planta de endulzamiento de gas	18
3.1.1.1. <i>Quality test definition</i>	18
3.1.1.2. <i>Quality test capability</i>	19
3.1.1.3. <i>Quality test request y quality test response</i>	19
3.1.1.4. <i>Quality parameters and procedures</i>	19

3.1.1.5.	<i>Test commands, test response y quality-specific data</i>	20
3.2.	Funciones principales	20
3.2.1.	<i>Quality test definition management</i>	21
3.2.2.	<i>Quality test resource management</i>	21
3.2.3.	<i>Detailed quality test scheduling</i>	22
3.2.4.	<i>Quality test despatching</i>	22
3.2.5.	<i>Quality test execution management</i>	23
3.2.6.	<i>Quality test data collection</i>	24
3.2.7.	<i>Quality test tracking</i>	24
3.2.8.	<i>Quality test performance analysis</i>	25
4.	DESARROLLO DE LA AUTOMATIZACIÓN	27
4.1.	Variabilidad	27
4.2.	Desarrollo de sistemas de control	30
4.2.1.	Caudal de amina	30
4.2.1.1.	Conexiones eléctricas	32
4.2.1.2.	Bloque de control	34
4.2.2.	Nivel de <i>surge tank</i>	38
4.2.2.1.	Conexiones eléctricas	39
4.2.2.2.	Bloque de control	40
4.2.3.	Monitoreo de equipos	42
4.3.	Presupuesto de inversión	44
	CONCLUSIONES	47
	RECOMENDACIONES	49
	BIBLIOGRAFÍA	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Organización jerárquica	2
2.	Diagrama de planta de endulzamiento de gas	9
3.	Modelo de actividades.....	16
4.	Modelo de actividades para la planta de endulzamiento	26
5.	Campana de Gauss - caudal de amina	29
6.	Campana de Gauss - presión en torre contactora	29
7.	Esquema de bloques para el caudal de amina	31
8.	Conexión del convertidor y sus componentes opcionales	33
9.	Comportamiento caudal/frecuencia	35
10.	Diagrama de flujo de algoritmo – caudal de amina.....	36
11.	Diagrama esquemático – caudal de amina.....	37
12.	Campana de Gauss – nivel de <i>surge tank</i>	38
13.	Esquema de bloques para el nivel de <i>surge tank</i>	39
14.	Esquema de potencia y control	40
15.	Diagrama de flujo del algoritmo – nivel <i>surge tank</i>	41
16.	Diseño físico del IOP-2.....	42
17.	Iconos de pantalla	43

TABLAS

I.	Transmisores de presión	12
II.	Transmisores de temperatura	12
III.	Transmisores de flujo	13
IV.	Transmisores y switch de nivel	13
V.	Cálculo de variabilidad.....	28
VI.	Especificaciones de motor eléctrico.....	32
VII.	Especificaciones variador de frecuencia	33
VIII.	Datos de operación.....	34
IX.	Equivalencia entre caudal y frecuencia.....	35
X.	Motor eléctrico de bomba de agua.....	39
XI.	Precios de equipos	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
Ph	Fases
FT	Flow transmitter
GPM	Galones por minuto
°F	Grados Fahrenheit
Hz	Hertz
LT	<i>Level transmitter</i>
PSI	Libra por pulgada cuadrada (<i>pound square inch</i>)
MSCFPD	<i>Mile standard cubic feet per day</i>
MMSCFPD	<i>Million standard cubic feet per day</i>
PPM	Partes por millón
%	Porcentaje
PT	<i>Pressure transmitter</i>
IN H₂O	Pulgadas de agua (<i>inch</i>)
SCF	<i>Standard cubic feet</i>
SLH	<i>Switch level high</i>
SLL	<i>Switch level low</i>
TT	<i>Temperature transmitter</i>
V	Voltaje
VAC	Voltaje de corriente alterna
VDC	Voltaje de corriente directa

GLOSARIO

Amina	Solvente químico que se utiliza para el proceso de endulzamiento.
ANSI	<i>American National Standards Institute.</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing.</i>
Endulzamiento	Proceso para extraer los componentes ácidos del gas natural.
ERP	<i>Enterprise Resource Planning.</i>
Gas dulce	Gas natural al que se le han extraído los componentes ácidos.
Gas natural	Mezcla homogénea en proporciones variables de hidrocarburos parafínicos.
ISA	<i>International Society of Automation.</i>
MDEA	Metildietanolamina.
MES	<i>Manufacturing Execution System.</i>

OAGi	<i>Open Applications Group, Inc.</i>
RS232	Interfaz para el intercambio de datos binarios.
SCADA	<i>Supervisory control and data acquisition.</i> Software para ordenadores que permite el control y monitoreo de procesos industriales.
Síncrono	Los motores son llamados así cuando la velocidad del rotor y el campo magnético del estator es igual.
UML	<i>Unified Modeling Language.</i>

RESUMEN

En este trabajo se explica brevemente lo que es el estándar ISA-95 y como puede ayudar en la industria para la optimización de procesos, además proporciona un modelo genérico para adaptarlo a las necesidades o exigencias en el proceso, y así visualizar las áreas vulnerables a tratar.

El estándar es aplicado a una planta de endulzamiento de gas, la cual el proceso es eliminar los componentes ácidos del gas natural proveniente de los pozos petroleros, permitiendo su consumo en moto-generadores. La mayoría de la planta solamente es monitoreada, pero no hay un control automatizado; entonces al implementar ISA-95 se puede visualizar cuales son las áreas críticas para automatizar y garantizar la calidad del gas dulce.

Al implementar el modelo en la planta se pudo determinar que la mezcla de amino es parte importante para mantener la calidad del gas dulce, pero su suministro no está automatizado y esto provoca pérdidas. Así que para ser eficientes y reducir costos, se decidió que solo era necesario automatizar el bombeo de la mezcla de amino y el nivel del tanque de suministro para controlar su concentración.

Para la automatización se utiliza la señal de monitoreo y se propone la implementación de un variador de frecuencia en un sistema de lazo abierto, garantizando el control de bombeo de la mezcla de amino, mientras que con un sistema sencillo de lazo cerrado se garantiza el control del nivel y la concentración de amino en el tanque de suministro.

OBJETIVOS

General

Proponer una solución adecuada utilizando la instrumentación y estándares necesarios para garantizar que la planta de endulzamiento de gas produzca un producto de calidad y se mantenga en esos parámetros de trabajo.

Específicos

1. Identificar las áreas vulnerables implementando el estándar.
2. Automatizar las áreas vulnerables en planta de endulzamiento de gas.
3. Proponer sistemas eficientes y económicos para la automatización.
4. Garantizar la calidad del gas.

INTRODUCCIÓN

En el campo petrolero ubicado en el municipio de San Andrés del departamento de Petén, tienen una planta de endulzamiento de gas la cual genera un gran ahorro para la empresa, porque se utiliza para generar el combustible que se consume en varios moto-generadores, pero tiene algunos inconvenientes como los pocos parámetros que se leen para determinar la calidad del gas y la instrumentación no actualizada que se utiliza, esto puede llevar a una deficiencia en la operación de los moto-generadores o a la falla de los mismos.

Para abordar estos problemas se recurre a los estándares ISA-95, los cuales tiene varios modelos para aplicarlos a cualquier proceso según lo que se necesite mejorar y para esto es necesario actualizar la instrumentación necesaria utilizando tecnología inteligente, para realizar monitoreos y calibraciones a una distancia segura para el personal.

Con esto se espera mejorar el control del proceso por parte de la instrumentación utilizando la información disponible, garantizando una buena eficiencia en el funcionamiento de los equipos que utilizan el gas para su funcionamiento y al mismo tiempo evitar pérdidas de materiales que se utilizan para el endulzamiento de gas.

1. ESTÁNDAR ISA-95

Es un estándar internacional que ayuda a la integración de los sistemas empresariales y los sistemas de control. Fue desarrollado por ISA (*International Society of Automation*) y se utiliza para el intercambio de información entre la planificación de recursos de la empresa (ERP, *Enterprise Resource Planning*) y los sistemas de ejecución de manufactura (MES, *Manufacturing Execution System*) (Scholten, 2007).

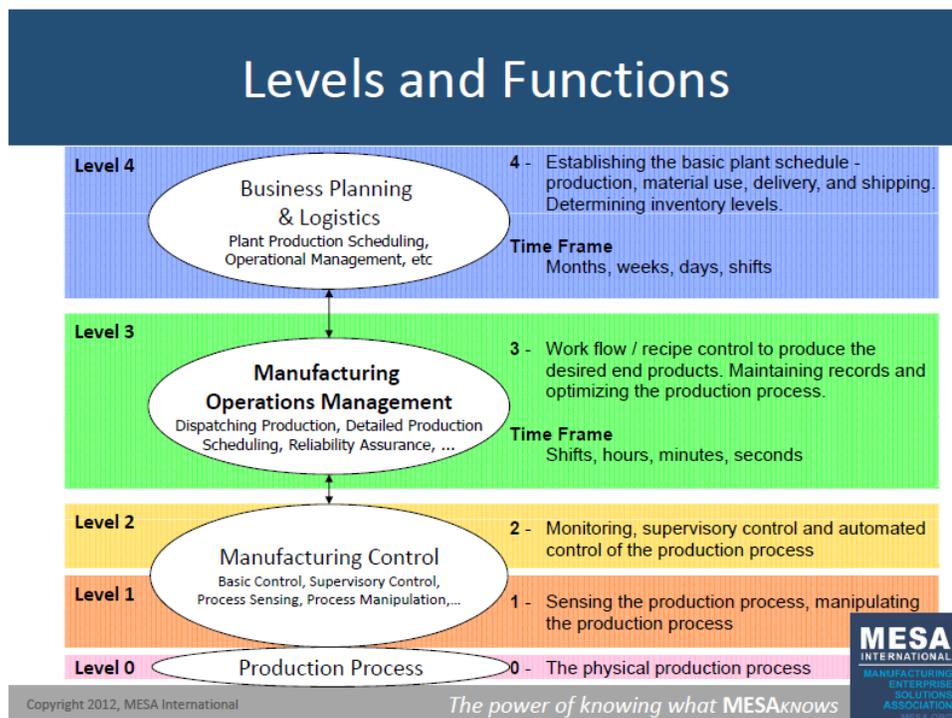
Contiene modelos y terminología que se utilizan para determinar qué información se debe intercambiar entre las diferentes funciones empresariales (compras, ventas, finanzas, logística, mercadeo) y los sistemas de control de manufactura (producción, inventarios, mantenimiento y calidad), basados en el concepto CIM (*Computer Integrated Manufacturing*), proporcionan una organización jerárquica que se observa en la figura 1 (ANSI/ISA-95.00.01, 2010).

