



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ELÉCTRICA

**Diseño de un Sistema de Vaporización de 20000 m<sup>3</sup>/h para  
Repotenciar una Planta de Regasificación de Gas Natural  
Licuado.**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

**AUTOR:**

Sieden Rojas, Luis Felipe (ORCID: [0000-0002-2886-8982](https://orcid.org/0000-0002-2886-8982))

**ASESOR:**

Mg. Ing. Julca Verástegui, Luis (ORCID: [0000-0001-5158-2686](https://orcid.org/0000-0001-5158-2686))

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Generación, Transmisión y Distribución

**Trujillo – Perú**

**2021**

## **DEDICATORIA**

En primer lugar, a Dios, por la vida, haberme recuperado del covid-19 en estos últimos meses, por la fuerza y sabiduría que me brindó a lo largo de esta trayectoria de estudio.

A mi mamá, Jenny Rojas Huatangare, a mis hermanas Thalía y Yari por haberme dado siempre esos ánimos y fuerza moral en los momentos difíciles. También va dedicado a mi novia Jocelyn por su apoyo incondicional en esta travesía estudiantil.

Luis Sieden R.

## **AGRADECIMIENTO**

Gracias al todo poderoso (Dios), por la fuerza que siempre me brindó y me sigue brindando para afrontar cualquier momento. A mi familia que siempre estuvo apoyándome.

También agradezco a mis amigos y compañeros de clase que sin duda alguna han sido un soporte primordial durante este periodo de estudio.

Y para finalizar a los grandes profesionales, licenciados e ingenieros que estuvieron guiándome en las clases.

Luis Sieden R.

# Índice de contenido.

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO: .....	5
III. METODOLOGÍA: .....	20
3.1. Tipo y diseño de investigación: .....	20
3.2. Variables y operacionalización: .....	20
3.3. Población, muestra y muestreo: .....	20
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos: .....	20
3.5. Procedimientos:.....	21
3.6. Método de análisis de datos: .....	22
3.7. Aspectos éticos:.....	22
IV. RESULTADOS .....	23
4.1. Condiciones actuales del proceso de regasificación: .....	23
4.2. Alternativas de diseño de un sistema de vaporización: .....	30
4.2.1. Vaporizadores de tablero abierto (ORV): .....	31
4.2.2. Vaporizadores de combustión sumergida (SCV): .....	32
4.2.3. Vaporizadores de carcasa y tubo (STV):.....	33
4.3. Dimensionamiento y simulación de la alternativa seleccionada: .....	37
4.3.1. Cálculo de diseño: .....	38
4.3.2. Planos para implementación de la propuesta: .....	52
4.4. Manual de Operación y Mantenimiento:.....	53
4.4.1. Principios de operación: .....	53
4.4.2. Mantenimiento: .....	55
4.5. Estudio económico de la propuesta: .....	57
4.6. Implementación del nuevo sistema de vaporización: .....	59
4.6.1. Evaluación de la implementación:.....	59
4.6.2. Rendimiento del nuevo sistema de vaporización: .....	61
V. DISCUSIÓN: .....	67
VI. CONCLUSIONES.....	71
VII. RECOMENDACIONES .....	73
Referencias Bibliográficas: .....	74
Anexos:.....	76

## Índice de tablas.

Tabla 1. Datos del GNL .....	9
Tabla 2. Demanda actual del Gas Natural .....	24
Tabla 3. Comportamiento de vaporizadores. ....	25
Tabla 4. Demanda proyectada de GN.....	27
Tabla 5. Caudal de GNL requerido a máxima demanda. ....	28
Tabla 6. Caudal de GNL que puede suministrar la planta. ....	28
Tabla 7. Demanda de GN fuera de temporada de pesca. ....	29
Tabla 8. Gasto por consumo de sistema ORV. ....	31
Tabla 9. Gasto de GN en un SCV por temporada de pesca.....	32
Tabla 10. Propiedades del agua a condiciones de diseño. ....	33
Tabla 11. Propiedades del GNL a condiciones de diseño. ....	34
Tabla 12. Caudales y flujos máxicos.....	34
Tabla 13. Flujo de calor necesario para vaporizar el GNL.....	34
Tabla 14. Consumo de GN de un sistema STV.....	34
Tabla 15. Gasto de GN de un sistema STV. ....	35
Tabla 16. Evaluación técnica de las alternativas.....	35
Tabla 17. Evaluación económica de las alternativas.....	36
Tabla 18. Características del agua a temperatura de operación. ....	38
Tabla 19. Características del GNL a temperatura de operación.....	38
Tabla 20. Caudales y flujos máxicos del GNL.....	39
Tabla 21. Flujo de calor para vaporizar el GNL.....	39
Tabla 22. Flujo máxico del agua. ....	39
Tabla 23. Características del intercambiador de calor.....	40
Tabla 24. Temperatura media logarítmica.....	41
Tabla 25. Área total y número de tubos. ....	41
Tabla 26. Resistencia térmica por conducción y convección.....	42
Tabla 27. Resistencia térmica en banco de tubos.....	42
Tabla 28. Datos de fluidos para dimensionamiento de bomba. ....	43
Tabla 29. Datos para selección de bomba. ....	50
Tabla 30. Programa de mantenimiento. ....	56
Tabla 31. Costo de inversión. ....	57

Tabla 32. Consumo actual de GN.....	57
Tabla 33. Factores de consumo de GN.....	57
Tabla 34. Consumo proyectado de GN.....	58
Tabla 35. Gastos operativos.....	58
Tabla 36. Flujo de caja del proyecto.....	59
Tabla 37. Demanda para prueba de sistema STV.....	62
Tabla 38. Comportamiento de sistema STV.....	64

## Índice de gráficos.

Gráfica 1. Curva de tendencia turno día.....	26
Gráfica 2. Curva de tendencia turno noche.....	26
Gráfica 3. Diagrama de evaluación técnico/económico.....	36
Gráfica 4. Temperatura vs Calor transferido. ....	46
Gráfica 5. Temperatura vs área de transferencia. ....	46
Gráfica 6. Carga dinámica total vs caudal - Fuente.....	51
Gráfica 7. Potencia y NPSH.....	51
Gráfica 8. Caudal vs temperatura, sistema STV. ....	65
Gráfica 9. Caudal vs temperatura (noche), sistema STV. ....	65

## Índice de figuras

Figura. 1. Vaporizadores ambientales.....	2
Figura. 2. Planta de regasificación de GNL.....	7
Figura. 3. Vaporizadores ambientales.....	9
Figura. 4. Vaporizador de tablero abierto.....	10
Figura. 5. Vaporizador de combustión sumergida.....	10
Figura. 6. Vaporizador de carcasa y tubos.....	11
Figura. 7. Tipos de carcasa de intercambiadores de calor.....	13
Figura. 8. Arreglos en intercambiadores de calor.....	14
Figura. 9. Módulo de diseño de intercambiador de calor.....	19
Figura. 10. Módulo de diseño de bombas.....	19
Figura. 11. Vaporizadores trabajando a plena carga.....	27
Figura. 12. Área para vaporizadores forzados.....	30
Figura. 13. Distancias para ORV.....	31
Figura. 14. Dimensiones aproximadas del intercambiador de calor.....	37
Figura. 15. Gráfica para determinar el factor "F".....	41
Figura. 16. Primera compilación en software.....	43
Figura. 17. Segunda compilación en software.....	44
Figura. 18. Tercera compilación en software.....	45
Figura. 19. Detalles de las corrientes de los fluidos.....	45
Figura. 20. Resumen del intercambiador de calor.....	46
Figura. 21. Detalles de coraza y tubos.....	47
Figura. 22. Datos de la geometría.....	47
Figura. 23. Accesorios succión de bomba.....	48
Figura. 24. Accesorios en descarga de bomba.....	48
Figura. 25. Compilación para diseño de la bomba.....	49
Figura. 26. Resumen de datos en la succión y descarga.....	49
Figura. 27. Factores de fricción y pérdida de carga.....	50
Figura. 28. Resumen bomba calculada y datos de accesorios.....	50
Figura. 29. Soldadura de tuberías.....	59
Figura. 30. Líneas de agua.....	60
Figura. 31. Montaje mecánico.....	60

Figura. 32. Vaporizadores forzados. ....	61
Figura. 33. Captura de Scada, consumo de clientes. ....	63
Figura. 34. HMI, Sistema de vaporización forzada. ....	63
Figura. 35. Vaporizadores forzados funcionando. ....	66
Figura. 36. Neblina por sistema STV. ....	66

## RESUMEN

La presente tesis está enfocada en repotenciar el sistema de vaporización de una planta de regasificación de gas natural licuado (GNL). La gran mayoría de plantas de regasificación utilizan vaporizadores ambientales para cambiar el estado del GNL y distribuirlo a temperatura ambiente, sin embargo, una planta puede iniciar con la problemática de su sistema de vaporizadores cuando existe una demanda alta y constante de gas natural.

Por lo anterior, la planta de objeto de estudio tiene una capacidad de vaporización instalada de 17200 m<sup>3</sup>/h de gas natural (GN), sin embargo, existen temporadas donde la demanda de GN llega al 93.85% de capacidad total, esto hace que los vaporizadores ambientales trabajen a plena carga, se produzca neblina en el ambiente, baje la temperatura y como consecuencia que los vaporizadores pierdan su eficiencia y solo vaporicen de manera correcta un 61.04% de su capacidad nominal. Para dar solución a lo anterior se evaluó diferentes alternativas de sistemas de vaporización forzada para un caudal de 20000 m<sup>3</sup>/h de GN.

Para elegir la mejor alternativa se utilizó la metodología de diseño VDI 2225 donde se hace una evaluación técnica – económica de los sistemas, posterior a ello se procede a realizar los cálculos para luego validarlos por el software SimQuim®.

Los 20000 m<sup>3</sup>/h de GN se dividen en 3 vaporizadores y los resultados muestran que el coeficiente global de transferencia de calor “U” es el ideal pues se logra una temperatura de salida del gas natural de 14.2 °C a un caudal de 6670 m<sup>3</sup>/h.

El análisis económico del nuevo sistema de vaporización tiene un retorno de la inversión de 30 días pues por cada dólar invertido se tiene una ganancia de \$ 29.41 dólares. Con esta repotenciación se logra duplicar la capacidad de regasificación de la planta haciendo que los ingresos crezcan un 105%.

**Palabras clave:** Vaporización, Coeficiente, Eficiencia.

## ABSTRACT

This thesis is focused on repowering the vaporization system of a liquefied natural gas (LNG) regasification plant. The vast majority of regasification plants use environmental vaporizers to change the state of the LNG and distribute it at room temperature, however, a plant can start with the problem of its vaporizer system when there is a high and constant demand for natural gas.

Therefore, the plant under study has an installed vaporization capacity of 17200 m<sup>3</sup>/h of natural gas (NG), however, there are seasons where the demand for NG reaches 93.85% of total capacity, this causes the environmental vaporizers to work at full load, producing fog in the environment, lowering the temperature and as a result the environmental vaporizers lose their efficiency and only vaporize 61.04% of their nominal capacity correctly. In order to solve this problem, different alternatives of forced vaporization systems were evaluated for a flow of 20000 m<sup>3</sup>/h of NG.

In order to choose the best alternative, the VDI 2225 design methodology was used, where a technical-economic evaluation of the systems is made, after which the calculations are made and then validated by the SimQuim® software.

The 20,000 m<sup>3</sup>/h of NG are divided into 3 vaporizers and the results show that the overall heat transfer coefficient "U" is ideal since a natural gas outlet temperature of 14.2 °C is achieved at a flow rate of 6,670 m<sup>3</sup>/h.

The economic analysis of the new vaporization system has a return on investment of 30 days because for every dollar invested there is a gain of \$ 29.41 dollars. With this repowering, the plant's regasification capacity is doubled, increasing revenues by 105%.

Key words: Vaporization, Coefficient, Efficiency.

## I. INTRODUCCIÓN

La masificación del gas natural (GN) en el Perú se está dando de forma considerable con la finalidad de contribuir a la economía familiar y minimizar la contaminación ambiental.

El estado peruano con el afán de hacer llegar este hidrocarburo a más familias en el Perú a través de un ducto virtual dio en concesión a empresas extranjeras la masificación del GN. Por el norte en los departamentos de Lambayeque, Cajamarca, La Libertad y Ancash tiene la concesión la empresa Gases del Pacífico S.A.C y por el sur en Arequipa, Tacna y Moquegua la empresa concesionaria es Naturgy (Osinergmin, 2013). Es importante mencionar que a la fecha la empresa Naturgy entregó la concesión al estado peruano y actualmente es administrada por Petroperú. Las empresas mencionadas en el párrafo anterior transportan el gas en estado líquido desde el cargadero de Perú LNG hasta sus plantas ubicadas en las diferentes ciudades de los departamentos de su concesión, el método de transporte es denominado ducto virtual y consiste en transportar el gas natural en estado líquido y temperaturas criogénicas de (-162°C) mediante cisternas aisladas al vacío.

La finalidad de transportar este hidrocarburo en estado líquido es para llevar más volumen de GN puesto que 1m<sup>3</sup> de GNL equivale a 600m<sup>3</sup> de GN (Egashira, 2013).

Por la forma de transporte del gas natural las empresas concesionarias en cada ciudad tienen una planta de regasificación de gas natural licuado (GNL) donde lo convierten a estado gaseoso por medio de vaporizadores ambientales y así distribuirlo a temperatura ambiente.

El proceso de regasificación mediante vaporizadores ambientales son los más económicos para desarrollar la ingeniería, procura y construcción de una planta de regasificación (Nguyen, 2015), cabe señalar que para dimensionar los vaporizadores ambientales se realiza un estudio del mercado potencial que puede consumir GN y se toma en cuenta las características del ambiente donde serán instalados estos equipos.

Las empresas concesionarias que tienen plantas en una zona con bastante humedad relativa, se enfrentan a un serio problema; pues los vaporizadores

ambientales en el proceso de regasificación de GNL generan bastante neblina sobre todo en las épocas del año donde las temperaturas descienden considerablemente, eh ahí donde las plantas de regasificación tienen una problemática considerable con la eficiencia de vaporización y con mucha más razón si su consumo de GN en esas épocas asciende.

La eficiencia del vaporizador ambiental repercute en la temperatura de entrega del gas natural ya que si las condiciones ambientales no son favorables hace que el GN salga a una temperatura no aceptable por la norma técnica peruana (NTP 111.011) que exige distribuir el gas natural a condiciones normales (15°C).

Para una mejor referencia del funcionamiento de los vaporizadores ambientales, en la Figura 1 se muestra el comportamiento típico de un proceso de regasificación de gas natural licuado.



Figura. 1. Vaporizadores ambientales - Fuente propia.

La Figura 1 muestra la planta de objeto de estudio, aquí se puede apreciar dos trenes de vaporizadores (4 vaporizadores ambientales por cada tren), cada tren con una capacidad nominal de 17200 m<sup>3</sup>/h. Se puede visualizar 4 de ellos congelados, el motivo es porque trabajan por grupos o también llamados trenes de vaporización que se suele designar por tren A y B, es decir que cuando el tren de vaporización "A" entregue el gas a temperaturas fuera de rango según norma, se conmuta para que entre a trabajar los vaporizadores que estaban en reposo (tren "B") mientras que el tren "A" inicia

su proceso de descongelamiento para estar listo cuando se sature el tren “B”.

El proceso de conmutación depende mucho de las condiciones ambientales y la demanda del gas natural, pues cuando el clima no es favorable y hay un consumo de gas natural considerable, los trenes de vaporización se saturan más rápido y por ende se conmutan de manera constante.

Al tener una conmutación constante de los trenes de vaporización con el paso del tiempo se pierde la eficiencia de la planta y cae hasta un 63%, puesto que no se le da el tiempo suficiente para que el tren que dejó de regasificar se descongele totalmente y cuando le toque el turno de trabajar no entre al 100% de su capacidad de vaporización. Aparte de lo ya descrito, existe una demanda futura que alcanza los 30500 m<sup>3</sup>/h de GN (solo en temporadas de pesca) y con los vaporizadores actuales evidentemente no se puede atender esta demanda futura.

Por lo descrito en los párrafos anteriores surge la interrogante ¿Cómo puedo reforzar la capacidad de vaporización para cubrir la demanda futura de la planta de regasificación?

Al diseñar un sistema de vaporización forzada se cubrirá la demanda proyectada que se tiene prevista.

Por lo tanto, para mejorar la capacidad de una planta de regasificación el presente estudio de diseño se justifica de manera técnica y económica. En la parte técnica con una metodología de diseño de cálculos de fluidos y transferencia de calor se selecciona el vaporizador más adecuado para un caudal superior al de la planta actual. En la parte económica se justifica con un estudio costo beneficio tomando en cuenta los ingresos que se darán cuando se cubra la máxima demanda que se tiene proyectada.

Para cumplir con la finalidad del estudio, el **objetivo general** es diseñar el sistema de vaporización forzada para repotenciar la planta de regasificación de GNL, para esto se plantea los siguientes **objetivos específicos**: i) Elaborar un diagnóstico actual del sistema de vaporización de la planta de regasificación de GNL, ii) Evaluar alternativas de diseño de un sistema de

vaporización forzada, iii) Dimensionar y simular la alternativa seleccionada. iv) Elaborar el manual de operación y mantenimiento del nuevo sistema de vaporización forzada. v) Evaluar económicamente el nuevo sistema de vaporización. vi) Evaluar la implementación del sistema de vaporización forzada y medir su efectividad del mismo.

Es importante resaltar que se darán conceptos básicos de una planta de regasificación, pero el principal enfoque será en la parte de vaporizadores, que son los equipos para convertir el gas de líquido a gaseoso.

## II. MARCO TEÓRICO:

Respecto a diseños de una planta de regasificación para mejorar su eficiencia mediante vaporizadores forzados, se encontró un estudio donde diseñan un evaporador de 540tn/hora de GNL (Riola, 2015). Para esto el autor realizó diversos cálculos de ingeniería con la finalidad de diseñar la parte térmica y mecánica de un intercambiador de carcasa y tubos mediante las fórmulas establecidas en las normas ASME (American Society of Mechanical Engineers) y TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association). Sin embargo, en el presente estudio se pudo observar que no se guiaron de la norma para la producción, almacenamiento y manipulación del gas natural licuado que es la NFPA 59A. El autor indicó que en base a su estudio determinó que para vaporizar 540tn/hora de GNL necesita seis evaporadores verticales trabajando en paralelo, el tipo de evaporador son de un solo paso por carcasa y por tubo operando en contracorriente.

En otra bibliografía se encontró el diseño de una planta con una capacidad de regasificación de 400000 Nm<sup>3</sup>/h la cual es bastante considerable para una planta de regasificación de GNL (Piñon, 2014). Para esto el autor sustenta su trabajo bajo la norma UNE-EN 1160:1996 (Norma de instalaciones y equipos para gas natural licuado), de donde extrae las fórmulas y las características generales del gas natural para sustentar sus cálculos de vaporización entre intercambiadores de calor de carcasa y tubos y vaporizadores de agua de mar. Respecto a esto el autor hace un estudio de viabilidad económica donde analiza el capital, los costos fijos, variables y un flujo de caja para luego determinar la valoración del proyecto mediante el VAN y TIR. El autor mediante su cálculo monetario determinó que la manera más viable para poder regasificar los 400000 Nm<sup>3</sup>/h de gas natural es mediante vaporizadores o intercambiadores de calor con flujo de agua de mar.

Otro autor desarrolla un diseño conceptual y un estudio de factibilidad para la construcción de una terminal regasificadora de gas natural licuado (Jofre, 2008). Para esto el autor realiza un estudio de la ubicación geográfica de

donde estará ubicada la planta de regasificación, analiza el proceso con un balance energético y másico con el objeto de diseñar equipos que contribuyan a la eficiencia de la energía para luego realizar el estudio de factibilidad técnica – económica de la planta regasificadora. Después del estudio realizado el autor determina una capacidad de regasificación de GN para esta planta de 229166 Nm<sup>3</sup>/h mediante intercambiadores de calor a contracorriente con agua de mar. Cabe señalar que el autor no utilizó normas para sus cálculos sin embargo todo el estudio presentado se sustenta mediante trabajos previos y artículos científicos.

En otro trabajo de investigación el autor realiza un análisis energético para contribuir con la eficiencia de plantas de regasificación de gas natural (Peña, 2018). Para sus diferentes estudios energéticos el autor señala que es indispensable conocer los detalles de una planta de regasificación como: funcionamiento del proceso, características principales de las plantas, equipos que utilizan en planta, material del tanque de almacenamiento y características de los vaporizadores. Una vez conocido eso, se basa en la norma UNE-EN ISO 50001:2011 para establecer las pautas, desarrollar e implementar los sistemas y procesos necesarios para mejorar su desempeño energético. El autor mediante el estudio realizado determina que para un sistema de gestión de la energía en una planta de regasificación es indispensable contar con procedimientos y registros adecuados que permitan monitorear los parámetros principales de la planta.

En una revista se encontró aspectos generales para el diseño y construcción de una planta satélite de gas natural licuado (Chapi, 2016). Para el estudio no se basaron en cálculos de ingeniería puesto que tomaron como referencia algunas características de plantas ya instaladas en distintas partes del mundo sin embargo tiene un excelente análisis financiero ya que realizan un flujo de caja proyectado en varios años para luego calcular el valor actual neto y la tasa interna de retorno de una planta de regasificación de GNL. Como resultado la revista muestra que, si el VAN es negativo y el TIR es

mucho mayor tiempo de lo esperado por los accionistas, ningún proyecto es viable.

Para mejor entendimiento, a continuación, se presentan **fundamentos teóricos** que se utilizará para desarrollar la presente tesis:

Las plantas de regasificación de GNL son nuevas en el Perú y es una excelente alternativa para que el gas natural llegue a más industrias, familias peruanas y reducir la contaminación ambiental. Cabe señalar que a nivel mundial estas plantas llevan algunos años funcionando, por ello a continuación se presentan conceptos básicos que se utilizaron para el desarrollo del proyecto.

Las plantas de regasificación de gas natural licuado se componen por diferentes procesos o zonas principales como: descarga de GNL, almacenamiento, regasificación de GNL y estación de regulación y medición. Para mayor detalle guiarse de la figura 2 (Querol, 2016) (Rico, 2016).



*Figura. 2. Planta de regasificación de GNL - Fuente propia*

Un aspecto importante a tener en cuenta es que en la zona de descarga dependiendo de las características de las plantas y el diseño se puede utilizar bomba criogénica o simplemente una descarga por diferencial de presión. En el caso de utilizarse bomba, esta se tiene que dimensionar de acuerdo con los requerimientos de planta y con la siguiente fórmula (Navarrete, 2013):

$$P_f = \left( \frac{Q \times h \times g \times \rho}{1000} \right) (kW)$$

Ec. 0

$P_f$  = Potencia del fluido

$Q$  = Caudal ( $m^3/s$ )

$h$  = Altura (m)

$g$  = Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$\rho$  = Densidad ( $kg/m^3$ )

Para el almacenamiento se utilizan tanques aislados al vacío con la finalidad de evitar la transferencia de calor y lograr mantener el GNL frío; cabe mencionar que el vacío debe estar por debajo de 0.6mbar (Thiaucourt, 2020). Por lo general estos se dimensionan en base a la autonomía que se requiere tener según el caudal máximo de la planta de regasificación.

De la zona de almacenamiento se deriva el GNL hacia el sector de regasificación mediante tuberías de acero inoxidable 304, aquí para la vaporización del GNL existen varios métodos que se describirán en párrafos posteriores. Pasado la etapa de regasificación sale el gas a temperatura ambiente para ingresar a la última zona de regulación y medición (ERM), toda la planta está realizada en base a la NFPA 59A. Es importante notar que los principales elementos del gas natural son el metano y etano (Cepeda, 2019) (Montoya, 2019) (Matías, 2019).

En el siguiente cuadro se muestra las características principales del gas natural licuado que proporciona Perú LNG:

Tabla 1. Datos del GNL - Fuente: Quavii

Datos del GNL	Valor
Temperatura (°C)	-161.0000
Poder Calorífico (MJ/KG)	54.3500
Densidad GNL (KG/m3)	450.7000
Composición Molar	%
CH4	90.0099
C2H6	9.1799
C3H8	0.0966
NH4H10	0.0000
IC4H10	0.0000
NC5H12	0.0000
NC6H14	0.0000
N2	0.7136
O2	0.0000
CO2	0.0000
NEOC5H12	0.0000
TOTAL	100

En la industria del GNL, existen vaporizadores típicos que se instalan en las plantas de regasificación dependiendo de la ubicación geográfica y capacidad de la planta, a continuación, se describen estos:

- Vaporizadores ambientales: Son los más comunes y usados en una planta de regasificación, sobre todo por su bajo costo. Estos vaporizadores funcionan con la energía térmica del aire y así vaporizan el GNL que pasa por el interior de un tubo que tiene aletas de aluminio para maximizar la transferencia de calor (Riola, 2015).

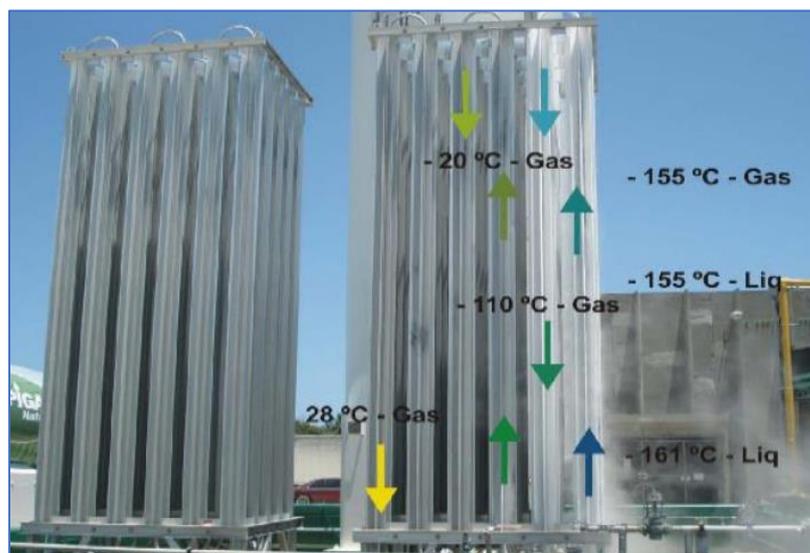


Figura. 3. Vaporizadores ambientales - Fuente Nikkiso

- Vaporizadores de tablero abierto (ORV): Son los que utilizan agua de mar para vaporizar el GNL. Están formados por paneles de tubos de aluminio cubiertos de una aleación de aluminio-zinc para evitar la corrosión, por lo general tienen cientos de tubos divididos por 3 u 8 paneles que se unen con colectores de entrada y salida (Riola, 2015).

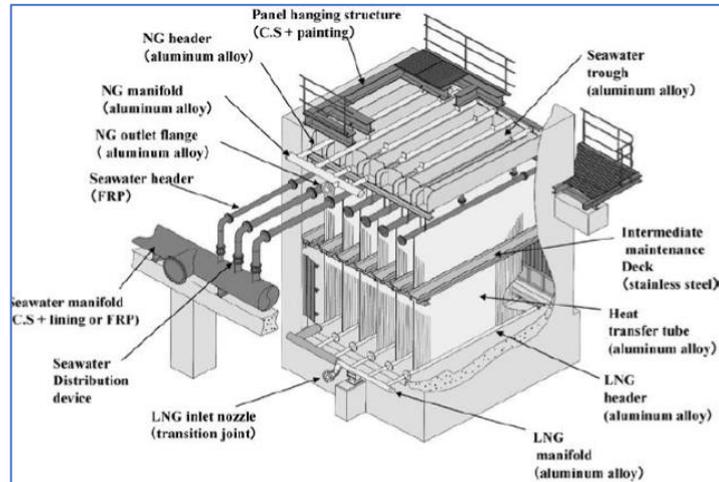


Figura. 4. Vaporizador de tablero abierto - Fuente Riola, 2015.

- Vaporizadores de combustión sumergida (SCV): En estos vaporizadores el fluido caliente es agua que ganó temperatura por la combustión del gas natural, pues los gases de combustión son inyectados en el agua y así calentarla para vaporizar el GNL (Riola, 2015).

