Universidad Nacional de Ingeniería

Área del Conocimiento de Agricultura

Diseño de un sistema automatizado para controlar la temperatura de calentamiento del fuel gas en refinería Puma Energy Bahamas S.A.

Trabajo Monográfico para optar al título de Ingeniero Químico.

Elaborado por:

Br. Andy Kadir Paladino Martínez
Carne: 2013-61607

Tutor:

M. en C. Rolando Antonio Guevara Arroliga.

19 de agosto del 2025
Managua, Nicaragua

ÍNDICE

DEDICATORIA *5*

AGRADECIMIENTOS *6*

RESUMEN *7*

GLOSARIO *8*

I. INTRODUCCIÓN *10*

II. OBJETIVOS *11*

2.1 General *11*

2.2 Objetivos Específicos *11*

III. MARCO TEÓRICO *12*

3.1 Bombas Centrífugas *12*

3.1.1 Definición *12*

3.2 Intercambiadores de calor *15*

3.2.1 Definición *15*

3.2.2 Tipos de intercambiadores de calor *15*

3.3 Sistema de Control Distribuido (SCD) *18*

3.3.1 Definición *18*

3.3.2 Elementos *18*

3.3.2Funcionamiento *19*

3.4 Lógica de control *22*

3.4.1 Definición *22*

3.4.2 Clasificación *22*

3.5 Protocolo de comunicación. *23*

3.6 Costos asociados al diseño y ejecución del proyecto *24*

IV. METODOLOGÍA 25

4.1 Tipo de metodología 25

4.2 Variable de estudio 26

4.3 Fuentes y Formas de Obtención de Información 27

4.4 Análisis y Procesamiento de la Información 27

V. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 28

5.1 Determinación de las propiedades físico-químicas del gas 28

5.2 Determinación del flujo calefactor 29

5.3 Cálculo de $ANPS_D$ 32

5.4 Dimensionamiento de la válvula de control 34

5.5 Descripción del lazo de retroalimentación 36

5.6 Protocolo de comunicación 37

5.7 Arquitectura de comunicación 38

5.8 Costos asociados a la ejecución del proyecto 40

VI. CONCLUSIONES 43

VII. RECOMENDACIONES 44

VIII. BIBLIOGRAFÍA 45

IX. ANEXOS 46

9.1 Anexo A 46

9.2 Anexo B 50

9.3 Anexo C 54

9.4 Anexo D 57

Índice de tablas y figuras

Figura 1 (Tipos de cabezales y carcazas de acuerdo a AFIT).....*18*

Figura 2 (Control retroalimentado con estrategia de control en Manref).....*20*

Figura 3 (Arquitectura típica de SCD).....*21*

Figura 4 (Controlador DeltaV) *22*

Figura 5 (Protocolo de comunicación).....*33*

Figura 6 (Protocolo de comunicación).....*39*

Figura 7 (Protocolo de comunicación).....*41*

Tabla 1 (Variables consideradas para el dimensionamiento del TIC-500).....*27*

Tabla 2 (Composición del gas según la cromatografía) *29*

Tabla 3 (Propiedades físico químicas del gas).....*30*

Tabla 4 (Temperatura de las corrientes del proceso).....*31*

Tabla 5 (Flujo de masa calefactora).....*31*

Tabla 6 (Flujo volumétrico en Ft^3/S) *32*

Tabla 7 (Flujo volumétrico en Barriles/día).....*32*

Tabla 8 (Flujos requeridos para el proyecto) *34*

Tabla 9 (Accesorios considerados para la caída de presión).....*34*

Tabla 10 (Calculo del $ANPS_D$).....*35*

Tabla 11 (Calculo de caída de presión en la descarga de la bomba).....*36*

Tabla 12 (Dimensionamiento de la válvula TIC-500) *37*

Tabla 13 (Lógica de control por retro alimentación entre TI-229 y TIC-500) *38*

Tabla 14 (Arquitectura del protocolo de comunicación del TIC-500).....*40*

Tabla 15 (Alarmas vinculadas al proceso) *41*

Tabla 16 (Costo del proyecto).....*42*

DEDICATORIA.

A mi padre, Orlando Ramón Paladino Aguilar (Q.E.P.D.),
quien en vida fue mi pilar, mi ejemplo y mi mayor inspiración.
Ingeniero de vocación y corazón, soñaba con verme alcanzar este logro.
Aunque ya no estás físicamente, tu legado me ha guiado en cada paso de este camino.
Esta meta cumplida es también tuya, porque siempre viviste en mí el deseo de llegar hasta aquí.

Y a mi madre, Karla Patricia Martínez Baltodano,
por su entrega incansable, por estar siempre al pendiente de mí,
por su fortaleza, su apoyo y su fe constante en mi formación.
Gracias por nunca soltar mi mano y por ser mi fuerza en los momentos difíciles.

A ustedes, con toda mi gratitud y respeto,
dedico este trabajo que representa más que un título:
es el fruto del esfuerzo, la constancia y la enseñanza que me inculcaron.

AGRADECIMIENTOS.

A mi amada esposa, Noelia Palacios, por ser mi compañera incansable durante estos nueve años de esfuerzo, sacrificio y perseverancia. Gracias por estar a mi lado en cada paso de esta odisea, por tu paciencia, apoyo incondicional y amor constante.

A mis hermanos Jean y Camila, con todo mi cariño y esperanza. Deseo que este logro sea para ustedes una semilla de inspiración, que les motive a luchar por sus sueños, a crecer con valentía y a nunca conformarse. Que vean en este esfuerzo la prueba de que, con dedicación y propósito, todo es posible.

A mi amigo y mentor, Ing. Eddysson Flores cuya guía y conocimientos han sido fundamentales tanto en mi desarrollo profesional en la refinería como en la realización de esta monografía. Gracias por compartir tu experiencia conmigo.

A Norvin Tórrez, por brindarme la oportunidad de ser parte del departamento técnico y confiar en mis capacidades. Sus consejos han sido piezas claves para la culminación de este trabajo.

A mi tutor el profesor MSc. Rolando Guevara, por su dedicación y entrega inquebrantable durante toda esta etapa. Su orientación y compromiso fueron pilares esenciales para culminar este trabajo.

Y, sobre todo, a Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y la vida para llegar hasta aquí. A Él le agradezco por permitirme cerrar esta etapa.

RESUMEN

El presente trabajo propone el diseño de un sistema automatizado para el control de temperatura en el proceso de precalentamiento del fuel gas en la Refinería Puma Energy ubicada en Managua, Nicaragua. La propuesta surge a raíz de la disminución en la disponibilidad del dirsol, fluido tradicionalmente utilizado como fuente térmica, lo cual ha generado fallas operativas significativas. Como solución, se plantea utilizar el fluido del pumparound de la torre atmosférica impulsado por las bombas P-160AB, controlando su flujo mediante una válvula automática (TIC-500) y un sistema de control distribuido (SCD) tipo DeltaV.

La metodología empleada incluye cálculos hidráulicos, análisis de propiedades fisicoquímicas del fuel gas y simulaciones de control utilizando herramientas especializadas como PRO/II, CONVAL y Fisher Specification Manager. Se dimensionó la válvula de control adecuada y se desarrolló una lógica de control de retroalimentación que garantiza una temperatura constante del gas, mejorando la eficiencia energética y la seguridad del proceso.

El diseño propuesto representa una mejora operativa y económica significativa, al aprovechar recursos existentes de la planta, reducir el riesgo de cavitación en las bombas, y asegurar un suministro térmico confiable. Se concluye que el proyecto es técnica y económicamente viable, con un costo estimado de C$759,110.

GLOSARIO.

La siguiente lista define siglas y términos utilizados en este texto, de una manera diferente a la que se puede encontrar en un diccionario común.

- **Controlador Indicador de Temperatura (TIC):** Instrumento que mide y controla la temperatura de un proceso. Regula el flujo de un fluido mediante una válvula.
- **Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID):** Algoritmo de control automático que ajusta una variable de salida para mantener una variable de proceso en su valor deseado.
- **Indicador de Temperatura (TI):** Dispositivo que mide y muestra la temperatura de un proceso en tiempo real.
- **Indicador de Flujo (FI):** Instrumento que indica el valor del flujo de un fluido dentro de una tubería.
- **Controlador Indicador de Flujo (FIC):** Instrumento que mide y regula el flujo de un fluido, garantizando que permanezca dentro de un rango deseado.
- **Libras por pulgada cuadrada manométrica (psig):** Unidad de medida de presión relativa. Expresa cuánta presión tiene un sistema por encima de la presión atmosférica.
- **Unidad térmica británica por libra y grado Fahrenheit (BTU/lb-°F):** Unidad que indica la cantidad de energía necesaria para aumentar un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de sustancia.
- **Grado Fahrenheit (°F):** Unidad de temperatura comúnmente utilizada en la industria para procesos térmicos.
- **Capacidad Calorífica (CP):** Cantidad de calor requerida para aumentar en una unidad la temperatura de una masa determinada de sustancia.
- **Barriles por día (Bbls/día):** Unidad de medida de volumen utilizado en la industria del petróleo para expresar el caudal de producción o consumo. Un barril equivale a 42 galones estadounidenses.
- **Pies cúbicos por segundo (ft^3/s):** Unidad de flujo volumétrico que indica el volumen de fluido que pasa por una sección de tubería en un segundo.
- **Centistokes (cSt):** Unidad de viscosidad cinemática que describe qué tan fácilmente fluye un líquido bajo la acción de la gravedad.
- **Altura neta positiva de succión disponible (ANPSD):** Presión efectiva que tiene el fluido al ingresar a la bomba. Es fundamental para evitar cavitación.
- **Altura neta positiva de succión requerida (ANPSR):** Presión mínima que necesita una bomba en su entrada para funcionar correctamente sin generar cavitación.
- **Grado API:** Indicador de la densidad relativa del petróleo con respecto al agua. Un valor mayor indica un fluido más liviano.

- **Sistema de Control Distribuido (SCD):** Sistema automatizado que permite supervisar y controlar procesos industriales a través de múltiples dispositivos interconectados.

- **Protocolo HART:** Protocolo de comunicación digital que permite la transmisión de señales e información entre instrumentos de campo y el sistema de control usando una línea analógica de corriente.

- **Pies (ft):** Unidad de longitud utilizada para medir tramos de tubería, alturas de instalación y componentes estructurales.

- **Diferencia de presión (ΔP):** Diferencia entre la presión de entrada y la presión de salida en un tramo de un sistema.

- **Diferencia de temperatura (ΔT):** Diferencia entre la temperatura de entrada y la de salida en un proceso de transferencia de calor.

- **Variable de proceso (PV):** Variable física (como presión, temperatura o flujo) que se mide y controla en un proceso automatizado.

- **Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (SAIM):** Organismo técnico que establece normas y estándares para equipos industriales como bombas y válvulas.

- **CONVAL 11:** Software utilizado para calcular pérdidas de presión, dimensionar válvulas, y modelar flujos en sistemas hidráulicos.

- **PRO/II:** Programa de simulación de procesos químicos que permite calcular propiedades fisicoquímicas de mezclas y realizar balances energéticos.

- **Sociedad Internacional de Automatización (ISA):** Entidad que desarrolla normas y buenas prácticas para la automatización industrial, incluyendo sistemas de control y gestión de alarmas.

- **DeltaV:** Sistema de control distribuido utilizado en la Refinería Puma Energy, que permite la supervisión y control en tiempo real de procesos industriales.

- **Pumparound:** Es un sistema de recirculación de líquido dentro de una columna de destilación, en el cual una corriente líquida se extrae desde un punto intermedio de la columna, se enfría en un intercambiador de calor, y luego se retorna a la columna unos niveles más arriba.

- **Shale oil:** es un tipo de petróleo que se obtiene a partir de formaciones de esquisto mediante técnicas no convencionales como la fractura hidráulica (fracking) y la perforación horizontal.

- **Fuel gas:** en refinación es una mezcla de gases ligeros combustibles (como hidrógeno, metano, etano, propano y butano), producidos en unidades como la destilación, el craqueo catalítico y el reformado, que se utiliza como combustible interno para alimentar hornos, calderas y calentadores de proceso.

I. INTRODUCCIÓN

En la industria de la refinación de hidrocarburos, la eficiencia operativa y la seguridad representan pilares fundamentales que influyen directamente en la rentabilidad, sostenibilidad y estabilidad de los procesos. Uno de los retos recurrentes en las refinerías es asegurar una combustión eficiente en los hornos, lo cual requiere un adecuado precalentamiento del fuel gas antes de su ingreso a los quemadores. Este paso no solo optimiza el rendimiento energético del proceso, sino que también minimiza la emisión de contaminantes atmosféricos.

El presente proyecto se centra en el diseño e implementación de un sistema de control automático para el calentamiento del fuel gas en la Refinería Puma Energy Managua, Nicaragua. Tradicionalmente, esta refinería ha utilizado Dirsol como fluido caliente, bombeado desde la torre atmosférica mediante la bomba P-120, para realizar este precalentamiento a través del intercambiador de calor E-18. Sin embargo, este sistema carecía de un control preciso, operando con válvulas manuales que dejaban el proceso vulnerable a las variaciones ambientales y operativas.

La introducción del shale oil como materia prima en 2019 trajo consigo una reducción significativa en la producción de dirsol, provocando fallos frecuentes en la bomba P-120 debido a cavitación y ruptura de sello, lo que comprometió la continuidad y seguridad del proceso. Frente a esta problemática, se plantea una solución basada en el uso del fluido caliente del pumparound de la torre atmosférica, impulsado por las bombas P-160AB, para alimentar el intercambiador E-18. Esta nueva configuración estará soportada por un sistema de control automático que regulará el flujo del pumparound mediante una válvula de control, asegurando una transferencia de calor eficiente y estable.

La implementación de este proyecto permitirá aprovechar mejor los recursos térmicos existentes, mejorar la eficiencia energética, reducir riesgos operativos y garantizar un calentamiento seguro y continuo del fuel gas. A lo largo de este trabajo se abordarán los componentes principales del sistema, su principio de funcionamiento, las estrategias de control implementadas, así como los aspectos económicos necesarios para asegurar su sostenibilidad a largo plazo. En conjunto, esta iniciativa representa un avance estratégico hacia operaciones más confiables, eficientes y alineadas con los objetivos de sostenibilidad de la Refinería Puma Energy.

II. OBJETIVOS

2. General

Diseñar un sistema de control de temperatura que utilice las instalaciones existentes de la refinería para precalentar el fuel gas, con el fin de mejorar la eficiencia operativa y garantizar la seguridad del proceso.

3. Objetivos Específicos

- Dimensionar una válvula de control adecuada para regular con precisión la temperatura del fuel gas en el intercambiador de calor.
- Realizar los cálculos hidráulicos necesarios para determinar el flujo de fluido a través del sistema, asegurando que se cumplan los requisitos de presión y caudal para un funcionamiento óptimo del intercambiador de calor y la válvula de control.
- Desarrollar la lógica de control para el nuevo lazo de control de temperatura denominado TIC-500 y sus respectivas alarmas de seguridad de proceso.
- Estimar el costo total del proyecto, incluyendo equipos, instalación y otros gastos, para determinar su viabilidad económica.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Bombas Centrífugas

3.1.1 Definición

Una bomba centrífuga "es una máquina que consiste de un conjunto de paletas rotatorias encerradas dentro de una caja, cubierta o coraza. Su característica principal es que aumentan la energía del fluido por la acción de la fuerza centrífuga provocada por el movimiento del fluido dentro de un rodete. Se denominan así porque la cota de presión que crean es ampliamente atribuible a la acción centrífuga" (Viejo, 2004). Las paletas imparten energía al fluido por la fuerza de esta misma acción. Una bomba centrífuga tiene dos partes principales:

- Un elemento giratorio, incluyendo un impulsor y un eje.
- Un elemento estacionario, compuesto por una cubierta, sellos mecánico y rodamientos.

Por otra parte, se debe tener en cuenta la curva del equipo en caso que se quiera conocer el comportamiento de la bomba. En Refinería Managua se tienen distintos tipos de bombas centrífugas entre ellas verticales y horizontales, que cuentan con variables operativas relevantes para saber si las condiciones de operación de las bombas son las más adecuadas para realizar el trabajo de bombeo, estas variables son definidas por (Viejo, 2004). como:

Gravedad específica. Es la relación que existe entre la densidad del líquido respecto a la densidad del agua a 60 °F (Viejo,2004).

Temperatura del líquido bombeado. Es una magnitud referida a la noción de calor medible del producto mediante un termómetro (Viejo,2004).