La organización jerárquica se divide en los siguientes niveles:

- Nivel 0: define los procesos físicos actuales.
- Nivel 1: define las actividades involucradas en sensado y manipulación de los procesos físicos.
- Nivel 2: define las actividades de monitoreo y control de los procesos físicos.
- Nivel 3: define las actividades del flujo de trabajo para producir el producto final deseado.

- Nivel 4: define las actividades relacionadas al negocio necesarias para gestionar una organización de manufactura.

Figura 1. Organización jerárquica



Fuente: Practical applications of the ISA 95 standard. http://web-material3.yokogawa.com/document_11744.pdf. Consulta: 15 de marzo de 2017.

Las actividades a incluir en los niveles 3, 2 o 1 están directamente involucradas en manufactura e incluyen información sobre personal, equipos o material y cumplen con cualquiera de las siguientes condiciones:

- La actividad es crítica para la seguridad de la planta.
- La actividad es crítica para la fiabilidad de la planta.
- La actividad es crítica para la eficiencia de la planta.
- La actividad es crítica para la calidad del producto.

- La actividad es crítica para mantener el cumplimiento normativo.

El intercambio de información se realiza entre los niveles 4 y 3, donde la información de negocios como la planificación de producción de la planta, la gestión de los negocios, entre otros, se encuentran en el nivel 4, mientras que en el nivel 3 se tienen las operaciones de manufactura y la información de control del área de supervisión, planes de producción, fiabilidad, garantía, entre otros.

Los puntos a tomar en cuenta en el intercambio son:

- Definición de los recursos como el personal, equipo y material.
- Capacidad de producción que está disponible para usar.
- Definición de producto como hacer el producto.
- Planeación de producción que hacer y usar.
- Desempeño de producción que fue hecho y usado.

El estándar ISA-95, cuenta con tres áreas principales:

- Modelos de intercambio de información entre los sistemas de negocio y los de manufactura. Parte 1, 2 y 5.
- Modelo de actividades en las operaciones de manufactura. Parte 3.
- Modelo de intercambio de información entre sistemas de operación de manufactura. Parte 4 (Brandl, 2012).

1.1. Partes del estándar ISA-95.

El estándar ISA-95 consta de cinco partes. La parte 1, consta de terminología estándar y la definición de modelos de objetos que pueden ser

utilizados para decidir qué información deber ser intercambiada. Los modelos y terminología presentados en este estándar enfatizan las buenas prácticas de integración de los sistemas de control con el sistema empresarial durante todo el ciclo de vida de los sistemas. Se puede aplicar independientemente del grado de automatización (ANSI/ISA-95.00.01, 2010).

La parte 2 consta de atributos para cada objeto que se define en la parte 1. Los objetos y los atributos de la parte 2 se pueden utilizar para el intercambio de información entre sistemas diferentes, pero estos objetos y atributos también se pueden utilizar como base para bases de datos relacionales. También en conjunto con la parte 1 especifica el contenido genérico de interfaz entre las funciones de control de manufactura y otras funciones empresariales. La interfaz considerada es entre los sistemas de manufactura de nivel 3 y los sistemas de negocio de nivel 4 que se presentan en el modelo jerárquico (ANSI/ISA-95.00.02, 2010).

La parte 3 se centra en las funciones y actividades en el nivel 3 o capa Producción/MES (calidad, mantenimiento, inventarios y producción). Define las actividades de producción y los flujos de información. Proporciona modelos de referencia para las actividades de producción, actividades de calidad, actividades de mantenimiento y actividades de inventario. El alcance se limita a:

- Un modelo de las actividades asociadas con la gestión de operaciones de manufactura, funciones de nivel 3.
- Identificación de algunos de los datos intercambiados entre las actividades de nivel 3 (ANSI/ISA-95.00.03, 2013).

La parte 4 titulada: modelos de objetos y atributos de la gestión de las operaciones de manufactura, define los modelos de objetos que determinan qué

información es intercambiada entre las actividades MES (que son definidas en la parte 3). Los modelos y atributos de la parte 4 son la base para el diseño y la implementación de estándares de interfaz y aseguran los lapsos flexibles de cooperación e intercambio de información entre las diferentes actividades MES (ANSI/ISA-95.00.04, 2012).

La parte 5 se basa en el uso de modelos abstractos previamente definidos en las partes 1 y 2, combinados con los verbos OAGi para definir modelos de transacción para el intercambio de información. Las transacciones se producen en todos los niveles dentro de la empresa y entre los socios empresariales, y están relacionadas con las actividades requeridas y reales, pero el enfoque es la interfaz entre los sistemas empresariales / negocios y los sistemas de manufactura. Se introducen modelos que proporcionan descripciones de las transacciones y explicaciones del comportamiento de procesamiento de transacciones requeridas (ANSI/ISA-95.00.05, 2013).

2. EVALUACIÓN

Para iniciar la implementación de ISA-95 se debe evaluar las condiciones en el proceso al cual se aplicará el estándar; como los materiales que utiliza para la producción, cuanto es su consumo de materiales, la capacidad de producción, en cuantas secciones se divide todo el proceso, cuantos niveles de la organización jerárquica están presentes y si la instrumentación es la adecuada para la implementación.

2.1. Descripción del proceso

El proceso a evaluar es en una planta de endulzamiento de gas natural que se encuentra en el campo de extracción de petróleo Xan.

El endulzamiento de gas natural es el proceso para remover los componentes ácidos como sulfuro de hidrógeno (H_2S), dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de carbonillo (COS) disulfuro de carbono (CS_2) del gas natural, por medio de procesos de absorción, a través de solventes químicos (amina), físicos y mixtos.

El endulzamiento con amina consiste en una reacción química de los componentes ácidos y la amina, el producto de esta reacción produce compuestos inestables, pero al aplicarles calor o disminución de la presión se pueden liberar los gases ácidos y regenerar la amina para utilizarlo nuevamente.

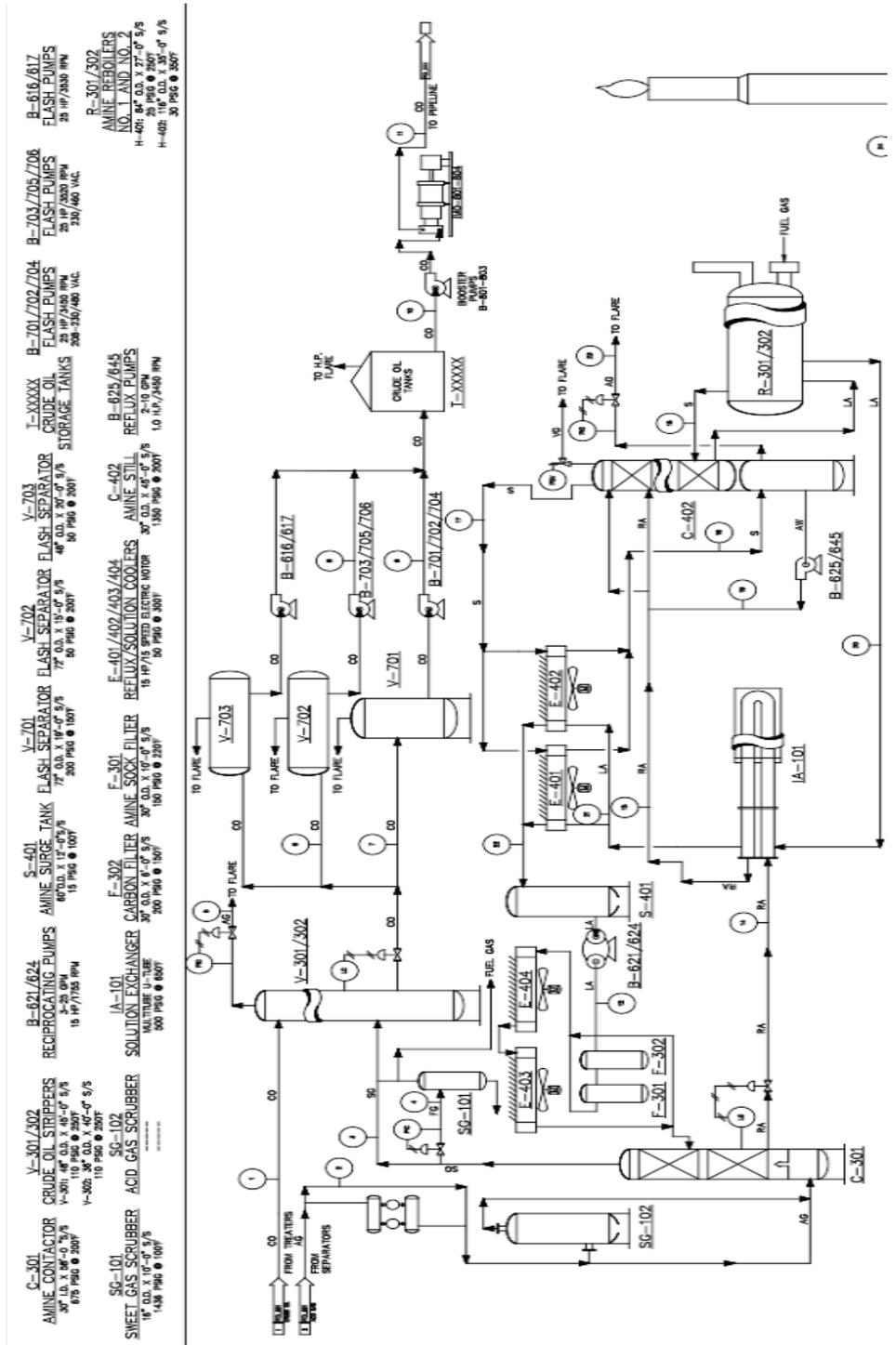
El proceso de endulzamiento que se utiliza en la planta del campo Xan es a través de amina, el gas dulce producido se utiliza solo para consumo propio en moto-generadores que hay en el campamento, algunos pozos y en la planta de generación, obteniendo un ahorro significativo para la empresa, por lo que es indispensable mantener una calidad óptima y eficiente.

2.2. Descripción de la planta de endulzamiento de gas con amina

A continuación se describe la función de cada equipo de la planta de endulzamiento de gas con aminas según el procedimiento que tienen en campo Xan. En la figura 2 se aprecia el diagrama de proceso y los equipos.