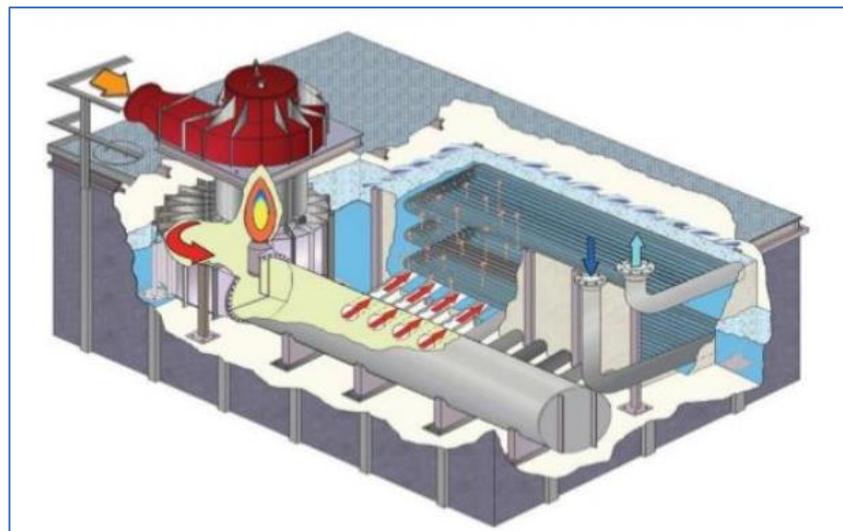


Figura. 5. Vaporizador de combustión sumergida - Fuente Riola, 2015.

- Vaporizadores de carcasa y tubos (STV): Son intercambiadores de calor por lo general de carcasa y tubo fabricados de acero inoxidable para resistir las temperaturas criogénicas del GNL. Estos son diseñados a partir del caudal de salida que se requiere (Egashira, 2013).

Los intercambiadores de calor de carcasa y tubos constan de una coraza exterior que alberga tubos y deflectores que ayudan a inducir un flujo turbulento. La elección de piezas individuales de este intercambiador depende de los parámetros de funcionamiento como, presiones y temperaturas de trabajo (Nguyen, 2015). En la figura 3 se muestra el intercambiador de calor descrito.



*Figura. 6. Vaporizador de carcasa y tubos - Fuente Juan Pablo, 2016.*

Casi siempre o dependiendo de la aplicación los intercambiadores de calor de carcasa y tubos se clasifican bajo la norma TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association), aquí se determinan mediante letras según el tipo de carcasa, el cabezal frontal y posterior (Riola, 2015).

Según tipos de carcasa:

- Tipo E: Es de un solo paso y la más común debido a su fácil fabricación y bajo costo, su aplicación es generalizada.
- Tipo F: Suele ser dos pasos por la carcasa y por lo general dos pasos por los tubos, su aplicación es generalizada.
- Tipo G: La boquilla de ingreso y salida del fluido está en la parte central, se utiliza en intercambiadores que presentan cambio de fase en el fluido de la carcasa.
- Tipo H: Similar a la anterior, pero con dos boquillas de ingreso y salida, se utiliza para limitar la caída de presión.

- Tipo J: Tiene dos entradas y una sola salida, en esta la velocidad del fluido es la mitad de una Tipo E y por ende una menor caída de presión.
- Tipo K: Empleada para la generación de vapor.
- Tipo X: Es de flujo cruzado y aplicada para usos de condensación.

Según cabezal frontal:

- Tipo A: Cilindro con bridas a ambos extremos, se utiliza cuando la aplicación requiere una constante limpieza del interior de tubos.
- Tipo B: Cubierta integrada y semiesférica, su aplicación es donde no se requiere una limpieza frecuente dentro de los tubos.
- Tipo C y N: Unidos a la carcasa o espejo y atornilladas a la cubierta.
- Tipo D: Su aplicación es para altas presiones (mayor a 70 barg).

Según cabezal posterior:

- De espejo fijo: Son los más utilizados pues minimizan la construcción de las uniones con juntas y por ende el mantenimiento, algo a resaltar es que no se tiene acceso al exterior de los tubos y el mantenimiento para el lado de la carcasa no es posible.
- De espejo flotante: Se subclasifican en los tipos P (usado para bajas presiones), W (bajas presiones y fluidos no peligrosos), T (difícilmente desmontable), S (recomendado para altas presiones y fluidos no peligrosos).
- Tubos en U: Aquí el haz de tubos se puede expandir libremente y de fácil extracción, su aplicación es con fluidos limpios por el lado de tubos.

En la siguiente figura resume el texto anterior:

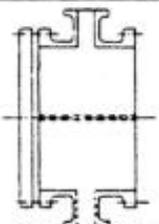
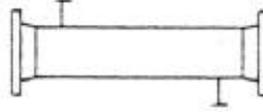
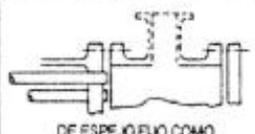
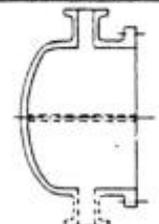
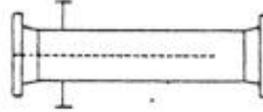
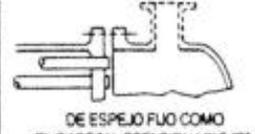
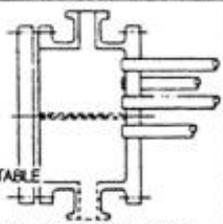
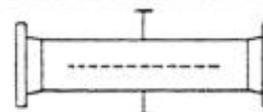
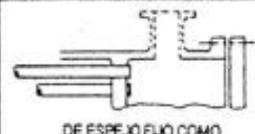
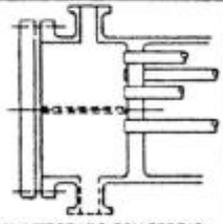
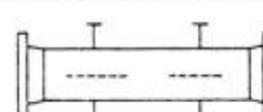
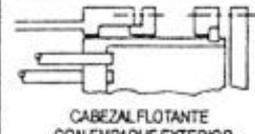
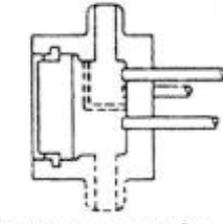
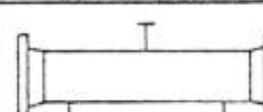
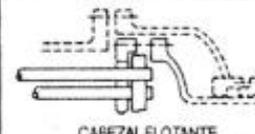
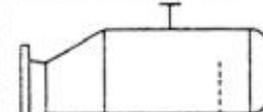
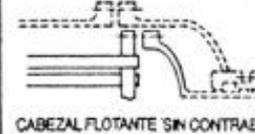
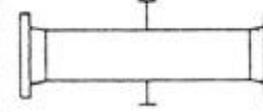
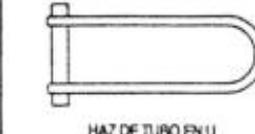
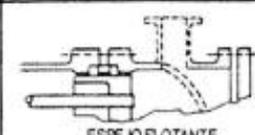
	TIPOS DE CABEZAL ESTACIONARIO, EXTREMO FRONTAL		TIPOS DE CORAZAS		TIPOS DE CABEZALES, EXTREMO POSTERIOR
<b>A</b>	 CANAL Y CUBIERTA DESMONTABLE	<b>E</b>	 CORAZA DE UN PASO	<b>L</b>	 DE ESPEJO FLUO COMO EL CABEZAL ESTACIONARIO "A"
<b>B</b>	 CASQUETE (CUBIERTA INTEGRADA)	<b>F</b>	 CORAZA DE DOS PASOS CON DEFLECTOR LONGITUDINAL	<b>M</b>	 DE ESPEJO FLUO COMO EL CABEZAL ESTACIONARIO "B"
<b>C</b>	 SOLO HAZ DE TUBOS DESMONTABLE CANAL INTEGRADO CON ESPEJO Y CUBIERTA DESMONTABLE	<b>G</b>	 DE FLUJO PARTIDO	<b>N</b>	 DE ESPEJO FLUO COMO EL CABEZAL ESTACIONARIO "N"
<b>N</b>	 CANAL INTEGRADO CON ESPEJO Y CUBIERTA DESMONTABLE	<b>H</b>	 DE FLUJO PARTIDO DOBLE	<b>P</b>	 CABEZAL FLOTANTE CON EMPAQUE EXTERIOR
<b>D</b>	 CIERRE ESPECIAL A ALTA PRESIÓN	<b>J</b>	 DE FLUJO DIVIDIDO	<b>S</b>	 CABEZAL FLOTANTE CON DISPOSITIVO DE APOYO
		<b>K</b>	 REHEVIDOR DE CALDERA	<b>T</b>	 CABEZAL FLOTANTE SIN CONTRABRIDA
		<b>X</b>	 FLUJO CRUZADO	<b>U</b>	 HAZ DE TUBO EN U
				<b>W</b>	 ESPEJO FLOTANTE SELLADO EXTERNAMENTE

Figura. 7. Tipos de carcasa de intercambiadores de calor - Fuente: Tema E

La disposición de los tubos dentro de un intercambiador de calor es un detalle importante a la hora de diseño, a continuación, una imagen de las disposiciones típicas según la norma TEMA:

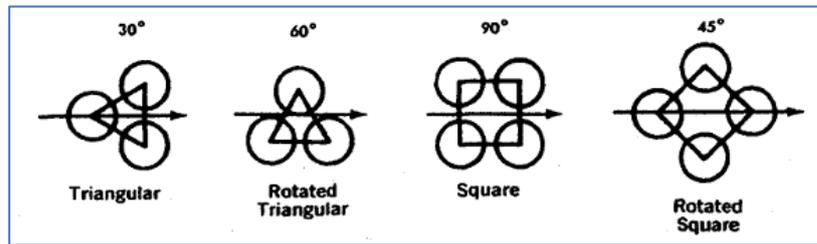


Figura. 8. Arreglos en intercambiadores de calor - Fuente: Tema E.

Los arreglos triangulares permiten una mayor densidad de tubos, en cambio los arreglos cuadrados se emplean cuando se requiere minimizar la caída de presión. La norma TEMA recomienda un pitch de 1.25 veces el diámetro externo de estos.

En la norma TEMA existen dimensiones típicas de tubos y carcasas, por ello en las tablas 2.21, CB 3.13, RCB-4.3, RCB-4.52 y RCB-5.22 de la novena edición se puede encontrar diámetros típicos, espesores, disposición de baffles, tramos máximos sin soportes y las dimensiones típicas de carcasas y de acuerdo con ello los diversos tipos de pernos.

Para los cálculos hidráulicos es de vital importancia saber que los tipos de flujo de los fluidos influyen en la pérdida de presión, aunque no existe un análisis general del movimiento de los fluidos sin embargo existen varios métodos de cálculos para soluciones a problemas de los fluidos, para ello es importante definir en los fluidos el número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad \text{Ec. 1}$$

$Re$  = Número de Reynolds

$\rho$  = Densidad del fluido ( $Kg/m^3$ )

$V$  = Velocidad del fluido ( $m/s$ )

$D$  = Diámetro de la tubería ( $m$ )

$\mu$  = Viscosidad dinámica ( $Ns/m^2$ )

$\nu$  = Viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )

El tipo de flujo se puede dividir en tres de acuerdo con su número de Reynolds:

- Flujo laminar:  $Re < 10^3$
- Región de transición de flujo:  $10^3 < Re \leq 10^4$
- Flujo turbulento:  $Re > 10^4$

Es importante mencionar que existen otros factores que afectan la transición de los flujos como la rugosidad de la pared del tubo pues esta produce inestabilidad del flujo y fluctuaciones en la densidad, temperatura y presión del fluido. Para aplicaciones de transferencia de calor es recomendable el flujo turbulento ya que hace que la transferencia sea más efectiva (Nguyen, 2015).

Para el gas natural licuado el factor de compresibilidad es tan pequeño que no se considera, vale aclarar que los fluidos incompresibles tienen una densidad constante es decir que esta no es afectada por los cambios de presión y temperatura. Para el flujo de GNL en una tubería la pérdida de presión ocurrirá debido a la resistencia, cambios de elevación y cambios de la energía cinética, para esto se puede utilizar la ecuación de Bernoulli (Nguyen, 2015).

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_L \quad \text{Ec. 2}$$

$$h_L = \frac{1}{\rho g} (p_1 - p_2) \quad \text{Ec. 3}$$

$p$  = Presión (Pa)

$g$  = Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$V$  = Elevación vertical (m)

$h_L$  = Pérdida de altura (m)

Darcy Weisbach calcula la pérdida de carga Ec. 6 teniendo en cuenta la resistencia de la fricción y el régimen del flujo. Para flujo laminar depende

directamente del número de Reynolds Ec. 4 y para flujo turbulento lo define la ecuación de Colebrook-White Ec. 5.

$$f_{Laminar} = \frac{64}{Re} \quad \text{Ec. 4}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_{turbulento}}} = -2 \ln \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_{turbulento}}} \quad \text{Ec. 5}$$

$$h_L = f \frac{LV^2}{D2g} \quad \text{Ec. 6}$$

$L =$  Longitud de tubería (m)

$f =$  Factor de fricción de Darcy

$\varepsilon =$  Rugosidad de la tubería (m)

El gas natural en estado gaseoso a diferencia de un fluido incompresible la densidad de este no es constante ya que se ve afectado por los cambios de presión y temperatura. Para determinar la pérdida de presión para un flujo compresible el método que utiliza las propiedades de entrada y salida es el método más simple es decir que el flujo de gas no tiene más del 10% de pérdida de presión a lo largo del sistema (Nguyen, 2015) (Vargas, 2015). Entonces para el cálculo de pérdida de presión aproximada para flujo compresible se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$p_1 - p_2 \approx \rho \left( f \frac{LV^2}{D2g} - \left( \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \right) \right) \quad \text{Ec. 7}$$

Para los cálculos del diseño térmico existen dos métodos que son la diferencia media de temperatura y el método de la efectividad NUT (Número de Unidades de Transferencia). El método de efectividad es un parámetro adimensional que caracteriza el tamaño de intercambiador y se define como relación del producto global de transferencia de calor (U) con el área de transferencia (A) entre la capacidad térmica de menor valor (Cmin) de los fluidos presentes en el intercambiador de calor (Suarez, 2019) (Riola, 2015).

**Ec. 8**

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}}$$

Para el balance térmico se puede utilizar la siguiente ecuación (Jofré, 2008):

$$Q = Q_{ev} + Q_{cal} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

$Q_{ev}$  = Calor necesario para evaporar el GNL

$Q_{cal}$  = Calor necesario para elevar la temperatura del GNL evaporado

Así mismo estos calores se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$Q_{ev} = \dot{m}_{GNL} \times h_g \quad \text{Ec. 10}$$

$$Q_{cal} = \dot{m}_{GN} \times C_{GN} \times \Delta T_{GN} \quad \text{Ec. 11}$$

Con el calor total calculado se puede hallar el flujo másico del agua para vaporizar el GNL:

$$Q_T = \dot{m}_{H2O} \times C_p \times \Delta T_{H2O} \quad \text{Ec. 12}$$

El diferencial de temperatura está dado por la temperatura de ingreso y salida del fluido caliente.

Obtenido el calor total necesario para vaporizar el GNL se puede terminar la cantidad de tubos necesarios, para ello se inicia con el cálculo de la temperatura media logarítmica, luego se determina el factor de corrección y posterior a ello el número de tubos:

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad \text{Ec. 13}$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad P = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad \text{Ec. 14}$$

$$\text{Área total} = \frac{Q_{total}}{K \times LMTD} \quad \text{Ec. 15}$$

$$N_{tubos} = \frac{A_{total}}{A_{tubo}} \quad \text{Ec. 16}$$

La característica de los tubos se puede extraer directamente de tablas estandarizadas de la norma TEMA, detalles como diámetros exteriores e

interiores, espaciamiento entre centro de tubos, configuración de tubos y longitud de los mismos.

Posterior a ello se procede determinar el coeficiente global de transferencia de calor, para ello previamente se calculan tres resistencias térmicas; la primera es la R por conducción:

$$R_d = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi LK} \quad \text{Ec. 17}$$

La resistencia térmica por convección en el exterior de los tubos se calcula de la siguiente manera:

$$R_{v1} = \frac{1}{h_{v1} \times A \times N_{tt}} \quad \text{Ec. 18}$$

Como se aprecia en la fórmula, primero se debe determinar el coeficiente por convección en el exterior de los tubos:

$$h_{v1} = \frac{N_u \times K}{D} \quad \text{Ec. 19}$$

Es importante resaltar que este está dado por el número de Nusselt, el número de Reynolds, el número de Prandtl y estos a su vez dependen directamente del caudal y las velocidades de los fluidos.

El coeficiente global de transferencia de calor en el interior de los tubos se determina de la siguiente manera:

$$R_{v2} = \frac{1}{h_{v2} \times A \times N_{tt}} \quad \text{Ec. 20}$$

Una vez calcula las resistencias térmicas se halla la resistencia térmica total que es la sumatoria de las tres resistencias:

$$R_T = R_{v1} + R_d + R_{v2} \quad \text{Ec. 21}$$

El coeficiente global de transferencia de calor está dado por:

$$U = \frac{1}{R_T \times A} \quad \text{Ec. 22}$$

Cabe mencionar que las ecuaciones mencionadas son generales y pueden ser aplicadas en distinto orden dependiendo de los datos o condiciones de diseño con los que se cuente.

El software es un elemento esencial para corroborar los cálculos y afinar detalles de ser necesario antes de la implementación, por lo anterior, en la presente tesis se utilizó el software Simquim® con los módulos de diseño de bomba e intercambiadores de calor.

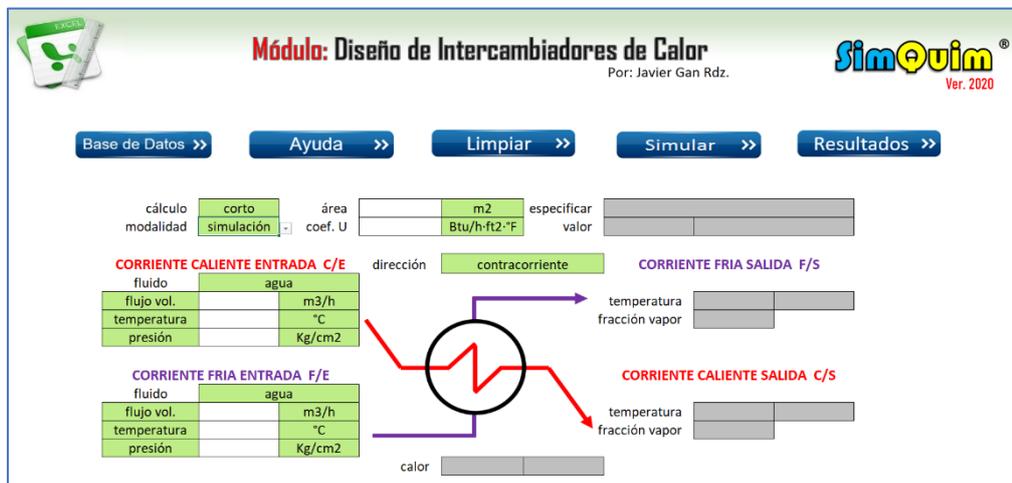


Figura. 9. Módulo de diseño de intercambiador de calor - Fuente: Software SimQuim

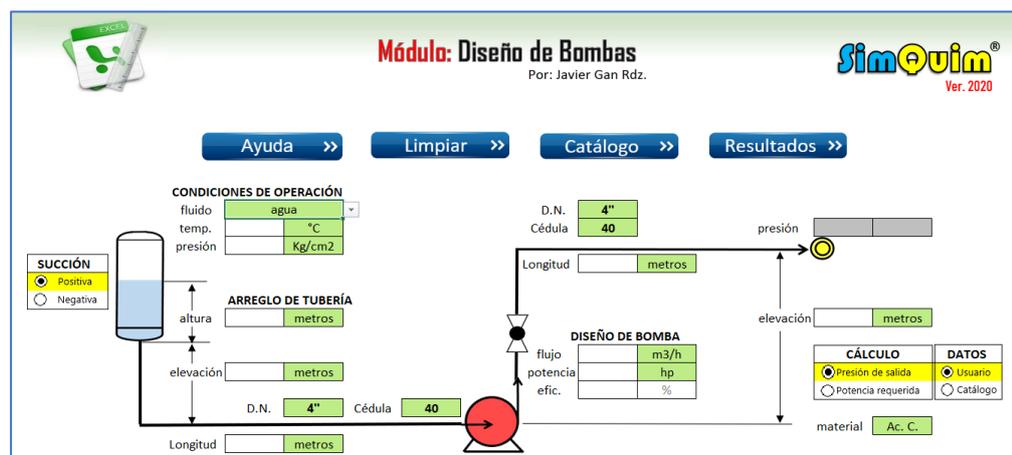


Figura. 10. Módulo de diseño de bombas - Fuente: Software SimQuim

Los módulos de diseño antes mencionados están referenciado por bibliografías especializadas y tiene como base el simulador Aspen Plus por lo cual hace que sus resultados tengan gran fiabilidad.

### III. METODOLOGÍA:

#### 3.1. Tipo y diseño de investigación:

La investigación de la presente tesis acorde al problema planteado y sus objetivos se identifica como aplicada, pues se centra en la problemática con la finalidad de repotenciar el proceso de regasificación en una planta de GNL. Mientras que el diseño es cuasi experimental puesto que la planta de estudio se determina previamente acorde a la problemática.

#### 3.2. Variables y operacionalización:

La variable independiente es el sistema de vaporización y la variable dependiente viene a ser la efectividad del sistema de vaporización.

La matriz de operacionalización de variables se encuentra en el anexo 01.

#### 3.3. Población, muestra y muestreo:

**Población:** Plantas de regasificación de GNL de la empresa Gases del Pacífico S.A.C

**Muestra:** Planta de regasificación de Nuevo Chimbote.

El **muestreo** se toma donde existe mayor consumo o demanda de gas natural en las diferentes ciudades de la concesión.

#### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos:

Las técnicas utilizadas son el análisis documental, cálculos termodinámicos y simulación. Los instrumentos a utilizar son históricos del sistema Scada, hojas de cálculos para el coeficiente global de transferencia de calor y software Simquim para validar datos calculados. En el **anexo 02** se muestra detalles de las técnicas e instrumentos y en el **anexo 03** la validación por especialistas de los instrumentos utilizados.

### 3.5. Procedimientos:

Para desarrollar la presente tesis, se requiere de un paso a paso, por ello a continuación se resume como está desarrollado el estudio de investigación en base a los objetivos específicos planteados; no sin antes mencionar que para un mejor entendimiento del lector se recomienda revisar el **Anexo 04** que es donde se habla de una planta de regasificación.

**Elaborar el diagnóstico actual del sistema de vaporización de la planta de regasificación:** Para el desarrollo de este punto se empezó conociendo la demanda de GN que existe en la planta de regasificación, posterior a ello se realizó los cálculos para el diagnóstico del sistema de vaporización actual.

**Evaluar alternativas de diseño de un sistema de vaporización forzada:** Una vez hecho lo descrito en el párrafo anterior, se evaluaron los distintos métodos que existe para mejorar el sistema de vaporización en una planta de regasificación mediante la metodología de diseño VDI 2225

**Dimensionar, simular y ejecutar la implementación del sistema de vaporización:** Una vez evaluada las diferentes alternativas, se procedió con los cálculos manuales hasta encontrar el coeficiente global de transferencia de calor, obteniendo este resultado se simuló en el software para validación de los mismos y como consiguiente la etapa constructiva y de pruebas.

**Elaborar manual de operación y mantenimiento:** Dado la importancia del sistema de vaporización, el manual de operación y mantenimiento es un entregable indispensable para conocer el proceso, para ello se describieron procesos esenciales y se deja un programa de mantenimiento que puede ser modificado cuando determinen nuevas frecuencias de trabajo de acuerdo a la operación del sistema.

**Realizar un estudio económico de la propuesta:** Se cuantificó los gastos del proyecto y se elaboró el VAN y TIR del presente estudio considerando un flujo de caja con los nuevos ingresos que tendrá la empresa con el nuevo sistema de vaporización.

### **3.6. Método de análisis de datos:**

Se utilizará el análisis descriptivo, es decir que toda la información será analizada mediante gráficos y tendencias que como resultado nos darán el porcentaje de eficiencia que tiene en el sistema de vaporización.

### **3.7. Aspectos éticos:**

El autor se compromete a presentar datos totalmente verídicos y citar cualquier párrafo o extracto de algún trabajo de investigación.

También la empresa Gases del Pacífico S.A.C dio el consentimiento para utilizar el nombre y datos para desarrollar el presente trabajo. **En anexo 05** se muestra el documento firmado por el jefe de Operaciones y Mantenimiento.

## **IV. RESULTADOS**

### **4.1. Condiciones actuales del proceso de regasificación:**

Como se describió al inicio del proyecto, en Chimbote existe un consumo estacional, es decir que por la temporada de pesca hay algunos meses donde la demanda del gas natural sube, esto debido a que las pesqueras entran en producción. A modo de resumen las temporadas de pesca duran aproximadamente entre 3 a 4 meses; la primera temporada abarca los meses de abril, mayo y junio; la segunda temporada los meses de octubre, noviembre y diciembre, en algunas ocasiones suele prolongarse hasta enero. Lo antes mencionado es para sintetizar, pues la fecha y mes exacto lo coloca el estado y el término de la temporada se da cuando completen las toneladas impuestas por el mismo.

Para efectos de cálculo del proceso, se tomará la demanda actual y luego la demanda proyectada que existe para la ciudad de Chimbote.

La demanda actual que se tienen en la ciudad de Chimbote se presenta a continuación:

Tabla 2. Demanda actual del Gas Natural - Fuente: Elaboración propia,

<b>DEMANDA DE GAS NATURAL EN TEMPORADA DE PESCA</b>			
<b>RESIDENCIAS CONECTADAS</b>	<b>TIPO DE DEMANDA</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO DIARIO (m<sup>3</sup>/día)</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO HORA (m<sup>3</sup>/h)</b>
25485.00	Estable	11065.00	461.04
<b>INDUSTRIAS CONECTADAS</b>	<b>TIPO DE DEMANDA</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO DIARIO (m<sup>3</sup>/día)</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO HORA (m<sup>3</sup>/h)</b>
Epinsa	Estable	592.00	59.20
Conservera San Lucas	Estable	1250.00	125.00
Inversiones Kathymar	Estable	1450.00	145.00
Group Corporation Reyes S.A.C.	Estable	3300.00	275.00
Inversiones Generales del Mar S.A.C.	Estable	1434.00	143.40
Conserveras MM S.A.C.	Estable	6800.04	566.67
Doil International S.A.C.	Estable	3300.00	330.00
Estación de Servicio GESA	Estable	3000.00	125.00
Corporación Pesquera Apolo S.A.C.	Estable	2477.00	247.70
OP7	Estacional	8212.00	410.60
Quiaza	Estacional	5907.00	492.25
Exalmar	Estacional	76455.06	3475.23
Oslo	Estacional	32246.96	1896.88
Farallon	Estacional	7356.02	525.43
Austral	Estacional	137263.00	6863.15
<b>CONSUMO TOTAL</b>		<b>302108.08</b>	<b>16141.55</b>

Como se aprecia en la tabla anterior, la demanda en temporada de pesca es 16141.55 m<sup>3</sup>/h, esta representa el 93.85% de la capacidad instalada con la que cuenta la planta.

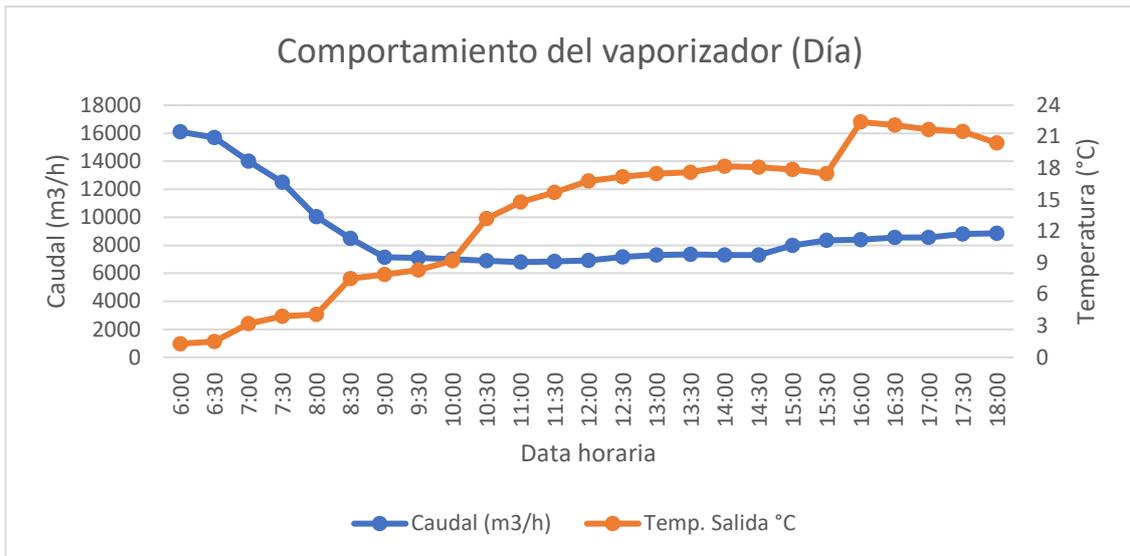
A modo de recordar, se mencionó anteriormente que la planta de Chimbote cuenta con dos trenes de vaporización y estos a su vez con 4 vaporizadores ambientales con una capacidad de regasificación de 4300 m<sup>3</sup>/h cada uno; es decir que la capacidad de regasificación instalada es de 17200 m<sup>3</sup>/h.

