



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Puesta en marcha de sistema de
transferencia para bombas ebuladoras en
proceso de hidrosulfuración**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Miguel Ángel Salazar Hernández

ASESOR DE INFORME

Dr. Hoover Mujica Ortega



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Jurado asignado

Presidente: Ing. Francisco José Rodríguez Ramírez

Secretario: Dr. Paul Rolando Maya Ortiz

Vocal: Dr. Hoover Mujica Ortega

1^{er} suplente: Mtra. Gloria Correa Palacios

2^{do} suplente: M.F. Gabriel Hurtado Chong

Ciudad Universitaria, Departamento de Control y Robótica, Laboratorio de Automatización.

Ciudad de México

Asesor de informe

Dr. Hoover Mujica Ortega

Agradecimientos

Eben-ezer

A mi Papá Grande, que postrado cada mañana, me ayudó a pelear mis batallas.

A mis padres, Miguel Salazar y Ruth Hernández, que gracias a sus oraciones, esfuerzo, amor y enseñanzas esto es posible. Los amo y admiro.

A mi entrañable Universidad Nacional Autónoma de México, mi *alma máter*.

A Grecia Fonseca, mi gran ayuda e inspiración, mi mejor amiga y compañera.

A mi profesor y asesor Dr. Hoover Mujica Ortega, por su invaluable compromiso y sobresaliente dedicación en la Facultad de Ingeniería.

A mi tío Rogelio Quiterio que me inspiró a ser ingeniero.

A todas mis tías y tíos, que me brindaron su apoyo, oraciones y palabras.
A mi tía Eva Hernández y a mi tía Tere Hernández por su apoyo, amor y constante persuasión a titularme y a mi tío Mauricio Salazar, tío Carlos Salazar y tía Nelly Rodríguez por su gran amor y apoyo.

Dedicatoria

A mi mamá Evita que amo, mujer virtuosa.

A mis amados padres, Miguel y Ruth.

A mis hermanos Iván y Benjamín.

A mi «trés jolie et très sympa chérie», Grecia.

Resumen

En este trabajo, se describen las actividades que se realizaron durante la actualización del sistema de accionamiento redundante de las bombas ebuladoras, dicho sistema forma parte de la planta de hidrodesulfuración de una refinería cercana a la Ciudad de México. En este tipo de proceso, las bombas ebuladoras regulan el flujo de combustóleo dentro del reactor y mediante un catalizador se elimina el azufre, proceso necesario para la producción de gasolina. Este es un sistema crítico en el que se debe garantizar la disponibilidad de las bombas con el fin de mantener la producción de gasolinas y evitar los costos que genera regresar a las condiciones de operación previas. La planta de hidrodesulfuración comenzó su producción en 1995, con más de 20 años de operación, los equipos que estaban instalados se encontraban obsoletos, lo que provocaba fallos constantes con tiempos de entrega prolongados en refacciones y componentes de los variadores de velocidad que cada vez eran más difíciles de adquirir. Dejar fuera de operación una planta de esta naturaleza se traduce en millones de pesos en pérdidas, por ejemplo, detener una bomba ebuladora por más de 12 horas genera la pérdida de 140 toneladas de catalizador y un mes de limpieza en el reactor.

La actualización consistió en el reemplazo del sistema de accionamiento redundante de dos bombas ebuladoras, en donde a cada bomba se le proporcionaron dos variadores de velocidad Sinamics S150 capaces de suministrar 605 A a una tensión de 460 V, de esta forma, el primer variador se encuentra en operación, regulando la velocidad de un motor de 350 HP y el segundo de respaldo en caso de un fallo en el primer variador. Adicionalmente se incluyó un controlador lógico programable y una interfaz hombre-máquina para la operación del sistema, además de las protecciones y alimentación redundantes. Durante el proyecto fui responsable de la supervisión de la instalación, la puesta en marcha de los variadores de velocidad, las pruebas en fábrica y en la planta de hidrodesulfuración de la refinería, la capacitación al personal de mantenimiento y personal de operación de la planta y la entrega de documentación final al cliente.

Con esta actualización se aumenta la fiabilidad del sistema, y en caso de haber un fallo, el tiempo de entrega de refacciones es menor debido a que la tecnología instalada es la última generación de variadores de velocidad de Siemens, lo que proporciona disponibilidad del equipo de respaldo. De esta forma,

se garantiza la operación de los reactores en la planta y como consecuencia, se logra una mayor producción de gasolinas.

Contenido

Índice de figuras	VII
Siglas	IX
1. Introducción	1
1.1. Definición del problema	1
1.2. Objetivo	4
1.3. Organización del informe	4
2. Antecedentes	5
2.1. Breve historia Siemens	5
2.1.1. Siemens en México	5
2.2. Descripción del puesto de trabajo	7
3. Marco teórico	9
3.1. Refinación del petróleo	9
3.2. Hidrodesulfuración	11
3.3. Variadores de velocidad	14
4. Análisis y metodología utilizada	17
4.1. Sistema redundante	17
4.1.1. Componentes del sistema	17
4.1.2. Mejoras al sistema previo	19
5. Resultados	23
5.1. Aportaciones profesionales	23
5.2. Resultados	25
6. Conclusiones	27
Referencias	29

Índice de figuras

1.1.	Sistema de transferencia Relcon™	2
1.2.	Bomba ebuladora desmontada y parte del reactor en refinería	3
2.1.	Siemens en Londres	6
2.2.	Línea de telégrafo Indo-Europea	6
2.3.	Planta hidroeléctrica de Necaxa	7
3.1.	Esquema de refinación profunda	10
3.2.	Sistema con lecho ebulado	12
3.3.	Diagrama general de variador de frecuencia	14
4.1.	Etapas de un arranque al vuelo	19
4.2.	Topología del sistema de transferencia	20
4.3.	Curva de aceleración y paro con OFF 1. en anaranjado se muestra la velocidad real del motor; En verde corriente absoluta.	21
4.4.	Curva de aceleración y paro con OFF 2. en amarillo se muestra la velocidad real del motor; En verde corriente absoluta.	21
4.5.	Curva de aceleración y paro con OFF 3. en amarillo se muestra la velocidad real del motor; En verde corriente absoluta.	22
5.1.	Velocidad durante una transferencia de carga	25
5.2.	Operación del sistema con mando remoto	26

Siglas

ALM Active Line Module. 17

CS Customer Service. 7

DCS Distributed Control System. 18, 24

DF Digital Factory. 7

FAT Factory Acceptance Test. 1, 4, 23

FSE Field Service Engineer. 7

HMI Interfaz Hombre Máquina. 8, 18, 23, 24

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor. 14

LD Large Drives. 7

PLC Controlador de Lógica Programable. 8, 18, 22–24

SAT Site Acceptance Test. 1, 4, 23, 24

SCR Silicon Controlled Rectifier. 14

TM31 Terminal Module 31. 18

VFD Variable Frequency Drive. 18

Capítulo 1

Introducción

El dióxido de azufre, liberado a la atmósfera durante la combustión de gasolinas, es un contaminante altamente nocivo para la salud que además provoca una disminución en la eficiencia de los convertidores catalíticos. Debido a los daños que ocasiona, en las últimas décadas se ha buscado disminuir el índice de azufre en las gasolinas. El proceso de hidrodesulfuración tiene como objetivo reducir el contenido de este elemento químico para cumplir con normas y regulaciones que permitan una mejor calidad del aire.

Como se detallará en el informe, los trabajos que desempeñé en la planta de hidrodesulfuración y específicamente en los reactores de lecho ebullado fueron diversos. Supervisé el equipo de trabajo que estuvo a cargo del cambio de los variadores, fui el responsable de liderar la parametrización y programación del sistema, me encargué de la capacitación del personal encargado del mantenimiento eléctrico e instrumentación en la planta y también de capacitación a personal de operación, me encargué de realizar Factory Acceptance Test (FAT) y Site Acceptance Test (SAT), la documentación del proyecto y la elaboración de los reportes y carpetas de entrega final al cliente.

1.1. Definición del problema

La industria tiene entre sus principales objetivos la reducción de costos e incremento de producción. Los paros no planeados debido a fallas en los equipos generan pérdidas enormes, ya sea por falta de producción o por procedimientos de restablecimiento, limpieza o desperdicios que se generan al detener una máquina o todo un proceso. Estos procedimientos pueden llevar mucho tiempo para regresar al estado de operación previo, lo que se traduce en millones de pesos en pérdidas. Los equipos mostrados en la Figura 1.1, se encontraban discontinuados lo que incrementaba el riesgo de paros del sistema y de la planta de forma importante, debido a las consecuencias que esto tiene en la producción de gasolinas en el país, se realizó la actualización del sistema.