- *Scrubber*: es donde se retiran los componentes líquidos o condensados que puede llevar el gas. Se encuentran situados en la entrada y salida del contactor.
- *Contactor*: es donde se produce la absorción del gas ácido por medio de la solución acuosa de aminas, el gas ingresa por la parte inferior y al ascender entra en contacto con la solución de amina pobre que ingresa por la parte superior. En la cabeza del contactor se obtiene el gas endulzado, sin H₂S. El amina rico sale por la parte baja y pasa por filtros de carbón activado
- *Intercambiador amina/amina*: aquí es donde la amina rica se calienta por la amina pobre o regenerada. La amina rica va hacia el regenerador y la pobre hacia la primera estación de *air cooler*.

Figura 2. Diagrama de planta de endulzamiento de gas



Fuente: Perenco Guatemala Limited.

- **Regenerador:** es donde se remueve el gas ácido de la solución de amina; la amina rica ingresa por la parte superior y al descender entra en contacto con el vapor de agua que se produce en el *reboiler*, regenerando la solución para su uso nuevamente.
- **Reboiler:** es donde se produce el vapor y al mismo tiempo se calienta la amina pobre que proviene de la regeneradora para luego dirigirse al intercambiador amina-amina.
- **Air cooler:** hay dos estaciones, en la primera se enfría el vapor que contiene gas ácido y se envía al acumulador de reflujo, al igual que el amina pobre que proviene del intercambiador amina-amina, se enfría y es enviado al *surge tank*; en la segunda estación se vuelve a enfriar el amina pobre que proviene del *surge tank*, después de haber pasado por filtros de carbón activado, y se envía hacia el contactor, cerrando el ciclo.
- **Acumulador de reflujo:** es donde el vapor es condensado y lo envía de regreso a la cabeza del regenerador, mientras que el gas es enviado a una torre de quema.
- **Surge tank:** es donde se realiza la solución acuosa de amina pobre y agua suavizada.

2.3. Parámetros del proceso

La información que se presenta a continuación son los rangos y datos proporcionados por la empresa de producción y operación que se utilizan para operar la planta adecuadamente.

En el campo se producen de 2,0 a 2,115 MMSCFPD de gas natural que contiene un 40 % de H₂S y 22 % de CO₂. La solución acuosa es de MDEA (meltildietalonamina) y se debe mantener una concentración de amina entre 40 y 42 %, con un caudal en un rango de 60 GPM hasta 75 GPM. El objetivo es producir 900 000 SCF por día de gas dulce con un máximo de 50 ppm de H₂S sin condensados.

En el contactor la temperatura del gas ácido debe estar entre 75 y 105 °F; la temperatura del amina pobre se debe mantener entre 10 y 15 °F arriba de la temperatura del gas ácido, ajustar siempre controlando que las ppm no se incrementen en la salida; la presión debe estar entre 55 y 60 PSI; por último, mantener un nivel visible de líquido.

En regenerador y acumulador de reflujo, la temperatura del vapor en la cabeza del regenerador se debe mantener entre 190 y 220 °F, la presión del acumulador de flujo debe ser mantenida entre 11 y 13 PSI, mantener un porcentaje de amina igual o menor a 0,5 %.

En *reboiler* la temperatura debe mantenerse entre 248 y 251 °F, sin sobrepasar los 251 °F para no degradar la amina.

En el intercambiador amina-amina; la amina pobre en la entrada se debe mantener entre 248 y 251 °F y en su salida entre 180 y 190 °F, el amina rico, en la entrada debe mantenerse entre 144 y 160 °F y en la salida entre 168 y 178 °F.

2.4. Instrumentación

A continuación se detalla que tipos de factores son los que se miden con la instrumentación y en donde están ubicados en cada equipo.

- Presión: la unidad de medida utilizada es el PSI el tipo de señal es analógica y el tipo de variable es de 2 hilos.

Tabla I. Transmisores de presión

Asignación de dispositivos	Descripción
PT-040	Entrada gas ácido C401
PT-041	Acumulador de reflujo B402
PT-042	Destilador C402
PT-043	<i>Reboiler</i> R301
PT-072	Salida contactor C401
PT-076	Entrada de gas dulce
PT-079	Cabeza regenerador

Fuente: elaboración propia.

- Temperatura: la unidad de medida es el Fahrenheit (F), el tipo de señal analógica y el tipo de variable es de 2 hilos.

Tabla II. Transmisores de temperatura

Asignación de dispositivo	Descripción
TT-007	Entrada amina pobre a <i>surge tank</i>
TT-017	Gas ácido contactor C401
TT-018	Acumulador reflujo B402
TT-019	Destilador C402
TT-020	Salida amina pobre <i>reboiler</i>
TT-021	Entrada amina rico a C402
TT-022	Salida amina rico de C401
TT-023	Salida regenerador

Continuación de la tabla II.

TT-024	Salida amina pobre de intercambiador
TT-025	<i>Reboiler</i>
TT-027	Salida gas dulce a C401
TT-031	Amina pobre entrada a contactor
TT-032	Cabeza regenerador

Fuente: elaboración propia.

- Flujo: Hay 3 transmisores y cada uno tiene diferente unidad de medida, ver tabla III; el tipo de señal es analógica y el tipo de variable es de 2 hilos.

Tabla III. **Transmisores de flujo**

Asignación de dispositivo	Descripción	Unidad de medida
FT-001	Flujo amina	GPM
FT-002	Presión diferencial de gas dulce	IN H ₂ O
FT-003	Entrada turbina gas a contactor	MSCFPD

Fuente: elaboración propia.

- Nivel: Hay instalados de dos tipos de señal, 2 transmisores analógicos con unidad de medida de IN H₂O y 5 de señal discreta de 24 VDC, todos son de 2 hilos.

Tabla IV. **Transmisores y switch de nivel**

Asignación de dispositivo	Descripción
LT-002	Nivel <i>surge tank</i> B402
LT-003	Nivel acumulador de reflujo
SLH-28	Nivel alto <i>scrubber</i> gas SG-102
SLL-33	Nivel bajo contactor amina C401
SLH-34	Nivel alto contactor amina C401

Continuación de tabla IV.

SLL-37	Nivel bajo reboiler
SLH-40	Nivel alto surge tank B401

Fuente: elaboración propia.

3. IMPLEMENTACIÓN DE ESTANDAR ISA-95

En el estándar ISA-95 hay varios modelos para aplicarse en un proceso, para saber cuál de todos utilizar se debe primero conocer el proceso y así determinar cuáles áreas son las más importantes y en donde se debe tener un mayor enfoque.

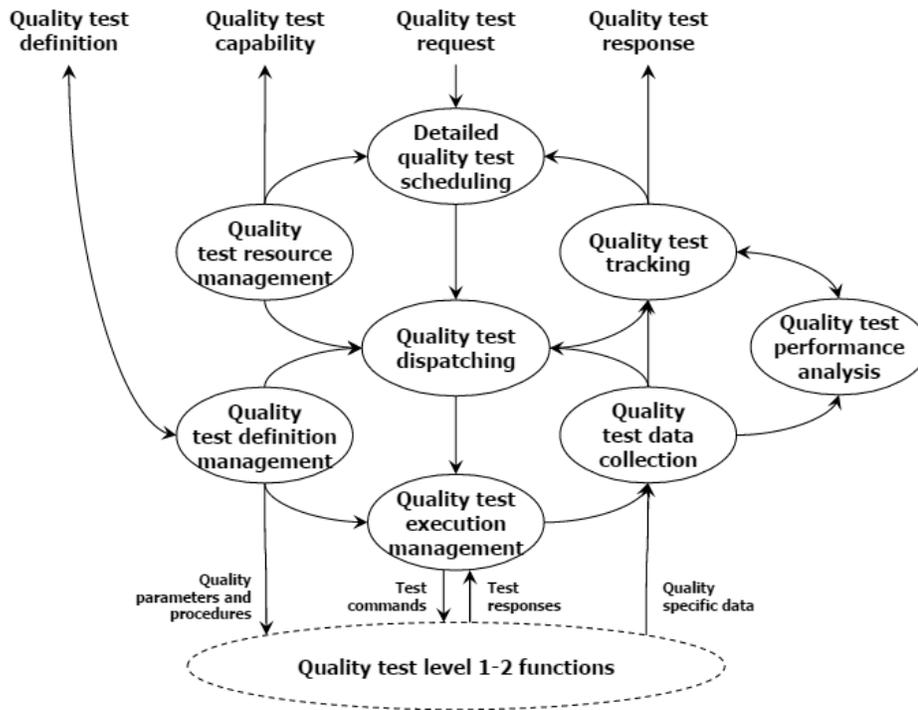
Este trabajo está enfocado en el proceso de endulzamiento de gas que se desarrolló en el capítulo anterior, se conoce cada etapa del proceso y que elementos son los necesarios para la producción.

Como la planta ya tiene una cuota definida de producción, no puede ser alterada al menos que se modifiquen los equipos, y esto sería una mayor inversión y cambio drástico en la forma de operación; por eso el trabajo se centrará en la calidad del gas dulce para mantenerlo dentro de los parámetros adecuados y sea aprovechado eficientemente en los moto-generadores.

Como el desarrollo del trabajo está centrado en la calidad del gas dulce, se utiliza el modelo de actividades para operación de pruebas de calidad de la parte 3 de ISA-95, ver figura 3.

La gestión de operación de calidad es definida como la recopilación de actividades las cuales coordinan, dirigen y rastrean las funciones de medición y reporte de calidad. El alcance de la gestión de operaciones de calidad incluye tanto las operaciones de calidad como la gestión de las mismas para garantizar la calidad de los productos intermedios y finales (ANSI/ISA-95.00.03, 2013).

Figura 3. **Modelo de actividades**



Fuente: ANSI/ISA-95.00.03.2013. Enterprise-Control System Integration Part 3: Activity Models of Manufacturing Operations Management. p. 59.

Según ANSI/ISA-95.00.03 el modelo mostrado arriba define las actividades y como se relacionan las operaciones para inspeccionar y realizar pruebas. Los óvalos indican las actividades que son las funciones principales y las líneas con punta de flecha indican los flujos de información entre las actividades.

3.1. Intercambio de información

A continuación se describen los elementos en el modelo utilizados para intercambiar información entre los niveles 1, 2, 3 y 4, según ANSI/ISA-95.00.03.