Emisividad. Es la medición de la capacidad de un objeto de emitir energía infrarroja. El valor de la emisividad se calcula por la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a una diferencia de temperatura con su entorno la emisividad puede tener un valor entre 0 (espejo brillante) y 1 (cuerpo negro). Para efecto de este estudio la emisividad que está definida en Refinería Puma Energy para cuerpo de bombas, tuberías oxidadas y motores eléctricos expuestos al ambiente es de 0.85.

Presión de vapor. Si un líquido se encuentra a una temperatura arriba de su punto de congelación, sufre evaporación en su superficie libre. En el seno del líquido se origina una presión que se llama presión de vapor y que está en función directa con la temperatura del líquido (Viejo,2004).

ANPSD (Altura neta positiva de succión disponible). Es la carga de succión neta positiva, medida con relación al plano de referencia, aumentada de la altura correspondiente a la presión atmosférica y disminuida de la altura debida a la tensión de vapor del líquido (Viejo,2004).

ANPSR (Altura neta positiva de succión requerida). Es un valor dado por el fabricante para alcanzar un determinado comportamiento en la bomba en dependencia de flujo, velocidad de giro, temperatura del líquido y gravedad específica. Este parámetro se encuentra definido por la siguiente ecuación (Viejo,2004).

$$\mathrm{ANPS_R} = \mathrm{Hz} + \frac{\mathrm{V}^2}{2\mathrm{g}} \qquad \textbf{EC. 1}$$

Donde,

Hz = Presión absoluta mínima necesaria en la zona inmediata anterior a los alabes.

$V^2/2g$ = Carga cinética correspondiente a la velocidad de entrada del líquido en la boca del impulsor.

ANPSD (Altura neta de aspiración disponible). Es un valor que depende de las características de la instalación y del líquido a bombear. Es una variable independiente del tipo de bomba y se calcula de acuerdo a las condiciones atmosféricas, de instalación y operación (Viejo,2004).

$$\mathrm{ANPS_D} = Ha \pm Hs - Hv - Hf \qquad \textbf{EC. 2}$$

Donde,

Ha = Presión atmosférica en pies.

Hs = Altura de succión en pies.

Hv = Presión de vapor en pies.

Hf = Pérdidas de fricción en la tubería de succión.

Flujo mínimo de la bomba. "Se define como la cantidad mínima de flujo a la descarga de la bomba para garantizar el funcionamiento libre de vibraciones y alta temperatura por recirculación interna" Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (SAIM, 2001, B73.1).
El flujo mínimo de las bombas centrífugas siempre debe tenerse en cuenta para la operación de una bomba, debido a que, si el flujo de la bomba está por debajo del valor mínimo recomendado la bomba desarrollará alta vibración y alta temperatura de recirculación que pueden dañar las balineras, el sello mecánico y otros componentes de la bomba.

Cavitación. "La cavitación es una vaporización instantánea del fluido, que se produce principalmente en las zonas en las que la presión absoluta es muy baja, a la cual sigue una rápida condensación" (SAIM, 2001, B73.1) La cavitación se puede evitar al cumplir con la siguiente condición.

$$ANPS_D > ANPS_R \qquad \textbf{EC. 3}$$

Flujo volumétrico según la literatura técnica, es la cantidad de volumen de un fluido que pasa a través de una superficie o sección transversal en una unidad de tiempo. Se expresa generalmente en unidades de volumen por tiempo.
Se encontrará el flujo volumétrico utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Flujo volumétrico} = \text{Flujo másico} / \text{ł del kerosene} * 86400 \qquad \textbf{EC. 4}$$

Se encontrará en la caída de presión del sistema utilizando la siguiente ecuación:

$$Ft = P * 2.31/Sg \qquad \textbf{EC. 5}$$

Generalidades. Las bombas que se utilizarán para impulsar el fluido caliente del pumparound hacia el intercambiador de calor E-18 serán las P-160AB, estas bombas son verticales con capacidad de 45 mil barriles por día con una potencia de 25 HP, esta bomba actualmente impulsa el fluido del pumparound por el intercambiador E-160 para precalentar el crudo a la unidad, en adición se pretende construir una derivación desde la descarga de la bomba para enviar el fluido calefactor hacia el E-18

3.2 Intercambiador de calor.

3.2.1 Definición

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos o más fluidos a diferentes temperaturas. Los fluidos involucrados no se mezclan, ya que están separados por una superficie de transferencia de calor sólida, como las paredes de los tubos en un intercambiador de calor de tipo carcasa y tubos. La finalidad principal de un intercambiador de calor es recuperar energía térmica para mejorar la eficiencia de los procesos industriales (Kern, 2018).

3.2.2 Tipos comunes de intercambiadores de calor.

Placas. Formados por una serie de placas delgadas de metal, apiladas de tal manera que forman canales para los fluidos. Los fluidos fluyen por canales alternos, lo que permite una transferencia de calor eficiente (Kern, 2018)..

Doble tubo. Compuestos por un tubo interior y un tubo exterior. Un fluido fluye por el interior del tubo interno, mientras que el otro fluido fluye en el espacio anular entre el tubo interno y el externo (Kern, 2018).

Carcasa y Tubos. Compuesto por un conjunto de tubos, donde un fluido circula por el interior de los tubos y el otro fluido fluye por el exterior de los tubos (dentro de la carcasa)

Para efecto del presente diseño el intercambiador que será utilizado será uno de carcaza y tubo (Kern, 2018)..

3.2.3 Mecanismo de transferencia de calor.

Conducción. La conducción es el proceso de transferencia de calor a través de un material sólido o entre sólidos en contacto directo. La energía térmica se transfiere por vibración y colisión de moléculas o átomos en el material, de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura (Kern, 2018).

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \qquad \textbf{EC. 5}$$

Radiación La radiación es el proceso de transferencia de calor mediante ondas electromagnéticas, principalmente en forma de radiación infrarroja. No requiere un medio material para transferirse, por lo que puede ocurrir en el vacío (Kern, 2018)..

Convección. Transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido en movimiento, o entre diferentes capas de un fluido (Kern, 2018).

$$q = h \cdot A \cdot (Ts - Tf) \qquad \textbf{EC. 6}$$

Ley de conservación de energía. Este concepto es fundamental en termodinámica, y establece que, en un sistema cerrado, cuando dos cuerpos con diferentes temperaturas entran en contacto, el calor perdido (cedido) por el cuerpo más caliente es igual al calor ganado (absorbido) por el cuerpo más frío, hasta que ambos alcancen el equilibrio térmico, para efecto de nuestro calculo es necesario encontrar la masa de keroseno (Kern, 2018)..

EC. 7

$$\text{Masa de kero} = \frac{\text{Masa de fuel gas} * CP * \Delta T}{CP\ kero * \Delta T}$$

Generalidades. El acrónimo AFIT corresponde a las siglas de la Asociación de Fabricantes de Intercambiadores Tubulares, formada por los principales fabricantes de intercambiadores de calor, de carcasa y tubos, cuya sede se encuentra en Tarrytwon (Nueva York).

Las normas y estándares AFIT definen los tipos de intercambiadores de calor y las tolerancias de mecanizado y montaje. Existen tres clasificaciones AFIT, según su funcionalidad, propósito y características principales.

El intercambiador que se utilizará para transferir calor de la corriente del pumparoud hacia el fuel gas será el E-18, este intercambiador posee un cabezal fijo de canal y cubierta desmontable (A), con una coraza de un paso (E) y de cabeza flotante con empaque exterior (P).

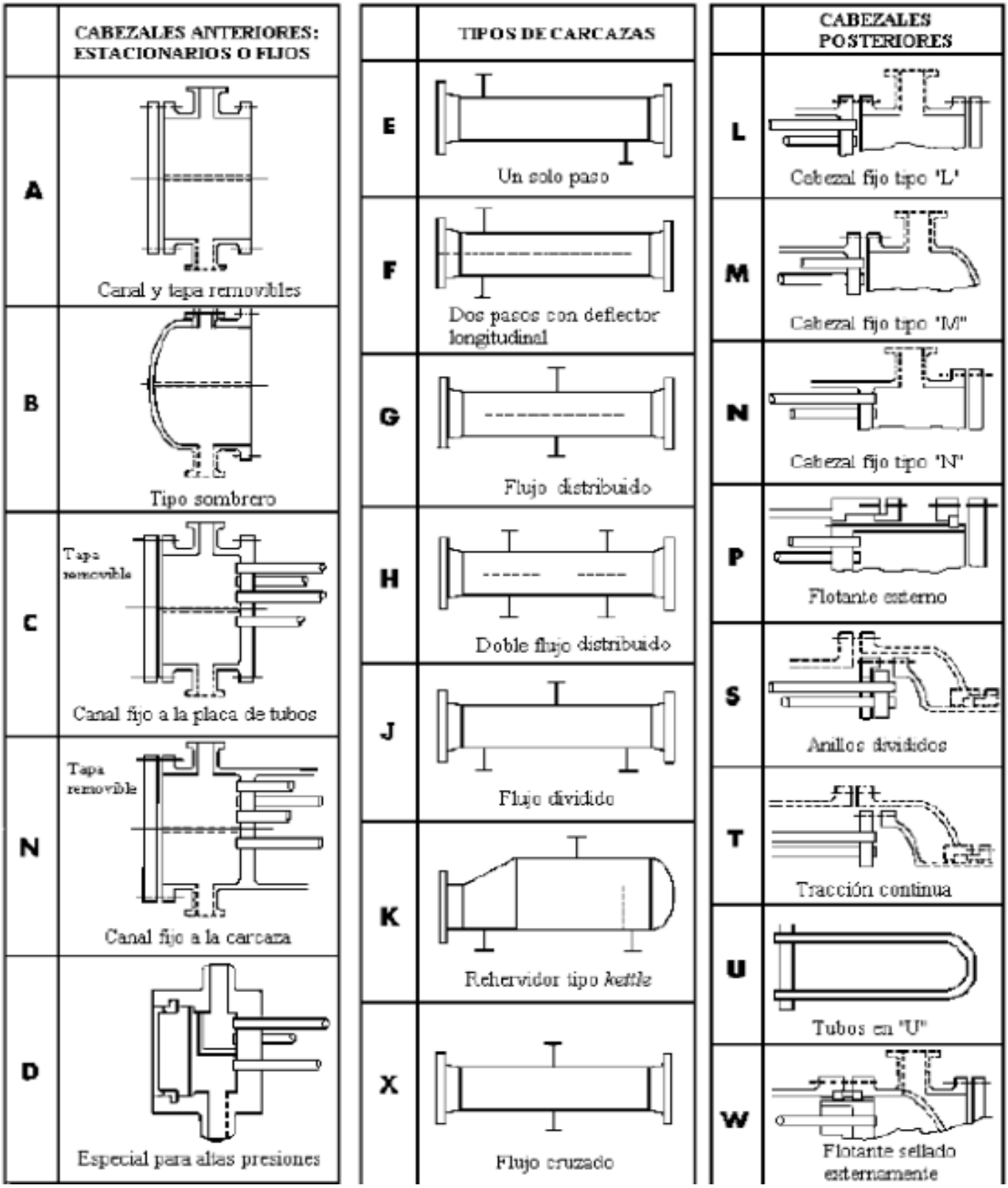


Figura 1.
Tipos de cabezales y carcazas de acuerdo a la Nomenclatura AFIT (2022)

3.3 Sistema de Control Distribuido (SCD)

3.3.1 Definición

En la Refinería Puma Energy se utiliza un Sistema de Control Distribuido aplicado a los complejos procesos que existen en la planta, y que combina la facilidad de uso, capacidades de control a gran escala de cada unidad de la planta, e integración de sistemas para ofrecer el máximo potencial de sus operaciones. El SCD también lleva una historización de las variables de proceso que posteriormente se pueden analizar y optimizar, asimismo, son limitadas con máximos y mínimos recomendables, con el objetivo de lograr preservar la integridad de todos los equipos del proceso (Emerson, 2021).

3.3.2 Elementos

En Refinería se tienen en consideración las variables operativas que se encuentran relacionadas con el funcionamiento del proceso, vinculados al funcionamiento de un intercambiador de calor. Por ejemplo, se encuentran algunos elementos del sistema de control de procesos ligados a los cambios que ocurren durante el proceso de transferencia de calor en dependencia de las condiciones del proceso como son:

Variables Controladas. Son aquellas variables o condiciones que se desean tener en un determinado valor, y cuentan con un valor deseado (señal de referencia) y un valor real en un determinado momento. Por ejemplo, para el control de temperatura del fuel gas se planea construir un lazo de control que sería denominado TIC-500.

Variables Manipuladas. Es la señal sobre la cual se actúa o se modifica con el fin de mantener la variable controlada en su valor. Continuando con el mismo ejemplo, el TIC-500 que pretende controlar el flujo de la bomba por medio de la apertura de válvula (0 – 100%), que a su vez recibe un valor de referencia por parte del operador de consola.

Señal de referencia. Es el valor en el cual se requiere mantener la variable controlada. En el caso del instrumento TIC-500, el operador de consola podrá introducir un valor entre 120- 170 F que es la temperatura requerida para poder quemar el Fuel gas en los quemadores de los hornos de refinería.

Perturbaciones. Cualquier otra variable presente en el proceso que tiende a desviar el valor de la variable controlada de su objetivo (Figura 2). En el caso de tener como variable de control de temperatura que pasa por (E-18), se puede considerar como perturbación el ensuciamiento de los tubos del intercambiador de calor, debido a que puede alterar la cantidad de masa calefactora que pasara por él mismo.

Elemento de medición. Es el encargado de determinar el valor de la variable controlada. Estos pueden ser la medición de flujo por platillo de orificio que son los elementos típicos de medición de flujo en MANREF, la medición de temperatura con termocuplas, medición de presión con transmisores de presión de membrana, entre otros.

Controlador. Es el encargado de determinar el error y determinar qué tipo de acción tomar. Por lo general se utilizan múltiples control PID organizados en un sistema de distribución.

Elemento final de control. Es el encargado de realizar la acción de control modificando la variable manipulada.

Entrada. Es el estímulo o excitación que se aplica al sistema desde una fuente de energía externa, generalmente con el fin de producir, de parte del sistema, una respuesta específica.

Salida. Es la respuesta obtenida de parte del sistema.

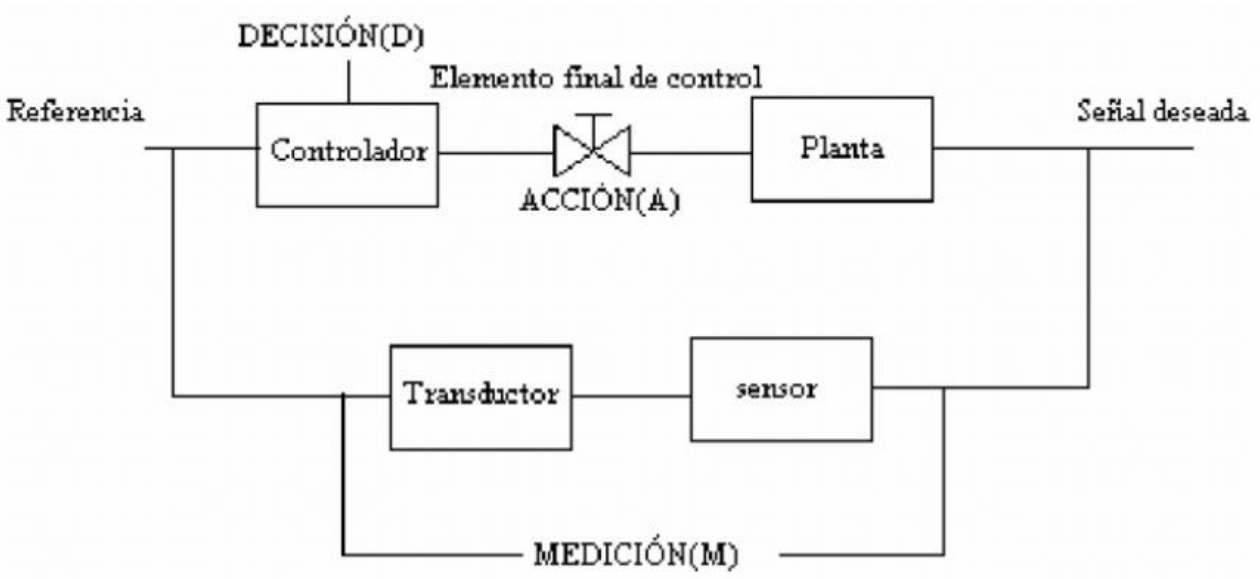


Figura 2

Control Retroalimentado utilizado con una de las estrategias de control de proceso en MANREF
Fuente: Murrill (2000).