Figura 1.1. Sistema de transferencia Relcon™

El sistema de transferencia de las bombas ebuladoras instaladas en la refinería, es un sistema redundante que reduce al mínimo la posibilidad de paro en las bombas, su función es recircular la mezcla de hidrógeno y combustóleo haciéndola pasar por un catalizador, el azufre contenido en el combustóleo se libera bajo la forma de sulfuro de hidrógeno y de esta forma, se puede reducir el contenido de azufre hasta llegar incluso a 0.1% [Speight, 2014]. La hidrodesulfuración es un proceso en el que se manejan presiones y temperaturas altas y los equipos y sistemas deben ser sobredimensionados para evitar paros en el proceso. En el reactor, la bomba ebuladora mueve además de la mezcla de hidrógeno-combustóleo, aproximadamente 140 toneladas de catalizador, para poner en contexto las dimensiones del reactor y la bomba ebuladora, en la Figura 1.2 se muestra en la parte inferior izquierda la bomba ebuladora montada en un soporte, mientras en la parte central superior se observa parte del reactor en color azul. El catalizador está contenido en dos platos, uno inferior y otro superior y válvulas que únicamente permiten el paso de hidrógeno-combustóleo en un sentido, sin embargo las fuerzas ejercidas por el catalizador y el flujo de combustóleo generan que se pierda el sello del plato inferior y gradualmente permite el paso del catalizador a la zona de mezclado. La importancia de que las bombas ebuladoras tengan un sistema redundante es producto de que el catalizador, al asentarse en el fondo del reactor, aumenta la posibilidad de que este pase a la cámara de mezclado y posteriormente al impulsor de la bomba ebuladora lo que generará daños en el motor. El asentamiento del catalizador adicionalmente ocasiona que se compacte y pierda sus características físicas, lo que provocaría el desecho de las 140 toneladas de catalizador y tiempos de limpieza en el reactor cercanos a un mes de trabajo continuo. Los costos que se

generan por el daño a la bomba ebuladora y por el paro a la planta de hidrodesulfuración son enormes. Debido a la naturaleza crítica del reactor en el proceso de desulfuración, es necesario tener una alta confiabilidad de operación y redundancia en los componentes.



Figura 1.2. Bomba ebuladora desmontada y parte del reactor en refinería

1.2. Objetivo

En este proyecto el objetivo principal fue realizar una actualización al sistema de transferencia para dos bombas ebuladoras en un complejo de hidrodesulfuración de una refinería en el centro del país. Adicionalmente, fue necesario implementar un controlador lógico programable y una interfaz hombre-máquina para la operación del sistema, además de las protecciones y alimentación redundante; todo esto con el propósito de incrementar la confiabilidad del proceso.

1.3. Organización del informe

El presente trabajo consta de seis capítulos que abordan al proyecto de actualización del sistema de transferencia para las bombas ebuladoras en la planta de hidrodesulfuración en una refinería desde su instalación, FAT, puesta en marcha, SAT y entrega de documentación final.

En el Capítulo 1 se muestra la necesidad de realizar la actualización de los elementos de un sistema de automatización y especialmente en sistemas críticos.

Posteriormente, en el Capítulo 2 se enmarca en el ámbito de la ingeniería el proyecto en el que trabajé así como el medio laboral en el que me he desarrollado durante los tres años en los que he laborado para esta empresa.

El Capítulo 3 describe el proceso de refinación de forma general y profundiza en la hidrodesulfuración, el subproceso de la refinación del petróleo en donde el proyecto fue desarrollado. Adicionalmente este capítulo describe el principio de operación de los variadores de velocidad utilizados.

El Capítulo 4, muestra los resultados del proyecto y mi participación en la actualización del sistema de transferencia.

Para finalizar, el Capítulo 5 expone las conclusiones a las que se llegó con base en los objetivos planteados en el presente trabajo.

Capítulo 2

Antecedentes

El incremento en ventas de variadores de velocidad en los últimos años ha sido importante y se espera que siga creciendo de forma constante, estos equipos se han convertido en una pieza fundamental en el desarrollo y automatización de la industria, durante 3 años como ingeniero de servicio en campo para variadores de velocidad comisioné y di soporte a aproximadamente 150 variadores en diversas industrias y con diferentes aplicaciones, que van desde control de velocidad de bombas y ventiladores, hasta complejos sistemas críticos en industrias como la petroquímica o minera.

2.1. Breve historia Siemens

La empresa en la que desarrollé el proyecto es una empresa multinacional de origen alemán que opera en los sectores de industria, energía, salud e infraestructuras y ciudades.

La compañía tiene alrededor de 372,000 empleados alrededor del mundo, que trabajan para desarrollar y fabricar productos, diseñar e instalar sistemas y proyectos y crear una amplia gama de soluciones para afrontar los retos de sus clientes. Fue fundada en 1847 en Berlín. En 1848, construyó la primera línea de telégrafo de larga distancia en Europa que contaba con 500 km y se dirigía de Berlín a la ciudad de Frankfurt, 20 años más tarde, construiría la línea de telégrafo Indo-Europea que viajaba de Calcuta a Londres a través de 11,000 Km, tomaba 28 minutos enviar un mensaje de un punto a otro.

En 1881, se utilizó uno de sus alternadores impulsado por un molino de agua el cual fue utilizado para energizar la primera calle con alumbrado público del mundo en Goldaming, Reino Unido. La compañía continuó creciendo y se diversificó al mercado de trenes eléctricos y lámparas incandescentes.

2.1.1. Siemens en México

A finales del siglo XIX, México se vio inmerso en la Revolución Industrial, una época de prosperidad para el país. Su primera sucursal en México se abrió en 1894 y desempeñó un papel importante e innovador en el desarrollo de la infraestructura mexicana. Su primer proyecto en el país fue el alumbrado eléctrico del Paseo de la Reforma, para el que se instalaron 48,000 bombillas en más de 14 kilómetros de la avenida principal de la Ciudad de México.



Figura 2.1. Siemens en Londres

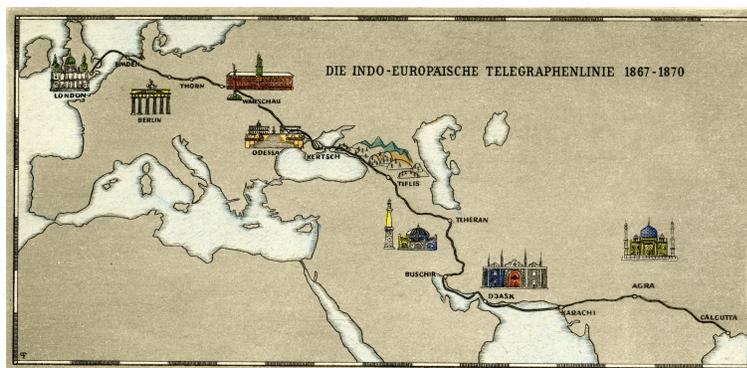


Figura 2.2. Línea de telégrafo Indo-Europea

Menos de cuatro años después de la apertura de su oficina en México, ya había crecido de forma exponencial y se había ocupado de instalar un total de 120,000 bombillas incandescentes en la Ciudad de México.

La empresa proporcionó los generadores y prestó asesoramiento técnico para la construcción de la presa hidroeléctrica de Necaxa, la cual fue un proyecto vital para el desarrollo del país, este proyecto se desarrolló también durante la Revolución Industrial. Cuando se inauguró en 1905, Necaxa se convirtió en la planta con mayor producción hidroeléctrica del mundo.

A lo largo de más de 120 años en México ha trabajado para maximizar el potencial de la infraestructura del país, con más de 6,000 empleados, nueve fábricas, dos centros de distribución, tres centros de investigación y desarrollo, quince oficinas de venta y una sede corporativa.



Figura 2.3. Planta hidroeléctrica de Necaxa

2.2. Descripción del puesto de trabajo

La empresa está conformada por divisiones, Industria es la división en donde se ubica mi puesto dentro de la organización, esta área se encarga de dar solución a las diferentes demandas de la industria con un portafolio de servicios integrados de hardware, software y servicios basados en tecnologías para apoyar a las empresas manufactureras a aumentar su productividad. Las soluciones que Digital Factory (DF) brinda ayudan a sus clientes a operar de manera confiable y con la máxima rentabilidad, eficiencia y compatibilidad ambiental.

Cada división a su vez se divide en unidades de negocio, mi unidad de negocio es Customer Service (CS), que tiene la responsabilidad de dar soporte y brindar asesoramiento técnico para las tecnologías que se aplican en todos los ramos de la industria.

El portafolio de productos que se encarga de los variadores de velocidad es Large Drives (LD), en el cual me he especializado, mi puesto de trabajo es Field Service Engineer (FSE). Como ingeniero de servicio en campo me encargo de dar soluciones al cliente en el área de variadores de velocidad principalmente en 5 formas diferentes: mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo, puestas en servicio, actualización de equipos obsoletos o en fase de discontinuación y cursos de capacitación.