Para analizar la problemática de la presente tesis, a continuación, se presentan datos del sistema Scada en temporada de pesca; los datos que se muestran a continuación son el promedio de un mes de temporada de pesca:

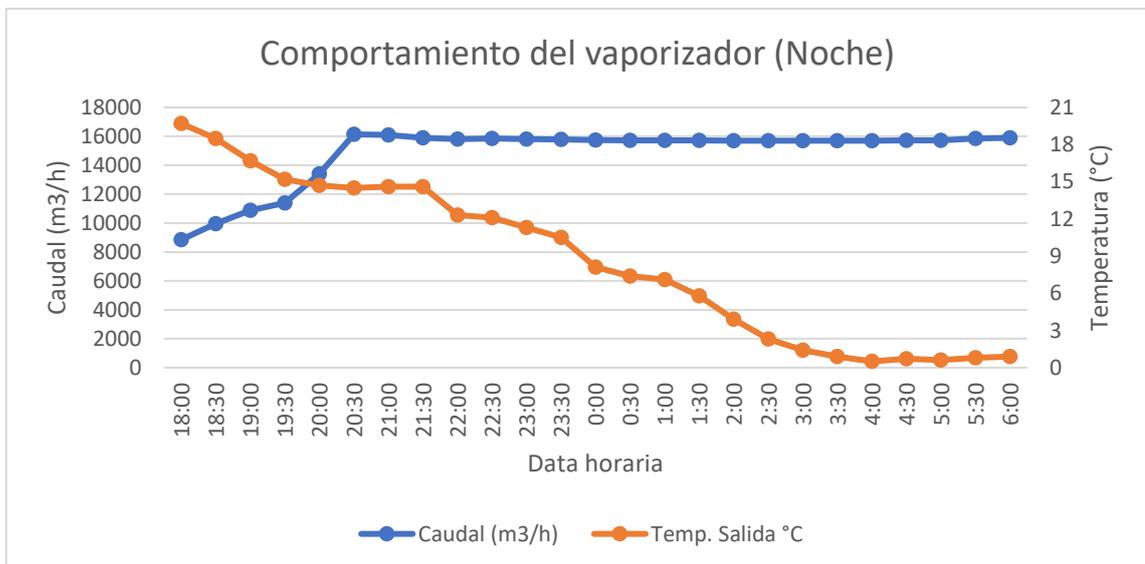
Tabla 3. Comportamiento de vaporizadores - Fuente: Elaboración propia.

COMPORTAMIENTO DEL VAPORIZADOR (DÍA)			COMPORTAMIENTO DEL VAPORIZADOR (NOCHE)		
Hora	Caudal (m3/h)	Temp. Salida °C	Hora	Caudal (m3/h)	Temp. Salida °C
06:00	16100	0.9	18:00	8850	19.7
06:30	15700	1.3	18:30	9950	18.5
07:00	14000	3.2	19:00	10890	16.7
07:30	12500	3.9	19:30	11400	15.2
08:00	10050	4.1	20:00	13400	14.7
08:30	8500	7.5	20:30	16140	14.5
09:00	7150	7.9	21:00	16100	14.6
09:30	7100	8.3	21:30	15910	14.6
10:00	7000	9.2	22:00	15820	12.3
10:30	6900	13.2	22:30	15850	12.1
11:00	6800	14.8	23:00	15810	11.3
11:30	6850	15.7	23:30	15790	10.5
12:00	6930	16.8	00:00	15750	8.1
12:30	7180	17.2	00:30	15730	7.4
13:00	7300	17.5	01:00	15720	7.1
13:30	7350	17.6	01:30	15720	5.8
14:00	7300	18.2	02:00	15710	3.9
14:30	7300	18.1	02:30	15700	2.3
15:00	8000	17.9	03:00	15700	1.4
15:30	8360	17.5	03:30	15690	0.9
16:00	8400	22.4	04:00	15705	0.5
16:30	8550	22.1	04:30	15715	0.7
17:00	8550	21.7	05:00	15730	0.6
17:30	8800	21.5	05:30	15850	0.8
18:00	8850	19.7	06:00	15910	0.9

Para un mejor entendimiento de la tabla, en la siguiente página se grafican los valores.



Gráfica 1. Curva de tendencia turno día - Fuente: Elaboración propia



Gráfica 2. Curva de tendencia turno noche - Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en las tablas y gráficas, a caudales máximos la temperatura por las noches desciende considerablemente, esto sucede debido a las condiciones ambientales; dado que el consumo de gas natural aumenta y la temperatura ambiente disminuye, se forma neblina y esto no permite que los vaporizadores trabajen a condiciones normales. Por lo antes mencionado, esto es una limitante ya que los vaporizadores pierden capacidad de vaporización.

A continuación, una imagen de referencia en temporada de pesca:



Figura. 11. Vaporizadores trabajando a plena carga - Fuente: propia

Es importante resaltar que existe una demanda industrial proyectada, esta se presenta a continuación:

Tabla 4. Demanda proyectada de GN - Fuente: Elaboración propia.

<b>DEMANDA PROYECTADA</b>			
<b>RESIDENCIAS PROYECTADAS</b>	<b>TIPO DE DEMANDA</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO DIARIO (m3/día)</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO HORA (m3/h)</b>
5000.00	Estable	2173.91	90.58
<b>INDUSTRIAS PROYECTADAS</b>	<b>TIPO DE DEMANDA</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO DIARIO (m3/día)</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO HORA (m3/h)</b>
Karsol	Estable	1250.04	104.17
Oldim S.A.	Estable	364.00	36.40
Pesquera Naftes	Estable	540.00	45.00
EDS Energigas	Estable	3000.00	125.00
Cantarana	Estacional	56000	2333.33
Tasa	Estacional	90000	3750.000
Cantabria	Estacional	55000.08	2291.67
CFG	Estacional	47000.16	1958.34
Centinela	Estacional	45000	1875
Pacífico Centro	Estacional	26000.16	1083.34
Promasa	Estacional	16000.08	666.67
<b>CONSUMO TOTAL FUTURO</b>		<b>644436.51</b>	<b>30501.05</b>

Como se aprecia en la tabla de demanda proyectada, el consumo futuro de la planta puede ascender a 30501.05 m<sup>3</sup>/h que es casi el doble de lo que se tiene actualmente. Para cerciorarnos que la planta puede suministrar esta cantidad de gas a continuación el siguiente cálculo:

Tabla 5. Caudal de GNL requerido a máxima demanda - Fuente: Elaboración propia.

<b>Caudal requerido con la máxima demanda</b>		
	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	GNL Requerido (m <sup>3</sup> /h)
Demanda Proyectada GN	30501.05	50.84

Tabla 6. Caudal de GNL que puede suministrar la planta - Fuente: Elaboración propia.

<b>Caudal que puede suministrar la planta</b>	
Ø Tubería en pulgadas	2" - 1/2"
Ø interior mm	66.93
Velocidad recomendada GNL (m/s)	5
Caudal m/s	0.01759
Caudal m <sup>3</sup> /h	63.33

Como se puede apreciar, el GNL máximo que puede entregar la planta es 63.33 m<sup>3</sup>/h, este valor fue calculado en base a la línea de descarga que es de 2"-1/2" material acero inoxidable 304L SCH-10S. Es decir que el volumen que requiere el sistema representa un 80.3% de la capacidad que la planta puede suministrar.

Por lo anterior en el presente proyecto se evaluará la mejor alternativa para cumplir con la futura demanda.

En base al historial, se puede observar que cuando el caudal oscila entre 7000 m<sup>3</sup>/h y 10500 m<sup>3</sup>/h las condiciones ambientales hace que la temperatura de salida se mantenga estable, entonces se tomará el mayor caudal como referencia para que la planta con las condiciones actuales trabaje en rangos de temperaturas aceptable. Descrito el párrafo anterior se evaluará la mejor alternativa para un caudal de 20000 m<sup>3</sup>/h de regasificación, este sumado con los 10500 m<sup>3</sup>/h cubre la demanda futura proyectada con un caudal total de 30501.05 m<sup>3</sup>/h.

Solo como dato, a continuación, se muestra la demanda constante y lo proyectado en la planta de Chimbote:

Tabla 7. Demanda de GN fuera de temporada de pesca - Fuente: Elaboración propia.

<b>DEMANDA DE GAS NATURAL FUERA DE TEMPORADA DE PESCA</b>			
<b>RESIDENCIAS CONECTADAS</b>	<b>TIPO DE DEMANDA</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO DIARIO (m3/día)</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO HORA (m3/h)</b>
25485.00	Estable	11065	461.042
<b>INDUSTRIAS CONECTADAS</b>			
<b>INDUSTRIAS CONECTADAS</b>	<b>TIPO DE DEMANDA</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO DIARIO (m3/día)</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO HORA (m3/h)</b>
Epinsa	Estable	592.00	59.20
Conservera San Lucas	Estable	1250.00	125.00
Inversiones Kathymar	Estable	1450.00	145.00
Group Corporation Reyes S.A.C.	Estable	3300.00	275.00
Inversiones Generales del Mar S.A.C.	Estable	1434.00	143.40
Conserveras MM S.A.C.	Estable	6800.04	566.67
Doil International S.A.C.	Estable	3300.00	330.00
Estación de Servicio GESA	Estable	3000.00	125.00
Corporación Pesquera Apolo S.A.C.	Estable	2477.00	247.70
<b>CONSUMO TOTAL</b>		<b>34668.04</b>	<b>2478.01</b>
<b>INDUSTRIAS PROYECTADAS</b>			
<b>INDUSTRIAS PROYECTADAS</b>	<b>TIPO DE DEMANDA</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO DIARIO (m3/día)</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO HORA (m3/h)</b>
Karsol	Estable	1250.04	104.17
Oldim S.A.	Estable	364.00	36.40
Pesquera Naftes	Estable	540.00	45.00
EDS Energigas	Estable	3000.00	125.00
<b>RESIDENCIAS PROYECTADAS</b>			
<b>RESIDENCIAS PROYECTADAS</b>	<b>TIPO DE DEMANDA</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO DIARIO (m3/día)</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO HORA (m3/h)</b>
5000.00	Estable	2173.91	90.58
<b>CONSUMO TOTAL FUTURO</b>		<b>39822.08</b>	<b>2788.58</b>

De la tabla se puede interpretar que fuera de temporada de pesca, los vaporizadores ambientales están sobredimensionados pues la demanda hora, está por debajo de la capacidad que estos pueden entregar. En este periodo las industrias están fuera de temporada de pesca y bajan su consumo representando así un pico máximo de un 80% de su máxima demanda; lo descrito anteriormente es un dato comprado por nuestro historial en el sistema Scada lo que hace que los vaporizadores ambientales estén sobredimensionados para la demanda.

#### 4.2. Alternativas de diseño de un sistema de vaporización:

Como se mencionó al inicio, la planta de Chimbote actualmente cuenta con vaporizadores ambientales, por ende, se evaluarán vaporizadores forzados para mejorar la capacidad de regasificación. Un aspecto importante a tener en cuenta es la normativa con la que se construyó la planta (NFPA 59A), es decir que toda la distribución con la que cuenta actualmente la planta es cumpliendo las distancias de seguridad; en el presente estudio se tratará de optimizar al máximo el espacio para implementar el sistema de vaporización forzado. Según análisis a continuación se presenta el espacio donde pueden ir los vaporizadores:

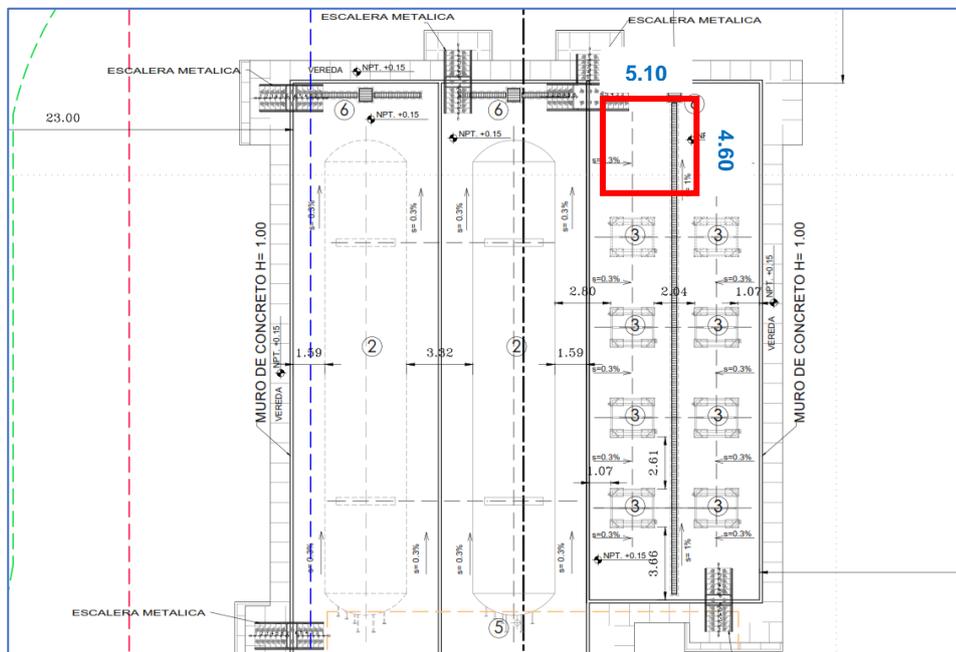


Figura. 12. Área para vaporizadores forzados - Fuente: Propia.

Debido a que el GNL está a temperaturas criogénicas, tiene que estar ubicado dentro de la zona criogénica, el área más apropiada es al costado de los vaporizadores ambientales. Es decir, el diseño tiene que adecuarse al área que se marca en rojo ( $23.5 \text{ m}^2$ ).

Dentro de las alternativas ya aplicadas existen tres tipos de vaporizadores forzados que son:

#### 4.2.1. Vaporizadores de tablero abierto (ORV):

Las características de estos vaporizadores es que necesitan agua de mar para su funcionamiento; es decir siempre hay un flujo de agua circulando por el vaporizador. Para la aplicación no es factible dado que el mar se encuentra aproximadamente a 3 km de la planta de regasificación. A continuación, una imagen de referencia:



Figura. 13. Distancias para ORV - Fuente: Elaboración propia.

Se buscó otra alternativa dado que existe un río (Lacramarca) cerca de la planta, este está aproximadamente a 700 mts de la planta; también se descarta esta alternativa puesto que los permisos de construcción son muy trabados por las entidades pertinentes.

Para saber cuánto cuesta vaporizar el GNL con los ORV, se obtiene un costo en base a la potencia de la bomba que se necesita para impulsar el agua desde el mar, a continuación, el cálculo:

Tabla 8. Gasto por consumo de sistema ORV - Fuente: Propia.

Cálculo - Gasto energía eléctrica por temporada de pesca			
Potencia de bomba (kW)	Gasto diario (S/.)	Gasto mensual (S/.)	Gasto por temporada pesca (S/.)
1200	S/12,960.00	S/388,800.00	S/1,555,200.00

Es importante mencionar que el cálculo usado no es de manera detallada pues no se considera pérdida de presión entre otros factores, si está inmerso la longitud, el caudal, y la densidad del fluido a temperaturas de trabajo.

#### 4.2.2. Vaporizadores de combustión sumergida (SCV):

Estos vaporizadores se caracterizan por calentar el agua con el gas de combustión utilizando el propio gas natural; por lo general el gas que aprovecha este tipo de vaporizador es el que se forma por el boil off con la finalidad de utilizar un vaporizador pequeño. Muy aparte de lo antes mencionado debido a que este vaporizador se instala dentro de la zona clasificada los equipos a utilizar tienen que ser a prueba de explosión, hecho que hace que los costos sean muy elevados y por la aplicación tienen que existir como mínimo 2 vaporizadores para que uno de ellos siempre funcione como respaldo o repartir la capacidad de regasificación en dos equipos.

Por otro lado, según estudios previos, el coste de funcionamiento de los vaporizadores de combustión sumergida es muy elevado porque de todo el GNL vaporizado utiliza entre el 1.5% y 2% como combustible. Para el caso de estudio se tomará en cuenta el 1.8% de 20000 m<sup>3</sup>/h que representa un consumo de gas natural de 360 m<sup>3</sup>/h. A continuación, se presenta el coste de consumo por la temporada de pesca:

Tabla 9. Gasto de GN en un SCV por temporada de pesca - Fuente: Elaboración propia.

Cálculo - Gasto de GN por temporada de pesca					
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Volumen día (m <sup>3</sup> )	Tarifa (soles/m <sup>3</sup> )	Gasto diario de GN	Gasto Mensual de GN	Gasto por temporada de pesca
360.00	8640.00	S/1.10	S/9,504.00	S/285,120.00	S/1,140,480.00

Como se aprecia solo en consumo de gas natural hay una suma considerable de dinero para el caudal que se necesita regasificar. Esto sirve como premisa para no entrar a los cálculos mecánicos y termodinámicos para la evaluación. A modo de resumen, estos vaporizadores en 4 meses generarían un gasto de combustible de S/. 1,140,480.00.

#### 4.2.3. Vaporizadores de carcasa y tubo (STV):

Estos intercambiadores de calor necesitan una recirculación de agua de mar o agua caliente para poder vaporizar el GNL; dado que en literaturas no existe una referencia del porcentaje que se gasta en combustible para calentar el agua en relación con el total del GNL vaporizado, se presentan algunos cálculos para determinar el consumo del GN y ser comparado con la alternativa anterior:

##### 4.2.3.1. Consumo de Gas Natural:

Para determinar el consumo de GN que se necesita para vaporizar los 20000 m<sup>3</sup>/h de gas natural primero se hallará el flujo de calor necesario y posteriormente dado que es el mismo calor que necesita aportar el agua se hallará el consumo del GN.

- **Flujo de calor necesario para vaporizar el GNL:** Para esto es importante saber que en el vaporizador el GNL pasa de líquido a gas (cambio de fase), por ello el calor total es la sumatoria del flujo de calor de vaporización del GNL ( $Q_{vap}$ ) más el flujo de calor de calentamiento del gas ya vaporizado ( $Q_{cal}$ ).

$$Q_{total} = Q_{vap} + Q_{cal}$$

**Datos para cálculos:** Para efectos de diseño, se está considerando los siguientes datos del agua.

Tabla 10. Propiedades del agua a condiciones de diseño - Fuente: Adaptado Cengel.

DATOS DEL AGUA					
	°C	°K	Densidad (kg/m3)	Cp (kJ/kg. °K)	Cp (promedio)
Temp - Inp	5	278.15	1004	4.201	4.189
Temp - Out	50	323.15	988.1	4.177	

Tabla 11. Propiedades del GNL a condiciones de diseño - Fuente: Quavii.

DATOS DEL GNL		
	°C	°K
Temp - Inp	-130	143.15
Temp - Out	15	288.15
Presión	Barg	
	10	
Entalpía	kJ/kg	
	510	
Densidad	(kg/m <sup>3</sup> )	
	450.7	

### **Cálculos de flujo de calor necesario:**

Tabla 12. Caudales y flujos másicos - Fuente: Elaboración propia.

Caudales Gas Natural y GNL	
Caudal del Gas Natural (m <sup>3</sup> /h)	20000
Caudal de GNL (m <sup>3</sup> /h)	33.33
Flujos Másicos del GNL	
Flujo másico de GNL (kg/h)	15023.33
Flujo másico de GNL (kg/s)	4.17
Calor Específico del GN	
Calor específico del GN (kJ/kgx°K)	2.5

Tabla 13. Flujo de calor necesario para vaporizar el GNL - Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del Flujo Total para Vaporizar el GNL	
Flujo de calor necesario para vaporizar el GNL (kJ/s)	2128.31
Flujo de calor de calentamiento de GN (kJ/s)	1512.77
Flujo de calor necesario total (kJ/s)	3641.07

- **Gasto por Temporada de Pesca:** A continuación, el aproximado de gasto que generaría este sistema de vaporización forzada:

Tabla 14. Consumo de GN de un sistema STV - Fuente: Elaboración propia.

Gas Natural Necesario para Vaporizar el GNL	
Q <sub>total</sub> (kW)	3641.07
Caudal GN (m <sup>3</sup> /h)	329.51

Tabla 15. Gasto de GN de un sistema STV - Fuente: Elaboración propia.

Cálculo - Gasto de GN por temporada de pesca					
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Volumen día (m <sup>3</sup> )	Tarifa (soles/m <sup>3</sup> )	Gasto diario de GN	Gasto Mensual de GN	Gasto por temporada de pesca
329.51	7908.21	S/1.10	S/8,699.03	S/260,970.94	S/1,043,883.74

Como se puede apreciar, existe un consumo de gas natural de 329.51 m<sup>3</sup>/h que es equivalente a un gasto por temporada de pesca de S/.1,043,883.74; en base a esto, el ahorro con la alternativa anterior es de S/.96,596.26.

Para efecto de análisis, a continuación, se presenta la evaluación técnico económico que se realizó para elegir la alternativa de diseño basado en la normativa internacional VDI 2225, donde se utiliza una ponderación establecida que dará como resultado la mejor alternativa, siendo Xi el valor técnico e Yi el valor económico.

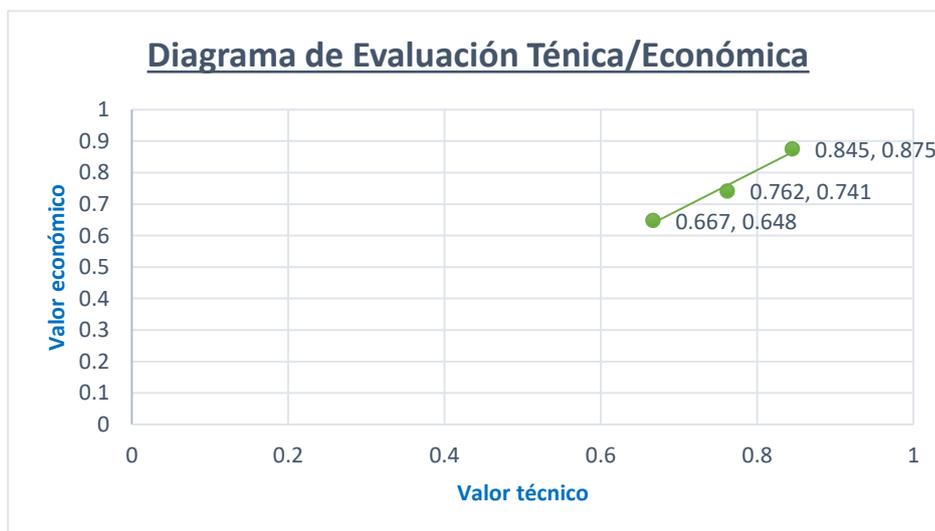
Tabla 16. Evaluación técnica de las alternativas. Fuente: Adaptado (Acosta, 2015)

VALOR TÉCNICO								
Proyecto: Diseño de un sistema de vaporización de 20000 m <sup>3</sup> /h								
P: puntaje de 0 a 4 (escala de valores según VDI 2225)								
0 = no satisface, 1 = aceptable a las justas, 2 = suficiente, 3 = bien, 4 = muy bien (ideal)								
G: Peso ponderado en función de la importancia de los criterios de evaluación (de 1 a 5) siendo 1 el de menos importancia.								
Criterio de evaluación para diseños en fase de concepto o proyecto								
Variantes de proyectos			Solución 1 - S1 (ORV)		Solución 2 - S2 (SCV)		Solución 3 - S3 (STV)	
Núm	Criterio de evaluación	G	p	Gp	p	Gp	p	Gp
1	Función	3	4	12	3	9	3	9
2	Complejidad y configuración de componentes	4	3	12	3	12	4	16
3	Confiabilidad operativa	4	3	12	3	12	4	16
4	Tamaño de la instalación	5	2	10	2	10	3	15
5	Condiciones de fabricación y montaje	5	2	10	1	5	3	15
Valoración total		21	14	56	12	48	17	71
Valor técnico Xi				0.667		0.762		0.845

Tabla 17. Evaluación económica de las alternativas. Fuente: Adaptado (Acosta, 2015)

VALOR ECONÓMICO								
Proyecto: Diseño de un sistema de vaporización de 20000 m3/h								
P: puntaje de 0 a 4 (escala de valores según VDI 2225)								
0 = no satisface, 1 = aceptable a las justas, 2 = suficiente, 3 = bien, 4 = muy bien (ideal)								
G: Peso ponderado en función de la importancia de los criterios de evaluación (de 1 a 5) siendo 1 el de menos importancia.								
Criterio de evaluación para diseños en fase de concepto o proyecto								
Variantes de proyectos			Solución 1 - S1 (ORV)		Solución 2 - S2 (SCV)		Solución 3 - S3 (STV)	
Núm	Criterio de evaluación	G	p	Gp	p	Gp	p	Gp
1	Costo de Fabricación y montaje	5	1	5	2	10	4	20
2	Consumo energía (S/kW)	4	3	12	2	8	3	12
3	Costo operativo	4	2	8	3	12	4	16
4	Mantenimiento	5	2	10	2	10	3	15
Valoración total		18	8	35	9	40	14	63
Valor económico Yi				<b>0.648</b>		<b>0.741</b>		<b>0.875</b>

Se aprecia en las tablas que ninguna alternativa cumple las expectativas al 100%, a continuación, una gráfica para mejor análisis:



Gráfica 3. Diagrama de evaluación técnico/económico. Fuente: Adaptado (Acosta, 2015)

Según el diagrama, los valores que se acercan al 100% son los de la alternativa 3 (vaporizadores TSV), según la metodología de diseño VDI

2225, la tercera alternativa es la más idónea para dar solución a la problemática de la presente tesis.

#### 4.3. Dimensionamiento y simulación de la alternativa seleccionada:

Aplicando la metodología de diseño se seleccionó un intercambiador de calor de carcasa y tubos. Un dato importante es que no se dimensionó un solo equipo para el caudal que se necesita regasificar; por temas de seguridad y confiabilidad se dividió el caudal total entre 3, es decir cada vaporizador tiene 6670 m<sup>3</sup>/h de capacidad de regasificación y en base al área disponible se dimensionaron los mismos.

El tipo de intercambiador seleccionado es BEU. Tipo B porque para la aplicación no requiere una limpieza frecuente del interior de los tubos; tipo E porque es la carcasa más simple, económica, sin complejidad en fabricación y tipo U porque el tubo puede expandirse y contraerse libremente, además la aplicación es para fluidos limpios, tal es el caso del GNL.

La configuración de los tubos será triangular porque según la norma TEMA este arreglo es ideal para aprovechar mejor la transferencia de calor.

Según el área disponible y la distancia entre vaporizador que exige la NFPA 59A (1.5 mts) se considera la siguiente distribución:

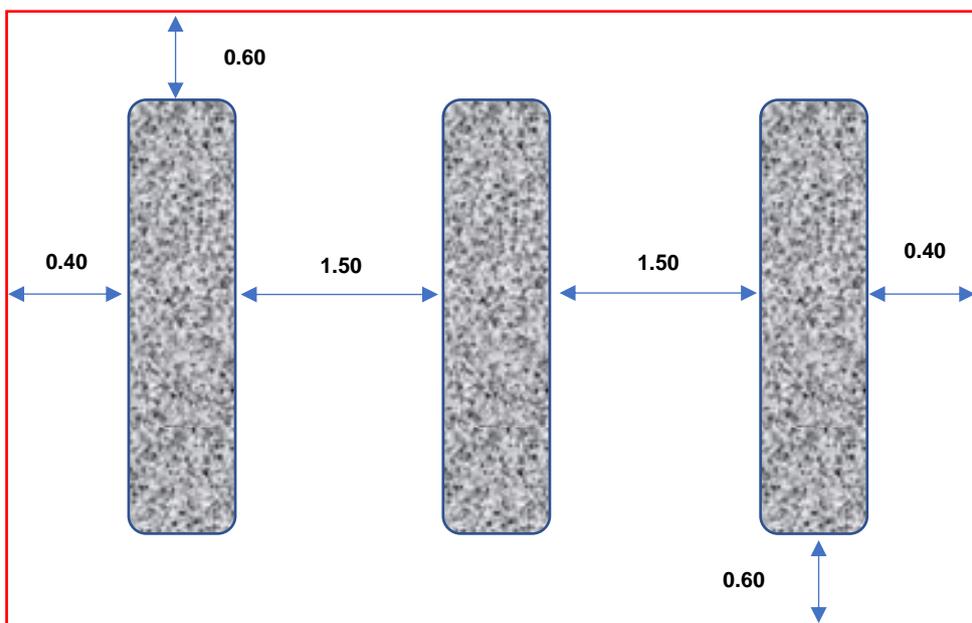


Figura. 14. Dimensiones aproximadas del intercambiador de calor - Fuente: Elaboración propia.