3.3.3 Funcionamiento

Los sistemas de control distribuido se encuentran destinados a mantener el control del proceso por medio de múltiples computadoras, cada una responsable de un grupo de lazos PID, distribuidos por las instalaciones y enlazados para compartir información entre ellas y con las consolas de operación a como se describe en la Figura 3. (Villajulca, 2011).

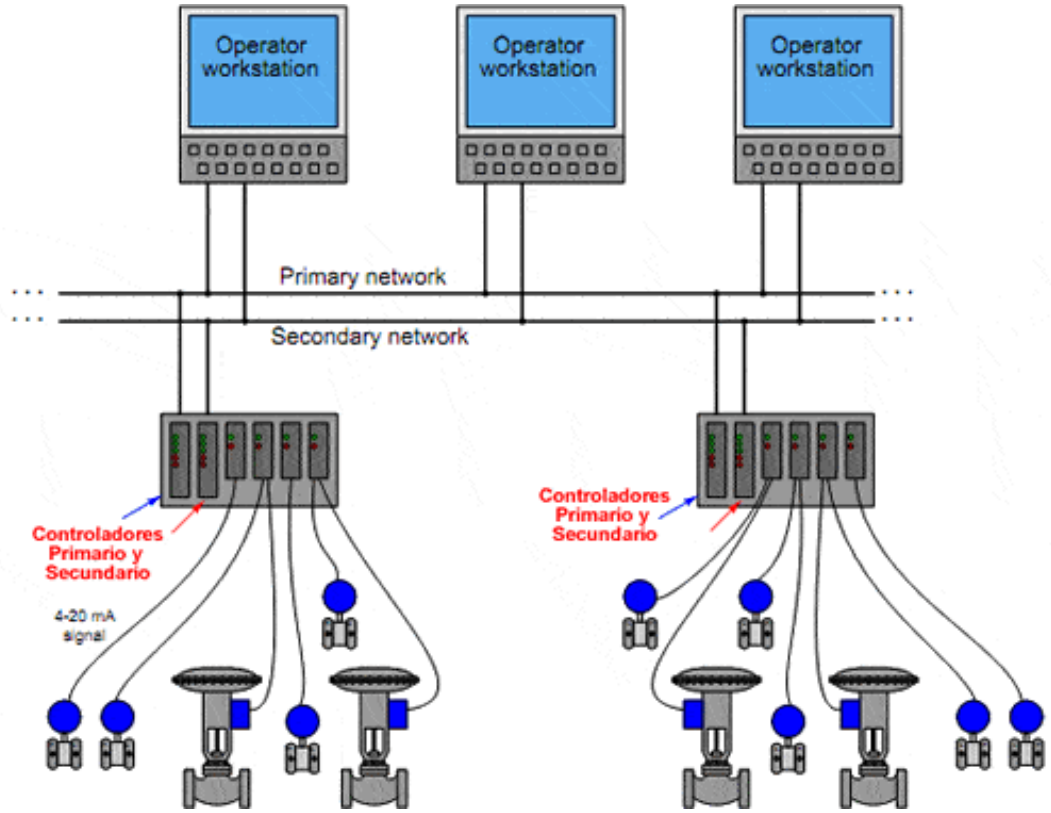


Figura 3.

Arquitectura típica de un Sistema de Control Distribuido.
Fuente: Villajulca (2011).

En ManRef se cuenta con un Sistema de control distribuido llamado DeltaV versión 14, que es proporcionado por Emerson, y es un sistema de automatización fácil de usar, debido a que su arquitectura de bloques de funciones simplifica la complejidad operativa y reduce el riesgo de operación (Emerson, 2019). En la figura 3 podemos observar la arquitectura típica de un SCD.

El controlador DeltaV, dentro del sistema DeltaV (SCD) de Emerson, es un dispositivo central de procesamiento y control que ejecuta la lógica del proceso industrial. Su tarea principal es leer variables de proceso, tomar decisiones de control en tiempo real y actuar sobre equipos de campo (Emerson, 2018). En la figura 4 podemos observar un controlador Delta VTM PF versión 14. .



Figura 4.

Controlador DeltaV™ PF versión 14.
Fuente: Emerson (2021).

El conjunto de productos y servicios de última generación que ofrece DeltaV aumenta el rendimiento de la planta con un control inteligente que es fácil de operar y mantener, tanto para el operador de consola como para el ingeniero encargado del sistema. Asimismo, DeltaV brinda un programa de gestión de alarmas que cumplen con la Gestión de Sistemas de Alarmas para las Industrias de Procesos ISA-18.2. (Emerson, 2019).

El sistema de alarmas en DeltaV se encuentra orientado a equipos mayores como hornos, reactores, intercambiadores de calor, entre otros. Para este caso en particular se planea crear alarmas basándose en los puntos críticos de la operación, como Max. y Min. Temperatura de Fuel Gas, alarma por desperfecto del instrumento de control (Emerson, 2019).

3.4 Lógica de control.

3.4.1 Definición

Es el conjunto de reglas, algoritmos y estrategias utilizadas para regular y automatizar el funcionamiento de sistemas y procesos industriales, mecánicos, eléctricos. Estas reglas determinan cómo los diferentes componentes de un sistema interactúan entre sí y cómo responden a diversas condiciones y entradas para alcanzar objetivos específicos, como mantener una variable de proceso en un valor deseado, maximizar la eficiencia, o garantizar la seguridad del sistema (Corripio, 2015).

3.4.2 Clasificación

Control manual. La operación se realiza mediante la intervención directa de un operador humano.

Control encendido/apagado. Activa o desactiva un dispositivo cuando la variable de proceso cruza un umbral predeterminado.

Control automático. El sistema opera automáticamente basado en reglas predefinidas, sin necesidad de intervención humana constante.

Control de Retroalimentación (Feedback): Ajusta continuamente el sistema basado en la comparación entre la salida real y el valor deseado (punto de ajuste).

Control de Alimentación Directa (Feedforward): Ajusta el sistema en base a las perturbaciones anticipadas, sin esperar a que el error ocurra.

Control Secuencial: Ejecuta una serie de operaciones en un orden específico, comúnmente usado en procesos de manufactura.

En el contexto del proyecto descrito para la Refinería Puma Energy, se seleccionó el control feedback (o control de retroalimentación) como sistema lógico de control, teniendo en cuenta las siguientes ventajas que nos proporciona:

Eficiencia Energética y Control de Temperatura: La implementación de un sistema de control feedback en el proceso de calentamiento del fuel gas es crucial para mantener la eficiencia energética. El control feedback permite monitorear continuamente la temperatura del fuel gas después de pasar por el intercambiador de calor E-18. Cualquier desviación de la temperatura deseada se detecta instantáneamente, y el sistema ajusta el flujo del pumparoud caliente en tiempo real para corregir la desviación. Esto asegura que el fuel gas siempre se caliente a la temperatura óptima para la combustión, minimizando el consumo de energía y las emisiones contaminantes.

Seguridad Operativa: El control feedback también mejora la seguridad operativa del sistema. Al mantener la temperatura del fuel gas dentro de los límites establecidos, se evita el riesgo de un Fuel Gas frio, el cual tendría consecuencias graves como escurrimiento de combustible por la boquilla del quemador además esto afecta negativamente la eficiencia en los quemadores. Además, el sistema incluirá alarmas en caso de detectar condiciones anómalas, protegiendo tanto el equipo como el personal de la refinería.

Sostenibilidad y Mantenimiento: Desde el punto de vista de la sostenibilidad, un sistema de control feedback contribuye a la reducción del desgaste de los componentes del sistema. Al mantener condiciones operativas estables, se reduce la frecuencia de ciclos térmicos y variaciones bruscas que podrían causar daños. Esto no solo prolonga la vida útil de los equipos, sino que también reduce los costos de mantenimiento y el tiempo de inactividad.

3.5 Protocolos de comunicación.

Un protocolo de comunicación es un conjunto de reglas que permite la transmisión de datos entre dispositivos de campo (sensores, actuadores, transmisores, válvulas de control) y sistemas de control, como un PLC o SCD. Estos protocolos aseguran la operabilidad, estandarización y eficiencia en la transmisión de datos dentro de sistemas industriales. Son esenciales para la automatización de procesos y la comunicación bidireccional en entornos industriales.

HART (Transductor remoto direccionable de alta velocidad): Protocolo híbrido que combina comunicación analógica y digital en la misma línea de 4-20 mA. Usado para configuración, monitoreo y diagnóstico de instrumentos de campo. (Beebe,2018)

Foundation fieldbus: Protocolo completamente digital que permite la comunicación entre dispositivos de campo y el sistema de control. Proporciona control distribuido y alimentación a través de un único par de cables. (Beebe,2018)

Modbus RTU/ASCII: Protocolo serial maestro-esclavo simple y ampliamente adoptado. Permite la conexión entre sensores, actuadores y sistemas de control. (Beebe,2018)

Para efecto del siguiente trabajo se utilizará el protocolo de comunicación HART para enviar y recibir las señales de los transmisores al SCD.

3.6 Costos asociados al diseño y ejecución del proyecto.

Costos asociados a tuberías e insulación: Para este diseño se considerará el costo asociado a la instalación de tuberías y accesorios de 2´´ cedula 40 raiting 150 (codo, válvulas de gaveta, conectores, manómetros etc), así mismo como la cantidad de soldadura requerida e insulación y mano de obra para realizar dicha instalación.

Costos asociados a instrumentación: Para este diseño se considera el costo asociado a la válvula de control, cableado, trasmisor de temperatura y así mismo la mano de obra requerida para realizar la instalación.

El costo total seria la sumatoria entre el costo asociado a tuberías e insulación y el costo asociado a la instrumentación, a este valor se le sumara el 25% del valor total dado que se incluirán los impuestos a pagar por estos materiales y mano de obra, basado en el costo total se procederá a solicitar el recurso para la ejecución del proyecto.

IV. METODOLOGÍA

Tipo de investigación.

El presente trabajo corresponde a una **investigación de tipo aplicada**, ya que se enfoca en el diseño y propuesta de implementación de un sistema de control automatizado para regular la temperatura del fuel gas en el intercambiador de calor E-18, utilizando el flujo de keroseno procedente de la bomba P-160AB en la Refinería Puma Energy, ubicada en Managua, Nicaragua. Esta investigación tiene un enfoque **cuantitativo** y se apoya en el análisis de datos técnicos, cálculos hidráulicos, modelado de sistemas y simulaciones de control para validar el diseño propuesto. Su propósito es ofrecer una solución práctica, eficiente y sostenible que mejore la seguridad y eficiencia operativa del proceso.

Universo de estudio: El universo del estudio está constituido por el sistema de calentamiento de fuel gas en la Refinería Puma Energy Managua, específicamente por los equipos e instrumentos involucrados en el proceso: bombas P-160AB, intercambiador E-18, válvula de control TIC-500, sensores de temperatura TI-229 y el sistema de control distribuido DeltaV. También se consideran las condiciones operativas del fuel gas y del fluido calefactor, así como los parámetros técnicos definidos por los fabricantes de los equipos.

Lugar de estudio: El estudio se llevó a cabo en las instalaciones de la Refinería Puma Energy, localizada en Managua, Nicaragua. Esta refinería es el escenario real de operación del sistema analizado, lo cual permitió que los datos empleados en la investigación fueran obtenidos de fuentes confiables como el sistema SCD (Sistema de Control Distribuido), hojas de especificaciones técnicas de los equipos y registros operativos del laboratorio de la planta.

Diseño de la investigación: El diseño de esta investigación es no experimental y de carácter transversal, ya que se basa en el análisis de condiciones existentes sin manipular directamente las variables operativas del sistema. Se recolectó información técnica disponible, se realizaron simulaciones de procesos, cálculos de ingeniería y evaluaciones económicas. Al ser una investigación aplicada, su finalidad es proponer una solución concreta y técnicamente viable, basada en los datos reales de operación, que pueda implementarse dentro del proceso actual de la refinería.

4.1 Variables de Estudio

Las variables de estudio a considerar se encuentran indicadas en la **Tabla 1, y** fueron seleccionadas tomando en cuenta las variables a considerar para el dimensionamiento de la válvula de control.

Tabla 1.

Variables consideradas para el dimensionamiento de la válvula de control TIC-500.

	Equipos involucrados	Calculo requerido	Información requerida	Unidad de medida
Variables a considerar para el dimensionamiento de la válvula de control TIC-500 y FIC-500	P-160AB	Altura Neta de aspiración disponible (NPSHA)	Presión de succión de la bomba	PSIG
			Presión de descarga de las bombas P-160AB	PSIG
			Longitud de tubería	PIE
			Diámetro de tubería	PIE
			Presión de vapor	PSIA
			Gravedad especifica	ADIMENSIONAL
			Viscosidad cinemática	CST
	E-18	Caída de presión desde la bomba hasta el intercambiador E-18	Longitud de tubería	PIE
			Diámetro de tubería	PIE
			Caída de presión del intercambiador E-18	PSIG
			Flujo másico de fluido calefactor	LB/h
			Flujo másico de Fuel Gas	LB/h
			Capacidad calorífica del Fuel Gas	BTU LB/ °F
			Capacidad calorífica de corriente del	BTU LB/ °F
		Temperatura requerida del Fuel Gas	Temperatura del Fuel Gas a la entrada del E-18	°F
			Temperatura de Fuel Gas a la salida del E-18	°F
		Temperatura requerida del Pumparound	Temperatura de entrada del fluido calefactor a la entrada del E-18	°F
			Temperatura de salida del fluido calefactor a la salida del E-18	°F
		Coeficiente de ensuciamiento del intercambiador E-18	Dato específico para intercambiador de calor E-18.	$PIE^2°F/BTU\ h$
	TIC-500	Máxima caída de presión permisible para la selección de nueva válvula	Depende de la caída de presión del sistema.	PSIG
		Flujo Min. y Max. del Fuel Gas a calentar para los quemadores de los hornos de refinería.	Depende de la condición del proceso en momentos de máxima y mínima demanda de los quemadores.	LB/h
	FI-500	Máxima caída de presión permisible para selección del indicador de flujo.	Depende de la caída de presión del sistema.	PSIG

Nota: Elaboración Propia.

4.2 Fuentes y Formas de Obtención de Información

Para el presente diseño se recolectaron los datos necesarios y registro de las condiciones de operación de los equipos instrumentos de control localizados en la succión de las bombas y después de la descarga de las P-160AB, por medio del sistema SDC. Además, de la hoja de especificación de los fabricantes de los equipos descritos anteriormente (bombas, intercambiador de calor).

4.3 Análisis y Procesamiento de la Información

La composición del fuel gas (componentes en %mol) se determinó por las cromatografías de gases que se hacen rutinariamente al fuel gas por el laboratorio. Se determinaron tres composiciones (máximo, mínimo y promedio) basado en la pureza de H2 que contiene el fuel gas, el cual es determinado por el grado de desactivación de la unidad de reformación (entre mayor desactivación del reformador, menor pureza de H2).

Los datos de composición de fuel gas fueron alimentados al software de simulación de procesos, PRO/II, con el cual se obtuvieron las propiedades físico-químicas del fuel gas PRO/II proporciono información como capacidad calorífica, viscosidad y densidad del producto que son datos requeridos para calcular el balance energético.

Se realizaron los cálculos hidráulicos para conocer la caída de presión del sistema, utilizando el software CONVAL 11, el cual usa el modelado L. Friedel "Correlación mejorada de caída de presión por fricción para flujos de tuberías de dos fases horizontales y verticales". Con este software se determinó la caída de presión que habrá en la tubería desde el ramal ubicado a la descarga de la bomba hasta la entrada del intercambiador de calor (**E-18**). Para este cálculo se han considerado también los accesorios involucrados en la construcción de la nueva línea.

Para el dimensionamiento de la válvula de control se utilizó con el software Gerencia de especificaciones para válvulas Fisher versión 2.20.00. Con este software se dimensiono la válvula de control TIC-500. El programa utiliza métodos de cálculo basados en normas reconocidas internacionalmente como SIA **(Sociedad internacional de automatización)** y CIE **(comisión internacional de electrotecnia)**.

Por otra parte, se utilizó la herramienta de Microsoft Excel 2019 para la compilación de los resultados por medio de tablas que muestran la información más relevante con respecto a los cálculos que se realizaron.

V. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Determinación de propiedades físico-químicas del gas

De acuerdo a la cromatografía de gases realizado en el laboratorio de Puma Energy se analizó la composición del Fuel gas, dicha composición se detalla en la **Tabla 2.**

Tabla 2
*Composición del Fuel gas***.**

	Componente identificado	**% presente en la mezcla Mínimo**	**% presente en la mezcla promedio**	**% presente en la mezcla Máximo**
Composición del Fuel gas	Hexano	1%	0%	0%
	Hidrogeno	52%	41%	67%
	Etileno	0%	0%	0%
	Etano	15%	28%	7%
	Metano	19%	22%	14%
	Propano	7%	6%	6%
	Propileno	0%	0%	0%
	Isobutano	2%	1%	2%
	n-Butano	3%	2%	3%
	T-2 Buteno	0%	0%	0%
	1-Buteno	0%	0%	0%
	Isobutileno	0%	0%	0%
	Cis-2-buteno	0%	0%	0%
	Isopentano	1%	1%	1%
	n-Pentano	0%	0%	0%
	1,3 Butadieno	0%	0%	0%
	1- penteno	0%	0%	0%
	2 M-buteno	0%	0%	0%
	Pentadieno	0%	0%	0%
	Heptano	0%	0%	0%

Nota: Programa PRO/II.

Los resultados de la composición físico-química del fuel gas obtenidos en PRO/II se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3

*Resultados físico-químicos del Fuel gas***.**

Propiedades Físico-químicas del gas	Unidad de medida	Composición con alto poder calorífico	Composición con poder calorífico promedio	Composición con bajo poder calorífico
Capacidad calorifica	BTU/LB-F	0.7752	0.6356	0.5821
Densidad actual	LB/FT3	0.1517	0.1370	0.1016
Viscocidad	CP	0.0096	0.0094	0.0093
Peso molecular	Lbmasa/Lbmol	17.8416	16.1487	12.0210

Nota: Programa PRO/II.

Los resultados presentados en la **Tabla 3** indican que a mayor presencia de hidrogeno, el peso molecular del fuel gas, densidad, viscosidad y poder calorífico disminuyen. Cuando el hidrogeno se encuentra en menor concentración en la mezcla del fuel gas, sus propiedades físico-químicas tienden a incrementarse.

Para efectos del balance energético, se toman en cuenta ambos escenarios para dimensionar correctamente la válvula de control que determinará con su porcentaje de apertura el flujo volumétrico de keroseno requerido que debe entregar la bomba para la transferencia de calor hacia el Fuel gas.

5.2 Determinación del flujo calefactor de keroseno

basados en los registros de máximo consumo de fuel gas de la refinería diariamente se consumen 6,510,000 Ft3 de gas tomando de referencia la densidad del gas a distintas composiciones (Mínimo, Promedio y máximo) la masa de gas se estima entre: 661.71KLbs y 987.42KLbs.

Para cuantificar la temperatura del fuel gas se utilizarán los registros del TI-229 (este mide la temperatura del gas luego de pasar por el intercambiador de calor) y del TI-163 (este mide la temperatura del keroseno a la descarga de la bomba), para efecto de la salida de la temperatura de keroseno luego de pasar por el intercambiador de calor se medirá con un termómetro infrarrojo marca Fluke, modelo:608 y una emisividad de 0.85.

La temperatura de las corrientes normalmente oscila según los valores de la **Tabla 4.**

Tabla 4
Temperaturas de las corrientes de proceso.

Temperaturas del proceso	Max	Med	Min
Temperatura de entrada del Kero	485 °F	475 °F	455 °F
Temperatura de salida del kero	180 °F	170 °F	155 °F
Temperatura de entrada del Fuel gas	100 °F	92 °F	75 °F
Temperatura de salida del Fuel gas	220 °F	190 °F	165 °F

Nota: Elaboración Propia.

Para determinar la masa de keroseno caliente necesaria para aumentar la temperatura de fuel gas, descritas anteriormente en la **Tabla 4,** hasta una temperatura Max. requerida de 220°F es necesario utilizar la **ecuación 4**:

La capacidad calorífica del keroseno se extrajo de la hoja técnica del intercambiador E-160, el cual es el intercambiador primario donde pasa un flujo máximo de 1342 GPM bombeados por las bombas P-160A/B, para precalentar el crudo de la unidad.

Para efecto del cálculo se tomó de referencia la capacidad calorifica del kero igual a: 0.707 BTU/LB-F, tomado de la hoja de diseño del intercambiador E-160.

Los resultados de la **ecuación 7** se muestran en la **Tabla 5.** Está muestra la cantidad de masa de keroseno necesaria para poder elevar la temperatura del Fuel gas, teniendo en cuenta la composición del gas a la temperatura que requiere el proceso.

Tabla 5
Masa de keroseno necesaria para elevar la temperatura del Fuel gas a distintas composiciones.

	Max	Prom	Min
Masa de kero en KLbs/Día	408.5563	239.4358	174.3902

Nota: Elaboración Propia

Una vez determinado el flujo másico de keroseno se calculó el flujo volumétrico que la bomba debe manejar para posteriormente realizar el análisis de altura neta de aspiración disponible ($ANPS_D$).

En la **Tabla 6** están los valores de los flujos requeridos para poder calentar la masa de Fuel gas a distintas composiciones.

Tabla 6

Flujos requeridos de keroseno para poder elevar la temperatura del Fuel gas a distintas composiciones.

Flujo de kero en Pie^3/s	**Max**	**Prom**	**Min**
	0.1225	0.0728	0.0534

Nota: Elaboración Propia.

Una vez encontrado el flujo volumétrico es necesario realizar la conversión de FT^3/s a Bbls/Dia para ello multiplicaremos el valor obtenido anteriormente por un factor de conversión que es de 15388.5312.

Una vez realizada la conversión pondremos los valores en Bbls/Dia en la **Tabla 7.**

Tabla 7

Flujos requeridos de keroseno para poder elevar la temperatura del Fuel gas a distintas composiciones.

Flujo de kero en Bbls/Dia	**Max**	**Prom**	**Min**
	1883.55	1120.28	821.75

Nota: Elaboración Propia.

5.3 Calculó de $ANPS_D$

Por medio del instrumento FIC-160 se ha censado un flujo máximo registrado de 42Kbarriles de keroseno enviado desde las bombas P-160AB ver **figura 5**, hacia el intercambiador de calor de E-160, esta cantidad es requerida para poder precalentar el crudo y mantener el equilibrio liquido vapor en la zona de keroseno-nafta de la torre de destilación de crudo. En este proyecto se plantea construir un ramal de la descarga de estas bombas para que el keroseno actúe como fluido calefactor, y se estima un flujo máximo de 1883.55 Bbls/Dia, para efectos del cálculo hidráulico asumiremos un flujo total de 48KBbls/Dia, desglosado de la siguiente forma en la **Tabla 8.**



Figura 5
Bombas de pumparound P160AB de Puma energy Bahamas S.A. (2025)

Tabla 8
Flujo desglosado de las bombas P160-AB

Flujo requerido de bombas P-160A/B	Bbls/Día
Flujo máximo censado por el FIC-160	42,000
10% de flujo adicional para ajuste especial al FIC-160	4,200
Flujo máximo requerido para calentar el Fuel gas	1,883
Flujo total	48,083
Flujo para efecto de calculo	**48,000**

Nota: Elaboración Propia.

Se realizo un plano isométrico **(ver anexo A)**, en este se plantea la propuesta del ramal de tubería a construir, teniendo esta propuesta como referencia se realizó el cálculo $ANPS_D$ considerando la longitud de tubería y los accesorios, en la **Tabla 9** se especifican.

Tabla 9
Caída de presión en tubería de succión de las bombas P-160AB.

Elemento	Unidad de medida	Cantidad
Tuberia de 8” cedula 40	Ft	65
Válvula de gaveta de 8” clase 300	Unidad	1
Reductor concéntrico de 6x2” cedula 80	Unidad	1
Codo de 90° radio largo 2” cedula 80	Unidad	4
Filtro a la succión de la bomba	Unidad	1

Nota: Elaboración Propia.

Realizando el cálculo en el programa CONVAL 11 **(Ver anexo B)** este da una caída de presión en la tubería de 3.82 Psig. Esta caída de presión expresada en Ft sería equivalente a 14.6 Ft, esto se calculó con la **ecuación 5.**

Desde el plato 14 de la torre T-101 (zona de extracción del pumparound) hasta el centro del ojo del impulsor de la bomba tenemos una altura de 35 Pies, para sistemas cerrados y presurizados la presión de vapor se iguala con la presión del sistema, por la tanto la **Ecuación 2** queda en dependencia de la altura de succión y de las perdidas por fricción del sistema.

Teniendo presente este dato, al evaluar un flujo de 48KBbks (1400 GPM) según la curva del equipo de bombeo esta tendrá un $ANPS_R$ de 10 Ft y un Cabezal de descarga de 70 Psig (**Ver Anexo B)**.

En la **Tabla 10** se adjunta el cálculo de altura neta de aspiración disponible lo cual indica que la bomba podrá operar sin problemas de cavitación considerando el flujo de calefacción que pasará por el intercambiador E-18.

Tabla 10

Calculo de $ANPS_D$

ΔFt	**8.6**	**Ft**
$ANPS_R$	10	Ft
$ANPS_D$/S.F	18.6	Ft
$ANPS_D$	20.4	Ft
H_P	0	Ft
H_{ST}	35	Ft
$-H_{VPA}$	0	Ft
$-H_{fs}$	14.6	Ft
DP_{Tot}	3.82	psi
$DP8_{in}$	3.82	psi
Flujo considerado para memoria de calculo		1400 GPM
Producto		Keroseno
API@60		47
API@480		102.4
Temperatura		485 F
ρ a 60		49.5 Lb/Ft3
ρ a 480		37.77Lb/Ft3
ΔP línea de 8" en 60' de tubería incluyendo 5 codos, una válvula de gaveta de 8"-150# y un filtro colocado a la succión de la Bomba		3.82 Psig

Nota: Elaboración Propia.

5.4 Dimensionamiento de la válvula de control

Para dimensionar la válvula de control es necesario conocer:

- La caída de presión en la tubería de 2" que se instalará a la descarga de la bomba.
- La caída máxima de presión que generará la nueva válvula de control.
- La máxima caída de presión que podría generar el intercambiador en caso de ensuciarse.

Para ello se realizó el cálculo de caída de presión a la descarga de la bomba con CONVAL 11 **(Ver anexo B)** , el cual dio el siguiente resultado mostrado en la **Tabla 11.**

Tabla 11

Caída de presión en tubería de descarga de las bombas P-160AB.

Calculo hidraulico	Calculo basado a un flujo de 1400 GPM	
Caída de presión válvula de gaveta 2”-300#	2.5	Psig
Caída de presión en 5 codos de 90° radio largo de 2”.		
Caída de presión en tubería de 2” en longitud de 55 pies en cedula 80		
Caída de presión en reductor concéntrico de 6”x2”		
Caída de presión en tubería de 6” *80′ cedula 40	0.02	Psig
Caída de presión en 4 codos de 90° radio largo de 6”.		
Máxima caída de presión lado de los tubos en intercambiador E-18	10	Psig
Caida de presión total	**12.52**	**Psig**

Nota: Elaboración Propia.

La caída de presión total del sistema sería de 12.52 Psig, teniendo como presión mínima a la descarga de la bomba de 70 Psig aun flujo de 48KBbls con esta información la presión resultante para el sistema sería de 57.48 Psig.

La válvula dimensionada con el programa software Gerencia de especificaciones para válvulas Fisher, toma en cuenta los datos físico-químicos del keroseno, así como el flujo requerido por el sistema. Simulando la válvula en el caso más severo este nos da una caída de presión de 11.61 Psig **(Ver anexo C),** lo cual daría una presión disponible de 45.87 Psig que satisface la presión requerida por el proceso, dado que para entrar nuevamente en la torre de destilación atmosférica T-101, la presión requerida es de 40 Psig.

La válvula de control dimensionada será de la marca Fisher y la descripción está indicada en la **Tabla 12** y la simulación en el software Gerencia de especificaciones para válvulas Fisher versión 2.20.00 se encuentra en el **anexo C**.

Tabla 12
Dimensionamiento de válvula de control TIC-500.

Marca	Emerson
Tipo	Globo
Modelo	EZ
Material del cuerpo	Acero al carbono
Tamaño	2”
Material del plug y asiento	Acero inoxidable 416 ss endurecido
Tipo de empaque	Grafito
Tipo de brida	Clase 150
Tipo de actuador	Neumático de diafragma
Aire para abrir	6-30 psig
Tipo de mecanismo de falla	Falla cerrada
Tipo de protocolo	Hart
Temperatura de diseño	550 °F
Presión máxima de diseño	150Psig

Nota: Elaboración Propia.

5.5 Descripción del lazo de retroalimentación

En este sistema de control por retroalimentación el objetivo es mantener la temperatura del fuel gas a la salida del intercambiador de calor dentro de un rango deseado, utilizando el TI-229 para medir su temperatura (ya instalado) y un controlador indicador de temperatura (TIC-500) que modula el flujo de keroseno en el lado calefactor del intercambiador.

En la **Tabla 13** se plantea la lógica que utilizara el sistema de control para mantener la temperatura del fuel gas a 180°F.

Tabla 13
Lógica de control del lazo TIC-500 y TI-229.

Instrumento	Acción
Sensor de Temperatura (TI-229)	es un indicador de temperatura y su función será medir la temperatura de salida del fuel gas en el intercambiador.
Controlador indicador de temperatura (TIC-500)	Si la temperatura del fuel gas es menor a la requerida por el TI-229, el TIC envía una señal para aumentar el flujo de keroseno, lo cual eleva el calor transferido al fuel gas. Si la temperatura es mayor a la requerida por el TI-229, el TIC reduce el flujo de keroseno, disminuyendo la cantidad de calor y evitando el sobrecalentamiento del fuel gas.
Sensor de Temperatura (TI-229)	Una vez alcanzada la temperatura especificada esta mantendrá la temperatura del fuel gas constante, abriendo o cerrando la válvula del TIC-500 en dependencia del requerimiento energético (Variable de ajuste del proceso).

Nota: Elaboración Propia.

5.6 Protocolo de comunicación: En este sistema de control por retroalimentación el objetivo es mantener la temperatura del fuel gas a la salida del intercambiador de calor dentro de un rango deseado, utilizando el TI-229 ver **figura 9**, para medir su temperatura (ya instalado) y un controlador indicador de temperatura (TIC-500) que modula el flujo de keroseno en el lado calefactor del intercambiador ver el plano del esquema en el **Anexo A.**

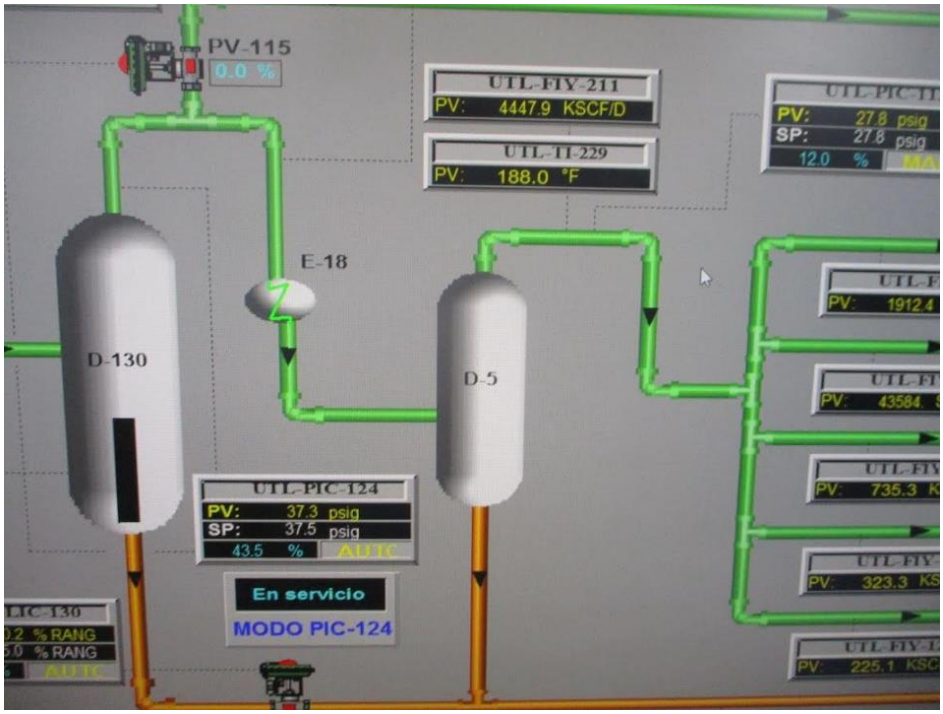


Figura 6
Variable TI-229 en el SCD de Puma Energy Bahamas S.A. (2025).