Durante un servicio de mantenimiento preventivo la principal tarea es reducir la probabilidad de fallos en el variador de velocidad debido a agentes externos, los más comunes son polvo, grasa, o partículas conductivas que se encuentran en el ambiente. También me encargo de revisar que los componentes del variador se encuentren en condiciones óptimas, no estén dañados y sus propiedades eléctricas se encuentren dentro de los rangos de operación indicados por el fabricante, este mantenimiento se sugiere realizarlo cada año, sin embargo, el tiempo dependerá del ciclo de trabajo de los variadores de velocidad y sobre todo de las condiciones del entorno en donde opera el equipo.

En el mantenimiento correctivo, la principal labor es regresar al equipo a condiciones adecuadas de operación. Durante un mantenimiento correctivo hay 3 etapas en las que se divide el servicio. La primera es el diagnóstico, en donde a través del estado operativo del equipo se busca entender cuál es la condición que impide que el equipo opere de manera adecuada, es importante antes saber cuál es la aplicación y lógica de operación y mediante gráficas y el manual del equipo se plantean los cambios que se deben realizar en el sistema, siguiendo una línea de ataque al problema. La segunda etapa es la reparación, en donde una vez identificado el problema se da solución, ya sea por medio del cambio de parámetros o reemplazo de algún componente dañado. Finalmente, se realiza el acompañamiento de operación en donde se grafican las señales involucradas y se observa que el equipo se encuentre operando de acuerdo a lo esperado.

Durante la puesta en servicio se parametriza un equipo de acuerdo a las necesidades del cliente, de forma general en un servicio de comisionamiento se programan los datos de placa del motor, los parámetros de comunicación y los parámetros de comando, se realizan mediciones estacionarias del motor en donde se calculan las resistencias del rotor y estator e inductancia magnetizante, además de otros parámetros que servirán para que el variador de velocidad realice una mejor aproximación al modelo matemático del motor para después realizar las optimizaciones en los lazos de velocidad y corriente y finalizar con la realización de las pruebas operativas y de aceptación.

En las actividades de actualización de equipos realicé propuestas técnicas para reemplazar los sistemas que se encontraban obsoletos o en fase de discontinuación. Partiendo de los diagramas eléctricos del cliente y de las especificaciones de los equipos instalados, seleccioné productos que satisficieran la solicitud del cliente, haciendo que su proceso fuera más confiable y en la mayoría de los proyectos incrementando la productividad de las máquinas. En este punto cabe mencionar que al ser máquinas con tiempos de operación de más de 10 años, nos encontramos con limitantes mecánicas cuando se buscaba un aumento de producción, sin embargo, la actualización de los equipos también incrementa el ahorro energético.

Por último, di cursos de capacitación a personal de las industrias petroquímica, llantera y automotriz con la finalidad de que conocieran los variadores de velocidad que tenían instalados en sus plantas de producción. En estas capacitaciones teórico-prácticas se vieron temas como diagnóstico y solución de fallas, principios de operación de los equipos y componentes instalados, reemplazo de componentes, operación de los equipos y puesta en servicio y parametrización, todo esto para variadores de velocidad Sinamics S120, S150, G120, G130 y G150.

Durante 3 años en la empresa realicé 4 viajes a Alemania para capacitación en diversas tecnologías y recibí 5 capacitaciones en México relacionadas con Controlador de Lógica Programable (PLC), por sus siglas en inglés, Interfaz Hombre Máquina (HMI), por sus siglas en inglés y equipos enfocados en el control de posición. Además de las capacitaciones técnicas, tomé cursos enfocados en ventas, trabajo en equipo, gestión de tiempo y liderazgo, habilidades fundamentales en el desarrollo de cualquier profesionalista.

Algunos de los proyectos en los que participé son la puesta en servicio de 30 variadores de velocidad en una cementera en Guatemala, la reparación de una grúa portuaria en el canal de Panamá, puestas en marcha de prensas de estampado para la industria automotriz y pruebas en altamar a un buque en Sudamérica.

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Refinación del petróleo

La refinación del petróleo de acuerdo a la Secretaría de Energía es el conjunto de procesos que se aplican al petróleo crudo con la finalidad de separar sus componentes útiles y adecuar sus características físicas y químicas, por lo tanto, una refinería tiene como función transformar el petróleo crudo, que no tiene uso antes de la refinación, a sus derivados que pueden ser utilizados para satisfacer las necesidades de la sociedad. La industria de refinación de petróleo encierra una serie de procesos a los que se somete el petróleo crudo para obtener de él por destilación y transformación química, los diversos hidrocarburos o las familias de hidrocarburos como se muestra en la Figura 3.1.

Esta transformación se logra mediante los procesos que a continuación se describen:

- Separación: El primer paso es la separación o fraccionamiento del crudo en torres de destilación atmosférica y al vacío. Al petróleo crudo se le aumenta la temperatura para separar físicamente sus distintas fracciones de destilación, diferenciadas por puntos de ebullición específicos y clasificados en gases, destilados ligeros, destilados intermedios, gasóleos y residuos. Este método funciona porque la temperatura es mayor en el fondo que en el extremo superior de la torre de destilación y hace que los componentes con punto de ebullición más alto se condensen primero, mientras que las fracciones con punto de ebullición más bajo alcanzan mayor altura en la torre antes de condensarse.
- Conversión: Durante estos procesos se modifica el tamaño y la estructura de las moléculas de hidrocarburos para convertir las fracciones en productos de más valor, algunos procesos de la conversión son el craqueo, la combinación y la rectificación.
- Tratamiento: En estos procesos se busca eliminar impurezas y compuestos que no son hidrocarburos debido a que afectan las propiedades de rendimiento de los productos acabados, reducen la eficacia de los procesos de conversión y pueden ser altamente contaminantes. Los combustibles residuales son mezclas líquidas de color oscuro y con alta viscosidad, de moléculas de hidrocarburos grandes, con puntos de inflamación superiores a 121 °C y altos puntos de ebullición que requieren ser

tratados para eliminar impurezas. Lo que se busca con estos procesos es mejorar la viscosidad y tener un bajo contenido de metales y azufre para el control ambiental.

- **Formulación y mezcla:** Los crudos de petróleo se transforman en una amplia gama de productos, tanto combustibles como bases para la industria petroquímica. Durante estos procesos se realiza el acabado final, incluyendo las mezclas en donde se combinan fracciones de hidrocarburos, se agregan aditivos y otros componentes para obtener productos con propiedades específicas de rendimiento idóneo para generar los productos destilados que demanda el mercado.
- **Operaciones auxiliares:** Otras operaciones de las refinerías necesarias para dar soporte al procesado de los hidrocarburos son la recuperación de residuos ligeros; la eliminación del agua amarga; el tratamiento y refrigeración de residuos sólidos, aguas residuales y agua de proceso; la producción de hidrógeno; la recuperación de azufre y el tratamiento de gases ácidos y gas residual. Otras funciones del proceso son la provisión de catalizadores, reactivos, vapor, aire, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y gases combustibles.