Para cumplir con la normativa con la que fue diseñada la planta se realiza la distribución que se visualiza en la imagen anterior; con esas dimensiones aproximadas se buscará el intercambiador más adecuado según la norma TEMA para cumplir con el caudal de cada vaporizador de 6670 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.3.1. Cálculo de diseño:

Se procedió con los cálculos de ingeniería, para ello se utilizó parámetros del proceso ya establecidos. En las siguientes tablas se muestran los datos principales de los fluidos que se utilizan en el sistema:

Tabla 18. Características del agua a temperatura de operación - Fuente: Elaboración propia.

DATOS DEL AGUA						
	°C	°K	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Cp (kJ/kg. °K)	Cp (promedio)	Den. (promedio)
Temp - Out	20	293.15	999.5	4.18	4.1785	993.8
Temp - Inp	50	323.15	988.1	4.177		
Visc. Cinemática (m <sup>2</sup> /s)		7.238E-07	Visc. Dinámica (kg/m.s)	0.000719312	Conductividad (W/m °C)	0.58

Tabla 19. Características del GNL a temperatura de operación - Fuente: Elaboración propia.

DATOS DEL GNL		
	°C	°K
Temp - Inp	-130	143.15
Temp - Out	15	288.15
Presión	Barg	
	10	
Entalpía	kJ/kg	
	510	
Densidad	(kg/m <sup>3</sup> )	
	450.7	
Visc. Cinemática	1.69E-07	(m <sup>2</sup> /s)
Visc. Dinámica	6.29E-05	(kg/m.s)
Calor específico	3875	(J/kg. °K)
Cond. Térmica	0.1402	(W/m °C)

Los datos mostrados en las tablas son las condiciones de operación con la cual se está diseñando los vaporizadores.

Como se mencionó anteriormente, se necesita obtener 20000 m<sup>3</sup>/h de GN, este caudal será entregado por 3 vaporizadores, por lo anterior el

análisis se hará de manera unitaria, es decir que para efecto de cálculos se analizará un solo vaporizador con un caudal de entrega de 6670 m<sup>3</sup>/h.

Tabla 20. Caudales y flujos másicos del GNL - Fuente: Elaboración propia.

<b>Caudales Gas Natural y GNL</b>	
Caudal del Gas Natural (m <sup>3</sup> /h)	6670
Caudal de GNL (m <sup>3</sup> /h)	11.12
<b>Flujos Másicos del GNL</b>	
Flujo másico de GNL (kg/h)	5010.28
Flujo másico de GNL (kg/s)	1.39

Obtenido el flujo másico del GNL, se procede a calcular el flujo de calor necesario para vaporizar el GNL.

Tabla 21. Flujo de calor para vaporizar el GNL - Fuente: Elaboración propia.

<b>Cálculo del Flujo Total para Vaporizar el GNL</b>	
Flujo de calor necesario para vaporizar el GNL (kJ/s)	709.79
Flujo de calor de calentamiento de GN (kJ/s)	504.51
Flujo de calor necesario total (kJ/s)	1214.30

Posterior a calcular el flujo de calor necesario se encuentra el flujo másico del agua.

Tabla 22. Flujo másico del agua - Fuente: Elaboración propia.

<b>Flujo Másico del Agua</b>	
Flujo másico de agua (kg/s)	9.687
Caudal de agua (m <sup>3</sup> /s)	0.0097
Caudal de agua (m <sup>3</sup> /h)	35.09

Según cálculos, el caudal de agua para vaporizar los 11.12 m<sup>3</sup> de GNL es 35.09 m<sup>3</sup>/h, este se utilizará para los cálculos posteriores hasta poder encontrar el coeficiente global de transferencia de calor.

A modo de síntesis, los cálculos están en base al caudal nominal que se necesita para cada vaporizador, luego se halla el flujo de calor necesario para vaporizar el GNL; sabiendo que el calor que requiere el GNL es el mismo que debe aportar el agua, se realiza una igualdad para encontrar el flujo másico del agua, es decir, el flujo másico del

agua es igual al calor total para vaporizar el GNL dividido de la multiplicación del calor específico promedio del agua con la diferencia de temperatura.

Debido a que la limitante en la planta es el área que ocuparán los vaporizadores, en la tabla 22 se presentan las características del intercambiador escogido en base a la norma TEMA:

Tabla 23. Características del intercambiador de calor - Fuente: Elaboración propia.

<b>LADO DE TUBOS</b>	<b>Vaporizador</b>
Arreglo	Triangular
Diámetro exterior (mm)	12.7
Diámetro interior (mm)	11.455
Espesor (mm)	1.245
Longitud (mts)	3.15
Pitch (mm)	17
N° de pasos	2
Material	SS 304L
Diámetro ingreso de GNL (pulg.)	2
<b>LADO DE CASCO</b>	
Diámetro exterior (mm)	457.2
Diámetro interior (mm)	450.4
N° Baffles	10
N° Pasos	2
Material	Acero al carbono
Diámetro ingreso de agua (pulg.)	6

Los datos presentados en la tabla serán las condicionales o limitantes para los cálculos, pues con esas dimensiones se cumplen las distancias de seguridad que exige la NFPA 59A, norma con la que la planta de regasificación fue diseñada.

Definido lo anterior, en la tabla 23 se muestra la temperatura media logarítmica y el factor de corrección “F” calculado.

Tabla 24. Temperatura media logarítmica - Fuente: Elaboración propia.

Temp. Med. Logarítmica	
$\Delta T_1$ (°C)	150
$\Delta T_2$ (°C)	35
LMTD (°C)	79.022
Factor de corrección "F"	
P	0.81
R	0.21
F	0.86

El factor F se extrae de la siguiente gráfica:

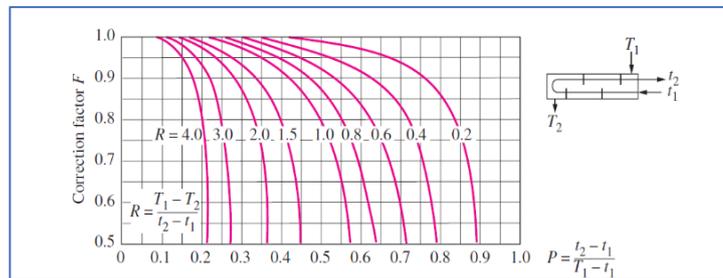


Figura. 15. Gráfica para determinar el factor "F" - Fuente: Cengel.

Ahora se calcula el área y como consiguiente el número total de tubos y los tubos por paso que necesitará el intercambiador de calor.

Tabla 25. Área total y número de tubos - Fuente: Elaboración propia.

Área total de tubería	
Área (m <sup>2</sup> )	44.80
Número de tubos	
Long. Efectiva (mts)	3.12
Área tubo (m <sup>2</sup> )	0.125
Número tubos	300
Número de pasos	2
Nt x paso	150

Antes de encontrar el coeficiente global de transferencia de calor, se calcula la resistencia térmica total que están dadas por velocidades, número de Reynolds, Prandtl y entre otros valores que se muestran en las tablas 25 y 26.

Tabla 26. Resistencia térmica por conducción y convección - Fuente: Elaboración propia.

<b>Res. Térmica por Conducción</b>	
Rd (°K/W)	0.038
<b>Res. Térmica por Convección en banco de tubos</b>	
Vel. Entorno (m/s)	0.534
Vel. Máxima (m/s)	2.113
Reynolds	37066.85
Prandtl	5.182
Nusselt	334.930
C2	0.96
C1	0.35
m	0.6
Coef. Conv. Hv1 (W/m <sup>2</sup> x°K)	15296.02
Rv1 (°C/W)	2.89507E-06

Tabla 27. Resistencia térmica en banco de tubos - Fuente: Elaboración propia.

<b>Res. Térmica por Convección en interior de tubos</b>	
Vel. Entorno (m/s)	1.524
Reynolds	1.0302E+05
Prandtl	1.737945792
Nusselt	293.826
Coef. Conv. Hv2(W/m <sup>2</sup> x°K)	3596.198
Rv2 (°C/W)	1.36522E-05
<b>Res. Térmica Total</b>	
Rt (°C/W)	0.038
U (W/m <sup>2</sup> x°K)	229.313

Como se sabe, el Coeficiente global de transferencia de calor “U” se refiere a que tan bien se conduce el calor a través de las tuberías; no existe un valor exacto pues esto depende mucho de las diferentes aplicaciones en la industria y para ello existen tablas típicas, sin embargo, intercambiadores de calor de GNL son muy poco comunes, por ello el resultado no puede ser comparado en una tabla típica de coeficientes global de transferencia de calor. Dado que el resultado no puede ser comparado, este tiene que ser simulado para analizar si los cálculos realizados son suficientes o necesitan ajustes para lograr vaporizar el GNL.

El software que se utilizó es SimQuim®, es importante resaltar que para el uso del mismo se adquirió la respectiva licencia.

El objetivo es comprobar que el coeficiente global de transferencia de calor (U) obtenido y los datos asumidos para el diseño cumplen con la finalidad de vaporizar el GNL requerido.

El software requiere de datos principales para comprar la efectividad de los mismo, a continuación, una tabla que muestran los datos que necesita el software para la simulación y como consiguiente una captura de pantalla que muestra la primera simulación:

Tabla 28. Datos de fluidos para dimensionamiento de bomba - Fuente: Elaboración Propia.

Fluido caliente	
Tipo de fluido	Agua
Caudal volumétrico	35 m3/h
Temperatura de ingreso	45 °C
Presión en carcasa	4 barg
Fluido frío	
Tipo de fluido	Metano
Caudal volumétrico	11.12 m3/h
Temperatura de ingreso	-130 °C
Presión en tubos	10 barg
Datos calculados	
Coefficiente global de transferencia de calor	229.31 W/m2x°K
Área de intercambio de calor	44.8 m2

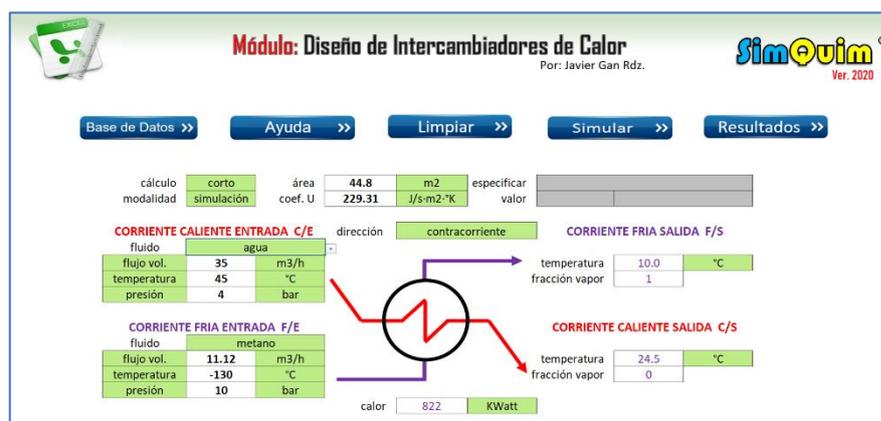


Figura. 16. Primera compilación en software - Fuente: SimQuim.

La figura 16 muestra la primera compilación en el software, con los datos ingresados se observa que la temperatura de salida del gas natural es 10 °C, con esto se deduce que el coeficiente global de transferencia de calor (U) encontrado es el adecuado pues está muy cercano a la temperatura mínima de salida que requiere el diseño. Para aumentar la temperatura de salida, se puede incrementar el “U”, el flujo de ingreso de agua o la temperatura de ingreso de esta; lo primero es poco probable dado que esto depende de las resistencias térmicas, incrementar la temperatura de ingreso se descarta para evitar calentar la tubería e incurrir con costos de protecciones térmicas, por lo anterior se hizo otra compilación en el software aumentado el flujo de agua.

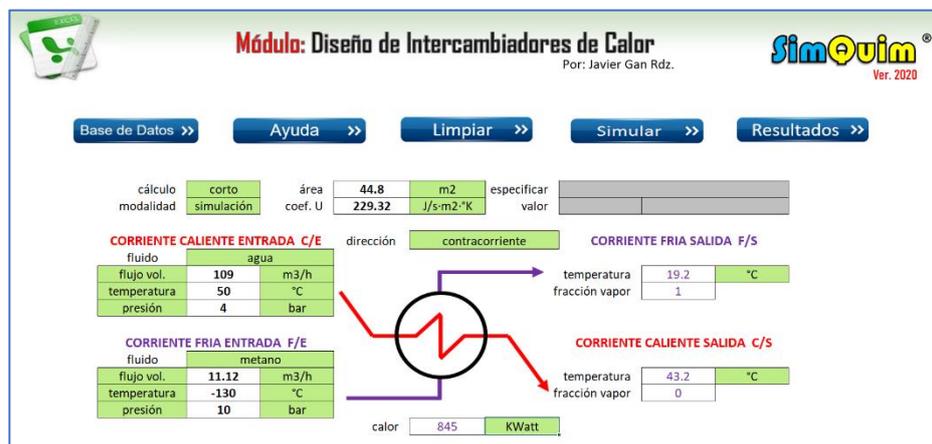


Figura. 17. Segunda compilación en software - Fuente: SimQuim.

Haciendo compilaciones en el software se determina un caudal de agua 109 m<sup>3</sup>/h y otro detalle a resaltar es que se introduce la temperatura de ingreso de agua tomada para los cálculos (50°C). Con los datos puestos nos arroja una temperatura de salida del gas natural de 19.2°C, es más que suficiente a lo requerido. Sin embargo, para dar un factor de seguridad al diseño, se seguirá asumiendo una temperatura de ingreso de agua de 45°C, con ello se obtiene lo siguiente:

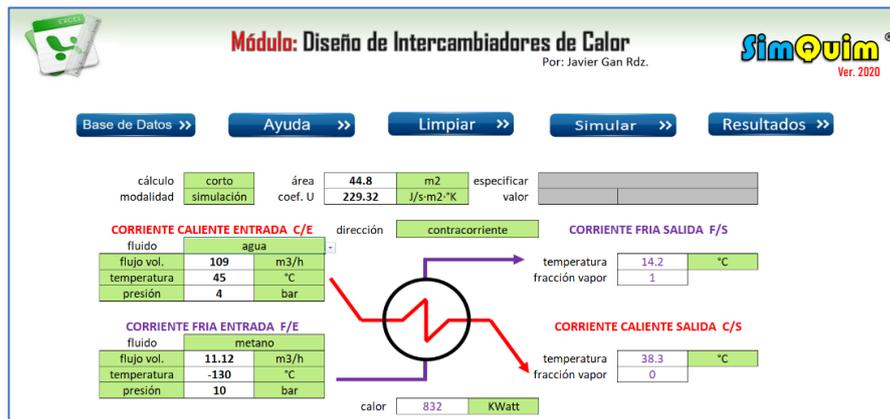


Figura. 18. Tercera compilación en software - Fuente: SimQuim.

Se obtiene una temperatura de salida del GN de 14.2°C y para ello se necesita un calor de 832 kW. El caudal elegido será el input para dimensionar la bomba que recirculará el agua y con el calor necesario se selecciona los calentadores.

Antes de proceder con la selección de bomba y calentadores, se muestra los datos que arroja el software de intercambiadores de calor que sirven para la etapa constructiva de la misma.

	Entrada		Salida		
	Caliente	Fria	Caliente	Fria	
Fluido	agua	metano	agua	metano	
Estado	liquido	liquido	liquido	gas	
Flujo másico	107547.6	4120.1	107547.6	4120.1	Kg/h
Flujo volumétrico	109.00	11.12	108.69	601.69	m3/h
Temperatura	45.00	-130.00	38.33	14.16	°C
Presión	4.08	10.20	4.08	10.20	Kg/cm2
Fracción de vapor	0.00	0.00	0.00	1.00	
Presión de vapor	0.10	7.66	0.07		Kg/cm2
Densidad	986.68	370.51	989.51	6.85	Kg/m3
gravedad especifica	1.00	0.37	1.00	0.01	
Viscosidad	0.611	0.063	0.693	0.011	cP
Capacidad calorífica	4176.21	3868.61	4176.96	2199.82	J/kg·K
Entalpía de vaporización	43.13	6.95	43.38		kJ/mol
Conductividad térmica	0.6318	0.1395	0.6239	0.0327	Watt/m·K
Tensión superficial	68.861	7.417	70.170		dyn/cm
factor compresibilidad	1.00	1.00	1.00	0.98	
Temperatura fusión	-217.2	-174.6	-217.2	-174.6	°C
Temperatura crítica	374.0	-82.6	374.0	-82.6	°C
Presión crítica	225.0	46.9	225.0	46.9	Kg/cm2
Factor acéntrico	0.345	0.012	0.345	0.012	
Peso molecular	18.02	16.04	18.02	16.04	

Figura. 19. Detalles de las corrientes de los fluidos - Fuente: SimQuim

Los datos mostrados en la imagen anterior son valores de las corrientes de ambos fluidos.

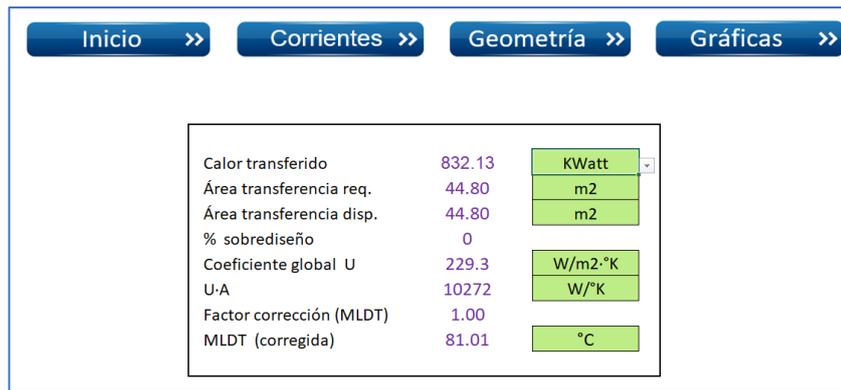
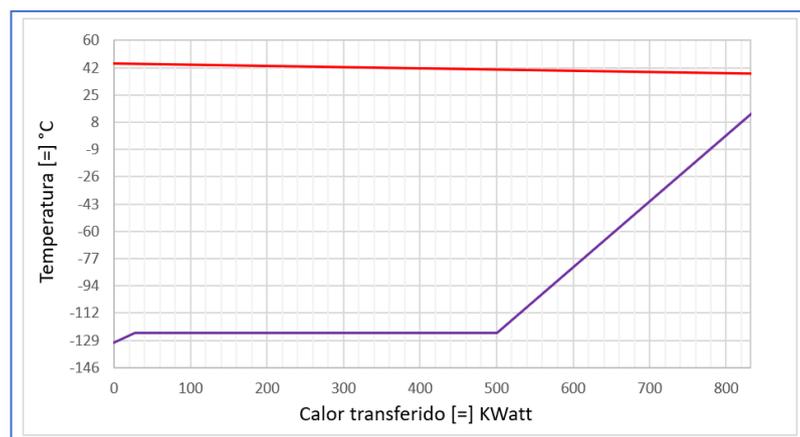


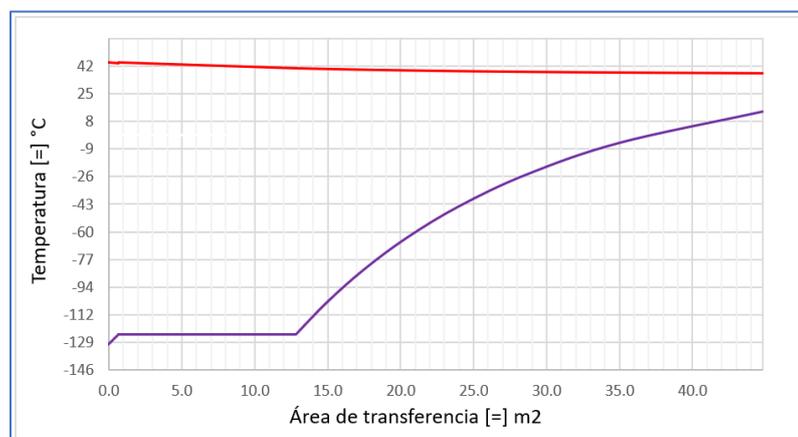
Figura 20. Resumen del intercambiador de calor - Fuente: SimQuim

A modo de resumen la figura 20, muestra los valores del “U”, área y la temperatura media logarítmica, este último valor es muy cercano al que se encontró en el cálculo manual; es un detalle que refuerza la veracidad de los cálculos realizados.

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento de la temperatura vs el calor transferido y el área de transferencia de calor:



Gráfica 4. Temperatura vs Calor transferido - Fuente: SimQuim.



Gráfica 5. Temperatura vs área de transferencia - Fuente: SimQuim.

Las gráficas muestran cómo se va regasificando el GNL en relación al área y el calor aplicado dentro del intercambiador de calor.

En las siguientes figuras se muestran detalles del intercambiador de calor seleccionado y la norma bajo la cual se sustenta dicho cálculo.

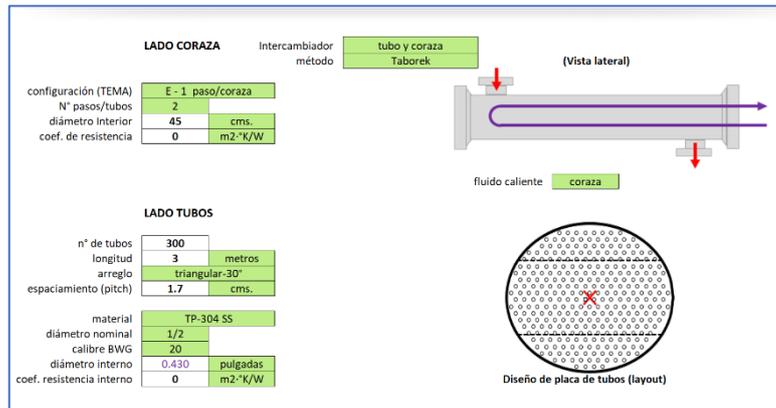


Figura. 21. Detalles de coraza y tubos - Fuente: SimQuim.

Datos de Geometría		
tipo de intercambiador	TEMA E	
diámetro interior / coraza	45.00	cms.
número de tubos	300	
longitud de los tubos	3.00	metros
material de los tubos	TP-304 SS	
diámetro interior / tubos	0.430	pulgadas
diámetro exterior / tubos	0.500	pulgadas
espesor de pared / tubos	0.0350	pulgadas
patrón de los tubos	tri - 30°	
espaciado (pitch) / tubos	1.700	cms.
número de pasos / tubos	2	
número de pasos / coraza	1	
número de bafles	8	
espaciado de los bafles	30.00	cms.
espesor de los bafles	0.5000	cms.
% corte de los bafles	25%	
tipo de bafles	segm. simple	

Figura. 22. Datos de la geometría - Fuente: SimQuim.

Los datos mostrados sirven como input para la etapa constructiva.

Es importante resaltar que la potencia (veracidad) de cálculo del software es suficiente para validar y dar confiabilidad a los resultados y por ende reforzar el sustento del proyecto.

Como se mencionó anteriormente, la planta fue diseñada en base a la norma NFPA 59A; a modo de síntesis, esta recomienda que entre dos posibles trampas de GNL (entre válvulas) debe existir una o más válvulas de alivio que permitan evacuar el gas natural a la máxima presión de diseño con un caudal de un 10% por encima del nominal. Por lo anterior se vio la necesidad de considerar 3 válvulas de alivio con una capacidad unitaria de 2712 m<sup>3</sup>/h por cada vaporizador forzado.

Con el caudal utilizado para el dimensionamiento del vaporizador se selecciona la bomba utilizando el mismo software SimQuim pero esta vez en el módulo de "Diseño de bombas". El caudal total del agua es de 320 m<sup>3</sup>/h puesto que son 3 vaporizadores, a continuación, los cálculos en el software.

La corrida se inicia considerando las cantidades de accesorios que se necesitan en la succión y descarga de la bomba:

**ACCESORIOS EN LA SUCCION**

	<b>Válvula de bola</b> razón β <input type="text" value="1"/> ángulo θ <input type="text" value="0"/> cantidad <input type="text" value="3"/>		<b>Válvula de pie de vástago</b> cantidad <input type="text"/>		<b>Tee bridada/soldada</b> flujo directo cantidad <input type="text"/> flujo desviado cantidad <input type="text" value="3"/> <b>Reducción tipo campana</b> <input checked="" type="checkbox"/> dimensión <input type="text" value="12 X 8"/>
	<b>Válvula de compuerta</b> razón β <input type="text" value="1"/> ángulo θ <input type="text" value="0"/> cantidad <input type="text"/>		<b>Codo 90° soldado/bridado</b> r/d <input type="text" value="1"/> cantidad <input type="text" value="3"/>		<b>Reducción tipo campana</b> <input checked="" type="checkbox"/> dimensión <input type="text" value="12 X 8"/>
	<b>Válvula de mariposa</b> cantidad <input type="text" value="1"/>		<b>Codo 45° soldado/bridado</b> r/d <input type="text" value="1"/> cantidad <input type="text" value="2"/>		<b>Entrada/Succión</b> <input type="checkbox"/> tipo <input type="text"/> r/d <input type="text"/>

Figura. 23. Accesorios succión de bomba - Fuente: SimQuim.

**ACCESORIOS EN LA DESCARGA**

	<b>Válvula de bola</b> razón β <input type="text" value="1"/> ángulo θ <input type="text" value="0"/> cantidad <input type="text" value="3"/>		<b>Válvula de globo a 90°</b> razón β <input type="text" value="1"/> ángulo θ <input type="text" value="0"/> cantidad <input type="text"/>		<b>Codo 90° soldado/bridado</b> r/d <input type="text" value="1"/> cantidad <input type="text" value="3"/>
	<b>Válvula de compuerta</b> razón β <input type="text" value="1"/> ángulo θ <input type="text" value="0"/> cantidad <input type="text"/>		<b>Válvula de globo en Y</b> razón β <input type="text" value="1"/> ángulo θ <input type="text" value="0"/> cantidad <input type="text"/>		<b>Codo 45° soldado/bridado</b> r/d <input type="text" value="1"/> cantidad <input type="text" value="3"/>
	<b>Válvula de mariposa</b> cantidad <input type="text" value="1"/>		<b>Válvula de retención/columpio</b> cantidad <input type="text"/>		<b>Tee bridada/soldada</b> flujo directo cantidad <input type="text" value="3"/> flujo desviado cantidad <input type="text" value="3"/>
	<b>Válvula de globo</b> razón β <input type="text" value="1"/> ángulo θ <input type="text" value="0"/> cantidad <input type="text"/>		<b>Válvula de retención/elevación</b> razón β <input type="text" value="1"/> ángulo θ <input type="text" value="0"/> cantidad <input type="text"/>		<b>Expansión tipo campana</b> <input checked="" type="checkbox"/> dimensión <input type="text" value="12 X 8"/>

Figura. 24. Accesorios en descarga de bomba - Fuente: SimQuim.