- *Quality test definition*: son las especificaciones de pruebas de materiales, equipos y ambiente. Puede incluir métodos de control usados en un laboratorio independiente para asegurar la credibilidad de los resultados. También se incluyen calibración de equipos y el uso de estándares para la verificación de equipos.
- *Quality test capability*: es la combinación de los recursos requeridos que contienen información sobre el estado de los recursos, quiere decir si ya está comprometido, disponible o inalcanzable. También incluye la capacidad de los recursos como la calificación, entrenamiento, experiencia y disciplina del personal, pruebas de equipos y materiales.
- *Quality test request*: son las peticiones para realizar actividades de pruebas en materiales o equipos, esto incluye peticiones para inspección de materia prima, productos intermedios y finales, y peticiones de pruebas para calibración de equipos.
- *Quality test response*: son los resultados de las actividades de pruebas que se solicitaron en *quality test request*, los resultados pueden ser de aprobado/no aprobado o alguna medida relacionada a la prueba.
- *Quality parameters and procedures*: son las instrucciones enviadas al nivel 2 o 1, se incluyen los procedimientos de operación estándar y los cálculos que se utilizarán.
- *Test commands*: es la petición de información enviada al nivel 2 o 1, incluye el contexto sobre la prueba que será ejecutada y los comandos para arrancar el instrumento.
- *Test responses*: es la información recibida del nivel 2 o 1 como respuesta al *test commands*, este podría ser el resultado de la prueba o un mensaje del estado del instrumento.
- *Quality-specific data*: es información recibida del nivel 2 o 1, esta información puede incluir datos del proceso en conjunto con medidas o cálculos del mismo.

3.1.1. Aplicación de conceptos en planta de endulzamiento de gas

La calidad del gas dulce y la mezcla acuosa de amina son lo más importante que se debe controlar; con el gas dulce se mide solamente la cantidad de H₂S, mientras que en la mezcla acuosa de amina se mide el porcentaje de peso en el sistema y la cantidad de gas ácido que contiene, con esto se obtienen los siguientes datos que es la información intercambiada entre los niveles.

3.1.1.1. *Quality test definition*

Para determinar la medida adecuada de H₂S en el gas dulce para la planta, se basan en las especificaciones de combustible en los manuales de los motores que lo consumen, en los motores Waukesha determinan un nivel de 0,1% (1 000 ppm) y por experiencia a 500 ppm empezaban a detonar, mientras que en los motores Caterpillar determinan que el rango máximo es de 160 a 180 ppm y por experiencia a 200 ppm detonaban; así que en la planta se fijó un valor de 150 ppm como máximo.

Con respecto a la mezcla acuosa de amina, el porcentaje de peso actualmente es de 41 % como mínimo, según el diseño de la planta y el volumen de producción que hay actualmente; y el porcentaje de gas ácido debe ser nulo. Estos procedimientos están basados en las Normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

3.1.1.2. *Quality test capability*

En los equipos en cada mantenimiento se realizan mediciones de espesor a las estructuras metálicas y evaluaciones visuales a los demás componentes para determinar si hay puntos de corrosión severos.

3.1.1.3. *Quality test request y quality test response*

En el gas dulce las mediciones de H₂S se realizan en la línea de producción 3 veces al día y el dato que se obtiene es un valor en ppm. Además cuando se presentan problemas en los motores debido al gas, entonces se sacan muestras del gas dulce y ácido para ser enviadas a un laboratorio externo, esta prueba se realiza solo cuando es muy necesario debido que es bastante costoso.

El detector que se utiliza para la medición de H₂S se compara con uno personal cada mes para determinar si es necesario calibrarlo.

En la mezcla acuosa de amina, se sacan muestras diarias para realizar los análisis en el laboratorio del campo. Los dos resultados son valores de porcentaje que se calculan según el análisis y fórmulas utilizadas en el laboratorio.

3.1.1.4. *Quality parameters and procedures*

Para mantener la calidad hay varios procedimientos elaborados por la empresa en conjunto con los operadores y laboratoristas, que determinan la forma correcta de operación y realización de análisis. Algunos datos en los procedimientos están basados en las Normas ASTM y otros son por

experiencia. A continuación se muestra el título de los procedimientos que utilizan en la empresa.

- OPS-XAN-102 operación de la planta de endulzamiento de gas del campo.
- OPS-XAN-702 determinación del porcentaje en peso de la solución de la amina.
- OPS-XAN-704 determinación de gas ácido total (H₂S y CO₂).

3.1.1.5. *Test commands, test response y quality-specific data*

En el gas dulce se utiliza un detector de H₂S para determinar la cantidad que contiene, se encuentra instalado en la línea de proceso dentro de una cámara con visualización, el resultado es un valor dado por el detector cada vez que se llena la cámara con gas.

Para la mezcla acuosa de amina hay una lectura de nivel en un tanque y solo se utiliza para determinar si hay que agregar agua a la mezcla o no. No hay un sensor que mida directamente la amina.

La demás información que se recibe es de los sensores de temperatura y presión en el proceso, que es utilizada para garantizar la producción de gas dulce en los parámetros de consumo y la eficiente utilización de amina.

3.2. Funciones principales

Son todas las actividades que se realizarán para llevar a cabo las pruebas de calidad en personal, equipos, materiales y producto final. A continuación se

describirán las actividades que serán útiles para aplicarlos en la planta de endulzamiento.

3.2.1. *Quality test definition management*

Está definida como el conjunto de actividades que define y gestiona las calificaciones del personal, los procedimientos de pruebas de calidad y las instrucciones de trabajo que se deben llevar a cabo para realizar las pruebas de calidad (ANSI/ISA-95.00.03, 2013).

Entre estas actividades se encuentran, las evaluaciones del personal laboratorista con respecto a los procedimientos, la revisión anual que se realiza a los procedimientos, los análisis diarios que se realizan a las muestras de la mezcla acuosa y el constante monitoreo en la línea de producción del nivel de H₂S del gas dulce.

3.2.2. *Quality test resource management*

Está definida como el conjunto de actividades que gestionan los recursos y la relación entre los recursos necesarios para la realización de las pruebas de calidad (ANSI/ISA-95.00.03, 2013).

Se puede implementar que cada semana se realice una auditoría de los recursos que hay en existencia y evaluar si es necesario el pedido de más, también revisar cada mes las condiciones y calibraciones de los equipos que se utilizan para realizar las pruebas, y se puede incluir que cada 6 meses a un operador de la planta se le instruya sobre los procedimientos para realizar las pruebas de calidad.

3.2.3. *Detailed quality test scheduling*

Se define como el conjunto de actividades que planean y programan los recursos para las tareas de calidad. Se toma en cuenta la situación local y los recursos disponibles, así como la preparación necesaria para las pruebas (ANSI/ISA-95.00.03, 2013).

Estas actividades se realizarían cuando se detecta alguna anomalía en los resultados de las pruebas normales o se estén implementando nuevos recursos, equipos o procedimientos. En el caso de la mezcla acuosa de amina, sería necesario realizar tres pruebas al día por una semana y comparar los resultados con los datos del historial, luego seguir con dos pruebas al día por otra semana y continuar comparando, si son satisfactorios los resultados seguir la rutina de una prueba al día, si no son satisfactorios retomar la antigua rutina.

3.2.4. *Quality test despatching*

Está definida como el conjunto de actividades que asigna y envía órdenes de trabajo de calidad a los recursos apropiados como se identificaron en la programación y definición, también se comunica la prueba que debe ser ejecutada y los recursos que deben ser usados. Si algún recurso no fue asignado en la programación, se puede asignar en esta actividad (ANSI/ISA-95.00.03, 2013).

Para abarcar esta actividad sería necesario realizar reuniones semanales para revisar lo que se tiene programado e informar al personal, para asignarle específicamente el trabajo que debe realizar y con qué y cuántos recursos dispone para realizarlo.

3.2.5. **Quality test execution management**

Está definido como el conjunto de actividades que dirigen la realización de la prueba. Es donde se aseguran que los correctos recursos (materiales, equipo y personal) sean usados. También incluye la confirmación de que las pruebas se están realizando acorde a los estándares de calidad aceptados y que el producto puede ser liberado (ANSI/ISA-95.00.03, 2013).

Se utilizan diferentes términos de prueba. La primera es prueba *in-line*; es cuando la prueba se realiza en la línea de producción, generalmente es realizada por una máquina y los resultados son inmediatos. La segunda es prueba *at-line*; es cuando el producto sale de la línea de producción y el operador en línea realiza la evaluación, esto solo toma segundos o minutos permitiendo que el producto continúe rápidamente. Y por último está la prueba *off-line*; el producto sale de la línea de producción y el análisis se realiza en un laboratorio, esto toma más tiempo que una prueba *at-line* (ANSI/ISA-95.00.03, 2013).

En la planta de endulzamiento se llevan a cabo dos pruebas. La primera es *at-line* y se aplica en el gas dulce, el operador desvía un poco del flujo de gas dulce hacia una cámara para medir con un detector el nivel de H₂S, el resultado es un valor en ppm y el operador es el que decide si pasa o no la prueba, basado en los procedimientos de operación y los rangos adecuados que se han determinado.

La segunda prueba es *off-line* y se aplica en la mezcla acuosa de amina, se saca dos muestras, una es de amina rico proveniente del contactor y la segunda de amina pobre proveniente del regenerador, se llevan a un laboratorio para determinar el porcentaje de gas ácido (H₂S y CO₂) en cada una, y se saca

una tercera muestra, esta proviene del acumulador del reflujo y también se lleva a laboratorio donde evalúan la concentración (% en peso) de la solución y así determinar si hay pérdidas de amina.

3.2.6. *Quality test data collection*

Está definida como el conjunto de actividades que almacenan los resultados de las pruebas para luego ponerlos a disposición para su uso. Estos datos pueden ser ingresados manualmente o venir directamente de algún equipo (ANSI/ISA-95.00.03, 2013).

Se lleva registro de las pruebas que se realizan, son datos que se ingresan manual y diariamente. Las pruebas en el gas dulce son tomadas por el operador de planta y las pruebas en la mezcla acuosa de amina son tomadas por el laboratorista.

3.2.7. *Quality test tracking*

Está definido como el conjunto de actividades que une los resultados de las pruebas a las respuestas de prueba, enviando las respuestas y gestionando la información sobre la utilización de los recursos requeridos para realizar las pruebas. Se provee una retroalimentación de la calidad hacia los sistemas del nivel 3 y 4 (ANSI/ISA-95.00.03, 2013).