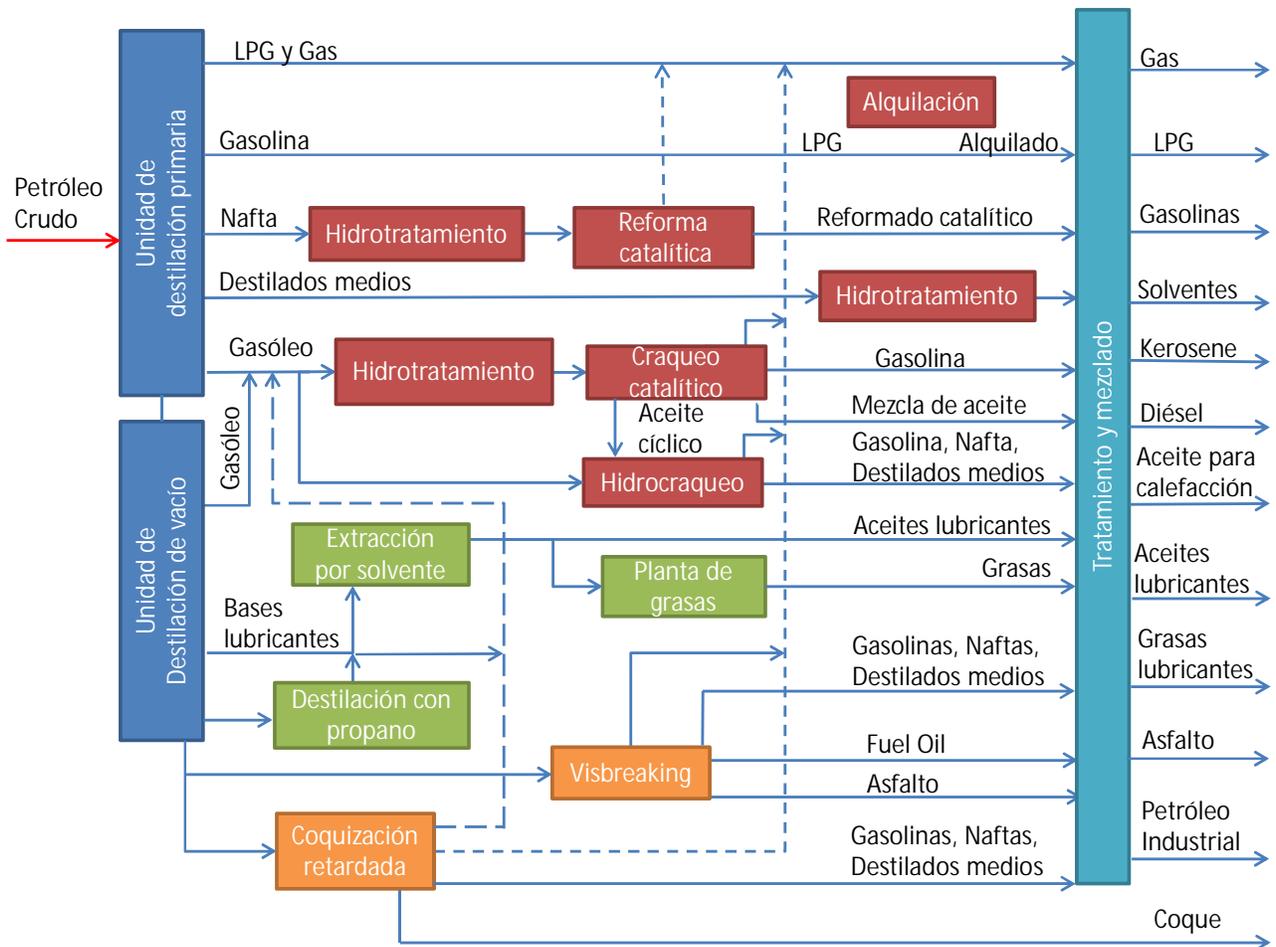


Figura 3.1. Esquema de refinación profunda

3.2. Hidrodesulfuración

El hidrotratamiento es un proceso en el que se aplica hidrógeno a las diferentes fracciones del petróleo y con ayuda de un catalizador se eliminan elementos no deseados en el producto final [Wuithier y Giraud, 1971].

La hidrodesulfuración es el proceso químico catalítico mediante el cual se elimina el azufre que se encuentra en los productos refinados del petróleo, rompiendo los enlaces químicos de los hidrocarburos y los contaminantes.

Normalmente, el hidrotratamiento se realiza antes que otros procesos como la reforma catalítica, que convierte las naftas pesadas de bajo octanaje en hidrocarburos aromáticos de alto índice de octano, para que el catalizador no se contamine con la carga de material no tratado. Se utiliza también antes del craqueo catalítico, cuya función es descomponer los hidrocarburos complejos en moléculas más simples para aumentar la calidad y cantidad de otros productos más ligeros, para reducir el azufre y mejorar el rendimiento de producción, también para mejorar las fracciones intermedias de petróleo destilado convirtiéndolas en queroseno, gasóleo, gasolina y gasóleos de calefacción.

En la hidrodesulfuración, se calienta la materia prima en un horno y esta se hace fluir junto con hidrógeno a través de un reactor que contiene un catalizador de óxido de metales, como el cobalto y óxido de molibdeno u óxido de aluminio. Las condiciones de operación y diseño del reactor se encuentran entre 370 °C y 482 °C y alrededor de 190 bar, dependiendo del tipo de materia prima utilizada y el grado de tratamiento requerido. Las fracciones obtenidas de puntos de ebullición elevados tienen altos índices de sulfuro y eliminar más sulfuro requiere de una temperatura y presión más elevada [Ancheyta, 2011].

Después de que la mezcla de combustóleo e hidrógeno pasan a través del reactor, el petróleo refinado sale por la parte superior, pasa a un segundo reactor igual al primero y después de salir del segundo reactor es enfriado y separado del exceso de hidrógeno, el cuál es reutilizado en el reactor. El catalizador usualmente no es retirado por completo, sin embargo, cada determinado tiempo y dependiendo del nivel del catalizador, se agrega y retira catalizador del reactor.

En el hidrotratamiento hay tres tipos de procesos que se han sido utilizados comercialmente alrededor del mundo:

- Sistema con lecho catalítico fijo
- Sistema con lecho fluidizado
- Sistema con lecho ebulado

En este informe nos centraremos en el sistema con lecho ebulado, este se lleva a cabo en un reactor como el que se muestra en la Figura 3.2. Un proceso adecuado se logra por medio de la bomba ebuladora, en la que el combustóleo requerirá más o menos flujo a través del catalizador. Este proceso se puede encontrar con dos variantes, con sólo un reactor en el que se reduce el azufre de forma moderada o con dos reactores que elimina de forma considerable el índice de azufre [Huitrón, 2012]. El sistema redundante fue instalado en un sistema con lecho ebulado del segundo tipo, por lo tanto, cada reactor tiene una bomba ebuladora y cada bomba ebuladora tiene a su disposición dos variadores de velocidad en

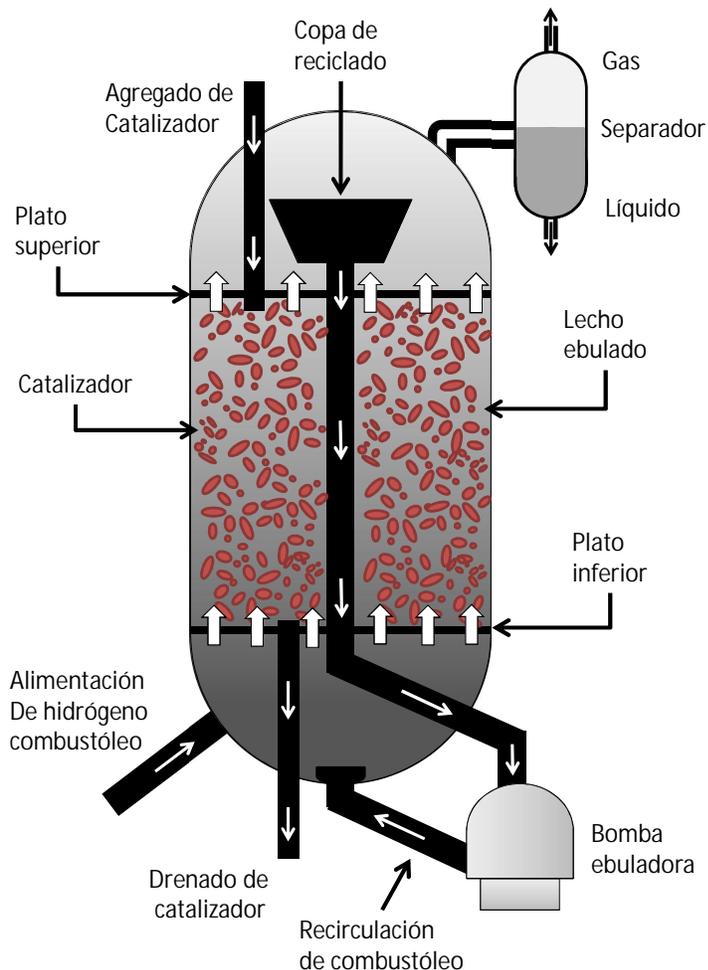


Figura 3.2. Sistema con lecho ebullado

el que uno será el variador de velocidad principal, mientras que el segundo variador de velocidad estará como respaldo.

De acuerdo a [Ancheyta y Speight, 2007] Las ventajas de la hidrodesulfuración por lecho ebullado son:

- Flexibilidad de operación (conversiones de fracciones altas y bajas).
- Capacidad de agregar o quitar catalizador para mantener la actividad catalítica.
- Su diseño con bomba ebulladora genera amplio espacio entre partículas, permitiendo pasar por el lecho ebullado sin acumularse, taparse o aumentar la caída de presión.
- Incremento significativo del factor de reacción por el uso de partículas de catalizador más pequeñas.
- Buena transferencia de calor que evita un sobrecalentamiento del reactor.

Con las siguientes desventajas:

- Elevado consumo de catalizador.
- Formación de sedimentos.
- El diseño y escalamiento de este reactor son más difíciles que los otros reactores debido a que se requiere más información del proceso, por ejemplo, información del nivel de catalizador, propiedades del catalizador, fenómenos hidrodinámicos, transferencia de calor y presiones entre otras.

3.3. Variadores de velocidad

Los variadores de velocidad son dispositivos que permiten modificar la velocidad de máquinas con movimiento. En este reporte, me centraré en los dispositivos electrónicos que mediante transistores, permiten cambiar la velocidad de motores eléctricos y en específico variadores de frecuencia de baja tensión utilizados para el control de motores de corriente alterna.