Posterior a ello, se procede a ingresar parámetros de operación y longitud de tubería:

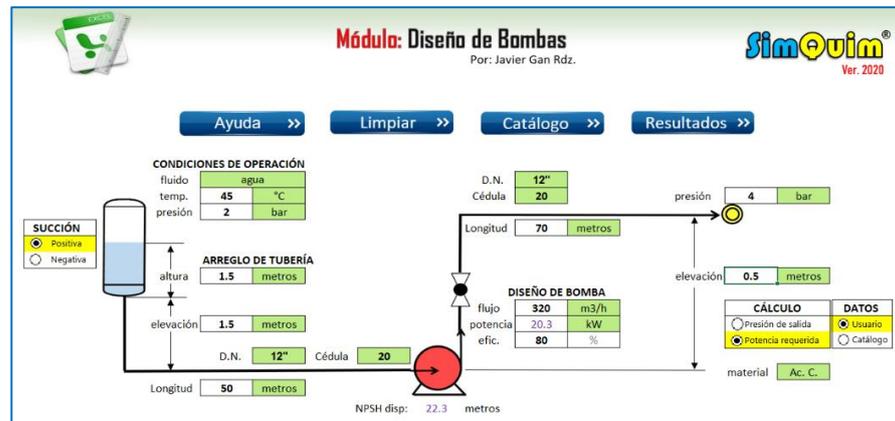


Figura. 25. Compilación para diseño de la bomba - Fuente: SimQuim.

Los resultados arrojan que se necesita una potencia de 20.3 kW = 22 kW y con un NPSH de 22.3 metros, con estos valores se selecciona la bomba ideal para la aplicación. Aparte de la potencia, el mismo software entrega datos adicionales para sustentar la solicitud de la bomba.

Inicio Secciones >> Resúmen >>

	Succión	Descarga	
Fluido	agua	agua	
Estado	liquido	liquido	
Flujo	320.00	320.00	m3/h
Velocidad	1.17	1.17	metros/s
Temperatura	45.00	45.00	°C
Presión	2.04	4.08	Kg/cm2
P vapor	0.10	0.10	Kg/cm2
Densidad	986.68	986.68	Kg/m3
Viscosidad	0.611	0.611	cP
Reynolds	586913	586913	
P.M.	18.02	18.02	
Temp. Fusión	0	0	°C
Temp. crítica	373.95	373.95	°C
Presión crítica	224.99	224.99	Kg/cm2

Figura. 26. Resumen de datos en la succión y descarga - Fuente: SimQuim.

	Succión	Descarga	Total	
Material	Ac. C.	Ac. C.		
Factor fricción	0.0147	0.0147		
Factor fricción t	0.0129	0.0129		
NPSH <sub>disp</sub>	22.25			metros
K tubería	2.36	3.31	5.7	
K accesorios	2.66	6.54	9.2	
ΔP fricción	0.016	0.023	0.0	Kg/cm <sup>2</sup>
ΔP accesorios	0.02	0.04	0.1	Kg/cm <sup>2</sup>
ΔP altura	-0.296	0.049	-0.2	Kg/cm <sup>2</sup>
ΔP total	-0.261	0.117	-0.144	Kg/cm <sup>2</sup>

Figura. 27. Factores de fricción y pérdida de carga - Fuente: SimQuim.

A modo de resumen, el software arroja resultados de la cantidad de tubería, accesorios y otros que se consideran para la etapa constructiva.

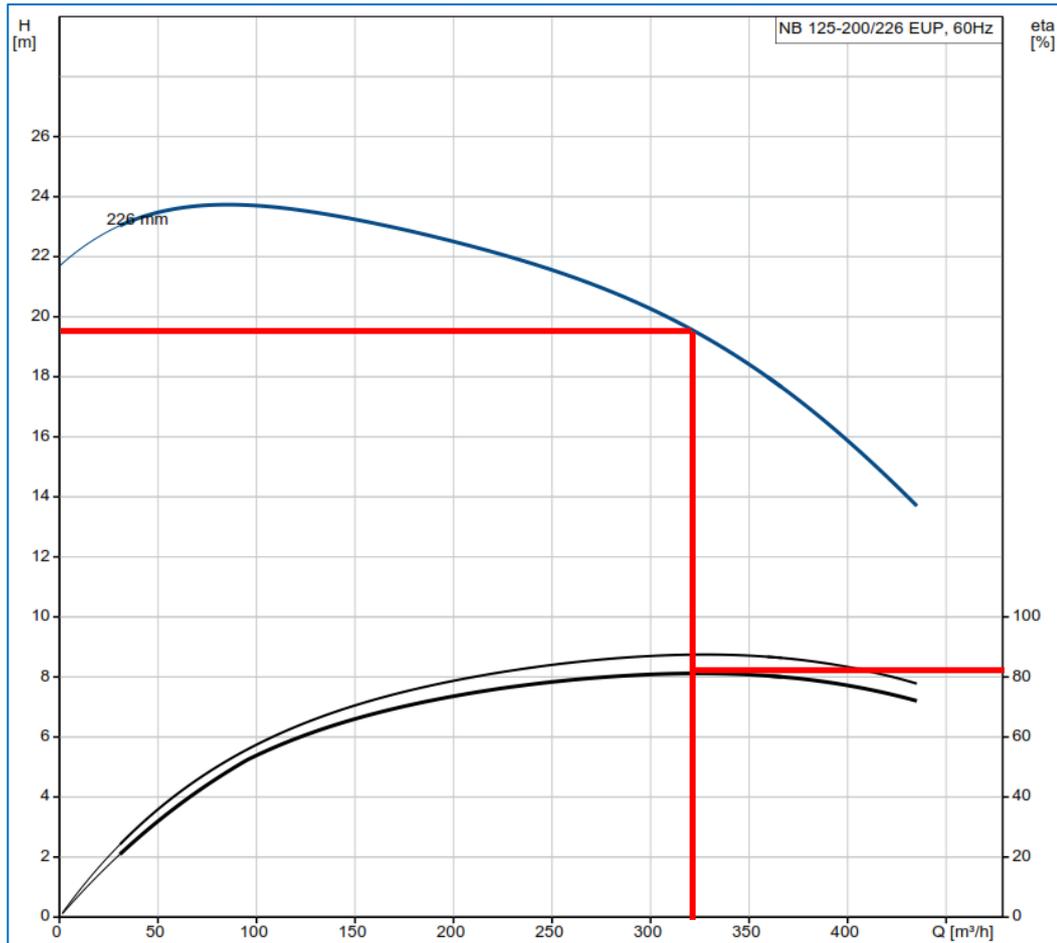
Inicio	Corrientes >>	Secciones >>	Imprimir >>
<b>Bomba especificada</b>			
Potencia: 28.3 hp, eficiencia: 80%, CDT diseño: 19.3 mts.			
<b>Tabla de tubería, válvulas y accesorios especificados</b>			
120 metros de tubería de 12" de diámetro, cédula 20 de Acero al Carbón			
6 Codo de 90° soldado/bridado (r/d = 1), diam: 12", mat: Ac. C.			
5 Codo de 45° soldado/bridado (r/d = 1), diam: 12", mat: Ac. C.			
3 Tee bridada/soldada (r/d = 1), diam: 12", mat: Ac. C.			
2 Reducción tipo campana de 12 X 8 pulg., mat: Ac. C.			
1 Reducción tipo campana de 12 X 8 pulg., mat: Ac. C.			
6 Válvula de bola (β = 1, θ = 0°), diam: 12", mat: Ac. C.			
2 Válvula de mariposa, diam: 12", mat: Ac. C.			

Figura. 28. Resumen bomba calculada y datos de accesorios - Fuente: SimQuim.

Con todos los datos principales de los cálculos se procede a seleccionar la bomba más adecuada, estos datos son:

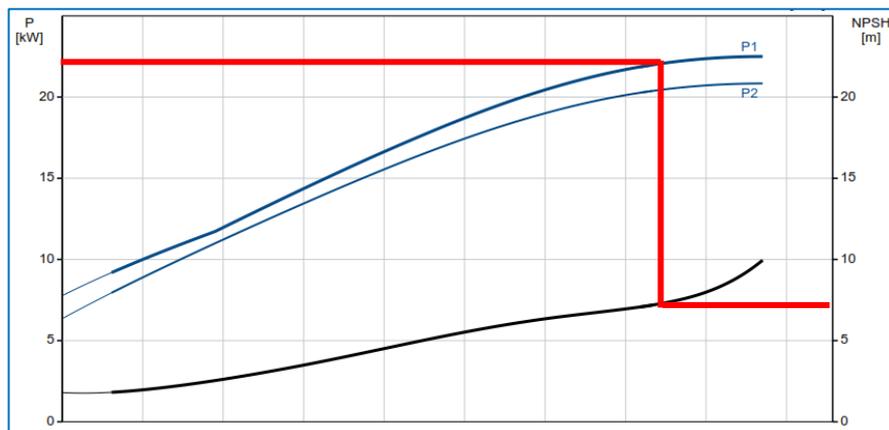
Tabla 29. Datos para selección de bomba - Fuente: Elaboración propia.

Datos para selección de bomba	
Potencia	22 kW
Eficiencia	80%
NPSH disponible	22.3 mts
CDT	19.3 mts
Caudal	320 m <sup>3</sup> /h



Gráfica 6. Carga dinámica total vs caudal - Fuente: SimQuim.

Se puede apreciar que a  $320 \text{ m}^3/\text{h}$ , las curvas de la bomba elegida está dentro de lo calculado; es decir que la carga dinámica total y la eficiencia considerada para cálculo está dentro de lo que puede ofrecer la bomba seleccionada, el catálogo de esta se muestra en el anexo 7. A continuación, se muestra la gráfica del NPSH requerido por la bomba seleccionada de acuerdo a su potencia nominal:



Gráfica 7. Potencia y NPSH - Fuente: SimQuim.

En la gráfica 7 se muestra la intersección de la potencia, considerando el caudal e interceptándola con el NPSH requerido por la bomba seleccionada; se puede apreciar que este es de 8 mts, para dar un factor de seguridad se le suma 0.5 mts tendiendo un NPSH requerido total de 8.5 mts. El NPSH disponible es de 22.3 mts, al ser este mayor que el requerido, se asegura que en la cabeza de la bomba no exista cavitación. Por todo lo anterior los datos calculados están acorde a la bomba seleccionada.

Se resalta que, el requerimiento es por dos bombas de la misma capacidad (22 kW), esta segunda es para prestar confiabilidad al sistema.

Para los calentadores de agua no se necesitan cálculos detallados pues ya se tiene el calor requerido que necesita un vaporizador para regasificar el GNL (832.15 kW), este multiplicado por 3 nos da un valor de 2496.45 kW, a este valor se le asigna un factor de seguridad (1.5) arrojando un flujo de calor necesario de 3744.7 kJ/s.

Con ese calor necesario se realizó el requerimiento obteniendo 4 calentadores, sin embargo, para garantizar el proceso se optó por tener 5 calentadores para que este último sirva como respaldo. Entonces el flujo de calor que pueden aportar los 5 calentadores es 4993 kJ/s. La ficha técnica de los equipos se encuentra en el anexo 8.

Para lo anterior se asume una distribución ideal de los caudales calculados y se desprecia la pérdida de calor con el medio ambiente por el factor de seguridad asumido.

#### **4.3.2. Planos para implementación de la propuesta:**

Hecho los cálculos, se procedió a realizar planos para la debida implementación del sistema de vaporización; este entregable se encuentran en anexo 9.

Un factor importante a tener en cuenta para el dimensionamiento de los vaporizadores era el espacio disponible en planta para cumplir con las distancias de seguridad según norma NFPA 59A.

Por lo descrito en el párrafo anterior, los vaporizadores forzados se ubicarán al costado de los vaporizadores ambientales; para calentar el agua que se utiliza en los intercambiadores de calor, se construyó un recinto para los calentadores y bomba que se ubica en el extremo de la planta, para mayor referencia revisar el plano del anexo 10.

Los vaporizadores forzados son aislados por medio de válvulas manuales con la finalidad de brindar una confiabilidad operativa de la planta y cada uno de ellos como medida de seguridad cuentan con válvulas de alivio, una mejor referencia de lo antes mencionado se encuentra en el anexo 9.

Para la ubicación de los calentadores y las bombas de recirculamiento de agua se debe construir un recinto para aislar los procesos; para la distribución de los equipos se utilizará un área de 135 m<sup>2</sup>, es importante mencionar que el recinto contará con un sistema de detección de gas para garantizar la seguridad en la planta.

#### **4.4. Manual de Operación y Mantenimiento:**

Dado que la planta cuenta con un manual de operación y mantenimiento y teniendo en cuenta que los vaporizadores forzados solo funcionarán en temporada de pesca para cubrir la máxima demanda a continuación se describen los puntos operativos y de mantenibilidad a tener en cuenta:

##### **4.4.1. Principios de operación:**

Los vaporizadores forzados entrarán a operar cuando el caudal supere los 10000 m<sup>3</sup>/h. Cuando el consumo esté por encima del caudal ya mencionado el operador de la planta deberá alinear sus válvulas y comunicarse con el centro de control para obtener el permiso de encender los calentadores; la secuencia de entrar en funcionamiento se describe a continuación:

- Obtenido el permiso del centro principal de control, se encenderá los calentadores y luego la bomba para iniciar con el recirculamiento del agua hasta que llegue a 50°C.
- La bomba tiene que estar en modo automático para que alterne según el tiempo que prevea el CPC.

- Es importante mencionar que mientras la temperatura del agua no alcance los 40 °C la válvula manual de ingreso de GNL hacia los vaporizadores debe mantenerse cerrada (solo la válvula de ingreso de GNL).
- El operador deberá mantener constante comunicación con el CPC para cerciorarse que los parámetros que está leyendo en campo son los mismos que visualizan en el SCADA.
- Una vez que la temperatura del agua llegue a los 40 °C, el operador abrirá la válvula manual de dos vaporizadores forzados, después de un lapso de 5 minutos cuando se cerciore que el sistema está operando correctamente debe proceder con el cerrado de las válvulas manuales de ingreso a los vaporizadores ambientales.
- Si el caudal supera los 12500 m<sup>3</sup>/h se debe aperturar la válvula manual de ingreso de GNL para que inicie a trabajar el tercer vaporizador.
- Respecto a los equipos que calientan el agua, según lógica de control trabajan de manera automática, es decir, si la temperatura del gas natural supera los 50°C estos se apagan automáticamente; si la temperatura de salida de gas natural desciende a 30°C se encienden de manera automática. Un dato importante es que la bomba no deja de funcionar hasta que se apague de manera manual.
- Si la temperatura del gas natural supera los 40°C se recomienda cambiar el sistema de vaporización, es decir pasar de los vaporizadores forzados a vaporizadores ambientales, dado que si la temperatura aumenta es porque el caudal está disminuyendo.
- La frecuencia y ajustes operativos lo realizaran en conjunto conforme vaya operando la planta.

#### **4.4.2. Mantenimiento:**

Se recomienda adaptar los equipos instalados al plan de mantenimiento anual que se tiene para las plantas. Para ello se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Dado que los equipos solo trabajan por temporada de pesca, el mantenimiento donde incluya detener el proceso debe realizarse en los periodos donde no haya consumo elevado de gas natural o fuera de temporada de pesca.
- Los equipos críticos a tener en cuenta son las bombas de recirculación y calentadores de agua.
- Para las electrobombas se recomienda seguir indicaciones del manual de fabricante para determinar los periodos de megado, limpieza mecánica, entre otros.
- Respecto a los calentadores se recomienda un mantenimiento semestral antes de iniciar la temporada de pesca y durante ella seguir una inspección visual y ajuste del sistema eléctrico.
- En lo que concierne a los vaporizadores forzados es libre de mantenimiento, sin embargo, a todos sus componentes, inspección y limpieza entre otras actividades.
- La limpieza mecánica de la tubería se recomienda realizarse cada 2 años dado que el agua que se utiliza es tratada y el GNL es un combustible libre de impurezas.
- Todos los puntos antes mencionados se resumen en el programa de mantenimiento de la siguiente página, claro está que son periodos propuestos, acorde a las condiciones operativas estos pueden variar su frecuencia, así como también agregar actividades en el mismo.

Tabla 30. Programa de mantenimiento - Fuente: Elaboración propia.

UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	PROGRAMA DE MANTENIMIENTO AÑO 2021														A: Anual		INT: Personal Interno											
															M: Mensual													
															S: Semestral													
															T: Trimestral		EXT: Personal Externo											
Elaborado por:	Luis Felipe Sieden Rojas				Revisado por:																							
CÓDIGO SAP EQUIPO/SISTEMA	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO				N° de personas	Encargado	Ejecutor	Tiempo de ejecución (H)	Frecuencia	Ene-21	Feb-21	Mar-21	Abr-21	May-21	Jun-21	Jul-21	Ago-21	Set-21	Oct-21	Nov-21	Dic-21	Ene-22	Feb-22	Mar-22	Abr-22	May-22		
<b>ED-CHB-017</b>	<b>Estación de Distrito Chimbote - Vaporizadores forzados</b>																											
<b>ED-CHB-017-01</b>	<b>Sistema intercambiador de calor</b>																											
	Búsqueda de fugas.	1	1	INT	4	M							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Inspección y limpieza de transmisores y medidores flujo	2	1	INT	5	M							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Inspección y limpieza de termómetros y manómetros	2	1	INT	4	M							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Inspección y limpieza del sistema F&G	2	1	INT	6	T							X			X			X				X				X	
	Inspección y limpieza válvulas ESDV	2	1	INT	4	T							X			X			X				X				X	
	Mantenimiento válvulas manuales	3	1	EXT	8	A															X							
	Mantenimiento válvulas ESDV	3	1	EXT	8	A																	X					
	Mantenimiento a electrobomba	4	1	EXT	12	S										X								X				
	Mantenimiento a sistema de calentamiento de agua	5	1	EXT	10	S										X							X					
<b>ED-CHB-017-02</b>	<b>Sistema de control y PLC</b>																											
	Buck up del PLC	2	1	INT	4	A																	X					
	Mtto preventivo a tablero de control	2	1	INT	5	T							X			X			X				X				X	
	Mtto preventivo a controlador de F&G	2	1	INT	4	T							X			X			X				X				X	
<b>ED-CHB-017-03</b>	<b>Calibración de equipos de medición</b>																											
	Transmisores y medidores de flujo	2	1	EXT	10	A																	X					
	Manómetros y termómetros	2	1	EXT	8	A																		X				
	Sistema Fire & Gas	2	1	EXT	6	A																			X			

Como se puede apreciar, en el programa de mantenimiento se consideran actividades principales con una frecuencia de mantenibilidad estándar acorde a las aplicaciones similares dada en plantas de regasificación de GNL.

#### 4.5. Estudio económico de la propuesta:

A continuación, se muestra las partidas generales y el costo global de cada una de ellas, esto representa la inversión total y se aclara que los costos asumidos son actualizados a la fecha de presentación de la tesis:

Tabla 31. Costo de inversión - Fuente: Elaboración propia.

Ítem	Descripción de la partida	Costo global
1	Ingeniería y Diseño del sistema de vaporización forzada	\$ 22,680.00
2	Suministro de equipamiento	\$ 530,695.00
3	Instalación y montaje	\$ 78,828.00
4	Supervisión	\$ 16,700.00
5	Comisionamiento y puesta en operación	\$ 50,284.00
<b>Inversión total</b>		<b>\$ 699,187.00</b>

Un dato importante es que se consideró realizar el análisis económico con una moneda internacional para manejar un estándar referencial por más variación que tenga la moneda local. Como consiguiente se calcula la demanda de gas natural existente:

Tabla 32. Consumo actual de GN - Fuente: Elaboración propia.

DEMANDA DE CONSUMO ACTUAL (m3)											
Temporada pesca (día)			302108.08			Fuera temporada pesca (día)			34668.04		
ABR	MAY	JUN	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	JUL	AGO	SET
5891107.56	5891107.56	5891107.56	5891107.56	5891107.56	5891107.56	832032.96	832032.96	832032.96	832032.96	832032.96	832032.96

Tabla 33. Factores de consumo de GN - Fuente: Elaboración propia.

Factor de consumo en temporada de pesca	0.65
Factor de consumo fuera de temporada de pesca	0.8

Como se aprecia en la tabla anterior, el mayor consumo se da en la temporada de pesca; los factores de seguridad elegidos están acorde a la eficiencia de la capacidad de regasificación que proporcionan los vaporizadores ambientales.

Por lo anterior, el consumo anual de gas natural llega a los 40,338,843 m<sup>3</sup>, esto genera un ingreso anual de \$14,328,004.39 dólares anuales.

Para una comparación con la repotenciación de la capacidad de regasificación, en la siguiente tabla se muestra la demanda proyectada de gas natural:

Tabla 34. Consumo proyectado de GN - Fuente: Elaboración propia.

DEMANDA DE CONSUMO PROYECTADA (m3)											
Temporada pesca (día)			644436.51			Fuera temporada pesca (día)			39822.08		
ABR	MAY	JUN	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	JUL	AGO	SET
19333095.39	19333095.39	19333095.39	19333095.39	19333095.39	19333095.39	1194662.4	1194662.4	1194662.4	1194662.4	1194662.4	1194662.4

Para los consumos proyectados no se utilizan factores de consumo pues el nuevo sistema estará en la capacidad de entregar el gas natural requerido, de la tabla anterior se obtiene un consumo anual de GN de 123,166,546.7 m<sup>3</sup> que equivalen a un ingreso efectivo de \$ 43,747,680.54 dólares anuales. Con la demanda proyecta se obtendrán ingresos anuales de \$ 29,419,676.15 dólares, este es el monto usado para el flujo de caja; para ello se costea los gastos operativos anuales con los que cuenta la empresa; de manera generalizada estos se presentan a continuación:

Tabla 35. Gastos operativos - Fuente: Elaboración propia.

ITEM	GASTOS OPERATIVOS (U\$)		
	Descripción	Costo mensual	Costo anual
1	Costo de GNL	\$ 480,240.00	\$ 5,762,880.00
2	Costo transporte GNL	\$ 194,715.00	\$ 2,336,580.00
3	Costo operacional	\$ 10,680.00	\$ 128,160.00
4	Costo mantenibilidad	\$ 247,640.00	\$ 247,640.00
5	Financiamiento de acometidas	\$ 2,984,267.00	\$ 2,984,267.00
6	Gastos administrativos	\$ 890,750.00	\$ 10,689,000.00
<b>Total</b>			<b>\$ 22,148,527.00</b>

Con los gastos operativos calculados en la tabla anterior, se elaboró el flujo de caja el cual se presente a continuación:

Tabla 36. Flujo de caja del proyecto - Fuente: Elaboración propia.

FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO				
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
	Dólares	Dólares	Dólares	Dólares
<b>Ingresos</b>		\$ 29,419,676.15	\$ 29,419,676.15	\$ 29,419,676.15
<b>Inversión</b>	\$ 699,187.00			
<b>Egresos</b>		\$ 22,148,527.00	\$ 21,080,686.00	\$ 20,122,473.00
<b>Ingresos netos</b>	\$ -699,187.00	\$ 7,271,149.15	\$ 8,338,990.15	\$ 9,297,203.15
<b>Tasa de interés</b>			8%	
<b>VAN</b>			\$20,563,118.10	
<b>ROI</b>			29.410	
<b>TIR</b>			1053%	

La tasa de interés asumida es extraída de la superintendencia de banca, seguros y AFP, se asume un valor promedio que representa el 8%. El resultado del VAN es positivo, por lo que el proyecto se hace viable; además de ello el retorno de la inversión representa un 29.41, esto se interpreta que por cada dólar invertido se tiene una ganancia de 29.41 dólares.

La TIR, tiene una rentabilidad de 1053%, esta tasa es elevada porque la inversión inicial frente a la rentabilidad anual es minúscula; es decir que ante ingresos netos elevados en comparación con la inversión siempre la TIR será elevada.

#### 4.6. Implementación del nuevo sistema de vaporización:

##### 4.6.1. Evaluación de la implementación:

Para la construcción del sistema de vaporización forzada se verificó que todas las actividades se realicen cumpliendo estrictamente todas las normas de seguridad, a continuación, imágenes de la etapa constructiva:



Figura. 29. Soldadura de tuberías - Fuente: Propia.

En la figura 29 se puede apreciar parte de la construcción de las líneas que conducirán el agua a los vaporizadores forzados, aquí se verificó que cumplan los procedimientos establecidos y el soldador esté debidamente calificado.



*Figura. 30. Líneas de agua - Fuente: Propia.*

En la figura 30 se supervisó el montaje de las tuberías y parte de la cubierta del recinto que alberga las bombas de agua y calentadores.



*Figura. 31. Montaje mecánico - Fuente: Propia.*

La figura 31 muestra el montaje de las tuberías de agua para los vaporizadores forzados, aparte de ello se aprecia que los vaporizadores ambientales continúan trabajando por lo cual todos los trabajos se consideraron en caliente, es importante resalta que ninguna soldadura se realizó en la zona clasificada, todo se pre fabricó y mediante uniones bridadas se supervisó el montaje.

En la figura 32 se aprecia los vaporizadores en su estado final de construcción, así como la instrumentación instalada y listo para sus

pruebas de comisionamiento y puesta en marcha; para lo último se llenan protocolos de liberación y se sigue un procedimiento de pruebas SAT que son validadas por una empresa de supervisión internacional pues así lo establece el ente regulador Osinergmin. Un detalle importante es que el sistema de vaporización forzada cuenta con su propia válvula de corte por frío; toda la instrumentación montada cumple con una filosofía de control que se complementa con el sistema actual y esta se puede interpretar en el P&ID que se encuentra en el anexo 6.



*Figura. 32. Vaporizadores forzados - Fuente: SimQuim.*

En síntesis, en la planta quedan dos sistemas de vaporización, uno de manera ambiental y otro forzado que solo se utiliza en temporadas de pesca.

#### **4.6.2. Rendimiento del nuevo sistema de vaporización:**

Posterior al comisionamiento y puesta en marcha se comprueba la eficiencia de los vaporizadores forzados; para la prueba se consideraron los siguientes consumos industriales:

Tabla 37. Demanda para prueba de sistema STV - Fuente: Elaboración propia.

<b>DEMANDA DE GAS NATURAL EN TEMPORADA DE PESCA</b>			
<b>RESIDENCIAS CONECTADAS</b>	<b>TIPO DE DEMANDA</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO DIARIO (m3/día)</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO HORA (m3/h)</b>
26580.00	Estable	11919.28	496.64
<b>INDUSTRIAS CONECTADAS</b>	<b>TIPO DE DEMANDA</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO DIARIO (m3/día)</b>	<b>CONSUMO PROMEDIO HORA (m3/h)</b>
Epinsa	Estable	592.00	59.20
Conservera San Lucas	Estable	1250.00	125.00
Inversiones Kathymar	Estable	1450.00	145.00
Group Corporation Reyes S.A.C.	Estable	3300.00	275.00
Inversiones Generales del Mar S.A.C.	Estable	1434.00	143.40
Conserveras MM S.A.C.	Estable	6800.04	566.67
Doil International S.A.C.	Estable	3300.00	330.00
Estación de Servicio GESA	Estable	3000.00	125.00
Corporación Pesquera Apolo S.A.C.	Estable	2477.00	247.70
OP7	Estacional	8212.00	410.60
Quiaza	Estacional	5907.00	492.25
Exalmar	Estacional	76455.06	3475.23
Oslo	Estacional	32246.96	1896.88
Farallon	Estacional	7356.02	525.43
Austral	Estacional	137263.00	6863.15
Gervasi	Estable	5200.00	520.00
Hayduk	Estacional	80000.00	3333.33
<b>CONSUMO TOTAL</b>		<b>302962.36</b>	<b>20030.48</b>

Es importante resaltar que los consumos promedio día y hora mostrados en la tabla anterior son los que se manejan de manera contractual con las industrias.

Como se aprecia en la tabla, los consumos que se agregaron respecto a la demanda mostrada en la tabla 7, son las industrias Gervasi y Hayduk, llegando así a una capacidad ideal de regasificación de 20,030.00 m<sup>3</sup>/h, ideal para comprobar la capacidad de regasificación.