Se realizan reportes diarios con los datos registrados de las pruebas en el gas dulce y los análisis de las mezclas acuosas de amina. Se debería agregar un registro de los recursos utilizados, las cantidades de material que se utiliza para mantener los rangos de calidad y los intervalos de tiempo entre cada ajuste de parámetros.

3.2.8. *Quality test performance analysis*

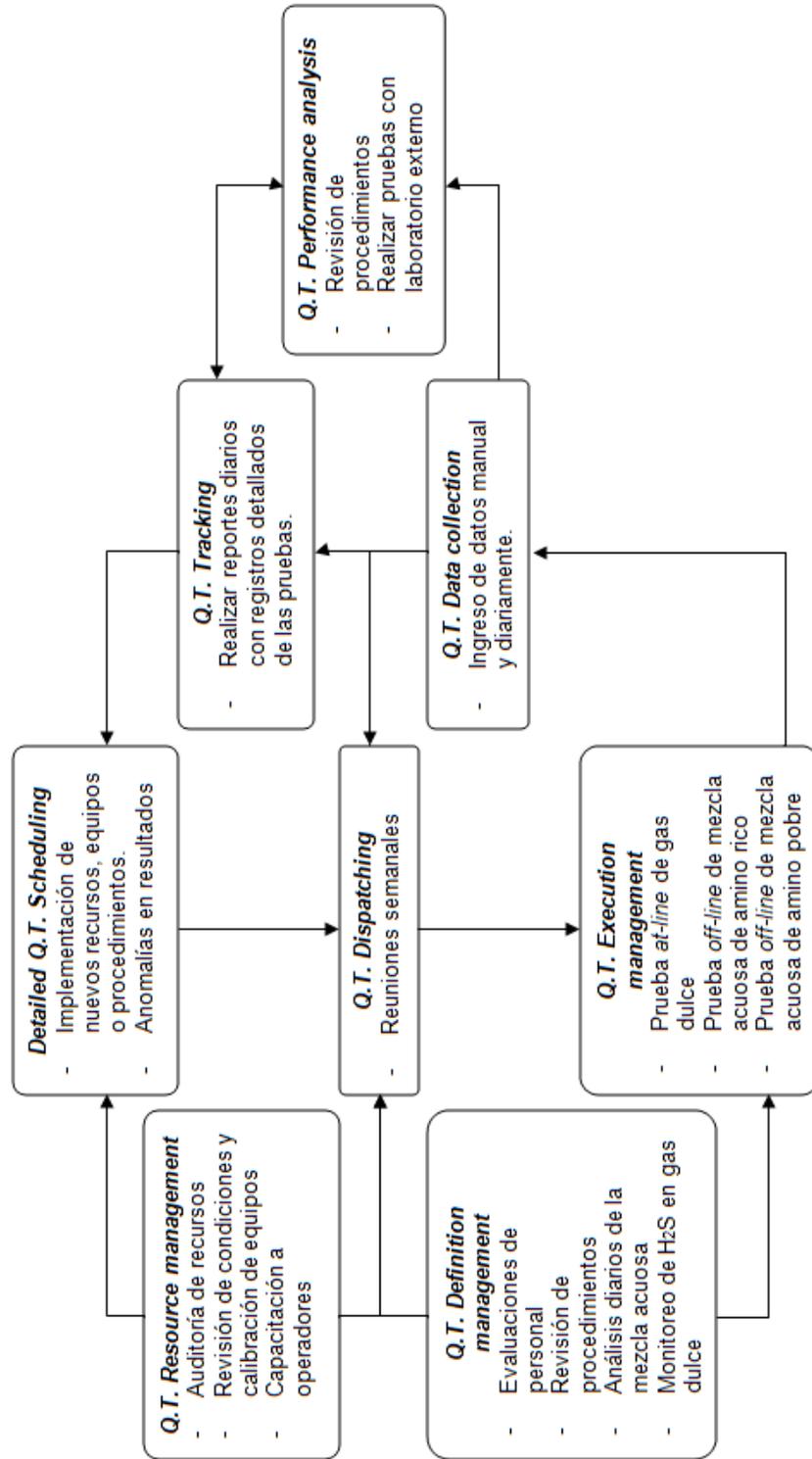
Se define como el conjunto de actividades que analizan los resultados de las pruebas de calidad y el rendimiento de las pruebas para determinar cómo mejorar la calidad del producto. Se incluyen los análisis de la variabilidad de calidad, los ciclos de tiempo, la utilización de recursos, la utilización de equipos y la eficiencia de los procedimientos (ANSI/ISA-95.00.03, 2013).

Una de las actividades que se realiza cada año es la revisión de los procedimientos para verificar que continúan cumpliendo los estándares en los que se basaron y si necesitan alguna mejora, además los resultados de las pruebas se registran y cada vez que hay problemas con los motores que consumen el gas se realizan análisis con un laboratorio externo, para comparar resultados y determinar si se necesita algún cambio en los métodos de pruebas o si se están realizando adecuadamente.

Con esta información se puede crear un modelo propio, especificando que actividades e información está involucrada en la planta de endulzamiento de gas y verificar cuales son los flujos de información entre cada uno. Ver figura 4.

Esto será la base para la implementación del estándar ISA-95 en la planta de endulzamiento y así realizar la integración correspondiente entre el sistema empresarial y el de producción.

Figura 4. Modelo de actividades para la planta de endulzamiento



Fuente: elaboración propia.

4. DESARROLLO DE LA AUTOMATIZACIÓN

Según lo estudiado con ISA-95 se detectaron varias áreas donde hay que optimizar por medio de la automatización para obtener mejores resultados y un control más eficiente.

El primer punto es determinar la variabilidad en la temperatura, presión, caudal de gas y calidad del gas para la torre contactora; luego ver la variabilidad en el caudal de amina pobre y como afecta a la calidad del gas dulce; por último, también ver la variabilidad del nivel de agua en el *surge tank* y que efecto tiene con la calidad del gas. Con los resultados que se obtengan se determinarán los controles PID necesarios para automatizar.

Para realizar estos cálculos se tomaron las lecturas de los datos mencionados y se realizarán tablas en Excel y sus respectivas gráficas de campana de Gauss.

4.1. Variabilidad

Para realizar los cálculos se tomó una muestra del registro digitalizado de los datos de la planta, los cuales se toman a cada 2 horas, la muestra es del 1 de enero de 2017 al 30 de junio de 2017, los resultados obtenidos se muestran en la tabla V.

Solo con observar los resultados se puede determinar que los parámetros en los cuáles se puede ajustar la desviación para que sea menor son en el caudal de gas ácido, gas dulce y las PPM del gas dulce. Pero consultando con

los operadores, el caudal de gas ácido está determinado por la capacidad de diseño de la planta, mientras que el caudal de gas dulce está determinado por la cantidad de equipos que estén consumiéndolo, así que son dos puntos donde no se tiene control.

Tabla V. **Cálculo de variabilidad**

	Presión contactora	Temp. Entrada amina pobre	Temp. Entrada gas ácido	Galonaje amina	Caudal gas ácido	PPM gas dulce	Caudal gas dulce	Nivel surge tank
Promedio	46,34	111,27	103,40	62,13	975,78	78,21	491,43	38,72
Desviación est.	2,23	7,00	8,49	2,23	81,26	30,14	57,24	7,37
Varianza	4,99	49,06	72,14	4,99	6 603,21	908,39	3 276,19	54,39
Máximo	51,00	132,00	128,00	68,00	1 180,00	376,00	766,00	106,00
Mínimo	30,00	78,00	78,00	58,00	410,00	23,00	190,00	20,00
Rango	21,00	54,00	50,00	10,00	770,00	353,00	576,00	86,00

Fuente: elaboración propia.

Ahora con respecto a las PPM del gas dulce se puede influir controlando el caudal de amino, el cual está relacionado con la presión de la torre contactora como se puede observar en los datos de la tabla V, estos dos parámetros son los que presentan la más baja desviación debido a que los operadores los mantienen controlado.

Como se puede observar en la tabla V y figuras 5 y 6, el caudal de amino y la presión de contactora son muy estables mientras la planta trabaja en condiciones normales pero el problema surge cuando esas condiciones son alteradas, por ejemplo que el clima cambie drásticamente u ocurra un arrastre de crudo hacia la torre, en esas condiciones no hay datos registrados pero los operadores comentaron que es cuando más se necesita el control de esos parámetros.

Figura 5. **Campana de Gauss - caudal de amina**



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Campana de Gauss - presión en torre contactora**



Fuente: elaboración propia.

Además mencionaron que lo más importante es no tener pérdidas de amina por el alto costo, entonces primero se trabajará con el caudal de amina porque solo está regulado por una válvula de retorno de forma manual, entonces cuando surge una emergencia si el operador no reacciona a tiempo podría provocar arrastre de amina por la salida de gas dulce, lo que conlleva a

pérdidas del material y quema de amina en los moto-generadores, provocando detonaciones en el equipo y dañarlo.

Otro punto a trabajar es mantener el nivel de agua en el *surge tank*, porque no se tiene un nivel estandarizado y cada operador utiliza un rango diferente. Además esto afecta los resultados de la concentración de amina, los cuales son muy buenos cuando el nivel está bajo, pero un nivel bajo no es recomendable para la operación y cuando agregan agua lo hacen en grandes cantidades, obteniendo un nivel alto que es bueno para la operación pero degrada la concentración de amina, entonces se buscará un balance para estandarizar el nivel.

4.2. Desarrollo de sistemas de control

Un sistema de control de lazo abierto es cuando la salida no tiene efecto sobre la acción de control. La salida no se mide para ser retroalimentada y compararla con la entrada.

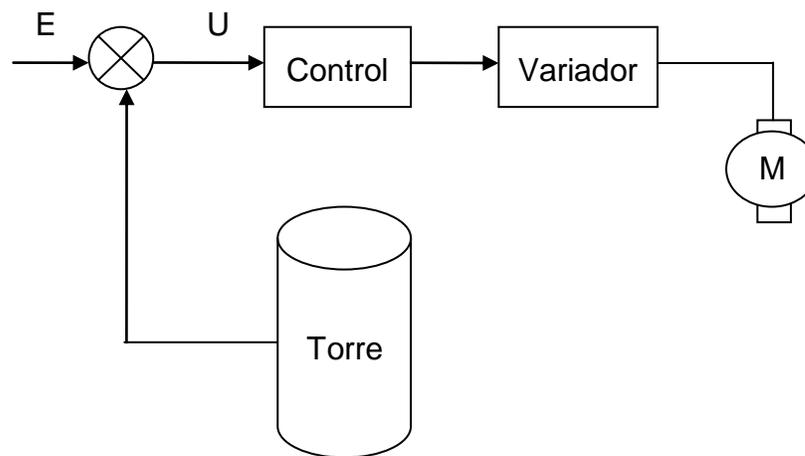
4.2.1. Caudal de amina

Actualmente el problema que tienen es cuando la presión en la torre disminuye provoca que el caudal aumente ocasionando el arrastre de amina por la salida de gas dulce, entonces el funcionamiento del sistema será el siguiente: cuando la presión en la torre contactora disminuya también disminuirá el caudal, esto quiere decir, que será un sistema de lazo abierto.