5.7 Arquitectura de comunicación:

Transmisor de Temperatura (TI-229): El TI-229 mide la temperatura del proceso y convierte este valor en una señal de corriente proporcional en el rango de 4-20 mA, 4 mA representa el valor mínimo del rango medido (por ejemplo, 100°F) y 20 mA el valor máximo (por ejemplo, 200°F). Esta señal analógica es enviada al SCD, que procesa la información para tomar decisiones.

SCD y Protocolo HART: El SCD utiliza la señal analógica para monitorear la temperatura en tiempo real, si el sistema requiere información adicional del transmisor, como diagnósticos o configuración, el protocolo HART se superpone a la señal de 4-20 mA como una comunicación digital sin interferir con la señal analógica.

Elemento final de control: Basándose en la temperatura recibida del TI-229, el SCD genera una señal analógica de 4-20 mA para controlar el transmisor de la válvula, en la **tabla 14** se propone un ejemplo de la apertura de la válvula en dependencia de la señal recibida.

Tabla 14:
Arquitectura de comunicación HART.

Corriente	% de Apertura de válvula
4mA	Válvula completamente cerrada 0%
8mA	Válvula abierta a un 25%
12mA	Válvula abierta a un 50%
16mA	Válvula abierta a un 75%
20mA	Válvula abierta a un 100% **(completamente abierta)**

Nota: Elaboración Propia.

Simultáneamente, el protocolo HART puede ser usado para supervisar o ajustar el funcionamiento del transmisor de la válvula, como la calibración o el diagnóstico.

Válvula Controlada: El transmisor de la válvula interpreta la señal analógica y ajusta su apertura o cierre dependiendo de la corriente recibida, si se detecta alguna anomalía, como una pérdida de señal, el protocolo HART permite que el ACD acceda a información adicional para diagnosticar y solucionar el problema.

Alarmas vinculadas al proceso: En el proceso, se implementarán alarmas clave para garantizar la seguridad y eficiencia operativa. La primera será una **alarma de baja temperatura**, configurada para activarse si la temperatura desciende por debajo de **170°F**, indicando una posible pérdida de calor en el sistema o fallos en el suministro de keroseno.

La segunda será una **alarma de alta temperatura**, que se activará si la temperatura supera los **210°F**, lo que podría señalar un sobrecalentamiento que pondría en riesgo la máxima temperatura de diseño de los componentes internos de la válvula de control.

Adicionalmente, se configurará una **alarma de "PV Malo" (Variable de proceso errónea)**, que se activará si el transmisor de temperatura detecta un fallo en la variable de proceso (PV, por sus siglas en inglés), como un sensor desconectado, cortocircuitado o fuera del rango operativo. Estas alarmas garantizarán que cualquier desviación crítica sea identificada rápidamente para prevenir daños mayores o interrupciones en el proceso, al detectar esta alarma la válvula de control quedara en su última posición de operación, ver **tabla 15**.

Tabla 15:
Alarmas del proceso.

Motivo de activación de la alarma	Respuesta del proceso
Temperatura menor a 170 °F	La válvula deberá de abrir hasta controlar en el valor colocado por el operador = 180°F
Temperatura mayor a 210 °F	La válvula deberá de cerrar hasta controlar en el valor colocado por el operador = 180°F
Alarma por PV Malo	Quedará en su última posición de operación.

Nota: Elaboración Propia.

5.8 Costos asociados a la ejecución del proyecto

Para este proyecto se considerará un costo teniendo presente los gastos asociados a tuberias, accesorios, soldaduras, consumibles, válvula de control y mano de obra utilizada para realizar el trabajo. En la **tabla 16**, se presenta la propuesta de gasto referente al proyecto y en la **figura 7** se observa la imagen donde se lleva acabo la ejecución del proyecto.



Figura 7
Construcción de tubería desde la bomba P-160AB hacia el intercambiador de calor E-18 en Puma Energy Bahamas S.A. (2025)
.

Tabla 16:

Materiales requeridos para instalación del TIC-500.

Item	Descripción	Unidad de medida	Cantidad	Costo	Total
1	Size NPS 2", Pipe, Carbon steel, Seamless, Sch. 80, A106 Gr. B, Plain Ends.	PIE	28	C$370	C$10,360
2	NPS 3/4", Valve, Full Port, Gate, compact, API 602, Class 800, socket welded ends, ASTM A 105 body and bonnet, bolted bonnet with A-193 Gr. B7 studs and A-194 Gr. 2H nuts, solid wedge, API Trim No.5, OS&Y. Bonnet gasket shall be spiral wound, Type 304	EA	2	C$3,145	C$6,290
3	NPS 2, Class 150, Spiral Wound Gasket, Type 304 SS windings, flexible graphite filled per ASME B16.20, carbon steel centering ring, Type 304 SS inner ring. Flexible graphite shall contain a minimum of 95% pure carbon and have a nominal density of 70 lb/ft^3.	EA	4	C$222	C$888
4	NPS 2", Valve, Full Port, Gate, compact, API 602, Class 150, flange, ASTM A 105 body and bonnet, bolted bonnet with A-193 Gr. B7 studs and A-194 Gr. 2H nuts, solid wedge, API Trim No.8, OS&Y. Bonnet gasket shall be spiral wound, Type 304	EA	2	C$4,440	C$8,880
5	NPS 6, Class 150, Spiral Wound Gasket, Type 304 SS windings, flexible graphite filled per ASME B16.20, carbon steel centering ring, Type 304 SS inner ring. Flexible graphite shall contain a minimum of 95% pure carbon and have a nominal density of 70 lb/ft^3.	EA	1	C$376	C$376
6	NPS 6", flange, welded neck, Carbon Steel ASME B16.5 Class 150, RF, A-105, Sch 40.	EA	1	C$740	C$740
7	NPS 2", flange, welded neck, Carbon Steel ASME B16.5 Class 150, RF, A-105, Sch 80.	EA	4	C$592	C$2,368
8	Size NPS 2", TEE, ASME B16.11, Sch 80, Forged, socked weld, A-105.	EA	1	C$370	C$370
9	NPS 2, 90 Degree Long Radius Elbow, weld neck, ASME B16.9, Carbon Steel, Sch 80, A-234 Gr. WPB.	UNIDAD	4	C$1,000	C$4,000
10	Plug (Tapón) SIZE 3/4": Round Head Plug carbon steel ASME B16.11, Class 3000, Threaded, Forged, external Threaded, A-105.	UNIDAD	2	C$84	C$168
11	Size NPS 6"x 4", Concentric Reducer, Sch 40, ASME B16.9, Carbon Steel, A-234 Gr. WPB, weld neck	UNIDAD	1	C$740	C$740
12	Size NPS 4"x 2", Concentric Reducer, Sch 40, ASME B16.9, Carbon Steel, A-234 Gr. WPB, weld neck	UNIDAD	1	C$925	C$925
13	Insulación, Silicato de calcio, NPS2"Ø X 2"	PIE	24	C$740	C$17,760
14	Insulación, silicato de calcio, NPS4"Ø X 2"	PIE	15	C$962	C$14,430

Nota: Elaboración Propia.

Item	Descripción	Unidad de medida	Cantidad	Costo	Total
15	Insulación, Lamina de aluminio, 0.016"X3FTX100FT	PIE	100	C$259	C$25,900
16	CLIPS SS, para insulación	CAJA	1	C$2,960	C$2,960
17	Electrodo E-6010 de 1/8in Lincoln Electric	Lb	40	C$373	C$14,920
18	Electrodo E-7018 de 1/8in Lincoln Electric	Lb	40	C$108	C$4,320
19	Electrodo E-7018 de 3/32in Lincoln Electric	Lb	40	C$117	C$4,680
20	Discos abrasivos para corte de metal DW de 4-1/2in x 3/64in x 7/8in	UNIDAD	10	C$52	C$520
21	Discos abrasivos para corte de metal DW de 4-1/2in x 3/32in x 7/8in	UNIDAD	10	C$41	C$410
22	Discos abrasivos para desbaste de metal DW de 4-1/2in x 1/4in x 7/8in	UNIDAD	10	C$67	C$670
23	Fresa rotativa cónica con punta redonda de carburo de tugsteno para desbaste de metal 1/2in x 1-1/8in x 1/4in	UNIDAD	1	C$7,385	C$7,385
24	Lima media caña para desbaste de metal de 12in	UNIDAD	4	C$197	C$788
25	Vidrios rectangular oscuros No. 11 para mascar de soldar	UNIDAD	4	C$16	C$64
26	Vidrios transparentes Mod. 2SCC2 para mascara de soldar	UNIDAD	4	C$9	C$36
27	Válvula de control tipo globo modelo EZ de 2" marca Fisher	UNIDAD	1	C$352,906	C$352,906
28	Soldador	UNIDAD	1	C$25,900	C$25,900
29	Armador de tuberías	UNIDAD	1	C$25,900	C$25,900
30	Ayudante de soldadura	UNIDAD	2	C$16,000	C$32,000
31	Armador de andamios	UNIDAD	2	C$13,500	C$27,000
32	Instrumentista	UNIDAD	2	C$17,000	C$34,000
				Total sin impuesto =	C$ 628,663
				Total más un 5% de margen=	C$ 660,096
				Impuestos=	C$ 99,014
				Total con impuestos=	C$ 759,110

Nota: Elaboración Propia.

VI. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del proyecto se llevaron a cabo diversas actividades técnicas con el objetivo de diseñar un sistema de control de temperatura eficiente y seguro para el precalentamiento del fuel gas, utilizando las instalaciones existentes de la refinería. Este trabajo incluyó el análisis y dimensionamiento de componentes clave, la implementación de estrategias de control y la evaluación económica de la solución propuesta. En conjunto, la propuesta representa un avance significativo hacia una operación más segura, eficiente y sostenible en el contexto industrial de la refinería. A continuación, se detallan las conclusiones del presente proyecto:

1. **Dimensionamiento de la válvula de control:** Se ha logrado dimensionar una válvula de control adecuada para regular de manera eficiente la temperatura del fuel gas en el intercambiador de calor, tomando en cuenta los parámetros operativos del sistema, tales como: el caudal, la presión y la temperatura de operación. La válvula elegida cumple con los requisitos de precisión y dimensionamiento necesarios para mantener la temperatura en el rango deseado entre un porcentaje de apertura de válvula de 30% a 70%, lo cual asegura un funcionamiento óptimo del intercambiador de calor y mejora la estabilidad del proceso.
2. **Cálculos hidráulicos y determinación del flujo de fluido:** Los cálculos hidráulicos realizados permitieron definir con precisión el flujo de fluido necesario para cumplir con los requisitos hidráulicos del sistema. Se ha determinado que el flujo de keroseno necesario cumple con las condiciones de presión y caudal, garantizando un $\mathrm{ANPS_D} = 18.6 > \mathrm{ANPS_R} = 10$.
3. **Desarrollo de la lógica de control TIC-500:** La lógica de control para el lazo de control de temperatura TIC-500 se diseño con una arquitectura de control de retroalimentación, este lazo de control permite reducir el error acumulativo en el tiempo de tal forma que el valor de la temperatura siempre se estará aproximando al valor de ajuste. Esto ofrecerá una regulación precisa de la temperatura del gas. La implementación de un controlador PID, junto con las alarmas de seguridad de proceso, permite una respuesta rápida ante cualquier desviación de las condiciones operativas, garantizando la seguridad y el rendimiento continuo del sistema.

4. **Estimación del costo total del proyecto:** El análisis de costos realizado permitió establecer una estimación precisa del presupuesto requerido para la implementación del proyecto el cual oscila en un monto de **C$759,110.** La inclusión de los costos de equipos, instalación y operación ha permitido evaluar la viabilidad económica, mostrando que el proyecto contribuye a la eficiencia operativa y la seguridad del proceso.

VII. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto y con el objetivo de optimizar aún más el desempeño del sistema, se proponen una serie de recomendaciones técnicas. Estas sugerencias buscan mejorar la precisión del control, reforzar el monitoreo de variables críticas y prevenir posibles fallas operativas en condiciones de alta demanda. A continuación, se detallan las recomendaciones que se consideran relevantes para garantizar la eficiencia, seguridad y sostenibilidad del sistema a largo plazo.

1. Se recomienda realizar sintonía al controlador de acuerdo a la dinámica del proceso, evaluando las variables ganancia, tiempo muerto, tiempo derivativo e integrativo, esta recomendación deberá de ser asignada al ingeniero de aplicaciones de Refinería Puma Energy S.A.

2. Se recomienda instalar transmisores de presión a la entrada y la salida del intercambiador para monitorear la caída de presión en tiempo real con el SCD, dado que es una variable que influye significativamente en la válvula de control TIC-500, esta recomendación deberá de ser asignada al departamento de instrumentación y electricidad de Refinería Puma Energy S.A.

3. Considerar ampliar la línea de succión de la bomba dado que la velocidad del fluido considerando la carga máxima de este proyecto podría crear erosión de la línea de succión de la bomba, así mismo si se quisiera aumentar por encima de 1400 GPM el flujo de la bomba esta podría tener problemas de cavitación dado que la caída de presión sería muy grande, esta recomendación deberá de ser asignada al departamento de tecnología de proceso de Refinería Puma Energy S.A.

VIII. BIBLIOGRAFIA

Whitesides, R., (2020). Consideraciones prácticas para arreglo en succiones de bombas. [Curso online para cálculos hidráulicos PH-134].

https://pdhonline.com/courses/m134/m134content.pdf

Emerson (2019.) Sistema de control distribuido DeltaV. Obtenido de: ParraA. (s.f.)

Villajulca, J. (2011) Introducción a los SCD: Sistemas de Control Distribuido. Obtenido de:

https://instrumentacionycontrol.net/introduccion-a-los-dcs-sistemas-de-control-distribuido/

Blevins, T., & Nixon, M. (2021). *Modern DCS solutions with Emerson DeltaV*. Estados Unidos: ISA.

Corripio, A. (2015). *Control automático de procesos*. México: Editorial Noriega.

Kern, D. Q. (2018). *Process heat transfer*. Estados Unidos: McGraw-Hill.

Lavine, A. S. (2011). *Fundamentos de transferencia de calor* (7ª ed.). Estados Unidos: Wiley.

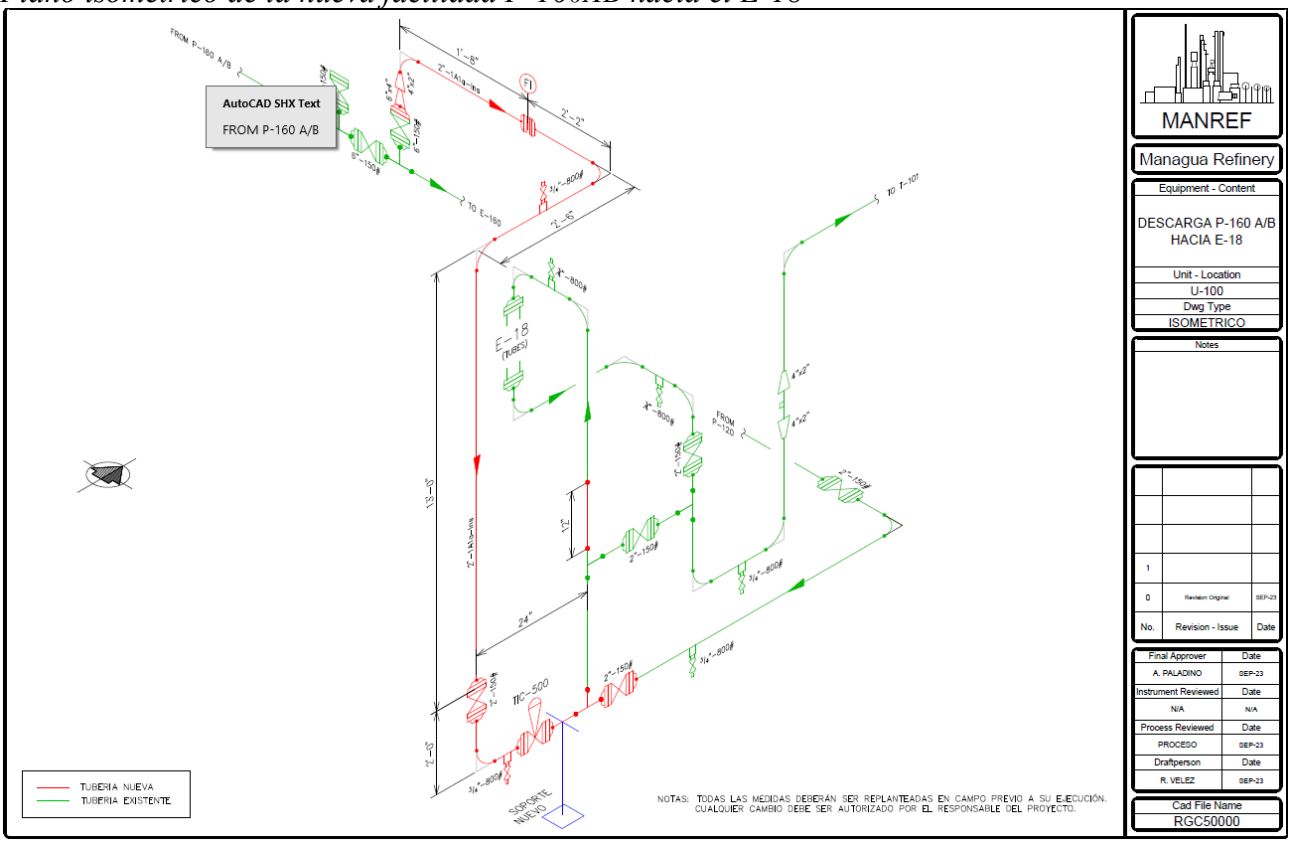
Mott, R. L. (2015). *Mecánica de fluidos* (7ª ed.). Estados Unidos: Pearson Education.