El consumo de las industrias se monitorea de manera remota y es desde el scada de donde se obtienen los consumos que se evaluaron en la tabla 38; a continuación, una imagen de referencia:

Gases del Pacífico

CONSUMOS INDUSTRIALES

INDUSTRIAS	VOLUMEN ACUMULADO		VOLUMEN CORREGIDO		PRESION REGULADA (bar)	TEMPERATURA (°C)	CAUDAL (m³/h)	FACTOR DE CORRECCION	VOLTAJE CORRECTOR	PRESION ENTRADA (bar)
	VOL. TOTAL CORREGIDO (m³)	VOL. TOTAL (m³)	VOLUMEN IN ACTUA (m³)	VOLUMEN DE INACTUA (m³)						
CHIMBOTE										
OFF BELL	810188	194877	0	0	0,739	21,61	0,00	1,79	9999,99	9999,99
EPKSA	20322	90832	888	4	0,913	21,09	0,00	1,81	9999,99	9,83
QUAZA	871474	835172	0	0	0,913	20,19	0,00	1,82	9999,99	9999,99
EXALMAR	10881210	9874623	9999,99	9999,99	2,941	18,73	0,00	1,80	9999,99	9999,99
OSLD	0	0	0	0	0,900	0,00	0,00	0,00	9999,99	9999,99
HAYDUK	11844178	8122388	9999,99	9999,99	2,734	20,83	200,23	0,00	9999,99	9999,99
AUSTRAL	277967	378789	112	2108	1,167	18,87	0,00	1,87	-11,11	0,00
AUSTRAL 2	304	400	0	0	1,103	19,00	0,00	1,80	13,84	9999,99
FARALLON	879775	834810	0	0	1,880	20,10	0,00	1,80	18,04	
SAN LUCAS	312588	223013	0	0	1,880	21,54	0,00	1,80	18,04	
SERVADI	240480	138004	0	0	0,887	17,207	0,00	1,80	3,711	
PACAIMARO										
TEC. AVICOLA	838775	455041	620	163	1,730	21,72	0,00	1,81	9999,99	9999,99
CAJAMARCA										
NESTLE	778804	2795	1132	2428	1,880	18,10	0,00	1,80	13,80	4,00
CINGOUR	370321	109802	404	400	1,119	18,11	0,00	1,84	18,82	4,00
SAN ROQUE	464834	240888	323	81	0,941	24,83	0,00	1,91	11,81	3,11

Figura. 33. Captura de Scada, consumo de clientes - Fuente: Propia.

Respecto a los consumos residenciales solo aumentaron 1095 casas que en número es un consumo despreciable pero que se tomaron en cuenta para analizar el comportamiento de los vaporizadores respecto al caudal vs temperatura.

La data de temperatura se puede extraer desde el scada o del mismo HMI que se tiene en planta:

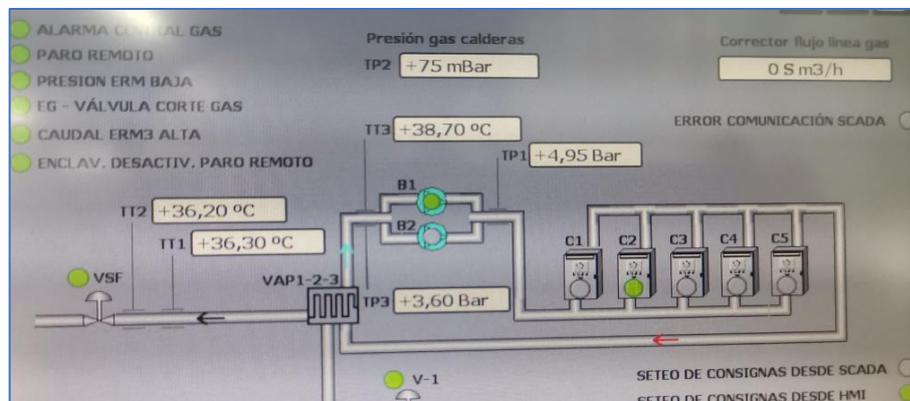


Figura. 34. HMI, Sistema de vaporización forzada - Fuente: Propia.

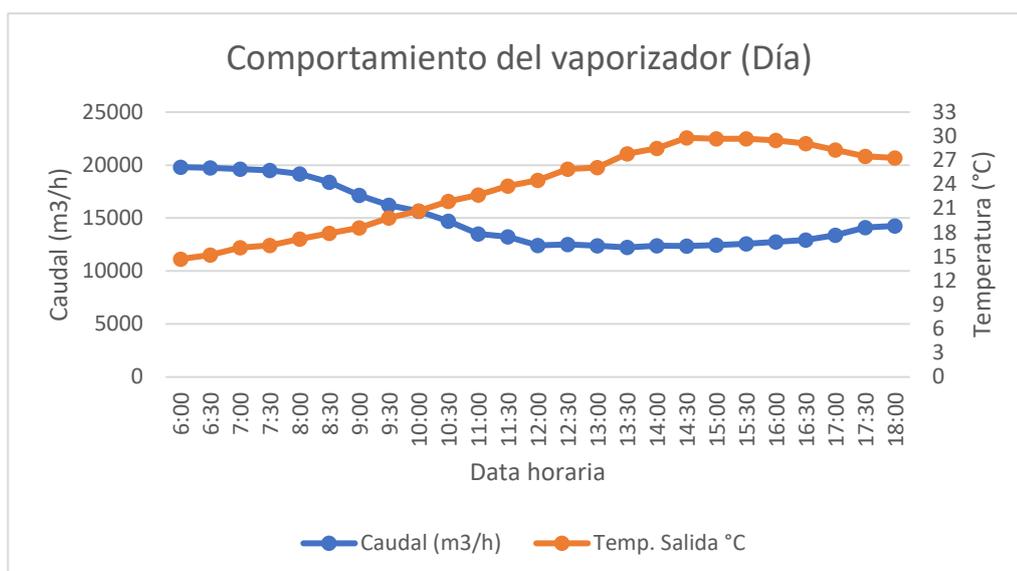
Tabla 38. Comportamiento de sistema STV - Fuente: Elaboración propia.

COMPARTAMIENTO DEL VAPORIZADOR (DÍA)			COMPARTAMIENTO DEL VAPORIZADOR (NOCHE)		
Hora	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Temp. Salida °C	Hora	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Temp. Salida °C
06:00	19810	14.7	18:00	15900	26.1
06:30	19750	15.2	18:30	16750	25.5
07:00	19620	16.1	19:00	17980	24.3
07:30	19510	16.4	19:30	18420	23.6
08:00	19160	17.2	20:00	18860	22.5
08:30	18400	17.9	20:30	19950	22.2
09:00	17140	18.6	21:00	19985	21.9
09:30	16230	19.8	21:30	19930	21.7
10:00	15640	20.7	22:00	19910	21.2
10:30	14724	21.9	22:30	19820	20.3
11:00	13500	22.7	23:00	19770	19.7
11:30	13230	23.8	23:30	19730	19.2
12:00	12410	24.5	00:00	19680	18.4
12:30	12520	25.9	00:30	19630	18.1
13:00	12380	26.1	01:00	19590	17.6
13:30	12230	27.8	01:30	19567	16.9
14:00	12390	28.5	02:00	19542	16.2
14:30	12370	29.8	02:30	19530	15.9
15:00	12450	29.7	03:00	19550	15.7
15:30	12560	29.7	03:30	19590	15.7
16:00	12740	29.5	04:00	19580	15.5
16:30	12920	29.1	04:30	19570	15.4
17:00	13400	28.3	05:00	19640	15.3
17:30	14100	27.5	05:30	19696	15.1
18:00	14250	27.3	06:00	19890	14.9

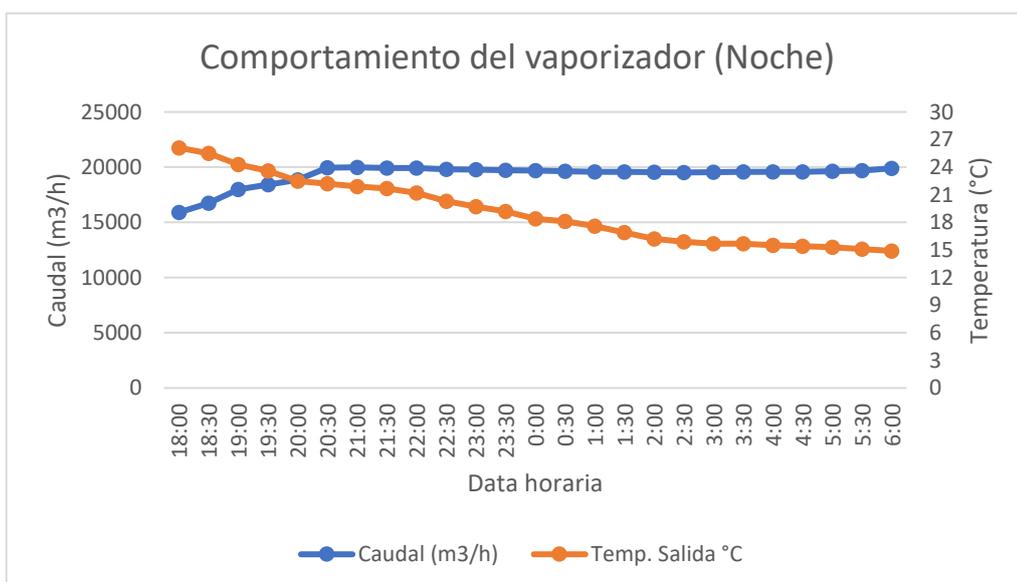
La tabla que se muestra es un promedio de una semana de consumo de las industrias en temporada de pesca. Como se aprecia el caudal pico fue 19,985.00 m<sup>3</sup>/h, a este flujo la temperatura está excelente a 21.9°C.

A diferencia de los vaporizadores ambientales, en la noche los vaporizadores forzados mantienen una excelente temperatura de regasificación que como mínimo es de 14.7°C, temperatura que hace que se cumpla con la normativa y da confiabilidad al sistema.

A continuación, se grafica el comportamiento del caudal vs la temperatura de salida del gas natural.



Gráfica 8. Caudal vs temperatura, sistema STV - Fuente: Propia.



Gráfica 9. Caudal vs temperatura (noche), sistema STV - Fuente: Propia.

En las gráficas se puede apreciar que cuando el caudal supera los 14,000.00 m<sup>3</sup>/h la temperatura se comporta inversamente proporcional sin embargo halla una estabilidad cerca a los 15°C, esto es determinante para dar confiabilidad al sistema de regasificación de gas natural pues se comprueba que los vaporizadores responden a la demanda que tiene la planta.

De la tabla 38 el sistema muestra una eficiencia de 97.7%, por lo anterior los resultados están acorde a la simulación realizada.

En las siguientes figuras se muestran los vaporizadores trabajando a plena carga:



*Figura. 35. Vaporizadores forzados funcionando - Fuente: Propia.*



*Figura. 36. Neblina por sistema STV - Fuente: Propia.*

Se puede visualizar que la neblina que generan los vaporizadores forzados es insignificante a diferencia de los vaporizadores ambientales, es esto lo que también contribuye a mantener la temperatura de salida del gas natural.

## V. DISCUSIÓN:

5.1. Los resultados del diagnóstico actual del sistema de vaporización indican que los vaporizadores ambientales no logran cumplir con su máxima capacidad de regasificación, pues cuando llega a un caudal de 16900 m<sup>3</sup>/h la temperatura desciende considerablemente. Según lo obtenido, cuando los vaporizadores regasifican 10500 m<sup>3</sup>/h mantienen una temperatura ideal y constante de 15°C, es decir que en relación a la eficiencia de la capacidad instalada de regasificación solo representa el 61.04%. Lo anterior concuerda mucho con lo que se encuentra en la literatura (Egashira 2013) pues los vaporizadores ambientales son para bajos caudales y si se requiere sostener una alta demanda de gas natural estos tienen que ser instalados en un lugar donde el flujo de aire sea continuo o en todo caso instalar ventiladores que ayuden a circular el aire para mejorar el rendimiento de estos equipos.

Por todo lo anterior y debido a que la proyección de la demanda de GN es considerable, se refleja la importancia de repotencia el sistema de regasificación actual.

5.2. Para los resultados de alternativas de diseño en estricto no existe una metodología exacta pues todo depende de las condiciones operativas con las que se cuenta como base de diseño, por ello evaluando alternativas, el tipo de vaporización forzada elegida es el STV, este sistema comparado con los SCV o los ORV resulta mucho mejor para caudales medianos tal como lo refiere (Egashira, 2013). La solución seleccionada fue mediante la metodología de diseño VDI 2225 donde a los sistemas se evalúa de manera técnica y económica. (Quispe, 2015)

La alternativa elegida es la ideal pues el consumo de energía que gastan los otros dos sistemas para poder entregar los 20,000.00 m<sup>3</sup>/h de GN regasificado representa un 9.25% y 48.98% respectivamente por encima de la energía utilizado en los vaporizadores STV. Los porcentajes son considerables por lo que se opta por el sistema STV.

- 5.3. El objetivo de los cálculos era encontrar el coeficiente global de transferencia de calor (U); lo común es comprar el “U” con valores estándares en tablas, pero para el resultado obtenido no se cuenta con tablas de referencia pues la aplicación es poco común, sobre todo en nuestro país.

Al simular los resultados, en el software se obtiene una temperatura de salida del GN de 10°C, resultado que indica que el “U” encontrado es correcto; pues la normativa exige que el GN sea distribuido a condiciones estándares y normales (0°C – 15°C), sin embargo lo ideal es llegar a condiciones de temperatura normales y para ello se aumenta el caudal del agua a 109 m<sup>3</sup>/h con una temperatura de ingreso de 50°C y se obtiene una temperatura de salida del GN de 19°C; sin embargo para efecto de seguridad del diseño se hizo otra corrida con una temperatura de ingreso del agua de 45°C obteniendo una temperatura de salida del GN de 14.2°C, resultado más que suficiente para cuando el vaporizador trabaje a plena carga.

El software utilizado (SimQuim) es aplicado en seminarios de transferencia de calor y cursos especializados por lo que se recomienda su uso debido a su versatilidad. El autor del software (Ing. Javien Gan Rdz.) da fiabilidad puesto que como base de diseño utilizó el simulador Aspen Plus.

Las ecuaciones que utiliza el software están respaldadas en bibliografías internacionales como: “transferencia de calor del proceso, Donald Q. Kern”, “Libro del manual de transferencia de calor, Warren M.”, “Norma TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association), 9° Ed” entre otras.

- 5.4. Este resultado es referente al manual de operación y mantenimiento el cual tiene como finalidad resaltar lo básico y más importante, pues en el transcurso del tiempo siempre sufre modificaciones que son adaptadas a las nuevas condiciones de operación que pueda adquirir la planta o proceso. Por ello en la parte operativa se describe brevemente el proceso o secuencia para operar los vaporizadores

forzados y en la parte de mantenimiento se presenta un programa generalizado con la finalidad de crear órdenes de trabajo para los mantenimientos preventivos que se recomiendan. (Castillo, 2009) describe que, el diseñador deja una base estimando las frecuencias de mantenibilidad sin embargo estas pueden ser alteradas cuando lo requieran pues todo cambia acorde al proceso y la vida útil de los equipos o sistemas. Las actividades propuestas en el plan de mantenimiento guardan relación con lo que describe (Guillen Cruz, 2015) en su tesis “Diseño de un intercambiador de calor”.

No se requiere dejar algo muy detallado pues la planta ya está operando, sin embargo, el personal operativo recibirá una capacitación en campo con los fabricantes para reforzar los conocimientos.

- 5.5. Los resultados del análisis financiero son muy elevados (como la TIR) y es importante aclarar que no hay alteraciones, solo que la inversión es pequeña respecto a los ingresos que tiene la empresa y la gran diferencia es porque el flujo de caja es de manera anual con una proyección de 3 años. Al tener una rentabilidad considerable el proyecto se hace viable porque el retorno de la inversión se da en 35 días. Como lo describe (Escudero Jofré, 2008) el ROI en una planta de regasificación de GNL se da casi siempre en menos de 3 años dado que la demanda de este hidrocarburo siempre va de manera creciente por ser más amigable con el medio ambiente y mucho más económico referente a otros hidrocarburos.

En base a lo que describe Escudero, esta repotenciación que es una mínima parte de la construcción de una planta de GNL tiene un retorno de la inversión corto y hace que el proyecto sea viable.

5.6. Luego de la implementación del diseño propuesto se obtuvieron parámetros de medición directos los cuales muestran el nivel de acertamiento respecto a los cálculos realizados en el diseño, con el sistema de vaporización forzada funcionando se evidencia que la mínima temperatura de salida del GN es de 14.7 °C a un caudal promedio de 19950 m<sup>3</sup>/h, esto representa una efectividad del 97.75%. Un detalle muy importante a notar es que el consumo superior a los 19000 m<sup>3</sup>/h no se producen las 24 horas, y esto ayuda a mantener la eficiencia descrita en el párrafo anterior. Como lo menciona (Nguyen, 2015), si un sistema de vaporización es sometido a trabajar de manera constante siempre habrá una pérdida de eficiencia con el transcurrir del tiempo por ello se recomienda trabajar por trenes de vaporización.

## **VI. CONCLUSIONES**

- 6.1.** Se elaboró el diagnóstico actual de la planta de regasificación reflejando la importancia de repotenciar con un nuevo sistema de vaporización forzada pues para cubrir la demanda proyectada se tiene que implementar otro sistema dado que la eficiencia actual se ve reducida al 61.7 %.
- 6.2.** Se evaluó alternativas de diseño de manera técnica y económica según la norma VDI 2225 para elegir la solución más viable dependiendo del contexto de aplicación. Además, se realizó una estimación del costo de cada sistema para vaporizar el GNL requerido, resultando como mejor alternativa el sistema de vaporización forzada STV.
- 6.3.** El dimensionamiento del sistema STV se hizo mediante principios de transferencia de calor y dimensiones estándares según la norma TEMA E 9° Ed., para comprobar los cálculos obtenidos se realizó la simulación con el software Simquim®. La validación con este fue de vital importancia para afinar detalles del caudal del agua (320 m<sup>3</sup>/h) y asegurar una temperatura de salida del GN de 14.2 °C a razón de 6670 m<sup>3</sup>/h de gas natural o 11.1 m<sup>3</sup>/h de GNL.
- 6.4.** Se elaboró un plan de operación y mantenimiento; en la parte operativa las consideraciones a tener en cuenta son al inicio del encendido de los vaporizadores forzados y en el mantenimiento se debe tener especial cuidado con los equipos críticos del nuevo sistema (calentadores y bombas) debido a su elevada disponibilidad que deben mantener.
- 6.5.** La evaluación económica es viable y rentable, puesto que la TIR es de 1053% y el ROI da como resultado que por cada dólar invertido se recibe 29.41 dólares de ganancia haciendo así que la inversión se recupere en 30 días. Se resalta que los ingresos se incrementan en un 105% referente a los ingresos con los vaporizadores ambientales.

- 6.6.** Se implementó el proyecto por la empresa y los vaporizadores funcionando al 97.7% muestran que regasifican el GNL según lo requerido, manteniendo una aceptable temperatura de salida del GN de 14.7 °C. Esto representa una desviación del 3.52% por encima de lo calculado por el software; en síntesis, el sistema es eficiente.

## **VII. RECOMENDACIONES**

- 7.1.** Se recomienda analizar equipos complementarios a los vaporizadores forzados para repotenciar una planta de regasificación de GNL, estos pueden ser disipadores de niebla o implementar una tecnología que ayude a mejorar el flujo de calor.
  
- 7.2.** Se sugiere realizar un estudio más profundo y minucioso del sistema SCV debido a que es una tecnología que viene siendo mejorada en plantas de regasificación de gas natural licuado.
  
- 7.3.** Se recomienda hacer una simulación fluidodinámica en un software de fluidos (modelamiento CAD) para analizar el comportamiento del intercambiador de calor, así como las temperaturas en los fluidos.
  
- 7.4.** Realizar una evaluación técnica y económica en campo del plan de mantenimiento propuesto con la finalidad de evaluar la disponibilidad de los intercambiadores de calor.
  
- 7.5.** Se sugiere utilizar y mejorar esta metodología aplicando el mismo procedimiento a realidades semejantes.

## Referencias Bibliográficas:

**Cepeda, Manuel Salvador Acuña. 2019.** *Anuario Iberoamericano de Derecho de la Energía*. Bogotá, Colombia : s.n., 2019.

**Chapi, Robert Valencia. 2016.** *Planta Satélite de Gas Natural Licuado para el Abastecimiento del Sector industrial en Cuenca - Ecuador*. Cuenca : Revista - Desarrollo local sostenible, 2016. Vol. 9.

**Egashira, Shinji. 2013.** *LNG Vaporizer for LNG Re-gasification Terminal*. Tokyo : Kobelco Technology Review, 2013.

**Escudero Jofré, Ricardo Esteban. 2008.** *Diseño y Estudio Técnico - Económico de una Terminal de Almacenamiento y Regasificadora de GNL*. Santiago de Chile : s.n., 2008.

**Guillen Cruz, Edinson Ferley. 2015.** *Diseño y fabricación de un intercambiador de calor*. Bogotá D.C. : s.n., 2015.

**Jofré, Ricardo Esteban Escudero. 2008.** *Diseño y Estudio Técnico - Económico de una Terminal de Almacenamiento y Regasificadora de GNL*. Santiago de Chile : s.n., 2008.

**Jofre, Ricardo Esteban Escudero. 2008.** *Diseño y Estudio Técnico Económico de una Terminal de Almacenamiento y Regasificadora de GNL*. Santiago de Chile : s.n., 2008.

**Matías, Juan Gonzáles. 2019.** *Desarrollo de Tanque de Gas Natural Licuado para Combustible en Camiones*. La Plata, Argentina : s.n., 2019.

**Montoya, Calos Andrés Losada Delgado y Santiago Emilio Rocha. 2019.** *Desarrollo de la Ingeniería Conceptual Requerida para el Diseño y Construcción de una Planta de GNL en Chira, Ghana*. Bogotá, Colombia : s.n., 2019.

**Navarrete, Pablo Andrés Medina. 2013.** *Estudio Hidráulico en Planta Satélite de Regasificación de Gas Natural Licuado*. Santiago de Chile : s.n., 2013.

**Nguyen, Kim. 2015.** *Desing Optimization of a Low Pressure LNG Fuel Supply Sistem*. 2015.

**Osinergmin. 2013.** Página principal de Osinergmin. [En línea] 2013.  
[http://gasnatural.osinerg.gob.pe/contenidos/ciudadania/publicaciones\\_osinergmin.html](http://gasnatural.osinerg.gob.pe/contenidos/ciudadania/publicaciones_osinergmin.html).

**Peña, Beatriz Diaz. 2018.** *Sistema de Gestión de la Energía en una Planta de Regasificación de Gas Natural*. Madrid : s.n., 2018.

**Piñon, Juan Sebastian Rey. 2014.** *Plantas de Regasificación Offshore de GNL*. s.l. : Escuela Universitaria Politécnica de Ferrol, 2014.

**Querol, Xavier. 2016.** *Plantas Satélites de GNL - Claves para la expansión del gas*. Barcelona - España : Sedigas, 2016.

**Quispe, Carlos Miller Acosta. 2015.** *Diseño de una máquina rebanadora de camote con una capacidad de 450 kg/h*. Lima : s.n., 2015.

**Rico, Alberto Escobar. 2016.** *Proyecto Técnico Económico del Diseño de una Planta de Regasificación de Gas Natural*. Madrid : s.n., 2016.

**Riola, Adrián Álvarez. 2015.** *Proyecto Técnico de Diseño de un Evaporador de 540 ton/h de GNL.* La Coruña : s.n., 2015.

**Riola, Adrián Álvarez. 2015.** *Proyecto técnico de diseño un evaporador de 540 TON/H de GNL.* s.l. : Universidad de Coruña, 2015.

**Suarez, Adolfo de la Torres. 2019.** *Comparación Termodinámica de Algunos Ciclos de Refrigeración para la Obtención del Gas Natural Licuado.* Barcelona : s.n., 2019.

**Thiaucourt, Jonas. 2020.** *Métodos y Modelos para el Concepto de Diseño de Gas Natural Licuado.* Francia : s.n., 2020.

**Vargas, Sergio Hernández Vargas y Juan José Salas. 2015.** *Análisis de las Tecnologías de Vaporización de Gas Natural Licuado y el Diseño del Regasificador de la Terminal para uso en las Costas Costarricenses .* Costa Rica : s.n., 2015.

**Anexos:**

**Anexo 1: Matriz de Operacionalización de variables.**

MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES					
Variable de Estudio	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de Medición
Variable independiente: - Sistema de vaporización	Conjunto de intercambiadores de calor que utilizan el fluido externo para transferir su calor al fluido interno y así lograr su objetivo que es vaporizar el líquido criogénico que pasar por este. (Riola, 2015)	Intercambiadores ambientales que reciben el GNL a -160°C y lo gasifica para que entregue el gas en estado gaseoso a temperatura ambiente. La fórmula general para el balance térmico es la siguiente: $Q = Q_{ev} + Q_{cal}$	Capacidad de regasificación	Caudal de regasificación Nm <sup>3</sup> /h	Razón
Variable dependiente: - Efectividad del sistema de vaporización	Grado de éxito del sistema de vaporización (Riola, 2015)	Capacidad efectiva de regasificación independientemente de las condiciones climáticas. Está dada por la siguiente ecuación: $\varepsilon = \frac{q}{q_{max}}$	Disponibilidad	Eficiencia de regasificación	Razón

**Anexo 2: Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

TÉCNICAS	INSTRUMENTOS	USO
Análisis documental	Histórico del Scada y hojas de cálculos	Conocer la planta, antecedentes y la situación actual
Cálculos termodinámicos	Hoja de cálculo Excel.	Diseñar el sistema de vaporización asumiendo datos de teóricos y de proceso.
Simulación	Software SimQuim	Simular resultados obtenidos para validación antes de la ejecución.

### **Anexo 3: Validación de instrumentos utilizados.**

**VALIDEZ DE INSTRUMENTOS  
JUCIO DE EXPERTOS**

Yo Jorge Montasinos León, identificado con Documento Nacional de Identidad 42029545 de profesión Ingeniero Mecánico y experto en Estaciones de Regasificación hago constar que revisé, analicé y evalué los instrumentos de recolección y procesamiento de datos para la tesis "Diseño de un sistema de vaporización de 20,000.00 m<sup>3</sup>/h para repotenciar una planta de regasificación de gas natural licuado" que tiene por autor al alumno: Luis Felipe Sieden Rojas.

Por lo anterior, firmo el presente documento:

  
----- CP:163812  
**FIRMA**

**FECHA: 12-07-2021**

**VALIDEZ DE INSTRUMENTOS  
JUCIO DE EXPERTOS**

Yo Raúl Díaz Cubas, identificado con Documento Nacional de Identidad 16786716 de profesión Ingeniero mecánico electricista y experto en Gas Natural hago constar que revisé, analicé y evalué los instrumentos de recolección y procesamiento de datos para la tesis "Diseño de un sistema de vaporización de 20,000.00 m<sup>3</sup>/h para repotenciar una planta de regasificación de gas natural licuado" que tiene por autor al alumno: Luis Felipe Sieden Rojas.

Por lo anterior, firmo el presente documento:

  
-----  
**Raúl Díaz Cubas**  
ING MECÁNICO ELECTRICISTA  
CIP- 87932 IG3: 02318  
-----  
**FIRMA**

**FECHA: 12 de julio del 2021**

## VALIDEZ DE INSTRUMENTOS JUCIO DE EXPERTOS

Yo **Brayan Tuesta Vela**, identificado con Documento Nacional de Identidad 71539592 de profesión **Ing. Mecánico Electricista** y experto en **Transferencia de calor y refrigeración**, hago constar que revisé, analicé y evalué los instrumentos de recolección y procesamiento de datos para la tesis “Diseño de un sistema de vaporización de 20,000.00 m<sup>3</sup>/h para repotenciar una planta de regasificación de gas natural licuado” que tiene por autor al alumno: Luis Felipe Sieden Rojas.

Por lo anterior, firmo el presente documento:



---

**BRAYAN TUESTA VELA**  
Ingeniero Mecánico Electricista  
CIP N° 260672

**FECHA: 28/06/21**

#### Anexo 4: Descripción de la planta de regasificación:

El proceso inicia con la extracción por la empresa Pluspetrol, luego el transporte por transportadora de gas del Perú (TGP) y finalmente la licuefacción del GN en la planta Melchorita.



Ilustración 1. Transporte de GN para licuefacción - Fuente: Quavii.

En la planta de Melchorita (Perú LNG) es donde se procesa el gas y se convierte a estado líquido reduciendo su volumen aproximadamente 600 veces. Luego en el cargadero es donde Quavii recepciona el GNL para transportarlo a sus diferentes plantas.

Para el transporte virtual, Gases del Pacífico utiliza cisternas aisladas al vacío con la finalidad de mantener la temperatura y presión del GNL.