Los valores que se utilizarán de base son 45 PSI para la presión de la torre contactora y 60 galones para el caudal de amina, el control debe ser proporcional, esto quiere decir, si la presión disminuye también lo debe hacer el

caudal. Los rangos de operación serán si la presión opera entre 50 y 45 PSI el caudal se aumentará a 63 galones, mientras si la presión opera entre 35 y 40 PSI el caudal se disminuirá a 55 galones.

Figura 7. **Esquema de bloques para el caudal de amina**



Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura 7, se utilizará un variador de frecuencia para regular la velocidad del motor eléctrico de la bomba de amina y así modificar el caudal a las condiciones que se desea. Todo dependerá del algoritmo en el bloque control.

Un variador de frecuencia es un dispositivo electrónico capaz de controlar motores eléctricos de inducción por medio de la frecuencia de alimentación suministrada.

La propuesta que se proporcionará será utilizar la señal de presión y de caudal de amina que van hacia el sistema SCADA que utilizan, se realizará el algoritmo de control base y los diagramas de conexiones eléctricas hacia el

variador de frecuencia para que el instrumentista o técnico del sistema SCADA se encargue de acondicionarlo a la programación adecuada.

El trabajo se centrará en el funcionamiento del variador para disminuir el caudal de amino cuando la presión en la torre contactora disminuya y restablecerlo cuando se den las condiciones, las cuestiones de arranque y frenado no se tomarán en cuenta en este trabajo.

4.2.1.1. Conexiones eléctricas

Se utilizan dos motores eléctricos síncronos trifásicos de los cuales siempre solo trabaja uno a la vez, y cuando es necesario ingresar el motor en stand-by, se debe apagar primero el que se encuentra trabajando.

Tabla VI. **Especificaciones de motor eléctrico**

Salida	40 HP / 30 KW
Polos	2
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	230 / 460 V
Fases	3
Amperaje	45,7
RPM	3 600

Fuente: elaboración propia.

Debido a las especificaciones de los motores eléctricos que tienen instalados, las condiciones de operación de los mismos y la versatilidad del variador para ser monitoreado, se utilizará el variador de frecuencia SINAMICS G120 de Siemens.

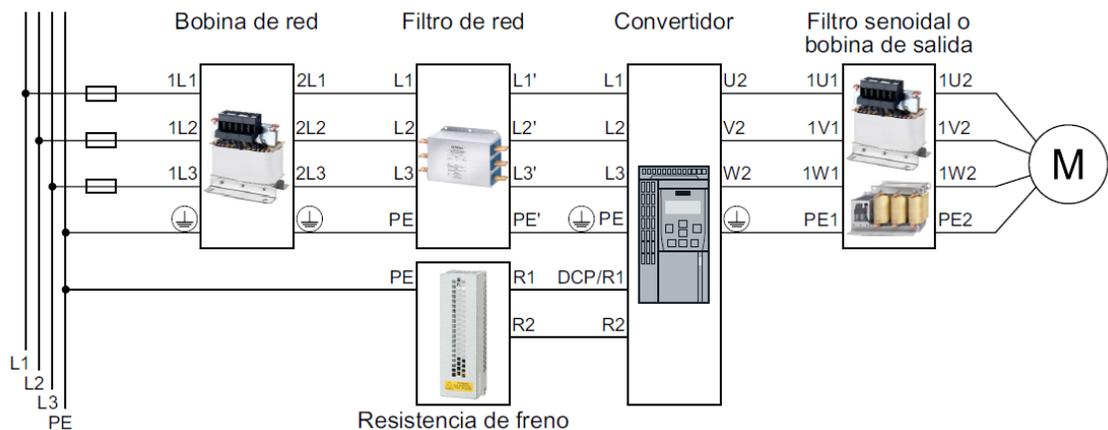
Tabla VII. **Especificaciones variador de frecuencia**

Tamaño	FSD
Potencia	37 KW
Corriente	68 A

Fuente: elaboración propia.

Las conexiones eléctricas generales entre el variador y el motor serían como las que se observan a continuación.

Figura 8. **Conexión del convertidor y sus componentes opcionales**



Fuente: SIEMENS. Instrucciones de servicios SINAMICS G120 Convertidores de baja tensión Modelos incorporables y para montaje mural con Control Units CU230P-2. p. 91.

De los componentes adicionales que se muestran no se utilizará la resistencia de frenado porque los motores trabajan continuamente; además el fluido no es demasiado viscoso para perjudicar al motor si se detiene inmediatamente.

También no se utilizará la bobina y filtro de red porque el variador seleccionado no lo necesita y la bobina de salida ya lo tiene integrado.

Todos estos componentes estarán instalados en un panel situado en el mismo cuarto donde se encuentran los paneles de PLC que obtiene las lecturas de los sensores de interés y se comunican con el computador central.

El cableado de los motores eléctricos debe reubicarse hacia el panel del variador y también se debe instalar cableado de comunicación RS485 entre el PLC y el variador.

4.2.1.2. Bloque de control

Para controlar el funcionamiento del variador como se había explicado anteriormente, se proporcionará un diagrama de flujo y programación en lenguaje de texto estructurado del algoritmo.

Antes de desarrollar el algoritmo se debe tener claro las variables y datos de operación; se sabe que la variable es la presión de la torre contactora y que los valores de caudal deseados para determinados rangos de presión son los mostrados en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Datos de operación**

Presión contactora (P)	Caudal bomba
50 – 45	63
44 – 41	60
35 - 40	55

Fuente: elaboración propia.

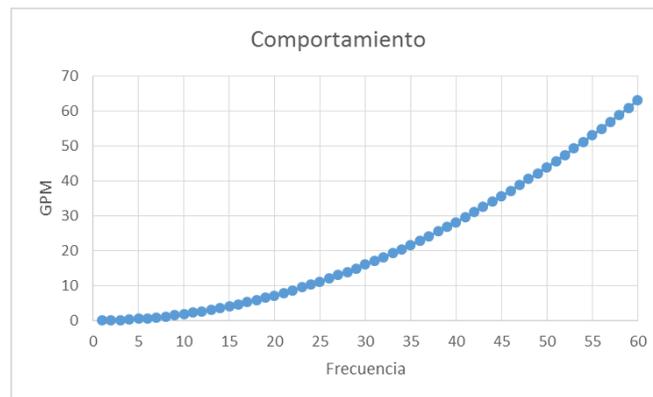
Como el algoritmo controlará al variador debemos conocer la frecuencia de operación para el caudal deseado; para eso nos basaremos en el

funcionamiento del motor según el tipo de carga, en nuestro caso opera en par variable debido que la aplicación es de bomba centrífuga.

El funcionamiento de par variable implica que el par requerido aumenta conforme la velocidad; la forma de incremento cuadrático es el utilizado para aplicaciones en bombas y ventiladores.

En la figura 9 se muestra la gráfica del comportamiento del caudal con respecto a la frecuencia, en base a esto se determinan los datos en la tabla IX.

Figura 9. **Comportamiento caudal/frecuencia**



Fuente: elaboración propia.

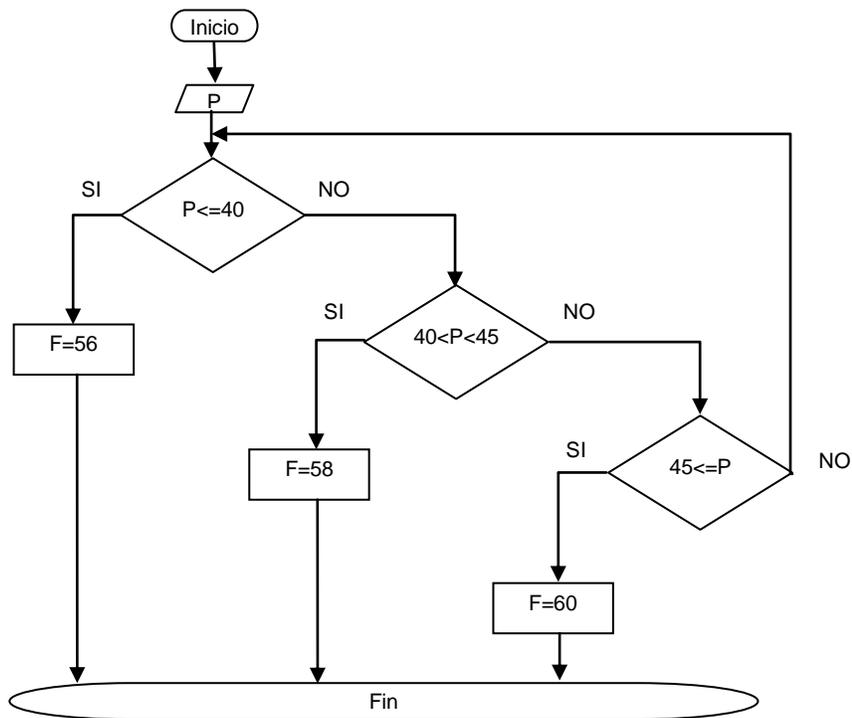
Tabla IX. **Equivalencia entre caudal y frecuencia**

Caudal	Frecuencia (F)
63	60
60	58
55	56

Fuente: elaboración propia.

Con esta información ya es posible desarrollar el diagrama de flujo que se muestra en la figura 10 y el algoritmo en lenguaje de programación de texto estructurado.

Figura 10. **Diagrama de flujo de algoritmo – caudal de amina**



Fuente: elaboración propia.