Green, D. W., & Southard, M. Z. (Eds.). (2019). *Perry's chemical engineers' handbook* (9th ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill Education.

Anexo A: Planos y PID del proyecto.

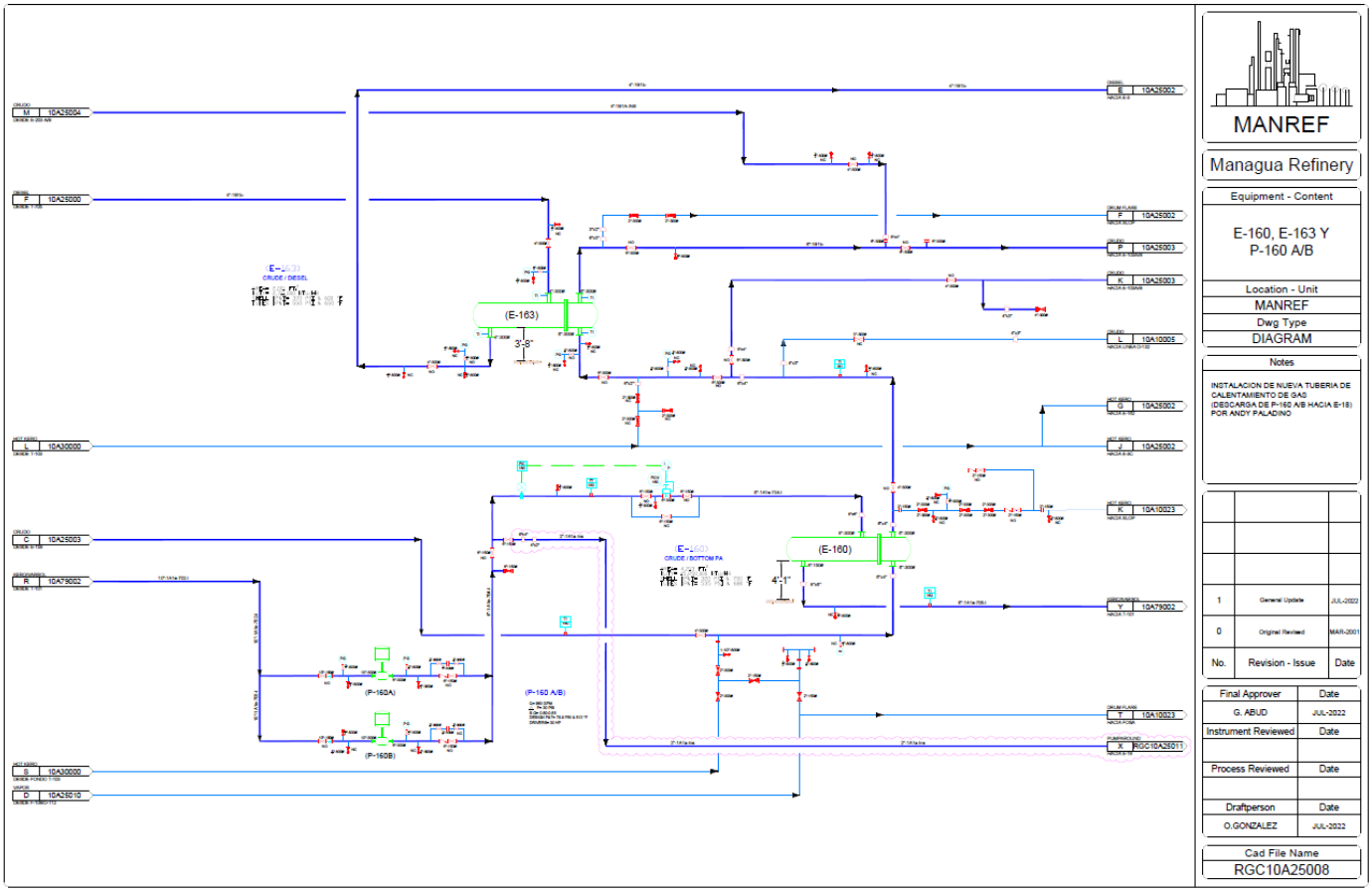
Puma Energy Bahamas S.A. (2025)

Plano isométrico de la nueva facilidad P-160AB hacia el E-18



Nota: Elaboración propia

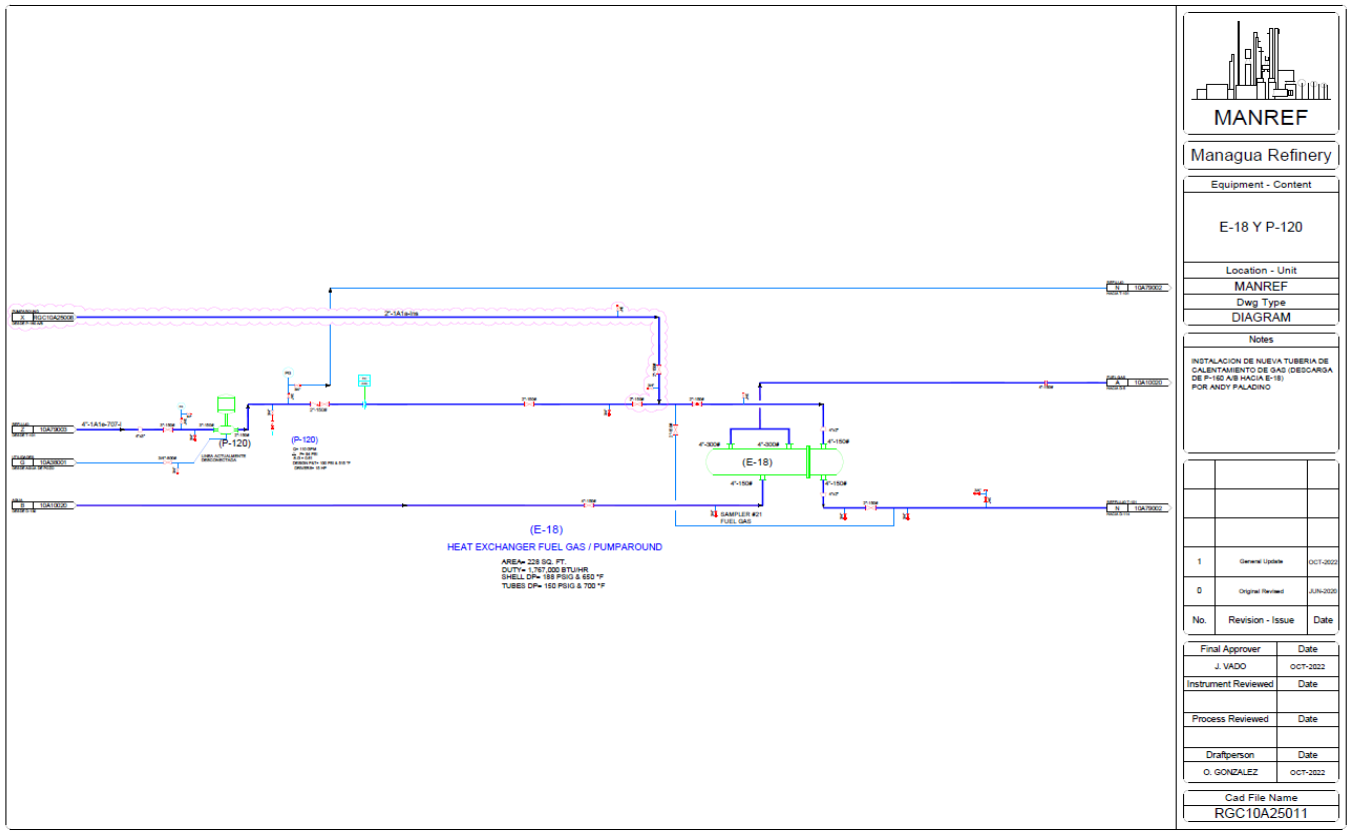
Puma Energy Bahamas S.A. (2025)
Plano PID de la nueva facilidad circuito de las bombas P-160AB.



Nota: Elaboración propia

Puma Energy Bahamas S.A. (2025)

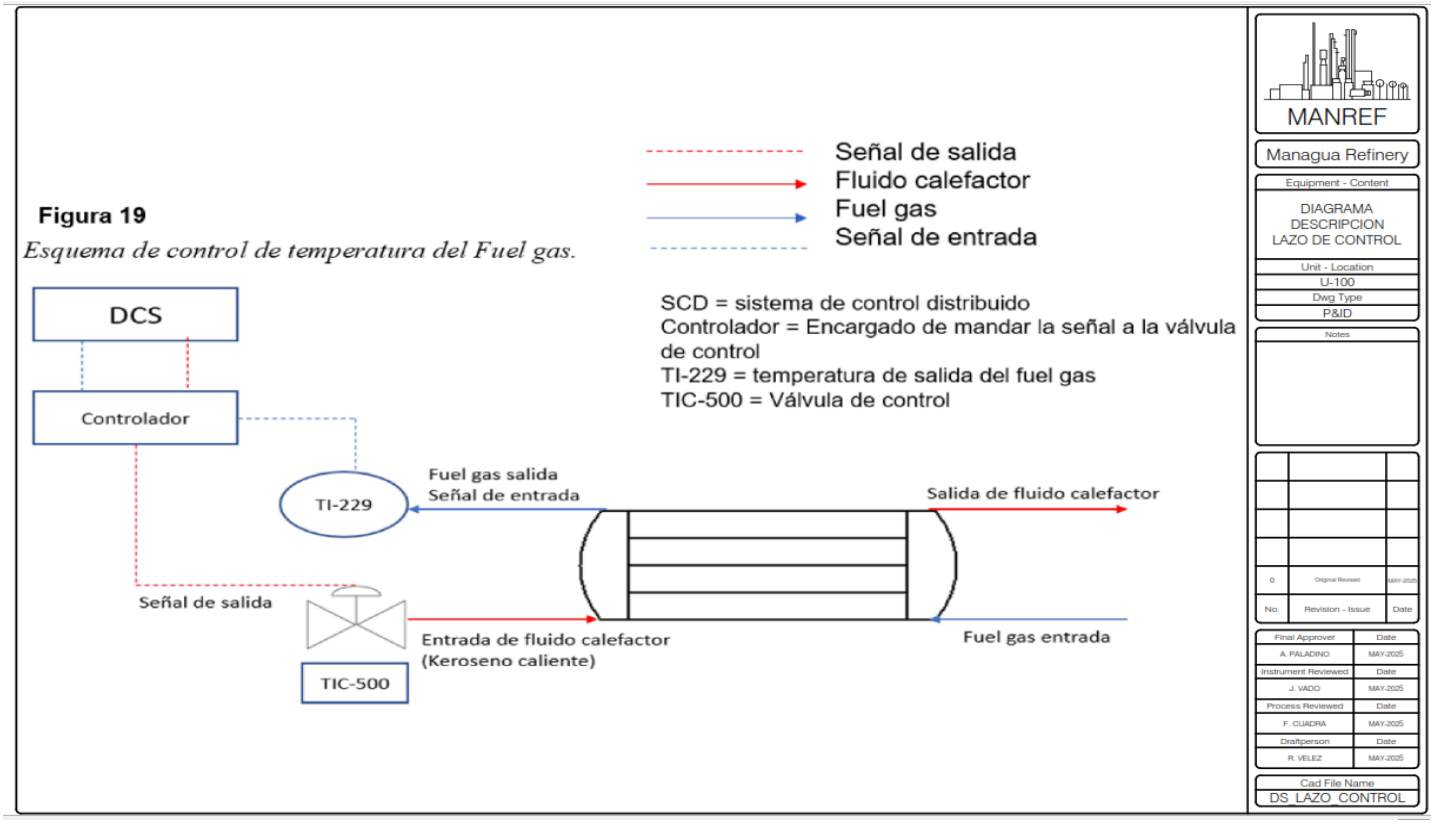
Plano PID de la nueva facilidad circuito del intercambiador E-18.



Nota: Elaboración propia

Puma Energy Bahamas S.A. (2025)

Plano del esquema de control de temperatura del fuel gas utilizando sistema de retroalimentación.



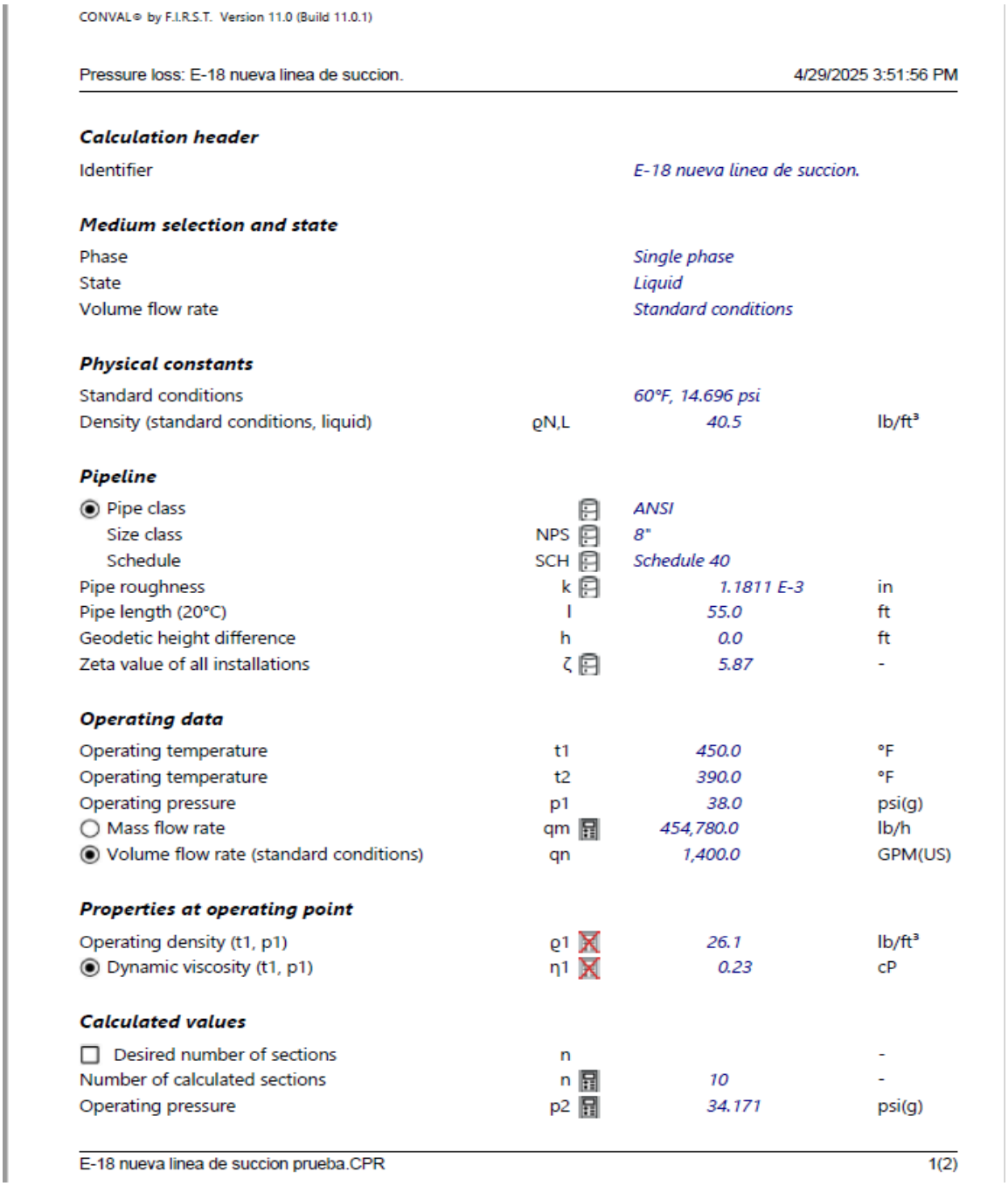
.