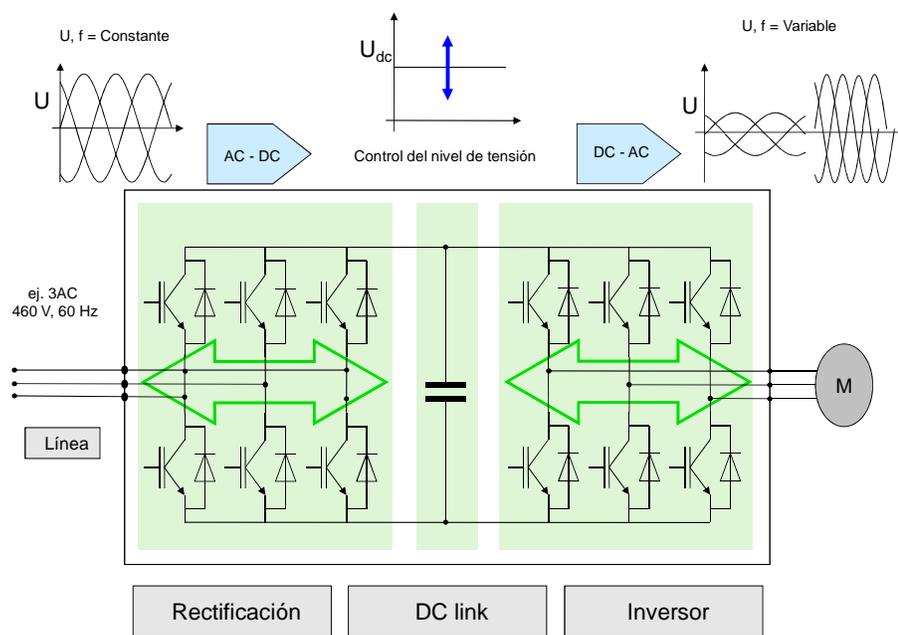


Figura 3.3. Diagrama general de variador de frecuencia

Un variador de frecuencia, como se muestra en la Figura 3.3, tiene principalmente 3 fases. La primera fase se le llama rectificador, y su tarea principal es pasar de la alimentación alterna, trifásica, con tensión y frecuencia constante, a corriente directa. Esta rectificación se logra con el uso de semiconductores, ya sea mediante un puente de diodos, Silicon Controlled Rectifier (SCR) o Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), los equipos que se describen en este reporte tienen una rectificación mediante IGBT. La segunda fase es conocida como bus de directa, circuito intermedio o DC-Link, en esta etapa se encuentra un banco de capacitores encargados de almacenar energía para evitar que la tensión en este circuito tenga fluctuaciones y también tiene la función de reducir el rizo que se genera durante la rectificación. Finalmente, en la tercera fase, a través de IGBT y mediante modulación por ancho de pulso se pasa de corriente directa a corriente alterna. Los IGBT permiten que el flujo de corriente sea en ambos sentidos, de esta forma cuando se requiere que el motor incremente su velocidad el flujo de energía irá de la alimentación hacia el motor, y cuando se busque disminuir la velocidad, el flujo de energía podrá ir del motor, que actuará como generador, hacia la línea de alimentación pasando antes por filtros que reducen los armónicos a niveles inferiores al 1%.

En la industria, el tipo de variadores a los que di servicio usualmente se alimentan en un rango de 380 a 480 VAC, sin embargo, también se consideran variadores de frecuencia de baja tensión a equipos con alimentación de hasta 690 VAC.

Los variadores de velocidad tienen como funciones principales el ahorro de energía y el control de velocidad, torque o posición de forma eficiente, aumentando la rentabilidad en el sector industrial. Antes de los variadores de velocidad con transistores de potencia, se variaba la velocidad de un motor de forma mecánica, esto involucraba fallas y mantenimiento constante y consumo de energía mayor debido a que la corriente de arranque requerida por un motor conectado a tensión plena es hasta 7 veces mayor a la corriente nominal.

Capítulo 4

Análisis y metodología utilizada

4.1. Sistema redundante

La solución que se ofreció al cliente, es un sistema redundante conformado, en forma general, por dos variadores de frecuencia SINAMICS S150 en donde cada uno puede controlar el motor de la bomba de forma independiente. Cada variador tiene una fuente de alimentación diferente, el variador de frecuencia 1 es alimentado por un turbogenerador ubicado en la refinería, mientras que el variador de frecuencia 2 es alimentado por una central termoeléctrica de ciclo combinado, de esta forma si hay un problema en la alimentación del variador que está operando se realizará la transferencia de carga de forma automática al otro variador y si la fuente de alimentación que es interrumpida es la que alimenta al equipo de respaldo, no afectará la operación del sistema.

La lógica de control del sistema es capaz de detectar un problema o falla en un variador de velocidad, en la alimentación o en el monitoreo de la velocidad y tomar una acción correctiva que prevenga el paro de la bomba ebuladora hasta que se restablezca la falla en el sistema. Esta acción puede involucrar la asignación a otro tacómetro si el que está en uso falla, la transferencia de carga del variador primario al variador de reserva, el ajuste a condiciones de operación predefinidas en caso de pérdida del control o el cambio a operación manual para la toma de acciones por parte de personal de operación para evitar que el catalizador se asiente.

4.1.1. Componentes del sistema

El sistema redundante cuenta principalmente con cinco elementos que a continuación se describen

- Convertidores de frecuencia: Sinamics es la familia de convertidores de frecuencia que abarca desde accionamientos básicos, servodrives dinámicos para control de posición, hasta accionamientos de media tensión. En la actualización de este sistema se seleccionó, debido a los requerimientos del cliente, un variador Sinamics S150 con una unidad de rectificación regeneración Active Line Module (ALM), la cual mantiene el bus de DC con una tensión constante a pesar de que la alimentación

fluctúe y más importante en este sistema, los armónicos son despreciables. Además el equipo cuenta con operación regenerativa por lo que se obtiene un ahorro significativo de energía y alta respuesta dinámica y precisión. El equipo opera con un factor de potencia igual a uno en donde la potencia reactiva puede ser compensada ya sea inductiva o capacitiva. En cuanto a la reparación de los variadores de velocidad esta puede ser rápida y fácil debido al concepto modular que se tiene, se pueden reemplazar los módulos de potencia y control en un tiempo muy corto, hasta 20 minutos para un módulo de potencia y 5 minutos en reemplazar tarjetas de control. Adicionalmente, el paquete de parametrización y diagnóstico STARTER, es un software con licencia libre, de uso intuitivo y con herramientas de diagnóstico muy eficientes. Este software cuenta con la herramienta TRACE, que permite graficar cualquier señal del variador ya sea digital o analógica, almacenarlas y analizarlas durante una puesta en servicio o para realizar el diagnóstico y reparación de fallas en el variador. El Variable Frequency Drive (VFD) además de la función principal que es regular la velocidad del motor, en el sistema es el encargado de recibir y enviar señales analógicas y digitales al sistema de control distribuido, las señales llegan a relevadores para aislar las señales y de ahí a una tarjeta de entradas y salidas analógicas y digitales llamada Terminal Module 31 (TM31), mediante el protocolo de comunicación interno del variador de frecuencia llamado Drive-Cliq las señales llegan a la unidad de control en donde se realiza la lógica de transferencia del sistema.

- Controlador Lógico Programable: El PLC utilizado en este proyecto es un SIMATIC S7-300. Es el encargado de realizar una parte de la lógica de control para la transferencia de un variador a otro en caso de que falle la comunicación entre variadores y el mando de arranque del variador en operación no pueda ser enviado al variador de respaldo para que este entre en operación, también a través de la red de comunicación PROFIBUS el PLC recibe la palabra de estado del VFD y las señales provenientes del Distributed Control System (DCS) y las muestra en el panel de operación, adicionalmente envía los comandos del panel de operación al VFD para arranque, paro, transferencia manual, selección de control local o remoto, reconocimiento de fallos y ajuste del setpoint de velocidad.
- Panel de operación: El panel de operación empleado es un equipo SIMATIC HMI TP 1200 Confort, es la última generación de paneles de operación de SIEMENS, su función principal es el despliegue de señales y estados del sistema en general, además recibe las acciones del operador y las envía al PLC y los variadores de velocidad para el control del sistema.
- Sistema de alimentación de control redundante: Este sistema está conformado por dos fuentes SITOP que suministran hasta 20A a 24Vdc y un módulo de redundancia SITOP PSE202U. Las fuentes SITOP están alimentadas cada una por un bus distinto llamados bus naranja y bus café que suministran energía desde la Comisión Federal de Electricidad y de un turbogenerador ubicado dentro de la refinería Miguel Hidalgo respectivamente. De esta forma, al igual que el suministro de alimentación a la parte de potencia de los variadores, se asegura que el control del sistema redundante se mantenga energizado.