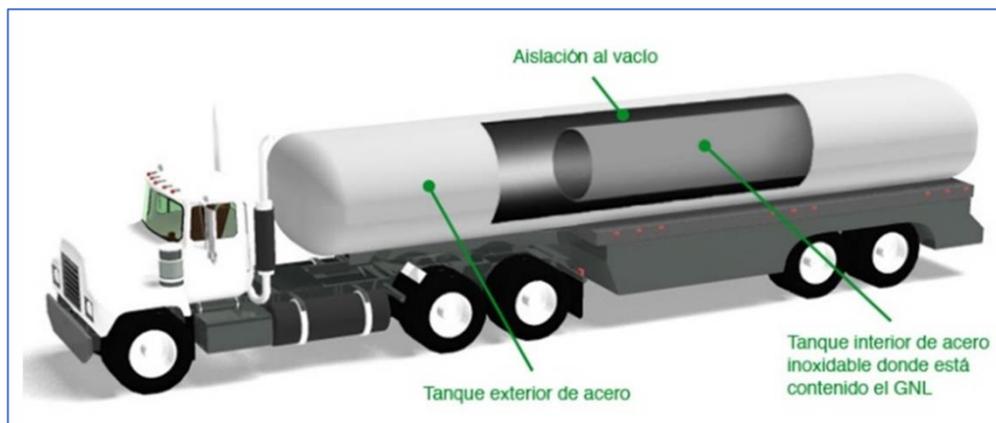


Ilustración 2. Cisternas aisladas al vacío - Fuente: Quavii.

Una vez el GNL puesto en la cisterna, estas llegan a las diferentes plantas de regasificación con las que cuenta Gases del Pacífico:



Ilustración 3. Proceso de transporte, almacenamiento y distribución de GN - Fuente: Quavii.

De manera generalizada, en la figura anterior se puede apreciar la etapa de transporte, regasificación y distribución del gas natural.

Dado que el punto de enfoque es una planta de regasificación, a continuación, se describen los procesos identificados en la figura 02.

**Zona de descarga:**

Es donde inicia todo el proceso, aquí llega la cisterna y mediante una bomba criogénica se realiza la descarga de GNL.

Para un mejor entendimiento del proceso de descarga, se presenta un extracto del P&ID:

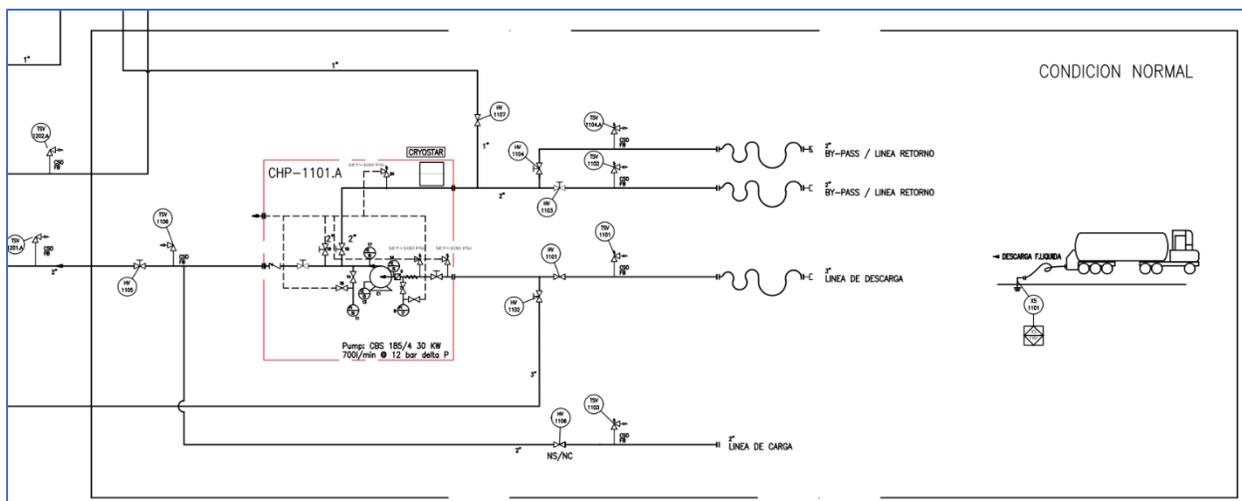


Ilustración 4. Extracto P&ID Zona de descarga - Fuente: Quavii.

Al llegar la cisterna a planta, llega aproximadamente a 0.6 barg. Una vez parqueada en la zona de descarga se tiene que conectar la puesta a tierra para liberar la energía estática, posterior a ello se conectan las mangueras de descarga y retorno con la finalidad de enfriar la bomba criogénica, en ese proceso de enfriamiento el GNL recircula, se vaporiza y se reinyecta a la cisterna, este proceso eleva la presión de la cisterna para iniciar el proceso de descarga. Un detalle importante a mencionar es el material de las tuberías, desde la zona de descarga hasta la salida de los vaporizadores todo es de acero inoxidable 304. Los vaporizadores ambientales son de aluminio.

#### **Zona de almacenamiento:**

En la zona de almacenamiento, se dispone de dos tanques criogénicos aislados al vacío, cada uno de ellos con una capacidad nominal de 200 m<sup>3</sup>, es importante resaltar que los tanques de GNL nunca son llenados al 100% de su capacidad puesto que existe un fenómeno llamado boil off que es la evaporación del GNL y por ende tiene que haber espacio donde se acumule el gas evaporado; muy aparte de ello el propio tanque tiene que mantener una presión para suministrar a la red y por ello también se requiere un espacio para crear presión. Por lo antes descrito, la recomendación de los fabricantes es llenar los tanques al 85% de su capacidad; entonces la capacidad de almacenamiento de GNL con la que cuenta la planta de Chimbote es de 340 m<sup>3</sup> de GNL. A continuación, un extracto del P&ID:

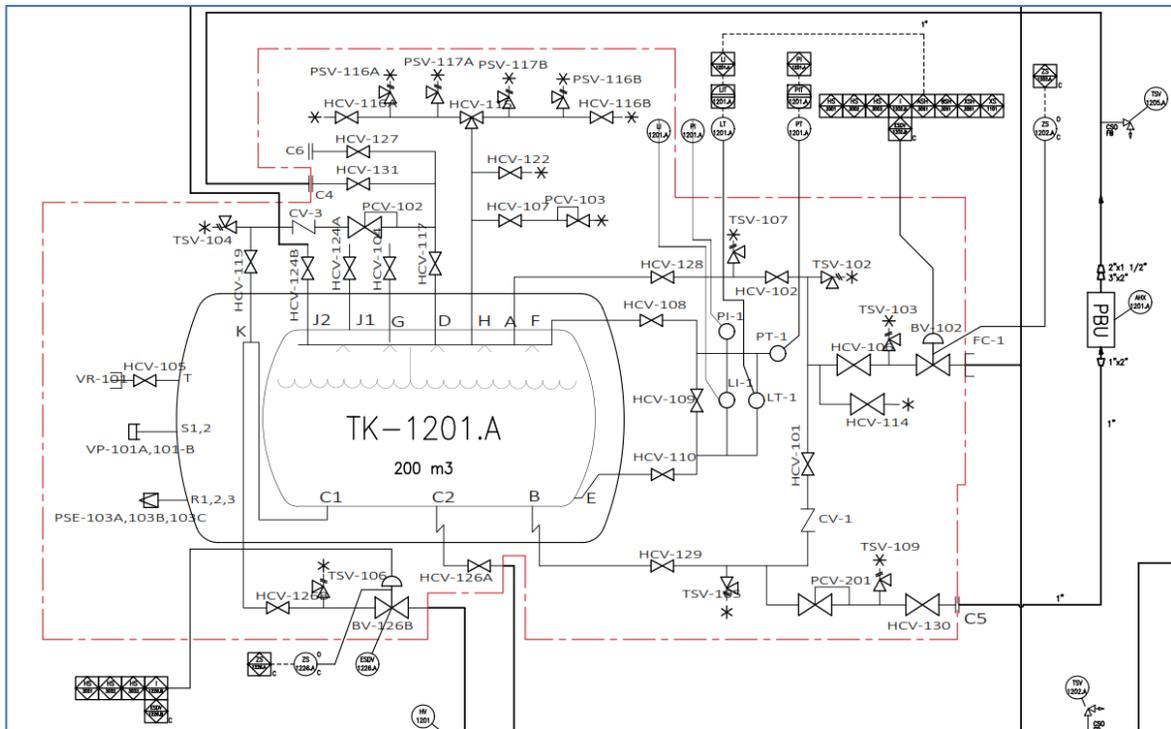


Ilustración 5. Extracto P&ID Zona de almacenamiento - Fuente: Quavii.

Como se puede apreciar, el tanque está totalmente instrumentado dado que todos los parámetros son monitoreados por el centro principal de control.

### Zona de vaporización:

Esto se realiza mediante vaporizadores ambientales, la planta de Chimbote cuenta con dos trenes de vaporización y cada tren con cuatro vaporizadores, estos tienen una capacidad nominal de 4300 Nm<sup>3</sup>/h, es decir que la capacidad de regasificación de la planta es de 17200 m<sup>3</sup>/h.

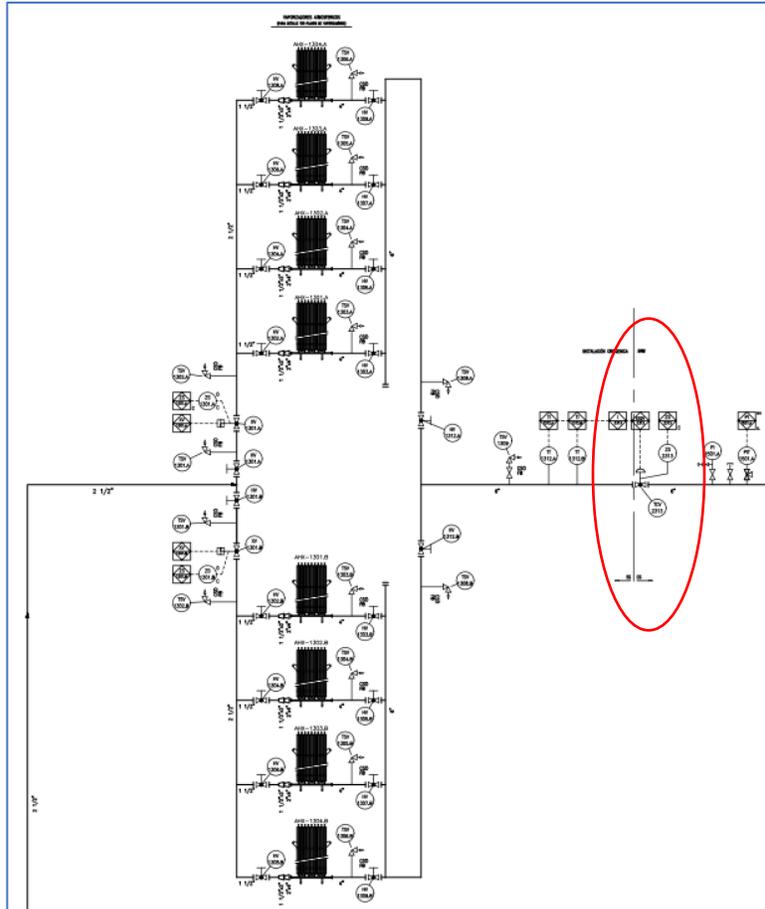


Ilustración 6. Extracto P&ID Zona de vaporización - Fuente: Quavii.

Una nota importante es que no se considera la capacidad de regasificación a los 8 vaporizadores dado que trabajan por grupos de manera alternada y nunca los 8 a la vez puesto que tiene que haber un tren de respaldo.

Otro detalle importante a mencionar y que se resalta de rojo en la figura anterior es que existe una válvula de corte por frío (válvula de seguridad) que cierra a  $-10^{\circ}\text{C}$ ; es decir si los vaporizadores pierden su eficiencia y no

vaporizan adecuadamente esta válvula actúa de manera automática. A parte de ello en este punto se da la transición de acero inoxidable a acero al carbono.

### Zona de regulación, medición y odorización:

Es la etapa del proceso compuesta de acero al carbono e inicia desde la válvula de corte por frío, en esta etapa se regula el gas natural a la presión máxima permitida ingresar a la red de polietileno que es 6 barg; para seguridad del proceso se cuenta con doble regulación. Aquí también el gas es medido por un medidor tipo turbina y se corrige mediante un corrector de la marca minielcor. Este mismo corrector envía la señal de caudal al odorizador para que inyecte odorante de manera proporcional al caudal. El odorizador utilizado es de la marca LEWA e inyecta una dosificación de 15 micro litros por cada metro cúbico. A continuación, un extracto del P&ID:

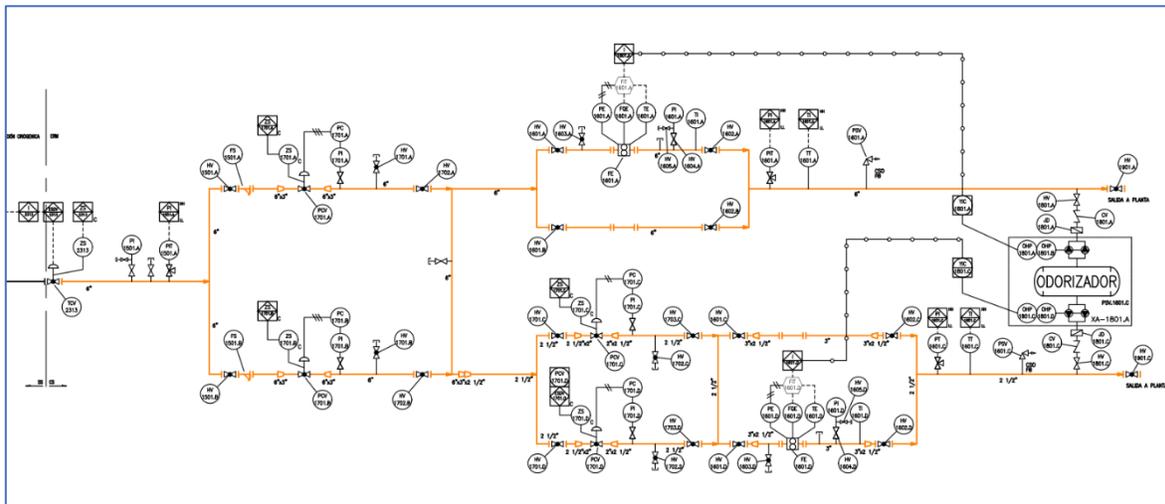


Ilustración 7. Extracto P&ID Zona de ERM - Fuente: Quavii.

Como se aprecia en la figura anterior, aparte de la doble regulación existe una doble medición, esto se hace porque en la planta se tienen separados los clientes residenciales de los clientes industriales.

Para visualizar el proceso de manera global, el P&ID global se encuentra en el anexo 6.

**Anexo 5: Permiso para utilizar datos de la empresa.**

## Permiso para Utilizar Datos de Planta

Yo **Francisco Cruzado Rodríguez**, identificado con Documento Nacional de Identidad 26697769 en mi calidad de **Jefe de Operaciones y Mantenimiento** hago constar que el alumno Luis Felipe Sieden Rojas cuenta con la autorización de nuestra representada para utilizar datos de la empresa y planta con el fin de desarrollar su proyecto de tesis.

Por lo anterior, firmo el presente documento:

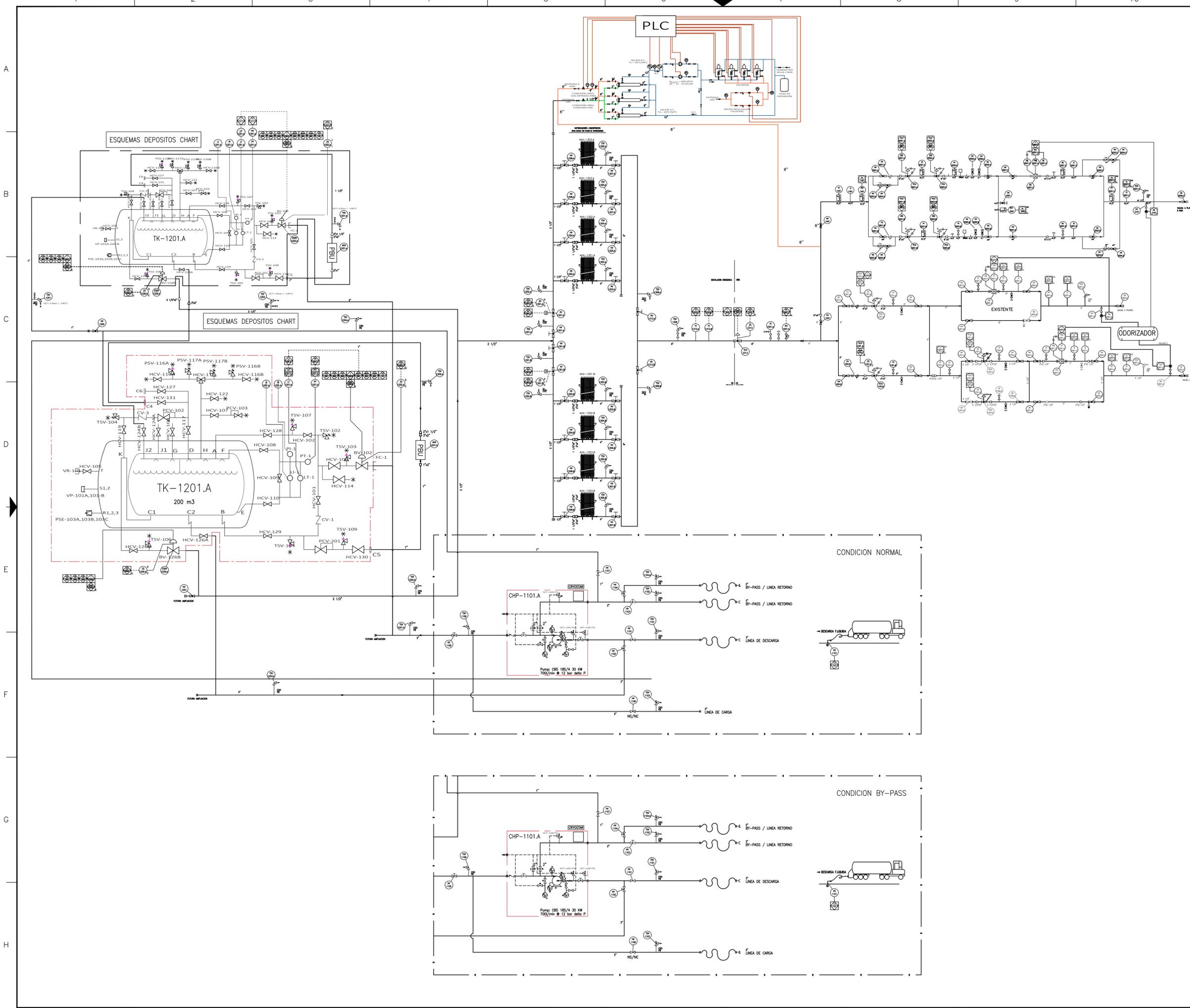


-----  
**ING. FRANCISCO CRUZADO RODRIGUEZ**  
Jefe de Operaciones & Mantenimiento

-----  
**FIRMA**

**FECHA:** 20-04-2021

**Anexo 6: P&ID – ED Chimbote.**

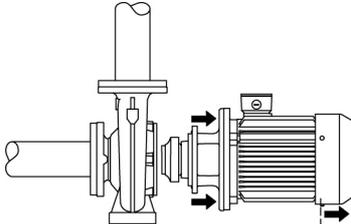


**LEYENDA DE ÁREA DE PROCESO**

- VÁLVULAS GENERALES**
- ☒ VÁLVULA DE BOLA
  - ☒ VÁLVULA DE GLOBO
  - ☒ VÁLVULA DE RETENCIÓN, GENERAL
  - ☒ VÁLVULA DE ALIVIO
  - ☒ VÁLVULA CON TAPÓN
- ON/O: OPERATION NORMAL OPEN  
NS/NC: NO SERVICE / NORMAL CLOSE
- ACTUADORES**
- ☒ ON/OFF NEUMÁTICA
  - ☒ NEUMÁTICA
- COMPONENTES TUBERÍA**
- ☒ FIGURA EN "8": FIGURA CERRADA
  - ☒ FILTRO DE GAS
  - ☒ REGULADOR MEMBRANA PILOTADO
  - ☒ CONTADOR DE TURBINA + CORRECTOR PTZ
  - ☒ MANGUERA FLEXIBLE
  - ☒ BOMBA CRIOGÉNICA
  - ☒ REDUCTOR CONCÉNTRICO
  - ☒ UNIÓN
  - ☒ BRIDA
  - ☒ BRIDA CIEGA
  - ☒ BOMBA
  - ☒ ANALIZADOR DE PROCESOS
- INDICADORES**
- ☒ TRANSMISOR DE TEMPERATURA
  - ☒ TRANSMISOR DE PRESIÓN
  - TI INDICADOR DE TEMPERATURA
  - PI INDICADOR DE PRESIÓN
  - PS PRESOSTATO
- VARIOS**
- ☒ DEPOSITO
  - ☒ ODORIZADOR
  - ☒ REDUCCIÓN
- TUBERÍAS**
- ☒ TUBERÍA INOX 304L
  - ☒ TUBERÍA GAS (ACERO AL CARBONO)

FECHA:	JULIO 2021		UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO
NOMBRE:	LUIS FELIPE SIEDEN ROJAS		DISEÑO DE UN SISTEMA DE VAPORIZACIÓN DE 20000 m <sup>3</sup> /h PARA REPOTENCIAR UNA PLANTA DE REGASIFICACIÓN DE GAS NATURAL.
PLANO:	M1	DE DISEÑO:	VAPORIZACIÓN FORZADA P&ID
ESCALA: DE		FOJA 1 DE 1	

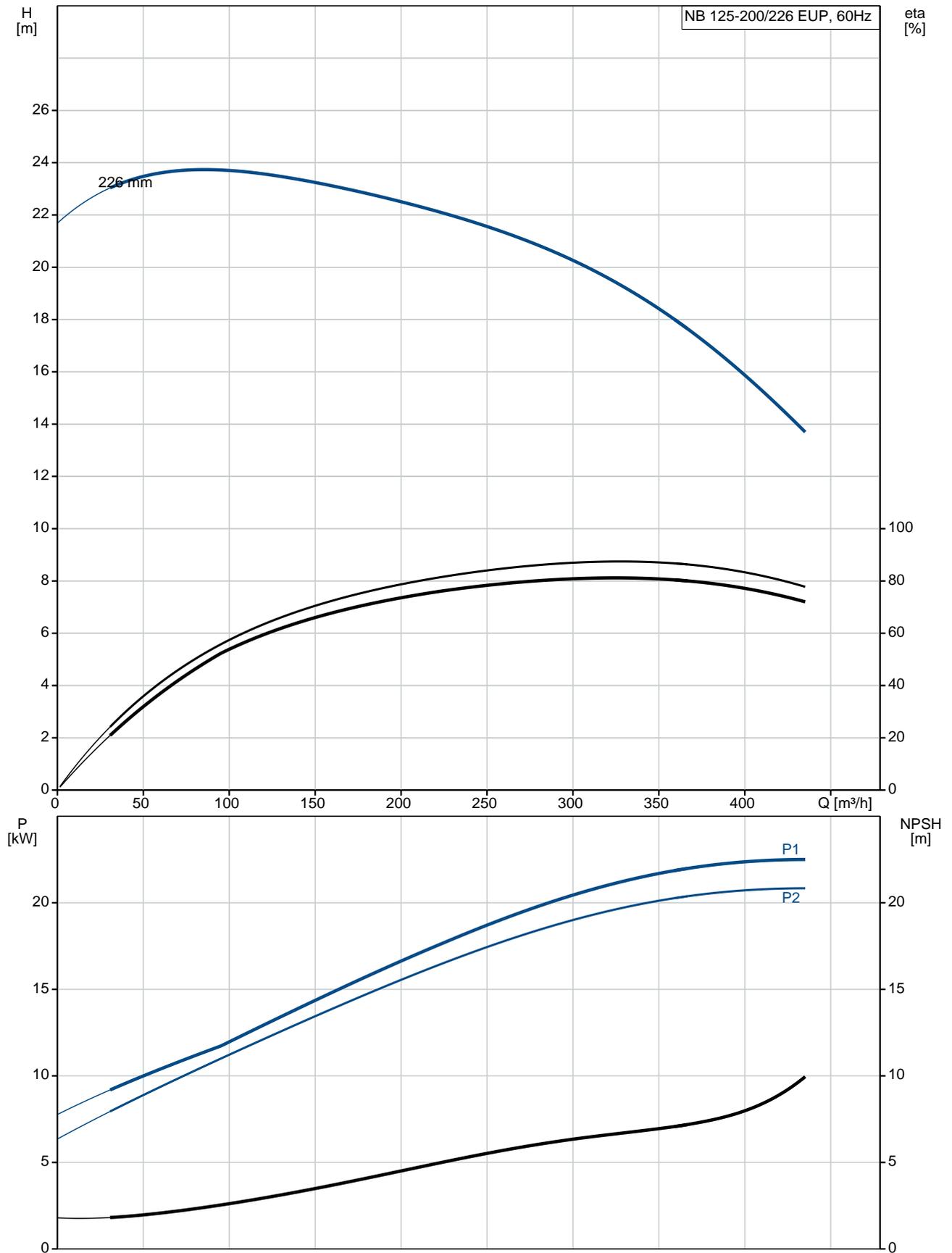
**Anexo 7: Ficha técnica de bomba.**

Contar	Descripción
1	<p><b>NB 125-200/226 EUP ASF2ABQQE</b></p>  <p>Código: Bajo pedido</p> <p>Bomba centrífuga de voluta, no autocebante y de una etapa, diseñada de acuerdo con la norma ISO 5199, con dimensiones y rendimiento nominal de acuerdo con la norma EN 733 (10 bar). Las bridas son de PN 16 y sus dimensiones satisfacen los requisitos establecidos por la norma EN 1092-2. La bomba posee un puerto de aspiración axial, un puerto de descarga radial, eje horizontal y un diseño que facilita la extracción del motor, el soporte del motor, la cubierta y el impulsor sin necesidad de desmontar la carcasa de la bomba ni las tuberías.</p> <p>El cierre de fuelle de caucho no equilibrado satisface los requisitos establecidos por la norma DIN EN 12756. La bomba está acoplada directamente a un motor asíncrono refrigerado por ventilador.</p> <p>El índice de eficiencia mínima del producto (MEI) es mayor o igual a 0,70. De acuerdo con el Reglamento (UE) de la Comisión vigente desde el 1 de enero de 2013, este es el valor de referencia indicativo para las bombas hidráulicas más eficientes disponibles en el mercado.</p> <p>Gracias a su diseño, el mantenimiento y la revisión de la bomba puede llevarlos a cabo una sola persona sin necesidad de desmontar la carcasa ni las tuberías.</p>  <p>Las piezas de fundición incluyen un revestimiento epoxídico, aplicado mediante un proceso de electrodeposición catódica. La electrodeposición catódica es un proceso de pintado por inmersión de alta calidad, consistente en la aplicación de un campo eléctrico alrededor de los productos que garantiza la deposición controlada de las partículas de pintura formando una capa delgada sobre la superficie.</p> <p><b>Bomba</b></p> <p>La carcasa de la bomba posee un orificio de cebado y otro de drenaje, ambos cerrados con tapones. El impulsor es de tipo cerrado y posee álabes de doble curvatura y superficies lisas. El impulsor se equilibra estáticamente (de acuerdo con la norma ISO 1940-1, clase G6.3) e hidráulicamente con objeto de compensar el empuje axial.</p> <p>Los anillos de desgaste que contienen la carcasa de la bomba y el impulsor son de bronce/latón o fundición. El soporte del motor y la cubierta de la bomba están fabricados en fundición (EN-GJL-250). Las protecciones del acoplamiento se instalan en el soporte del motor. La cubierta de la bomba está equipada con un tornillo de purga de aire manual para purgar el aire de la carcasa de la bomba y la cámara del cierre.</p> <p>La bomba está equipada con un cierre de fuelle de caucho no equilibrado con transmisión de par a través del muelle y alrededor del fuelle. El fuelle evita que el cierre desgaste el eje e impide que el movimiento axial se vea obstaculizado por la presencia de depósitos en el eje.</p> <p>Cierre primario:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Material del anillo del cierre giratorio: carburo de silicio (SiC)</li><li>• Material del asiento estacionario: carburo de silicio (SiC)</li></ul> <p>Esta combinación de materiales se usa en casos en los que es preciso conferir al equipo una mayor resistencia a la corrosión. La elevada dureza de esta combinación de materiales proporciona una magnífica resistencia contra las partículas abrasivas.</p> <p>Material del cierre secundario: EPDM (caucho de etileno-propileno)</p>