El texto estructurado es un lenguaje de alto nivel que se parece al BASIC, PASCAL o C, los cuales utilizan subrutinas para ejecutar diferentes funciones de control y pasan parámetros y valores entre las diferentes secciones del programa. Soporta lazos de control repetitivos como WHILE...DO, así como estructuras condicionales tales como IF...THEN...ELSE.

```

IF (Presion <= 40) THEN
    Frecuencia := 56;
  
```

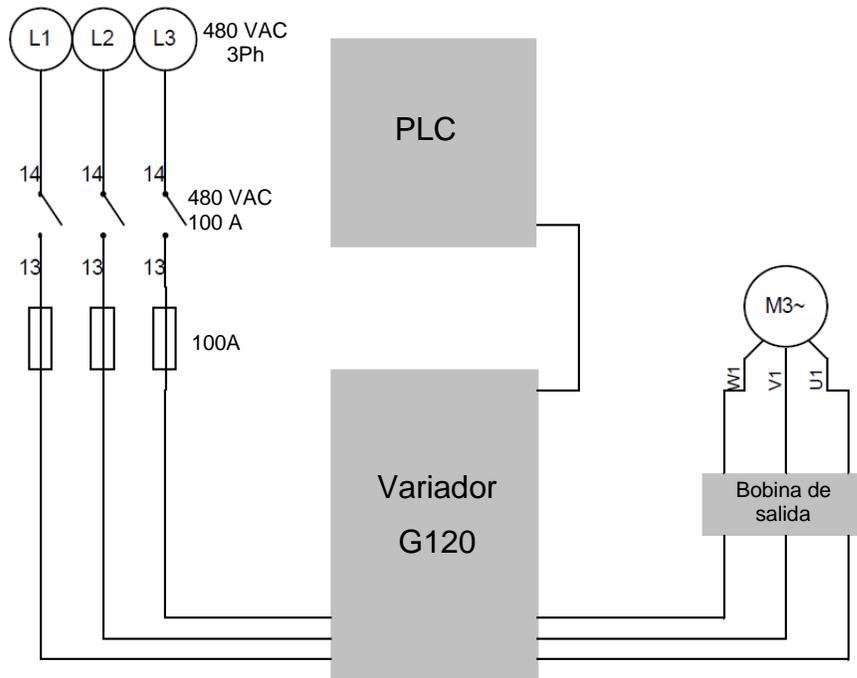
```

ELSE
  IF ((Presion > 40) AND (Presion < 45)) THEN
    Frecuencia := 58;
  ELSE
    IF (Presion >= 45) THEN
      Frecuencia := 60;
    END_IF;
  END_IF;
END_IF;

```

Ahora queda determinar el diagrama esquemático de las conexiones eléctricas entre variador y PLC.

Figura 11. Diagrama esquemático – caudal de amina



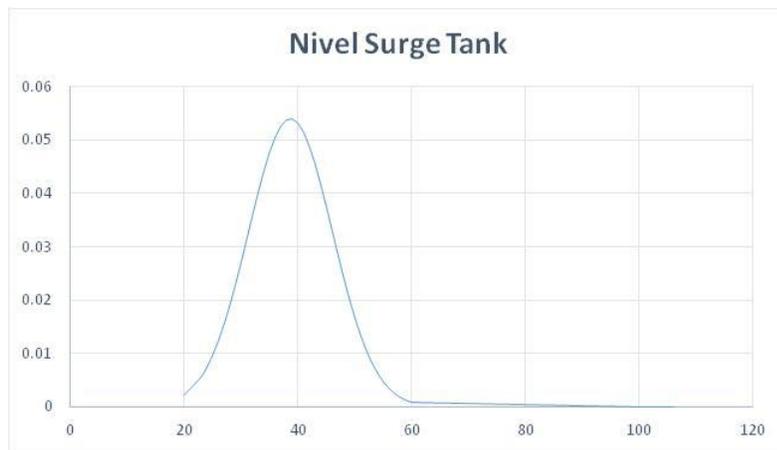
Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Nivel de *surge tank*

Para este sistema solo se centrará en proponer estandarizar el nivel a un valor específico y así evitar agregar agua en grandes cantidades, lo cual afecta la concentración de amino. Con respecto a la concentración de amino, no será un factor influyente para decidir los valores de diseño del sistema de control debido que la mejor concentración se consigue al mínimo nivel de agua pero no es recomendable para el proceso.

Basándose en los datos que se obtuvieron en la tabla V y observando el comportamiento de la campana de Gauss del nivel del tanque, se determinará que el valor a trabajar será de 40 pulgadas.

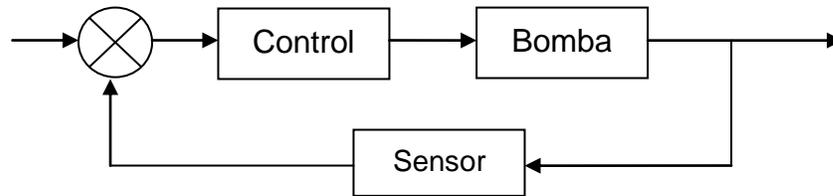
Figura 12. **Campana de Gauss – nivel de *surge tank***



Fuente: elaboración propia.

El sistema de control será de lazo cerrado y al igual que en el caudal de amino, se utilizará la señal de nivel que se visualiza en el sistema SCADA y el mismo PLC para realizar el algoritmo.

Figura 13. **Esquema de bloques para el nivel de *surge tank***



Fuente: elaboración propia.

El funcionamiento de este sistema es sencillo; el sensor da una lectura constante del nivel en el tanque, cuando este nivel disminuya a 39 pulgadas el PLC enviará una señal al contactor para arrancar la bomba y permanecerá trabajando hasta que el nivel alcance la medida de 41 pulgadas.

Con esto se garantiza mantener una concentración de amina constante y un nivel adecuado de operación en el *surge tank*.

4.2.2.1. Conexiones eléctricas

La conexión eléctrica será sencilla porque la potencia del motor a utilizar es baja y el tiempo de trabajo es corto, además el intervalo de arranque será de aproximadamente una vez al día.

Tabla X. **Motor eléctrico de bomba de agua**

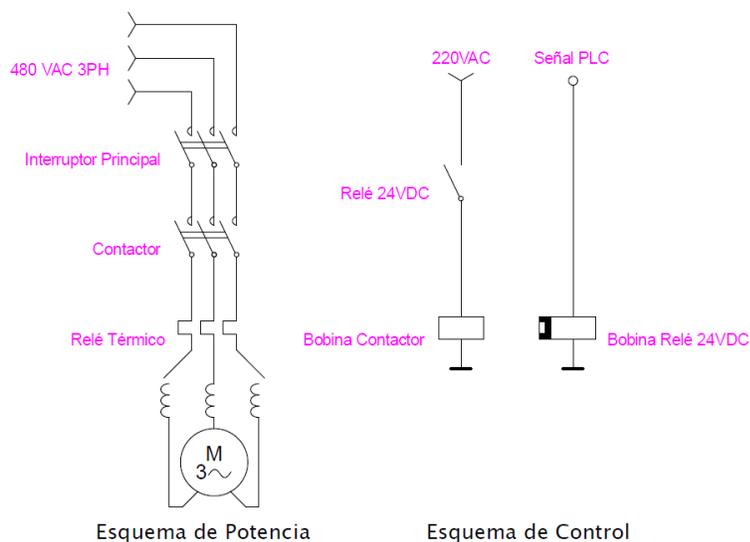
Potencia	1,04 KW / 1,4 HP
Corriente	2 – 2,1 A
Voltaje	440 – 480 V
RPM	3 420 – 3 460
Fases	3

Fuente: elaboración propia.

El circuito eléctrico solo consta de la parte de potencia y la parte de control como se ve en la figura 14, no requiere de cálculos sobre el funcionamiento del motor eléctrico porque trabajará a la frecuencia y voltaje de la fuente de alimentación.

Cuando el algoritmo se cumpla el PLC enviará una señal de 24 VDC hacia una bobina, activando el relé que permitirá alimentar la bobina del contactor con 220 VAC monofásicos, para finalizar la activación del contactor suministrando los 480 VAC trifásicos al motor. Cuando la señal del PLC se deshabilite, ocurrirá lo mismo en los relé apagando el motor de la bomba.

Figura 14. Esquema de potencia y control



Fuente: elaboración propia.

4.2.2.2. Bloque de control

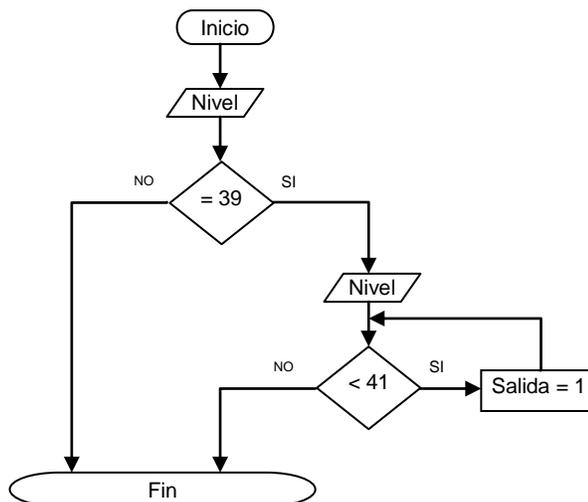
El algoritmo para controlar el funcionamiento del motor se realizará de la misma manera que con el caudal de amino, se proporcionará un diagrama de

flujo y un programa en lenguaje de texto estructurado; los valores para elaboración del algoritmo son nivel mínimo de 39 pulgadas y nivel máximo de 41 pulgadas. El diagrama de flujo se puede observar en la figura 15.

La programación que se presenta a continuación funciona de la siguiente manera; si la señal de nivel desciende hasta el valor de 39 pulgadas se ingresa una función condicional, luego ingresa a un ciclo repetitivo para enviar un pulso positivo hacia una terminal de salida binaria mientras el nivel no ascienda hasta el valor de 41 pulgadas; al alcanzar el valor, finaliza el ciclo repetitivo y la función condicional.

```
IF (Nivel = 39) THEN
    WHILE (Nivel < 41) DO
        TERMINAL_SALIDA:= 1;
    END_WHILE;
END_IF;
```

Figura 15. Diagrama de flujo del algoritmo – nivel surge tank



Fuente: elaboración propia.