Nota: Elaboración propia

Anexo B: Calculo de caída de presión en línea de succión y descarga de la bomba.

Figura 9

Interfaz de programa Conval 11 para calcular caída de presión en la succión de la bomba.



CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 11.0 (Build 11.0.1)

Pressure loss: E-18 nueva linea de succion. 4/29/2025 3:51:56 PM

Calculation header

Identifier		*E-18 nueva linea de succion.*	

Medium selection and state

Phase		*Single phase*	
State		*Liquid*	
Volume flow rate		*Standard conditions*	

Physical constants

Standard conditions		*60°F, 14.696 psi*	
Density (standard conditions, liquid)	ρN,L	*40.5*	lb/ft³

Pipeline

◉ Pipe class		*ANSI*	
Size class	NPS	*8"*	
Schedule	SCH	*Schedule 40*	
Pipe roughness	k	*1.1811 E-3*	in
Pipe length (20°C)	l	*55.0*	ft
Geodetic height difference	h	*0.0*	ft
Zeta value of all installations	ζ	*5.87*	-

Operating data

Operating temperature	t1	*450.0*	°F
Operating temperature	t2	*390.0*	°F
Operating pressure	p1	*38.0*	psi(g)
○ Mass flow rate	qm	*454,780.0*	lb/h
◉ Volume flow rate (standard conditions)	qn	*1,400.0*	GPM(US)

Properties at operating point

Operating density (t1, p1)	ρ1	*26.1*	lb/ft³
◉ Dynamic viscosity (t1, p1)	η1	*0.23*	cP

Calculated values

☐ Desired number of sections	n		-
Number of calculated sections	n	*10*	-
Operating pressure	p2	*34.171*	psi(g)

E-18 nueva linea de succion prueba.CPR 1(2)

Nota: Elaboración propia

Figura 11

Interfaz de programa Conval 11 para calcular caída de presión en la succión de la bomba.



CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 11.0 (Build 11.0.1)

Pressure loss: E-18 nueva linea de succion. 4/29/2025 3:51:56 PM

Calculated values (continued)

Total pressure loss	Δp	*3.829*	psi
Pressure loss of pipeline	Δpl	*0.61967*	psi
Pressure loss of geodetic height	Δph	*0.0*	psi
Pressure loss of resistances	Δpζ	*3.2093*	psi
Power loss	P	*4.8523*	hp(I)
Average Reynolds number	ReM	*1.5648 E6*	-
Average pipe friction coefficient	λM	*0.013706*	-
Average operating density	ϱM	*26.1*	lb/ft³
Average dynamic viscosity	ηM	*0.23*	cP
Average kinematic viscosity	νM	*0.55013*	cST
Average pipe inside diameter	DiM	*7.981*	in
Max. flow velocity	u,max	*13.932*	ft/s

Net positive suction head (NPSH)

☐ Calculate net positive suction head

Missing input data:

➔ Missing parameter: Medium

Comments:

Zeta value of all installations - ζ

5 Elbow, Smooth Angle = 90° (5.35)
1 Gate valve partly closed, closed = 10% (0.06)
1 Sudden pipe contraction, d2/d1 = 0.3 (0.46)

Legend

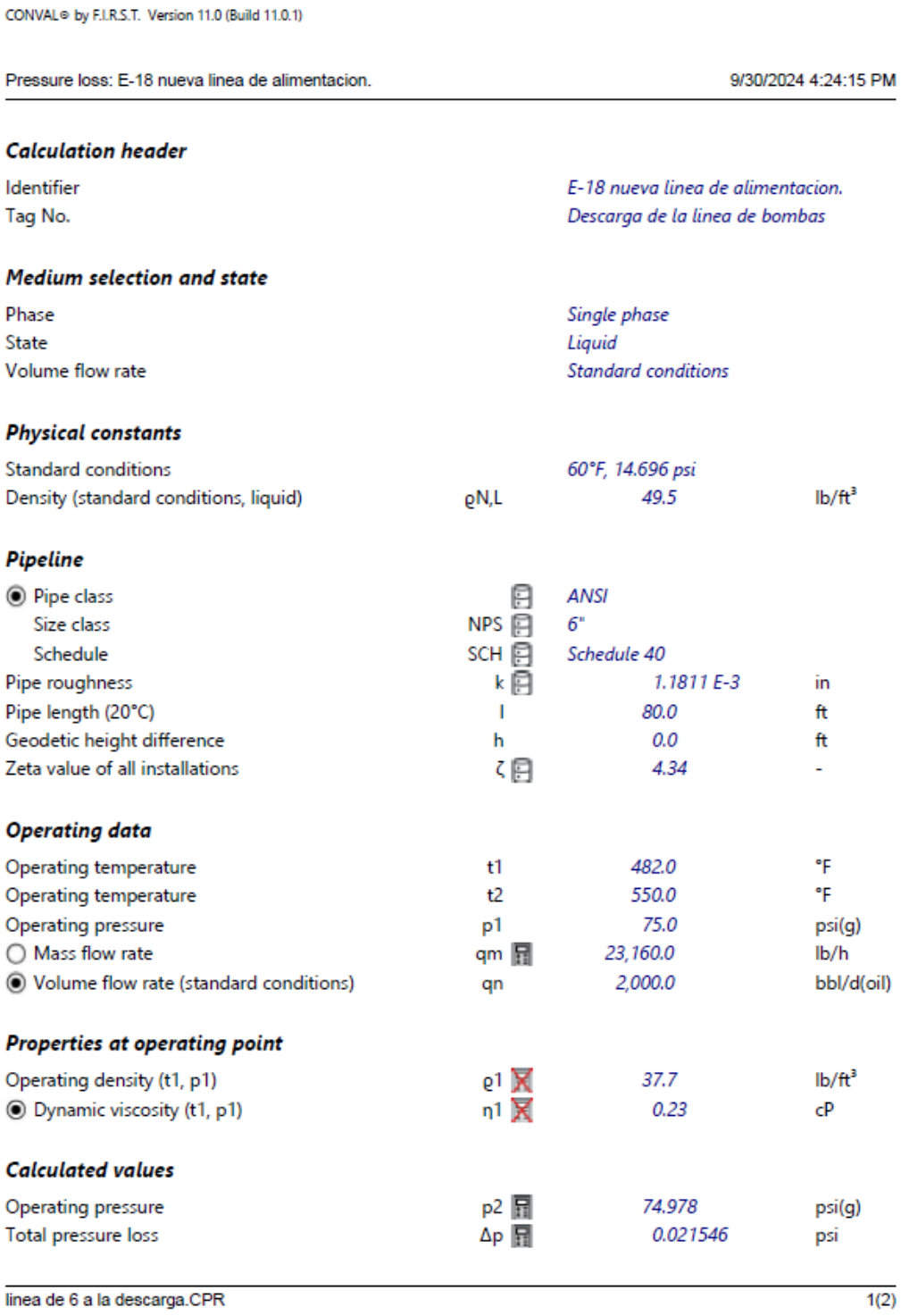
Calculated value
Modified calculated value
Lookup value
➔ Missing data

E-18 nueva linea de succion prueba.CPR 2(2)

Nota: Elaboración propia

Figura 12

Interfaz de programa Conval 11 para calcular caída de presión en la descarga de la bomba.



CONVAL® by F.I.R.S.T. Version 11.0 (Build 11.0.1)

Pressure loss: E-18 nueva linea de alimentacion. 9/30/2024 4:24:15 PM

Calculation header

Identifier		*E-18 nueva linea de alimentacion.*	
Tag No.		*Descarga de la linea de bombas*	

Medium selection and state

Phase		*Single phase*	
State		*Liquid*	
Volume flow rate		*Standard conditions*	

Physical constants

Standard conditions		*60°F, 14.696 psi*	
Density (standard conditions, liquid)	ϱN,L	*49.5*	lb/ft³

Pipeline

◉ Pipe class		*ANSI*	
Size class	NPS	*6"*	
Schedule	SCH	*Schedule 40*	
Pipe roughness	k	*1.1811 E-3*	in
Pipe length (20°C)	l	*80.0*	ft
Geodetic height difference	h	*0.0*	ft
Zeta value of all installations	ζ	*4.34*	-

Operating data

Operating temperature	t1	*482.0*	°F
Operating temperature	t2	*550.0*	°F
Operating pressure	p1	*75.0*	psi(g)
○ Mass flow rate	qm	*23,160.0*	lb/h
◉ Volume flow rate (standard conditions)	qn	*2,000.0*	bbl/d(oil)

Properties at operating point

Operating density (t1, p1)	ϱ1	*37.7*	lb/ft³
◉ Dynamic viscosity (t1, p1)	η1	*0.23*	cP

Calculated values

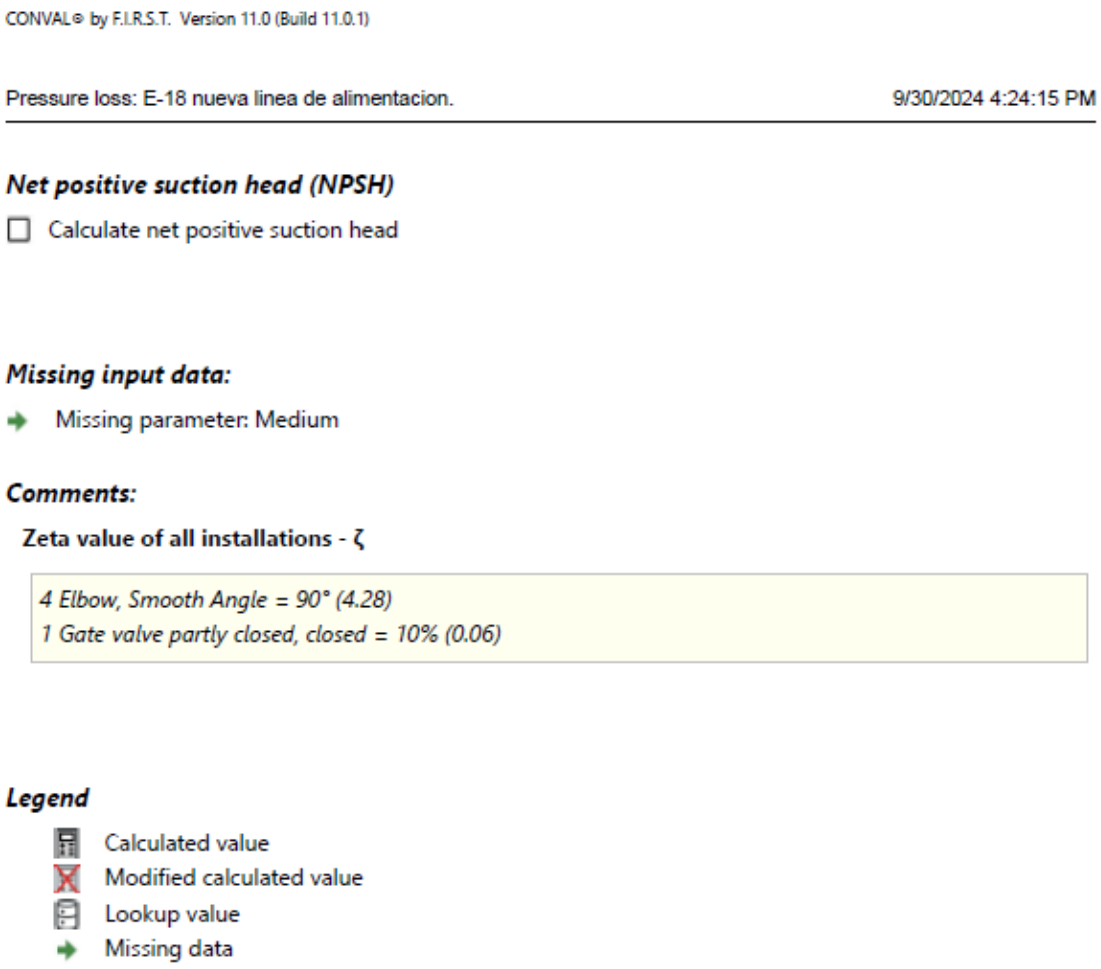
Operating pressure	p2	*74.978*	psi(g)
Total pressure loss	Δp	*0.021546*	psi

linea de 6 a la descarga.CPR 1(2)

Nota: Elaboración propia

Figura 13

Interfaz de programa Conval 11 para calcular caída de presión en la descarga de la bomba.



Nota: Elaboración propia

Anexo C: Dimensionamiento de válvula de control TIC-500

Figura 14

Interfaz de software Gerencia de especificaciones para válvulas Fisher versión 2.20.

FISHER

Sliding Stem Valve Specification

EMERSON

Customer:	Mauricio Soto
Contact:	Contact: **Dennis Lopez**
Customer Reference:	Sales Office Reference: **MS0924-1004N01** Lead Time:
Item: **1** Rev: Qty: **1**	
Tags:	Date Last Modified: **09/27/2024**
Description: **NPS 1 1/2 EZ 667 Size 30i DVC6200 Factory Mtgs DVC7K/DVC6200/DVC2000**	
Service Description:	

Service:	
Size and Type:	**NPS 1 1/2 EZ**
Body Style:	**Globe**
Design Temp:	**550 deg F**
Design Press:	**90 psig**
End Connect/In/Out:	**CL300/RF Flg/RF Flg**
Material:	**WCC Steel**
Ports:	**1**
Flow Direction:	**Up**
Trim Number:	**101**
Cage Matl:	
Retainer Matl:	**CB7Cu-1 SST**
Bushing Matl:	**S17400 SST**
Seat Ring Matl:	**S41600 SST**
VALVE PLUG	
Material:	**S41600 SST**
Guiding:	**Post**
Balance:	**Unbalanced**
Shutoff Class:	**ANSI CL IV**
Port Size:	**1 1/2 Inch**
Characteristic:	**Equal Percent**
Stem Material:	**S31600 SST**
Stem Size:	**3/8 Inch**
Bonnet Style:	**Plain**
Boss Size:	**2 1/8**
Packing:	**Single Graphite**
Access:	**No,No**
Bolt, Bonnet:	**SA-193-B7 Studs/2H Nuts NCF2**
PackFlg/Bltg:	**SST Pkg Flg, SST Studs & Nuts**
Actuator:	**Spring & Diaphragm**
Type/Size:	**667/30i**
Travel:	**3/4 Inch**
Bench Set:	**12-24 psi**
Push Down To:	**PDTC**
Supply:	**Air**
To Actuator:	**0 to 33 psig**
Fails Valve:	**Close**
Handwheel:	**None**

Positioner Type:	**DVC6200,HART Communicating-HC**
Input Signal:	**4 to 20 mA dc**
Access:	**67CFR Filter/Regulator**
Gauges:	**0-60 psig/0-4 bar**
Action:	**Direct**
Certification:	**FM,Explosion Proof/Intrinsic Safe/Nonincendive**
Controller Type:	
Action:	
Measure Element:	
Range:	
Output:	
Mounting:	
Airset:	
Mounting:	
Transducer:	
Input Signal:	
Output Signal:	
Action:	
Mounting:	
Airset:	
Certifications:	
Line In:	**2 in, SCH 40**
Line Out:	**2 in, SCH 40**
Insulation:	**None**
Service Cond:	
Process Fluid:	
Critical Pressure:	**150.000 psig**
Shutoff Drop:	**90 psi**
Max Rated Cv:	**28.1**

Variable Name	Unit	Minimum		Maximum	
Volumetric Flow Rate Liquid (Ql)	**barrel/d**	**785.00**		**2000.00**	
Inlet Pressure (P1)	**psig**	**75.000**		**90.000**	
Outlet Pressure (P2)	**psig**	**70.000**		**70.000**	
Inlet Temperature (T1)	**deg F**	**550.0000**		**550.0000**	
SG		**0.618**		**0.573**	
Kinematic Viscosity (Nu)	**cSt**	**0.010**		**0.010**	
Vapor Pressure (Pv)	**psig**	**55.600**		**55.600**	
Sizing Coefficient (Cv)		**8.069**		**9.910**	
% Open		**65**		**70**	

Nota: Elaboración propia

Figura 15

Interfaz de programa Conval 11 para calcular caída de presión en la descarga de la bomba.