- Enlace de salida: Este sistema cuenta a la salida de cada variador con un contactor cuya corriente nominal de operación es de 630 Amp controlado por una bobina de 230Vac, los dos contactores de salidas tienen un bloqueo mecánico y uno en programación para evitar que estos se encuentren cerrados al mismo tiempo mientras los dos variadores de frecuencia se encuentran operativos lo que ocasionaría un corto circuito a la salida del sistema. Como medida de protección adicional para el motor, se instaló a la salida de cada variador de frecuencia un interruptor termomagnético que evitará corrientes elevadas que puedan provocar sobrecalentamiento del motor y problemas en el aislamiento de los devanados, sin embargo, esta no es la única protección que tiene el motor, ya que el equipo está limitado por software a una corriente 1.5 veces mayor a la corriente nominal del motor y sensores de temperatura en los rodamientos y devanados envían señales analógicas que alertan sobre temperaturas arriba del rango de operación.

4.1.2. Mejoras al sistema previo

Por petición del cliente, el sistema de accionamientos redundantes mostrado en la Figura 4.2 debe realizar la transferencia de carga de una bomba a otra sin que las revoluciones lleguen a cero y en el menor tiempo posible. Para lograr esto, recurrí a una función que los variadores de velocidad Sinamics tienen, el “arranque al vuelo” o “flying restart” permite tomar el control del motor aun cuando este se encuentra girando, la función de arranque al vuelo detecta la dirección de giro del motor así como la velocidad y posteriormente acelera a la velocidad deseada no importando a qué revoluciones por minuto se encuentre girando, sin este modo retomar la velocidad del motor e incrementarla hasta llevarlo al punto deseado podría causar problemas mecánicos por una abrupta respuesta si la velocidad a la que gira el motor y el setpoint de velocidad del motor son contrarias o incluso muy diferentes. Para realizar este procedimiento el variador de frecuencia se encargará de realizar las 3 acciones que se muestran en la Figura 4.1, la primera es asegurarse que el motor se encuentra desmagnetizado, posteriormente el variador de frecuencia, auxiliado del modo de operación vectorial, detectará la velocidad a la cual gira el motor para finalmente realizar la magnetización y elevar la velocidad hasta llegar al setpoint de velocidad.

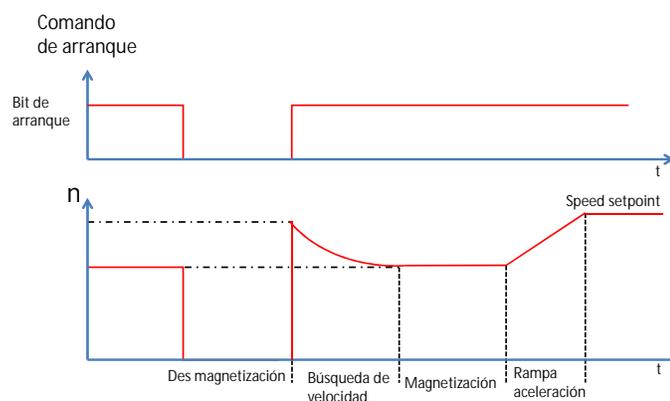


Figura 4.1. Etapas de un arranque al vuelo

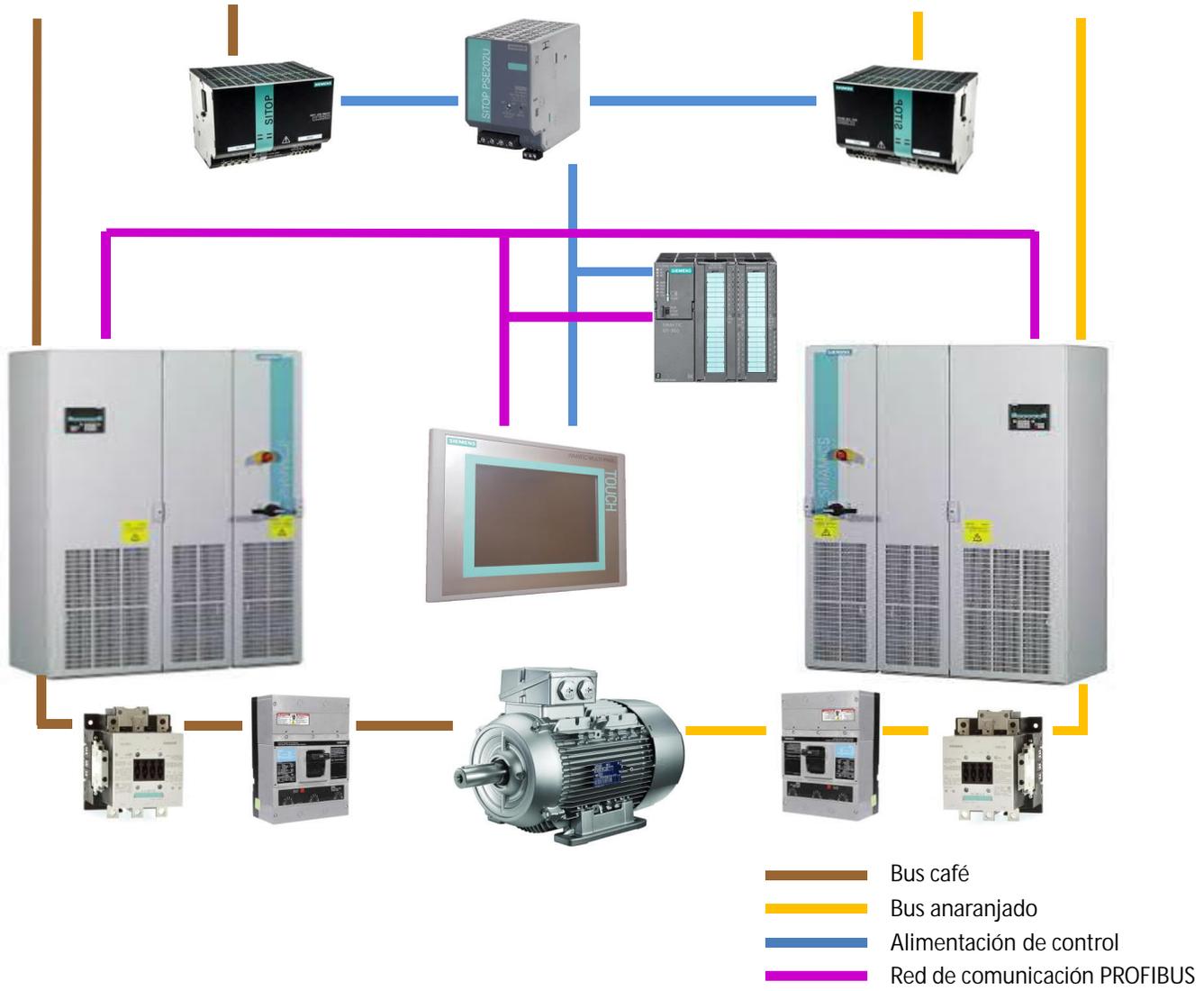


Figura 4.2. Topología del sistema de transferencia

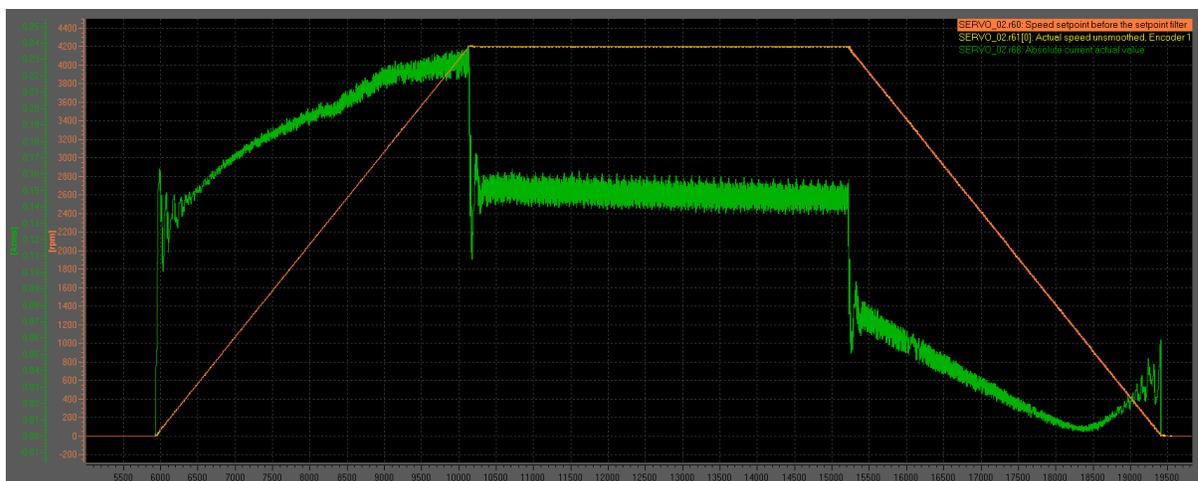


Figura 4.3. Curva de aceleración y paro con OFF 1. en anaranjado se muestra la velocidad real del motor; En verde corriente absoluta.