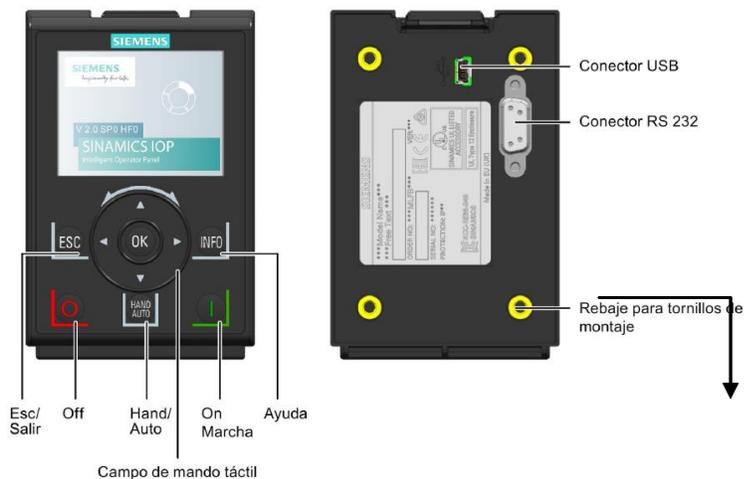
4.2.3. Monitoreo de equipos

Mantener un monitoreo de las condiciones de operación de los equipos es importante para protegerlos y garantizar la operación confiable en el proceso.

En este trabajo se seleccionó un variador de frecuencia que posee un módulo especializado llamado *intelligent operating panel 2 (IOP-2)* en el cual se pueden realizar diagnósticos, permitiendo el monitoreo de las condiciones de operación.

El IOP-2 está diseñado para mejorar las prestaciones de interfaz y comunicación del variador mediante una interfaz RS232 (Siemens, 2017).

Figura 16. Diseño físico del IOP-2.



Fuente: Siemens. Instrucciones de servicio SINAMICS IOP-2 Intelligent Operator Panel 2
Herramienta de puesta en marcha/configuración inteligente. p. 12.

Con este panel se pueden realizar la configuración inicial para el variador por medio de un asistente, lo cual facilita la puesta en marcha del mismo.

Antes de operar el panel se debe conocer el significado de los iconos que se muestran en la parte superior de la pantalla, ver figura 17, los cuales indican diversos estados o situaciones actuales del variador; luego se centrará en la función de diagnóstico ya que es lo más importante para este trabajo, así que no se entrará en detalles con respecto a las demás funciones del panel.

Figura 17. **Iconos de pantalla**

Función	Icono	Observaciones
Fuente de señales de mando		Auto: el convertidor recibe las señales de mando del controlador de red.
	JOG	Se visualiza cuando la función JOG está activa.
		HAND: el convertidor lo controla el IOP-2
Estado del convertidor		
		El icono gira cuando el motor está en funcionamiento.
Fallo presente		
Alarma presente		
Guardado en RAM		Indica que todos los cambios recientes en los parámetros se han guardado solo en la RAM. En caso de fallo de alimentación, se perderán todos los cambios recientes guardados en la RAM. Para evitar la pérdida de datos de parámetros, se debe realizar un guardado de RAM a ROM.
Optimización automática PID		
Modo de hibernación		
Protección contra escritura		No se pueden modificar los parámetros.
Protección de know-how		Los parámetros no pueden visualizarse ni modificarse.
ESM		Modo de servicios esenciales
Estado de la batería		El estado de la batería solo se muestra cuando se utiliza el kit de IOP-2 portátil.

Fuente: Siemens. Instrucciones de servicio SINAMICS IOP-2 Intelligent Operator Panel 2 Herramienta de puesta en marcha/configuración inteligente. p. 15.

La función de diagnóstico permite verificar varias condiciones en el variador, ya sea en el equipo mismo o en las conexiones de comunicación y alimentación. Las opciones que proporciona esta función son las siguientes:

Alarmas/fallos activos: se muestran las alarmas y fallos que no se han confirmado.

Historial: se muestra una lista de todos fallos y alarmas que han ocurrido con la hora a la que se produjeron.

Identificación/mantenimiento: muestra información técnica específica del variador.

Estado E/S: muestra una lista de las entradas y salidas digitales y analógicas y su estado actual.

Estado de comunicación: muestra el estado de la interfaz de bus de campo y los detalles de los ajustes.

Simulación E/S: permite simular entradas y salidas digitales y analógicas sin necesidad de señales externas. Esto es útil para realizar pruebas de mantenimiento o detectar fallas.

Habilitaciones de accionamiento: muestra todas las señales de habilitación en el variador.

4.3. Presupuesto de inversión

Para determinar los precios de los dispositivos propuestos se utilizará como referencia la lista de precios 2017 de siemens. Ver en bibliografía donde está disponible el archivo.

El variador seleccionado está compuesto de 2 componentes, el módulo de potencia y la unidad de control; la unidad de control se diferencia por el bus de comunicación que se utilizará, para los intereses de este trabajo el modelo a utilizar es el CU-230P-2DP para bus de campo profibus DP y el módulo de

potencia a utilizar es el modelo PM240-2 FSD. También se debe tomar en cuenta que se necesita el panel inteligente.

Los precios de los componentes se muestran en la tabla XI, el valor es en dólares estadounidenses.

Tabla XI. **Precios de equipos**

EQUIPO	Cantidad	PRECIO US \$
CU-230P-2DP	1	5 395,00
PM240-2 FSD	1	345,00
Panel inteligente IOP-2	1	225,00
Fusibles (empaquete de 3)	1	35,00
Interruptor automático	1	307,24
TOTAL		6 307,24

Fuente: elaboración propia.

Para economizar solo se contabilizaron los equipos que son necesarios comprar porque no hay en existencia en el campo; con respecto al cableado, gabinete y mano de obra necesaria queda a criterio de la empresa determinar si la compra o no dependiente de la existencia y condiciones.

Lo mismo se determina con los componentes necesarios para el sistema de nivel del *surge tank*, como es un sistema sencillo y no se controlarán equipos sofisticados solamente lo que ya se encuentra instalado, queda a discreción de la empresa la compra de materiales o utilizar la existente.

CONCLUSIONES

1. El estándar ISA-95 es una herramienta bastante útil para determinar las áreas más importantes para un proceso y en las cuáles se debe mantener un mejor control para garantizar la eficiencia del mismo.
2. El estándar ISA-95 abarca muchas más áreas que ayudan a mejorar la eficiencia de una empresa, pero que debe iniciar desde un nivel muy abajo, mejorando y actualizando para garantizar la información que será utilizada en los siguientes niveles.
3. Automatizar un proceso no significa actualizar toda la instrumentación utilizada en una planta, sino es aplicar un análisis de las áreas del proceso y determinar cuáles son primordiales mantener controladas, para luego implementar el sistema necesario utilizando los equipos e información que esté disponible, siempre garantizando eficiencia y ahorro.
4. La operación en campos petroleros tiene sus riesgos para el personal especialmente en una planta donde se procesa el gas natural, porque contiene componentes ácidos que son dañinos, no solo para los equipos sino que pueden ser mortales para el humano, así que es primordial el control automatizado del proceso para evitar accidentes y tener respuesta inmediata en casos de urgencia.

RECOMENDACIONES

1. Implementar al menos el control automático del nivel del *surge tank*, para estandarizar el nivel y disminuir el rango de operación, así se tendrá un mejor control de la concentración de amina y será mucho más fácil observar la tendencia en la degradación del amina.
2. Aplicar el modelo de ISA-95 propuesto que permite conocer como se relaciona la información que se adquiere día a día, y darle seguimiento conforme se actualice o automatice las áreas de importancia.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANSI/ISA-95.00.01. 2010. *Enterprise-control system integration part 1: models and terminology*. International Society of Automation. American National Standard. 142 pp.
2. ANSI/ISA-95.00.02. 2010. *Enterprise-control system integration part 2: object model attributes*. International Society of Automation. American National Standard. 104 pp.
3. ANSI/ISA-95.00.03. 2013. *Enterprise-control system integration part 3: activity models of manufacturing operations management*. International Society of Automation. American National Standard. 104 pp.
4. ANSI/ISA-95.00.04. 2012. *Enterprise-control system integration part 4: objects and attributes for manufacturing operations management integration*. International Society of Automation. American National Standard.
5. ANSI/ISA-95.00.05. 2013. *Enterprise-control system integration part 5: business-to-manufacturing transactions*. International Society of Automation. American National Standard.
6. BRANDL, Dennis. 2012. *Practical applications of the ISA 95 standard* [en línea]. MESA International. Disponible en: <http://web-material3>.

yokogawa.com/document_ 11744.pdf. [consulta: 18 de marzo de 2017].

7. MEDINA, Ramón. *Estándar de lenguajes de programación IEC 1131*. Disponible en: <http://ramonmedina.name/files/universidad/plc/plc0007.pdf>. [consulta: 16 de septiembre de 2017].
8. OGATA, Katsuhiko. 2010. *Ingeniería de control moderna*. PEARSON EDUCACIÓN, S.A., Madrid. 904 p.
9. PINO MORALES, Fernando. *Endulzamiento del gas natural* [en línea]. Universidad de Oriente. Núcleo Monagas. Escuela de ingeniería de petróleo. Maturín/Monagas/Venezuela. Disponible en: <https://carteleraelectronica.files.wordpress.com/2011/12/endulzamiento-de-gas-natural.pdf>. [consulta: 27 de marzo de 2017].
10. PIÑERO RUEDA, José Manuel. 2015. *Control de un motor de inducción usando un variador de frecuencia*. Proyecto Fin de Carrera GRADO EN INGENIERÍA DE LAS TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN. Universidad de Sevilla. 110 p.
11. SCHOLTEN, Bianca. 2007. *Integrating ISA-88 and ISA-95* [en línea]. ISA. Disponible en: <https://www.isa.org/pdfs/integrating-isa-88-and-isa-95/>. [consulta: 24 de marzo de 2017].
12. SIEMENS. 2017. *Instrucciones de servicio SINAMICS G120 Convertidores de baja tensión modelos incorporables y para montaje mural con control units CU230P-2* [en línea]. Disponible en: <http://www.industry.siemens.com/drives/global/en/converter/>

low-voltage-drives/sinamics-g/. [consulta: 13 de septiembre de 2017].

13. SIEMENS. 2017. *Instrucciones de servicio SINAMICS IOP-2 Intelligent operator panel 2 herramienta de puesta en marcha/configuración inteligente* [en línea]. Disponible en: <https://support.industry.siemens.com/cs/products?dtp=Manual&mf=ps&pnid=13221&lc=en-WW>. [consulta: 18 de septiembre de 2017].
14. SIEMENS. 2017. *Lista de precios productos industriales eléctricos* [en línea]. Disponible en: <https://www.industry.siemens.com/home/aan/es/ecuador/Documents/LISTA%20DE%20PRECIOS%20SIEMENS%20MAYO24%202017.pdf>. [consulta: 18 de septiembre de 2017].