FISHER

Valve/Regulator Sizing Calculation

EMERSON

Customer: Mauricio Soto
Contact: Contact: **Dennis Lopez**
Customer Reference: Sales Office Reference: **MS0924-1004N01** Lead Time:
Item: **1** Rev: Qty: **1** Rev: **A**
Tags: Date Last Modified: **09/27/2024**
Description: **NPS 1 1/2 EZ 667 Size 30i DVC6200 Factory Mtgs DVC7K/DVC6200/DVC2000**
Service Description:
Atención:; Ing. Andy Paladino.

Sizing Type: Liquid | Flow is Turbulent | Solving for: Cv | Noise is None | Flow is Volumetric

Variable Name	Units	Minimum	Normal	Maximum
SERVICE & SIZING				
Liquid				
Specific Gravity (SG)		0.618		0.573
Inlet Pressure (P1)	psig	75.000		90.000
Outlet Pressure (P2)	psig	70.000		70.000
Inlet Temperature (T1)	deg F	550.0000		550.0000
Volumetric Flow Rate Liquid (Ql)	barrel/d	785.00	1500.00	2000.00
Pressure Recovery Factor (Fl)		0.970	.97	0.970
Valve style modifier (Fd)		0.189	.14	0.211
Cavitation coefficient (Kc)		0.600	0.600	0.600
Kinematic Viscosity (Nu)	cSt	0.010	1.000	0.010
Vapor Pressure (Pv)	psig	55.600		55.600
Critical Pressure (Pc)	psig	150.000		150.000
Atmospheric Pressure	psi	14.69	14.69	14.69
Pipe Size Up	in	2		2
Pipe Schedule Up		40	STD	40
Pipe Size Down	in	2		2
Pipe Schedule Down		40	STD	40
Nominal Valve Diameter (dv)	in	1.500	1.500	1.500
Sizing Coefficient (Cv)		8.069		9.910
% Open		65		70
Application Ratio (Ar)		0.258		0.581
dP Cavitation	psi	11.612		20.567
dP Choked	psi	32.785		46.657
Fp		1.00		1.00
VELOCITY OUTPUTS				
V1 Pipe	ft/s	2.188		5.575
V2 Pipe	ft/s	2.188		5.575

Item Notes:
MAURICIO SOTO CORP
EMERSON PROCESS MANAGEMENT
Fisher Controls.

Nota: Elaboración propia

Figura 16
Cotización de válvula TIC-500.

MAURICIO SOTO
LIMITED CORP.

ventas@msotoltda.com
OFICINA TÉCNICA
TEL: (506) 2296-0700
FAX: (506) 2296-0080

COTIZACION

PUMA ENERGY BAHAMAS S.A.
Cuesta del plomo
Managua, Nicaragua
Atención: Ing. Andy Paladino.

Fecha	Numero de Cotización
27 de septiembre de 2024	**MS0924-1004N01**
Req. TIC-500	Favor de citar número en su período de validez

PLAZO DE ENTREGA: 8 SEMANAS

Item	QTY	DESCRIPCION	Precio Unit.	PRECIO
1	1	VALVULA DE CONTROL TIPO GLOBO. EZ, 2" Válvula de control Fisher Controls tipo globo modelo EZ. Tipo Cierre Leakage Class IV Cuerpo: 2" de Acero WCC Plug y Asiento de acero inoxidable 416 SST endurecido Seat Ring Retainer de Acero Inox. 17-4PH SST endurecido. Empaques de FGM Inconel/Grafito Empaquetadura de Grafito Yoke Boss: 2-1/8" Puerto: 2" Equal Percent Carrera: 1-1/8" Conexiones: Brida ANSI Class 300 RF Actuador neumático de diafragma modelo 667 tamaño 30 Aire para abrir. Aire al diafragma: 6-30 Psig. Resorte para accionar válvula en falla de aire. (Fail Close) Posicionador Inteligente FIELDVUE modelo DVC6200 Comunicación digital y Protocolo HART, nivel inteligencia HC montado directo en el actuador. Incluye Filtro de aire y Manómetros Señal de entrada: 4-20mA Procolo HART	$9,088.84	$9,088.84
		COSTO APROXIMADO DE FLETES, SEGUROS Y ENVÍO.		$450.00
		TOTAL DE LA OFERTA CIF NICARAGUA **Casa Fabricante: FISHER CONTROLS**		**$9,538.84**

Nota: Elaborado por Mauricio Soto Limeted Corp.

Anexo D: Curva de las bombas.

Figura 17

Curva de la bomba P-160AB.

Pump Data Sheet - Afton Pumps

Company: ESSO Standard Oil S.S. LTD
Name: P.O. #: KEW-F-19020
Date: 06/29/2022

Item #: P-160 A / B Bottom P/A
Afton S/N: 31778-1 & -2

afton pumps inc.

Pump:

Size:	6x8 - 13L	Dimensions:	
Type:	ILVS	Suction:	8 in
Synch Speed:	1800 rpm	Discharge:	6 in
Dia:	10.875 in		
Case Pat:	07-001-227A		
Impeller Pat:	07-003-115		
Specific Speeds:	Ns: 1513		
	Nss: 8029		

Search Criteria:

Flow:	960 US gpm	Near Miss:	---
Head:	109.9 ft	Static Head:	0 ft

Fluid:

Name:	unknown		
SG:	0.65	Vapor Pressure:	100 psi a
Density:	40.5 lb/ft³	Atm Pressure:	14.7 psi a
Viscosity:	0.23 cP		
Temperature:	513 °F	Margin Ratio:	1

Pump Limits:

Temperature:	500 °F	Sphere Size:	---
Wkg Pressure:	740 psi g		

Motor:

Standard:	NEMA	Size:	30 hp
Enclosure:	TEFC LP	Speed:	1800 rpm
Frame:	286LP		
Sizing Criteria:	Max Power on Design Curve		

Pump Selection Warnings:

Specified fluid temperature exceeds limit for the pump.

--- Duty Point ---

Flow:	968 US gpm
Head:	112 ft
Eff:	66.9%
Power:	26.5 hp
NPSHr:	8.17 ft
Speed:	1750 rpm

--- Design Curve ---

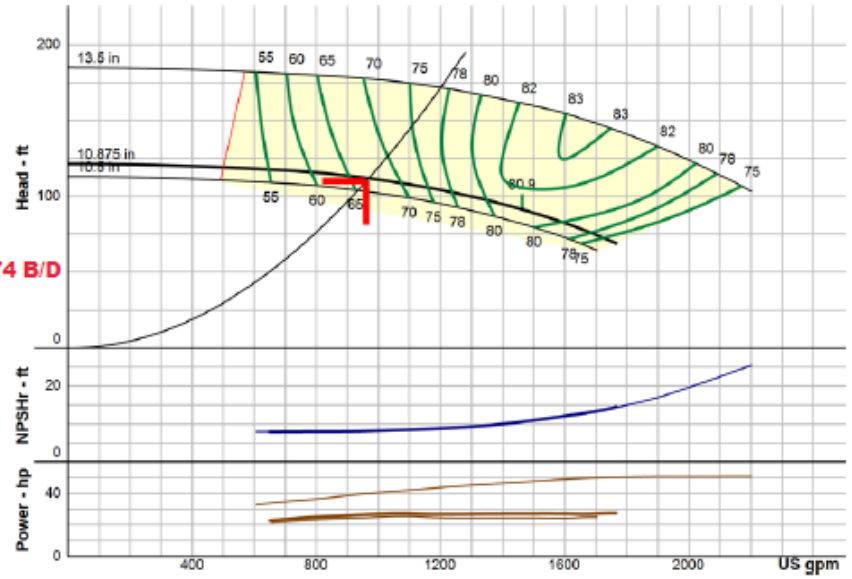
Shutoff Head:	122 ft
Shutoff dP:	34.2 psi
Min Flow:	498 US gpm

17,074 B/D

BEP: 80.9% @ 1464 US gpm
NOL Power:
27.5 hp @ 1770 US gpm

--- Max Curve ---

Max Power:
50.6 hp @ 2171 US gpm



Performance Evaluation:

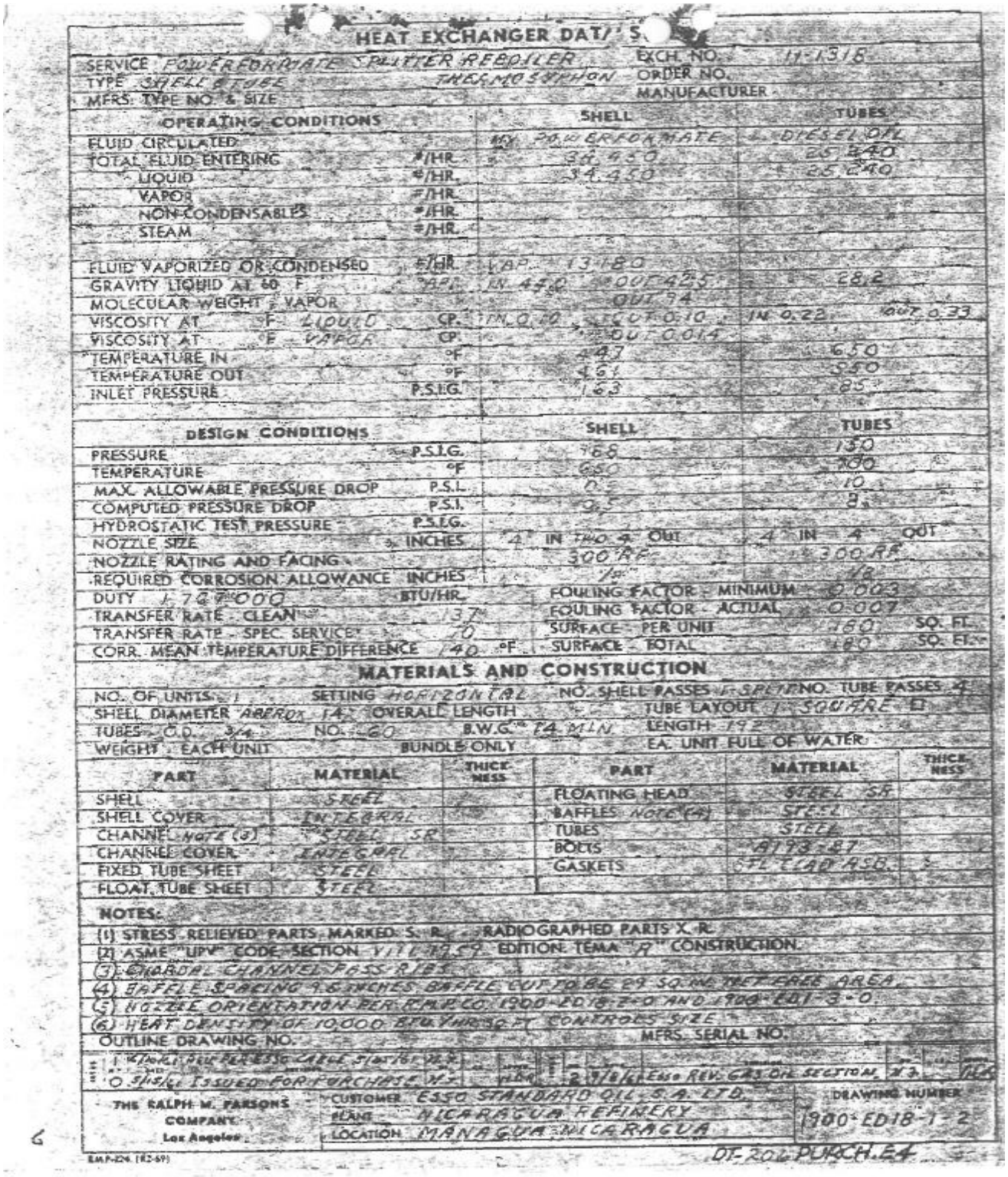
Flow	Speed	Head	Efficiency	Power	NPSHr
US gpm	rpm	ft	%	hp	ft
1152	1750	106	74.6	26.9	8.62
960	1750	112	66.6	26.4	8.15
768	1750	116	59.5	24.6	8
576	1750	118	52.4	21.6	7.94
384	1750	---	---	---	---

Nota: Elaboración por Aftong pumps.

Anexo E: Hoja técnica del intercambiador de calor.

Figura 17

Hoja técnica de intercambiador de calor E-18.



HEAT EXCHANGER DATA SHEET

SERVICE: POWERFORMATE SPLITTER REBOILER — EXCH. NO. 11-1318
TYPE: SHELL & TUBE THERMOSYPHON — ORDER NO.
MFRS. TYPE NO. & SIZE — MANUFACTURER

OPERATING CONDITIONS		SHELL	TUBES
FLUID CIRCULATED		POWERFORMATE	DIESEL OIL
TOTAL FLUID ENTERING	#/HR.	38,950	25,240
LIQUID	#/HR.	34,450	25,240
VAPOR	#/HR.		
NON-CONDENSABLES	#/HR.		
STEAM	#/HR.		
FLUID VAPORIZED OR CONDENSED	#/HR.	VAP. 13,180	
GRAVITY LIQUID AT 60 °F	°API.	IN. 44.0 OUT 42.5	28.2
MOLECULAR WEIGHT, VAPOR		OUT 94	
VISCOSITY AT °F LIQUID	CP.	IN 0.10 OUT 0.10	IN 0.22 OUT 0.33
VISCOSITY AT °F VAPOR	CP.	OUT 0.014	
TEMPERATURE IN	°F	447	650
TEMPERATURE OUT	°F	461	550
INLET PRESSURE	P.S.I.G.	163	85

DESIGN CONDITIONS		SHELL	TUBES
PRESSURE	P.S.I.G.	168	130
TEMPERATURE	°F	650	700
MAX. ALLOWABLE PRESSURE DROP	P.S.I.	0.5	10
COMPUTED PRESSURE DROP	P.S.I.	0.5	8
HYDROSTATIC TEST PRESSURE	P.S.I.G.		
NOZZLE SIZE	INCHES	4" IN TWO & OUT	4" IN 4" OUT
NOZZLE RATING AND FACING		300 RF	300 RF
REQUIRED CORROSION ALLOWANCE	INCHES	1/8"	1/8
DUTY 1,767,000	BTU/HR.	FOULING FACTOR - MINIMUM	0.003
TRANSFER RATE - CLEAN	137	FOULING FACTOR - ACTUAL	0.007
TRANSFER RATE - SPEC. SERVICE	70	SURFACE - PER UNIT	160 SQ. FT.
CORR. MEAN TEMPERATURE DIFFERENCE	40 °F	SURFACE - TOTAL	480 SQ. FT.

MATERIALS AND CONSTRUCTION

NO. OF UNITS 1 — SETTING HORIZONTAL — NO. SHELL PASSES 1 SPLIT — NO. TUBE PASSES 4
SHELL DIAMETER ABBROX 14" — OVERALL LENGTH — TUBE LAYOUT 1" SQUARE
TUBES O.D. 3/4" — NO. 60 — B.W.G. 14 MIN. — LENGTH 192"
WEIGHT - EACH UNIT — BUNDLE ONLY — EA. UNIT FULL OF WATER

PART	MATERIAL	THICKNESS	PART	MATERIAL	THICKNESS
SHELL	STEEL		FLOATING HEAD	STEEL SR	
SHELL COVER	INTEGRAL		BAFFLES NOTE (4)	STEEL	
CHANNEL NOTE (3)	STEEL SR		TUBES	STEEL	
CHANNEL COVER	INTEGRAL		BOLTS	A193-B7	
FIXED TUBE SHEET	STEEL		GASKETS	STL CLAD ASB.	
FLOAT. TUBE SHEET	STEEL				

NOTES:
(1) STRESS RELIEVED PARTS MARKED S. R. RADIOGRAPHED PARTS X. R.
(2) ASME "UPV" CODE, SECTION VIII 1959 EDITION TEMA "R" CONSTRUCTION
(3) CHORDAL CHANNEL PASS RIBS
(4) BAFFLE SPACING 9.6 INCHES. BAFFLE CUT TO BE 29 SQ. IN. NET FREE AREA
(5) NOZZLE ORIENTATION PER RMP CO. 1900-ED18-Z-0 AND 1900-ED1-3-0
(6) HEAT DENSITY OF 10,000 BTU/HR/SQ FT CONTROLS SIZE

OUTLINE DRAWING NO. — MFRS. SERIAL NO.

1 3/16/61 PER REVISED CABLE SLOT REF. — 2 9/6/61 ENG. REV. GAS OIL SECTION
0 5/15/61 ISSUED FOR PURCHASE MF

THE RALPH M. PARSONS COMPANY, Los Angeles
CUSTOMER ESSO STANDARD OIL S.A. LTD.
PLANT NICARAGUA REFINERY
LOCATION MANAGUA NICARAGUA
DRAWING NUMBER 1900-ED18-1-2
DT-204 PURCH. E4

Nota: Elaboración propia.