Para obtener la mejor respuesta en este sistema, es necesario explicar los tipos de paro que se pueden programar en los equipos SINAMICS. Se pueden programar tres tipos de paro con diferentes perfiles de desaceleración, la primera forma de realizar un paro es mediante la desaceleración controlada del motor y que se muestra en la Figura 4.3, a la cual denominaremos “OFF1”. En este tipo de paro después de recibir el comando, el drive recibe un setpoint de velocidad igual a cero y desacelera siguiendo la función generadora de rampas programada, dependiendo de la aplicación las he programado desde 0.5 segundos hasta 90 segundos, que será el tiempo que tome en llegar desde la velocidad máxima de operación hasta cero revoluciones por minuto, es importante mencionar que durante este paro, el variador controla la velocidad de desaceleración del motor y se encuentra conectado eléctricamente en todo momento haciendo un intercambio de energía para lograr la regulación de velocidad deseada.

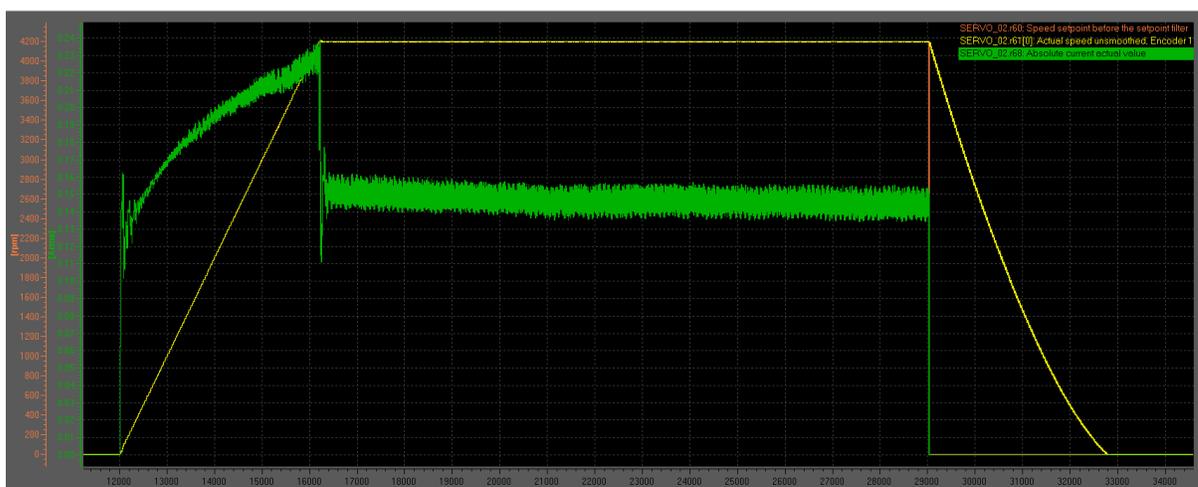


Figura 4.4. Curva de aceleración y paro con OFF 2. en amarillo se muestra la velocidad real del motor; En verde corriente absoluta.

Al segundo tipo de paro, mostrado en la Figura 4.4, se le denomina “OFF2” y tras recibir este comando, inmediatamente se realiza la supresión de pulsos por lo que el motor girará libremente y el tiempo en el que el motor llegue a cero dependerá de factores como la inercia de la carga o fricción que exista en el sistema.

Finalmente se puede programar un paro llamado “OFF3”, como se observa en la Figura 4.5, cuyo principio de operación es el mismo que el “OFF1” sin embargo se sugiere programar un tiempo de paro menor. Este tipo de paro también es llamado paro de emergencia, sin embargo, es importante observar que en ciertas aplicaciones detener una carga muy rápido puede provocar un daño mecánico.

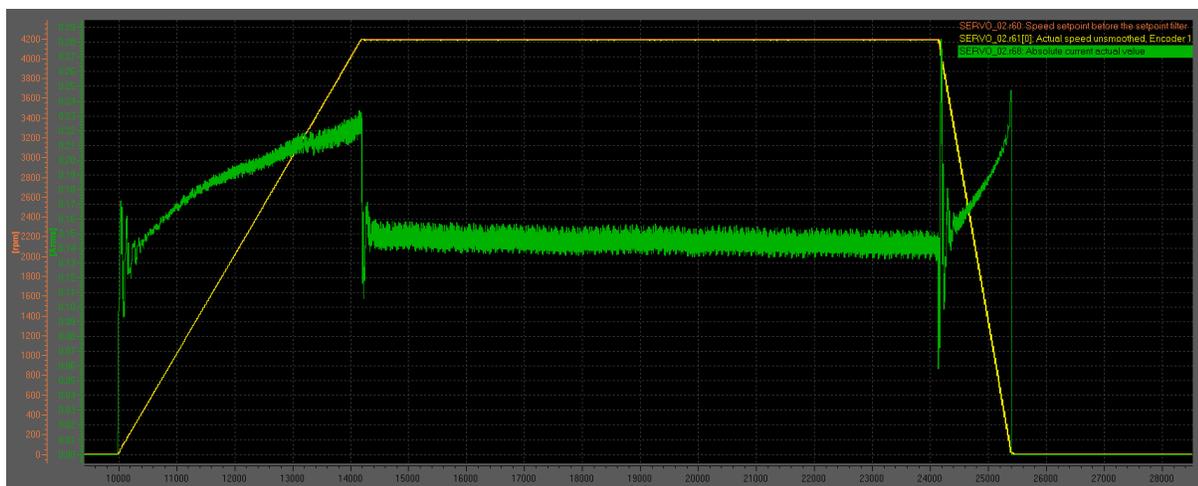


Figura 4.5. Curva de aceleración y paro con OFF 3. en amarillo se muestra la velocidad real del motor; En verde corriente absoluta.

Sabiendo de la importancia de realizar la transferencia de la forma más rápida posible y tomando en cuenta que el variador tiene una rampa de desaceleración programada de 30 segundos, si el contactor se cerrara durante la rampa de desaceleración, el variador al no detectar al motor cambiaría a un estado de fallo y lo dejaría inoperable hasta que algún operador reconociera la falla, es por esto que para solucionar este problema recurrí a un paro de tipo “OFF2” y aprovechando que el variador de frecuencia se desconecta del motor al realizar este tipo de paro, se puede iniciar la transferencia inmediatamente abriendo el contactor de salida del equipo que se encuentra operando y en menos de un segundo se cierra el contactor de salida del equipo al que se le transfiere la carga realizando la función de arranque al vuelo que tomará menos de cinco segundos para llevar el motor a la velocidad de operación previa.

La lógica de operación fue programada tanto en el PLC, como en el variador de velocidad. La ventaja de tener esta lógica en ambas unidades de control, es la redundancia que proporciona y en caso de una falla de alguna unidad de control el sistema pueda seguir operando.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Aportaciones profesionales

En el proyecto estuve involucrado principalmente en cuatro actividades: FAT, impartición de curso de variadores de velocidad, puesta en marcha del sistema y SAT, cada una con los resultados diferentes que a continuación describo:

- Pruebas FAT: Debido al corto tiempo que se tuvo para realizar las pruebas FAT, realicé, con el apoyo de un ingeniero con más experiencia en esta aplicación, el pre-comisionamiento del sistema redundante, parametricé la lógica de los variadores de velocidad y un ingeniero más, brindó apoyo para la programación del PLC y la HMI. Posteriormente, en presencia de personal de la refinería, realicé las pruebas FAT de manera satisfactoria, corroboré el correcto conexionado de todas las señales de control y de fuerza, medí los niveles de tensión en el tablero, probé los comandos remotos, comandos locales, la transferencia manual, transferencia por falla en variador, transferencia por falla de alimentación, cambio de sentido de giro, variación de velocidad y redundancia en alimentación de control. Todas las pruebas resultaron satisfactorias, en presencia de personal de la refinería se llenaron y aprobaron los protocolos de pruebas. Después de realizar las pruebas, los tableros de transferencia fueron enviados a la refinería para su instalación.
- Impartición de curso de variadores de velocidad: Impartí un curso de variadores de velocidad a personal de Pemex, en este curso se revisaron temas relacionados con los fundamentos de variadores de velocidad y una introducción al sistema de transferencia, componentes que conforman el sistema de transferencia, software STARTER, parametrización de equipos SINAMICS, herramientas para el diagnóstico y solución de fallas, reparación y mantenimiento preventivo del sistema. Este curso lo impartí durante 5 días con un total de 40 horas teórico prácticas con el apoyo de simuladores Sinamics S120. Al finalizar el curso, realicé un examen escrito y práctico a los 10 asistentes pertenecientes al área de instrumentación, mantenimiento eléctrico y operación, con un 100% de los exámenes aprobados y certificaciones obtenidas, se dio por concluido el curso de capacitación en el sistema redundante de forma satisfactoria.

- Puesta en marcha del sistema: Una vez instalados los equipos, realicé el comisionamiento del sistema redundante, la puesta en marcha y las pruebas pre operacionales se realizaron con un motor de pruebas de una capacidad de 7.5kW. La complicación en esta etapa estuvo en la identificación de las señales digitales y analógicas que se envían con lógica cableada al DCS debido a que el equipo se encontraba fuera de operación, además muchas señales no se encontraban identificadas por lo que se rastrearon una por una, se realizaron pruebas de lazo para todas las señales y en colaboración con el área de instrumentación se realizaron los protocolos de pruebas. Adicionalmente se realizaron pruebas de comunicación entre el PLC, HMI y variadores de velocidad, se realizaron escalamientos de señales analógicas y mediante mediciones con amperímetro, voltímetro y tacómetro se corroboró que las señales enviadas por los variadores de velocidad eran correctas, estas pruebas se asentaron en el protocolo de entrega y fueron aceptadas por el cliente de forma satisfactoria. Finalmente para realizar las SAT con las bombas ebuladoras, el cliente solicitó realizar pruebas de transferencia con el motor de 7.5kW, todas las pruebas fueron satisfactorias.
- Con las pruebas pre operacionales acreditadas por el cliente solicité las conexiones de los motores de las bombas ebuladoras, en presencia del área de mantenimiento eléctrico, instrumentación y operación se realizaron las SAT del sistema, probé los comandos de arranque, paro, aumento y disminución de velocidad, cambio de sentido de giro, transferencia manual, transferencia por falla en variador de velocidad y por falla en alimentación. Corroboré que los estados que se envían al sistema de control distribuido fueran desplegados de forma correcta, simulando fallas y realizando arranques del sistema en el DCS.

5.2. Resultados

El sistema redundante de las dos bombas ebuladoras fue entregado al cliente para su operación en mayo del año 2016 siendo satisfactorias todas las pruebas realizadas al sistema, los trabajos fueron realizados por el equipo de trabajo que encabezé, conformado por 2 ingenieros y 3 técnicos electricistas. Las pruebas estuvieron supervisadas por el cliente en todo momento, por personal de mantenimiento eléctrico, mantenimiento de instrumentación y operación.

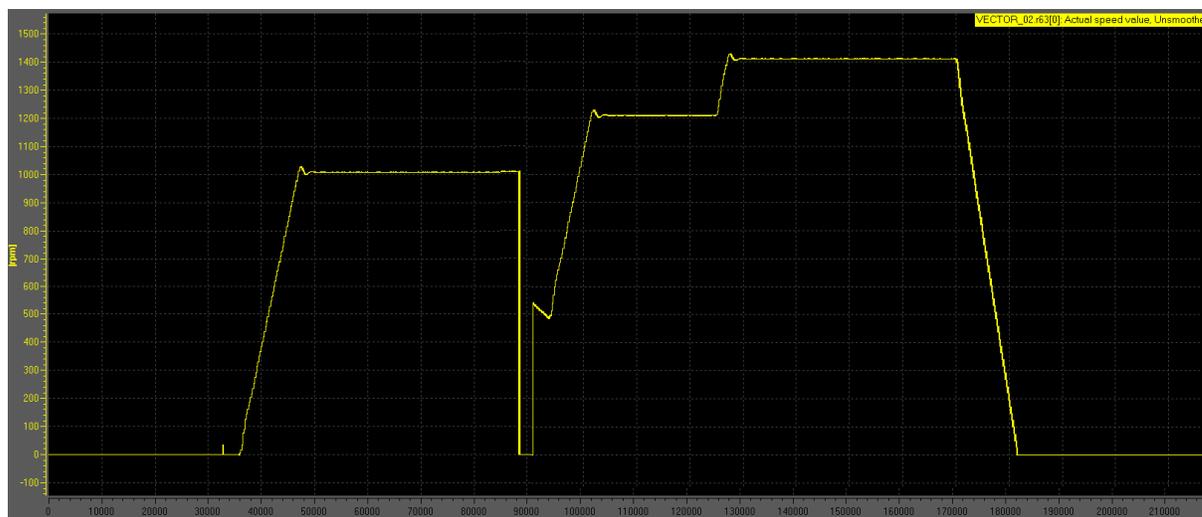


Figura 5.1. Velocidad durante una transferencia de carga

En la Figura 5.1 se observa en operación la transferencia del sistema, cuando al estar operando, se le provoca una falla al variador en operación, después de 2 segundos, el variador de frecuencia encuentra la velocidad a la que el motor gira, la retoma y en 4 segundos, la velocidad ya está incrementando hasta alcanzar la velocidad requerida.

Finalmente, en la Figura 5.2 se observa la operación del sistema, desde el centro de control distribuido, se aumenta la velocidad hasta 1800 RPM de forma escalonada y se decrementa a 0 RPM.

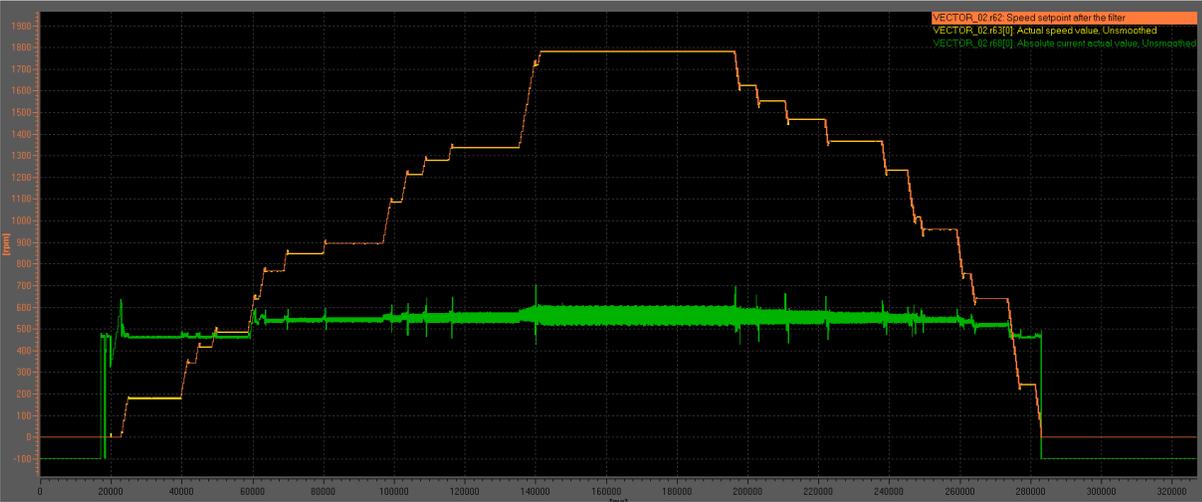


Figura 5.2. Operación del sistema con mando remoto

Capítulo 6

Conclusiones

La elaboración de trabajos de calidad que derivan en la satisfacción del cliente, son la principal razón por la que la empresa en la que colaboro es una de las más grandes en su ramo. El cumplimiento de los objetivos en la renovación del sistema redundante fue resultado del trabajo en equipo y valores como la responsabilidad, excelencia e innovación.

Las actividades que realicé como ingeniero de servicio en campo, me han permitido tener un acercamiento a los procesos industriales, la automatización y los retos a los que se enfrentan los ingenieros en las plantas de producción. Durante estos primeros años de mi carrera profesional, mi paso por las aulas de la Universidad me dejó conocimientos en ingeniería que han sido fundamentales para alcanzar los logros que hasta ahora he tenido, sin embargo no fueron la única ni más importante herramienta que obtuve. El proyecto de la actualización del sistema de transferencia de las bombas ebuladoras, fue el más grande reto al que me había enfrentado, no obstante, la tenacidad, inculcada desde los primeros semestres de la carrera, fue de gran ayuda en la búsqueda de soluciones a problemas a los que me enfrenté. Considero que la cualidad preponderante en mi formación ha sido la sensibilidad a los problemas que tiene nuestra sociedad y la búsqueda de soluciones que impacten en nuestro entorno.

Referencias

- [Ancheyta, 2011] Ancheyta, J. (2011). *Modeling and Simulation of Catalytic Reactors for Petroleum Refining*. Wiley. (Citado en página 11.)
- [Ancheyta y Speight, 2007] Ancheyta, J. y Speight, J. (2007). *Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua*. Chemical Industries. CRC Press. (Citado en página 12.)
- [Huitrón, 2012] Huitrón, Q. B. (2012). Evolución del proceso de hidrodesulfuración por el manejo de tipo de crudo. (Citado en página 11.)
- [Speight, 2014] Speight, J. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum, Fifth Edition*. Chemical Industries. Taylor & Francis. (Citado en página 2.)
- [Wuithier y Giraud, 1971] Wuithier, P. y Giraud, A. (1971). *Refino y tratamiento químico: el petroleo*. CEPSA, S.A. (Citado en página 11.)