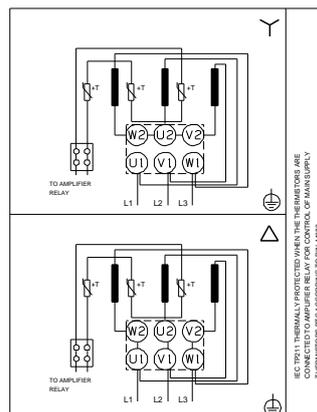
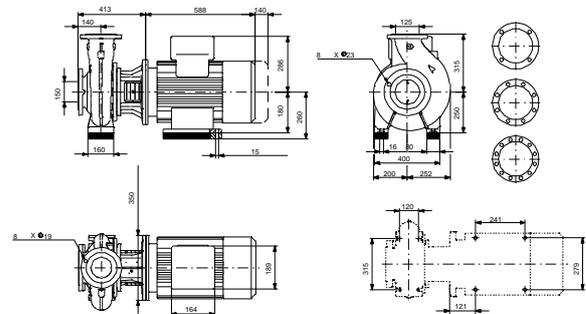
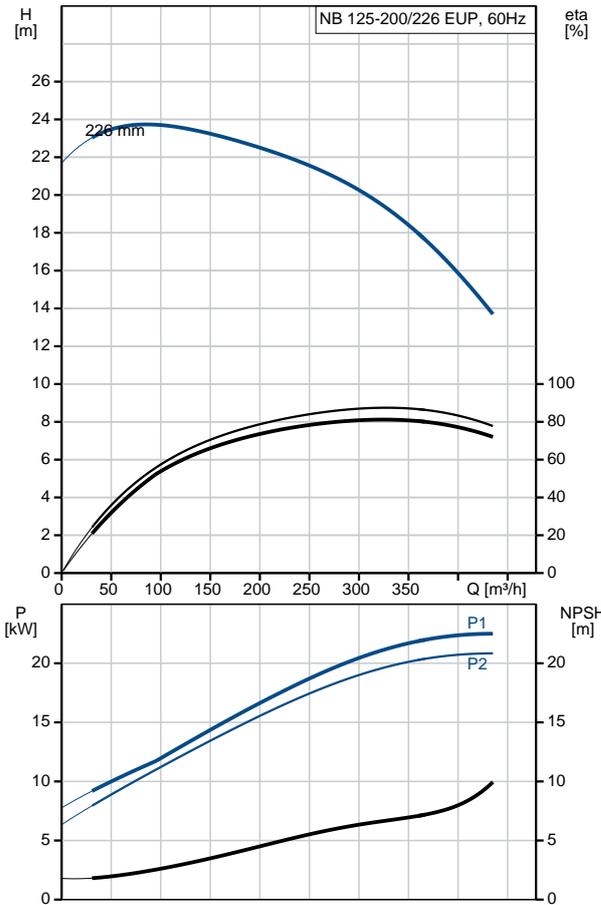
Contar	Descripción
	<p>El EPDM posee una excelente resistencia al agua caliente. El EPDM no es apto para el uso con aceites minerales.</p> <p>La carcasa de la bomba tiene patas.</p> <p>La bomba debe fijarse a la cimentación insertando pernos a través de las patas de la carcasa de la bomba y las patas del motor. La bomba se suministra con bloques de apoyo de acero. Los bloques de apoyo permiten que la bomba quede alineada horizontalmente y garantizan la separación necesaria entre el soporte o la brida del motor y la cimentación.</p> <p><b>Motor</b></p> <p>El motor es de tipo totalmente cerrado, cuenta con refrigeración por ventilador y sus principales dimensiones se ajustan a las normas IEC y DIN. Las tolerancias eléctricas satisfacen los requisitos establecidos por la norma IEC 60034.</p> <p>El nivel de eficiencia del motor de acuerdo con la norma EISA2007 es alto.</p> <p>El motor posee termistores (sensores PTC) en los bobinados, de acuerdo con las normas DIN 44081/DIN 44082. El sistema de protección reacciona a los aumentos de temperatura lentos y rápidos (como aquellos que tienen lugar en condiciones de sobrecarga constante y atasco).</p> <p>Los térmicos deben conectarse a un circuito de control externo para garantizar que la función de restablecimiento automático no pueda dar lugar a accidentes. Los motores deben conectarse a un disyuntor protector para motor de acuerdo con lo establecido por la normativa local en vigor.</p> <p>El motor se puede conectar a un variador de frecuencia para hacer posible el ajuste del punto de trabajo de la bomba a cualquier valor. La gama CUE de Grundfos pone a su disposición un amplio abanico de variadores de frecuencia. Encontrará más información en el centro de productos de Grundfos.</p> <p><b>Más información acerca del producto</b></p> <p><b>Datos técnicos</b></p> <p>Paneles control:</p> <p>Convertidor de frecuencia: NONE</p> <p><b>Líquido:</b></p> <p>Líquido bombeado: Agua</p> <p>Rango de temperatura del líquido: -25 .. 120 °C</p> <p>Temperatura del líquido durante el funcionamiento: 20 °C</p> <p>Densidad: 998.2 kg/m<sup>3</sup></p> <p><b>Técnico:</b></p> <p>Velocidad predeterminada: 1765 rpm</p> <p>Caudal nominal: 328.5 m<sup>3</sup>/h</p> <p>Altura nominal: 19.23 m</p> <p>Diámetro real del impulsor: 226 mm</p> <p>Diámetro nominal del impulsor: 200 mm</p> <p>Disp. de cierre: Single</p> <p>Código del cierre: BQQE</p> <p>Tolerancia de curva: ISO9906:2012 3B</p> <p>Diseño rodamiento: Standard</p> <p><b>Materiales:</b></p> <p>Cuerpo hidráulico: Fundición</p> <p>Carcasa de la bomba: EN-GJL-250 ASTM class 35</p> <p>Mat. de anillo de desgaste: Latón</p> <p>Impulsor: Fundición EN-GJL-200 ASTM class 30</p> <p>Eje: Stainless steel EN 1.4301 AISI 304</p> <p><b>Instalación:</b></p>

Contar	Descripción
	<p>Temperatura ambiente máxima: 55 °C            Presión de trabajo máxima: 16 bar            Normativa de conexión de tubería: EN 1092-2            Tamaño de la conexión de entrada: DN 150            Tamaño de la conexión de salida: DN 125            Normativa de conexión de tubería: EN 1092-2            Presión nominal para la conexión de la tubería: PN 16            Carcasa de bomba con pie: Yes            Bloque de soporte: Y</p> <p><b>Datos eléctricos:</b></p> <p>Tipo de motor: SIEMENS            Clase eficiencia IE: NEMA Energy / IE2 60Hz / NRC            Potencia nominal - P2: 22 kW            Frecuencia de red: 60 Hz            Tensión nominal: 3 x 380-420D/660-725Y V [3 x 440-480D V]            Intensidad nominal: 42,5-40,5/24,6-23,6 A [39.5-36.0 A]            Intensidad de arranque: 600-600 % [690-690 %]            Cos phi - factor de potencia: 0.8            Velocidad nominal: 1765 rpm [1770 rpm]            Eficiencia: IE2 92,4% [IE2 91,7%]            Eficiencia del motor a carga total: 92.4-92.4 % [91.7-91.7 %]            Eficiencia del motor a una carga de 3/4: 93.4-93.4 % [92.0-92.0 %]            Eficiencia del motor a una carga de 1/2: 93.8-93.8 % [91.7-91.7 %]            Número de polos: 4            Grado de protección (IEC 34-5): 55 Dust/Jetting            Clase de aislamiento (IEC 85): F            Motor N.º: 99032196</p> <p><b>Otros:</b></p> <p>Índice de eficiencia mínima, MEI : 0.70            Peso neto: 321 kg            Peso bruto: 354 kg            Volumen de transporte: 0.951 m³</p>

## Bajo pedido NB 125-200/226 EUP ASF2ABQQE 60 Hz

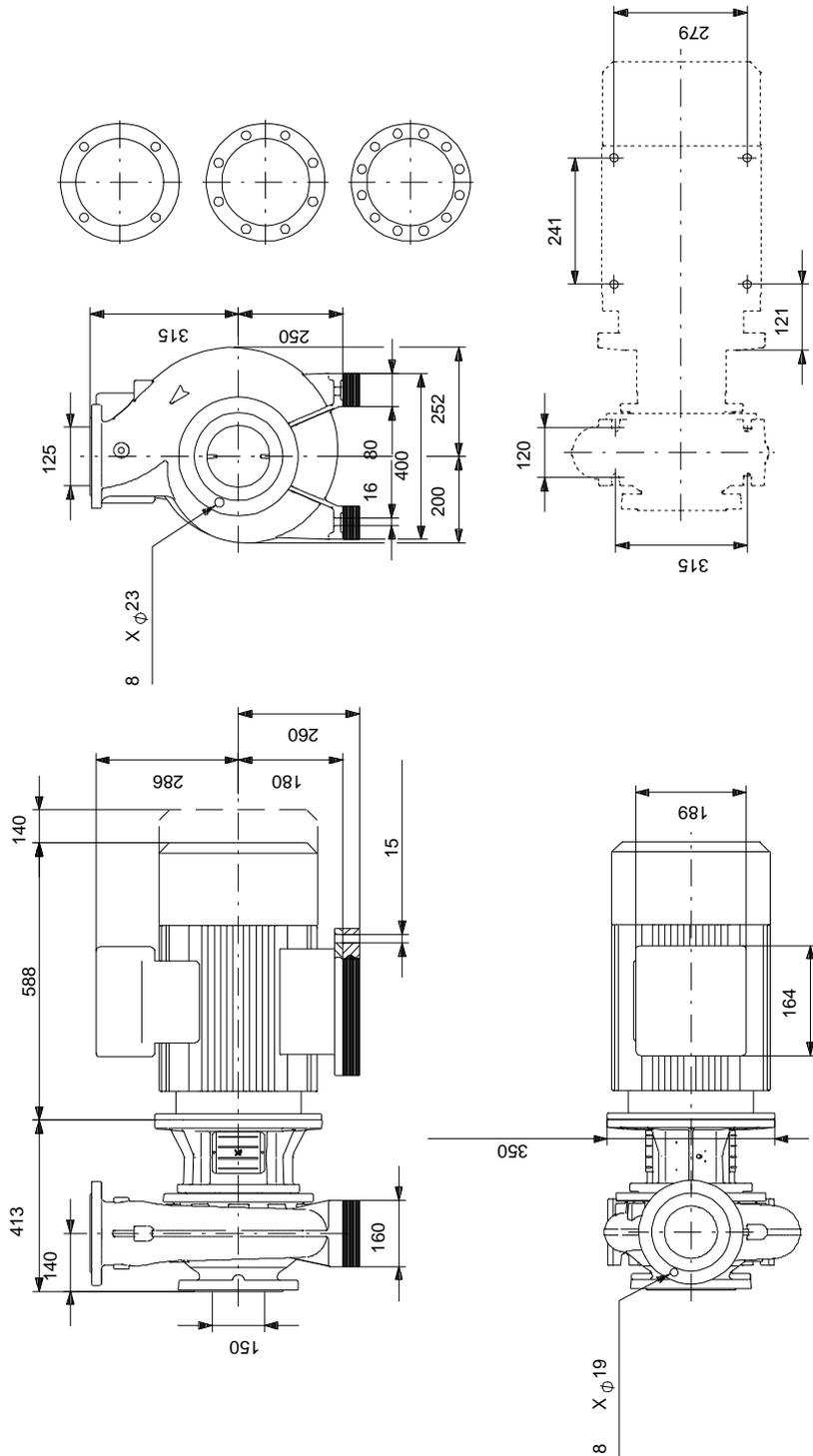


Descripción	Valor
<b>Información general:</b>	
Producto::	NB 125-200/226 EUP ASF2ABQQE
Código::	Bajo pedido
Número EAN::	Bajo pedido
	Bajo pedido
<b>Técnico:</b>	
Velocidad predeterminada:	1765 rpm
Caudal nominal:	328.5 m <sup>3</sup> /h
Altura nominal:	19.23 m
Diámetro real del impulsor:	226 mm
Diámetro nominal del impulsor:	200 mm
Disp. de cierre:	Single
Diámetro del eje:	32 mm
Código del cierre:	BQQE
Tolerancia de curva:	ISO9906:2012 3B
Versión de la bomba:	AS
Diseño rodamiento:	Standard
<b>Materiales:</b>	
Cuerpo hidráulico:	Fundición
Carcasa de la bomba:	EN-GJL-250 ASTM class 35
Mat. de anillo de desgaste:	Latón
Impulsor:	Fundición EN-GJL-200 ASTM class 30
Eje:	Stainless steel EN 1.4301 AISI 304
Código de material:	A
Código para caucho:	E
<b>Instalación:</b>	
Temperatura ambiente máxima:	55 °C
Presión de trabajo máxima:	16 bar
Normativa de conexión de tubería:	EN 1092-2
Tamaño de la conexión de entrada:	DN 150
Tamaño de la conexión de salida:	DN 125
Normativa de conexión de tubería:	EN 1092-2
Presión nominal para la conexión de la tubería:	PN 16
Carcasa de bomba con pie:	Yes
Bloque de soporte:	Y
Código de conexión:	F2
<b>Líquido:</b>	
Líquido bombeado:	Agua
Rango de temperatura del líquido:	-25 .. 120 °C
Temperatura del líquido durante el funcionamiento:	20 °C
Densidad:	998.2 kg/m <sup>3</sup>
<b>Datos eléctricos:</b>	
Tipo de motor:	SIEMENS
Clase eficiencia IE:	NEMA Energy / IE2 60Hz / NRC
Potencia nominal - P2:	22 kW
Frecuencia de red:	60 Hz



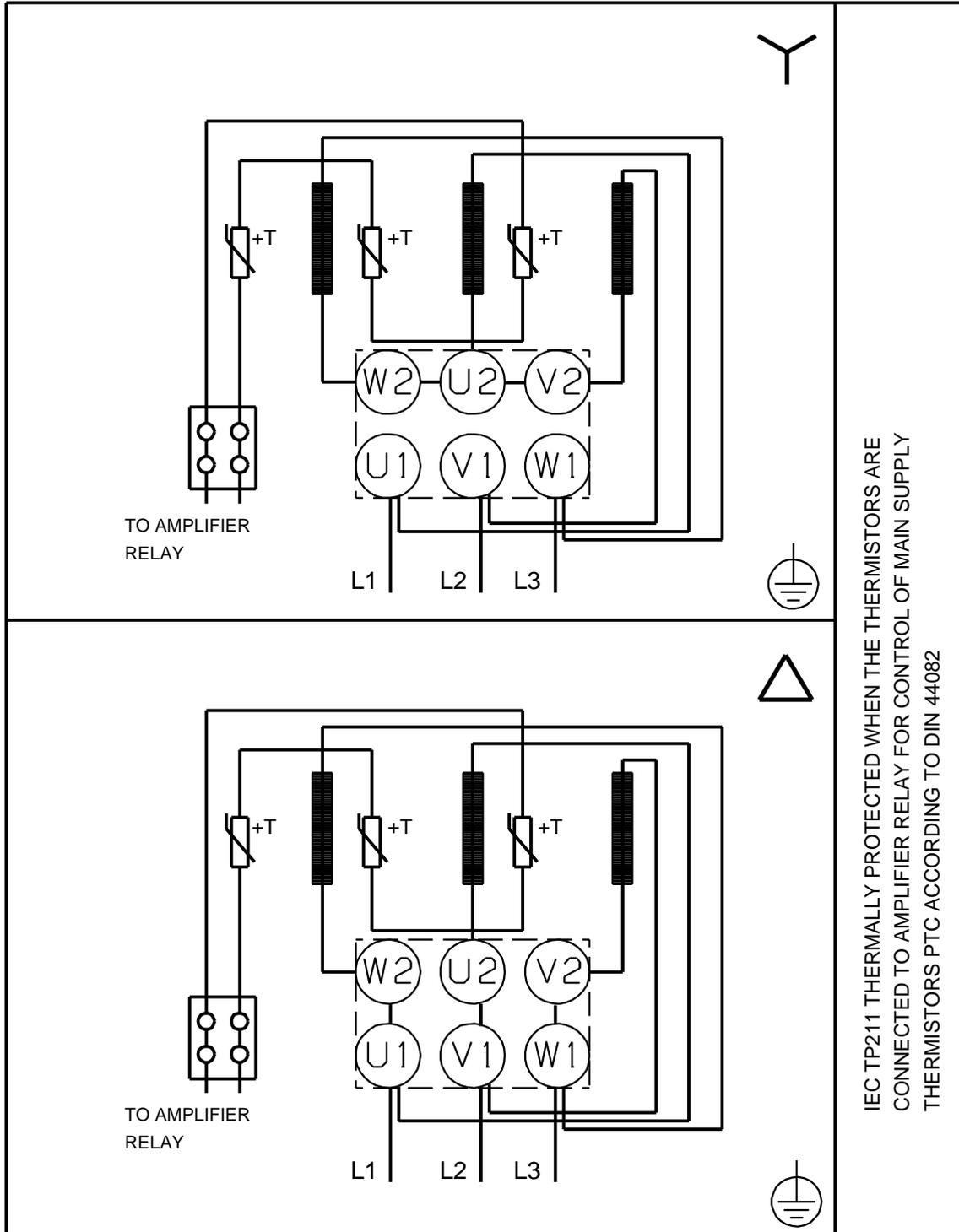
Descripción	Valor
Tensión nominal:	3 x 380-420D/660-725Y V [3 x 440-480D V]
Intensidad nominal:	42,5-40,5/24,6-23,6 A [39.5-36.0 A]
Intensidad de arranque:	600-600 % [690-690 %]
Cos phi - factor de potencia:	0.8
Velocidad nominal:	1765 rpm [1770 rpm]
Eficiencia:	IE2 92,4% [IE2 91,7%]
Eficiencia del motor a carga total:	92.4-92.4 % [91.7-91.7 %]
Eficiencia del motor a una carga de 3/4:	93.4-93.4 % [92.0-92.0 %]
Eficiencia del motor a una carga de 1/2:	93.8-93.8 % [91.7-91.7 %]
Número de polos:	4
Grado de protección (IEC 34-5):	55 Dust/Jetting
Clase de aislamiento (IEC 85):	F
Protec de motor:	PTC
Motor N.º:	99032196
Diseño del montaje según norma CEI 34-7:	IM B35
<b>Paneles control:</b>	
Convertidor de frecuencia:	NONE
<b>Otros:</b>	
Índice de eficiencia mínima, MEI :	0.70
Peso neto:	321 kg
Peso bruto:	354 kg
Volumen de transporte:	0.951 m³

## Bajo pedido NB 125-200/226 EUP ASF2ABQQE 60 Hz



Nota: todas las unidades están en [mm] a menos que se indiquen otras. Exención de responsabilidad: este esquema dimensional simplificado no muestra todos los detalles.

## Bajo pedido NB 125-200/226 EUP ASF2ABQQE 60 Hz



IEC TP211 THERMALLY PROTECTED WHEN THE THERMISTORS ARE  
CONNECTED TO AMPLIFIER RELAY FOR CONTROL OF MAIN SUPPLY  
THERMISTORS PTC ACCORDING TO DIN 44082

¡Nota! Uds en [mm] a menos que otras estén expresadas



Empresa:  
Creado Por:  
Teléfono:

Datos: 04/03/2020

---

**Dados da encomenda:**

Nombre de producto: NB 125-200/226 EUP ASF2ABQQE

Cantidad: 1

Código prod.: Bajo pedido

Total: Precio bajo pedido

---

**Recambios NB 125-200/226 EUP, Cód. de prod. Bajo pedido**  
**Producido después 1627 (semana y año producción)**

Pos	Descripción	Anotación	Datos de clasif	Part no.	Contar	Unidad
-	Kit de carcasa de la bomba			98776465	1	pcs
6	Carcasa de la bomba				1	
20	Clavija				2	
36	Tuerca		Rosca: M10		8	
-	Kit de eje de bomba			96039360	1	pcs
9	Socket set screw				2	
11	Llave paralela				1	
51	Stub shaft				1	
66a	Spring lock washer				1	
66	Arandela				1	
67	Tuerca		Rosca: M18		1	
-	Kit de protector de acoplamientos			96809945	1	pcs
7a	Pan head screw				4	
7	Protector del acoplamiento				2	
-	Kit de tuerca			96939130	1	pcs
11	Llave paralela				1	
-	67 Tuerca				1	
66a	Spring lock washer				1	
66	Arandela				1	
67	Tuerca		Rosca: M18		1	
-	Kit, anillo de desgaste			99208807	1	pcs
45	Anillo de desgaste				1	
-	Kit, tapa			98990962	1	pcs
18	Tornillo de purga de aire				1	
36	Tuerca		Rosca: M10		8	
77	Tapa				1	
-	Motor stool cpl.			99449574	1	pcs
77a	Volumen, Pan head screw (20 pcs)			99266550	4	
	Motor				1	pcs
18	Volumen, Tornillo de purga de aire (10 pcs)			96620482	1	pcs
18	Tornillo de purga de aire			98164277	1	pcs
20	Volumen, Clavija (10 pcs)			97511949	2	pcs
36	Volumen, Tuerca (20 pcs)		Rosca: M10	96620484	8	pcs
49	Impulsor			99248105	1	pcs
72.a	Junta tórica		Diámetro: 221,84 Tipo de material: EPDM Espesor: 3,53	97757671	1	pcs
105	Junta del eje			98434906	1	pcs

**Anexo 8: Ficha técnica de calentador de agua.**



**The Hot Water Management Experts<sup>SM</sup>**

# Raytherm<sup>®</sup> Selection Guide

**Specifications for  
Commercial Atmospheric:  
Hydronic Heating Boilers  
Water Heaters**

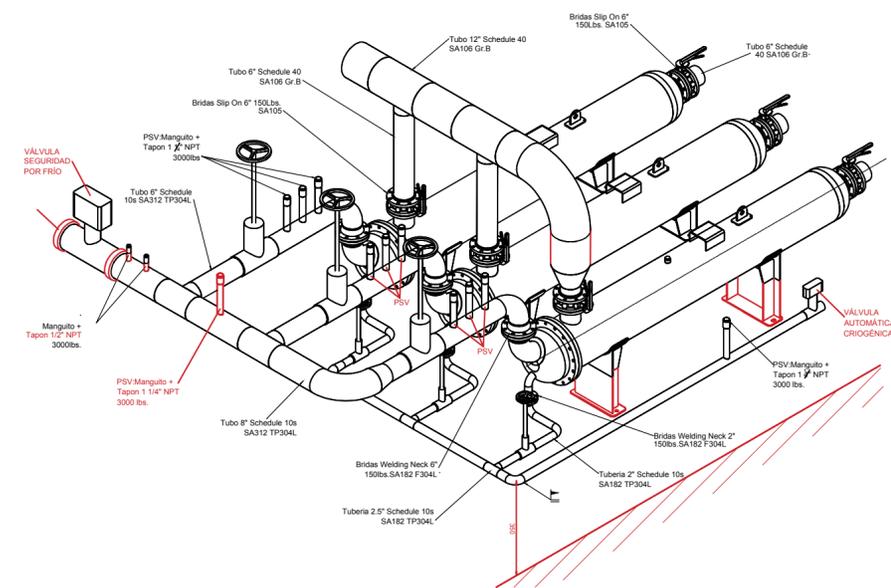
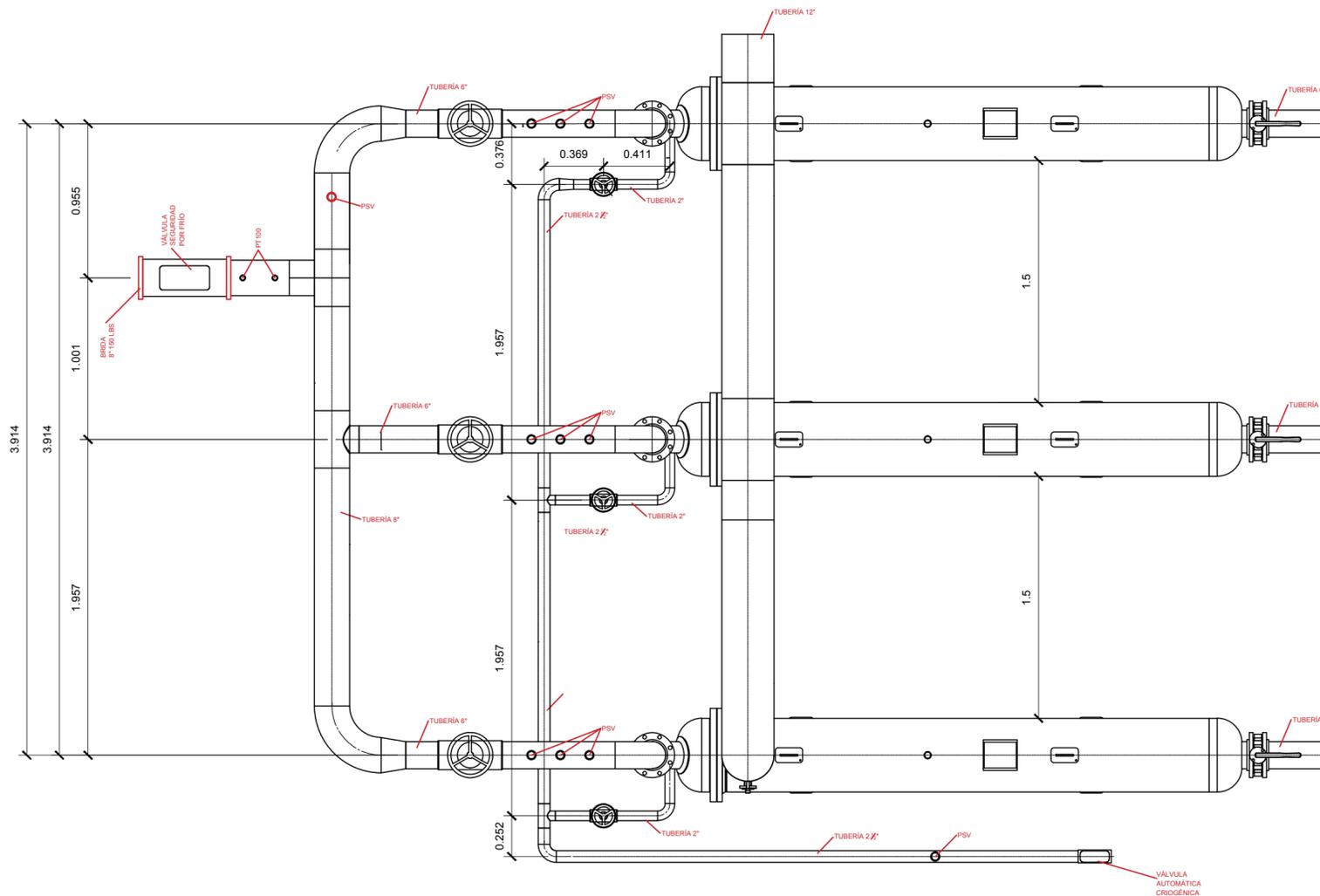
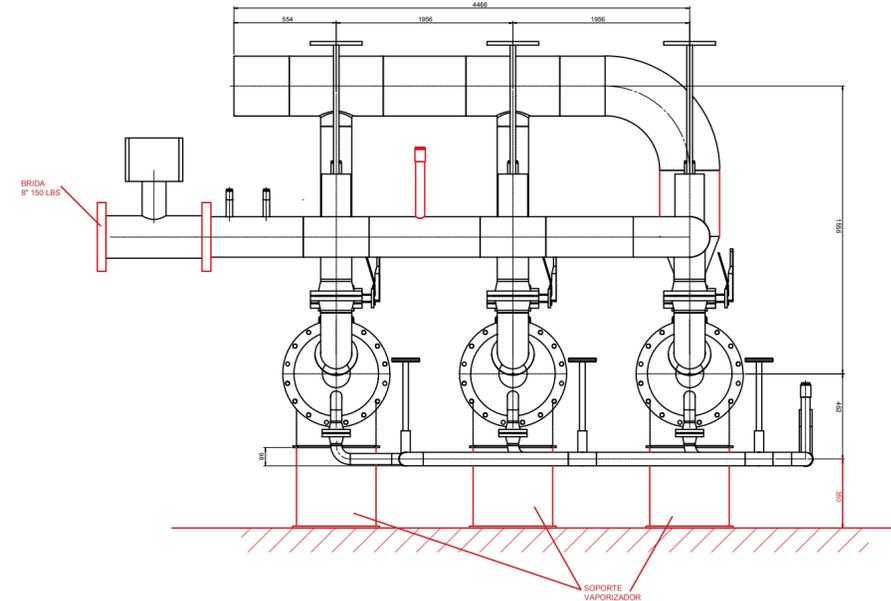
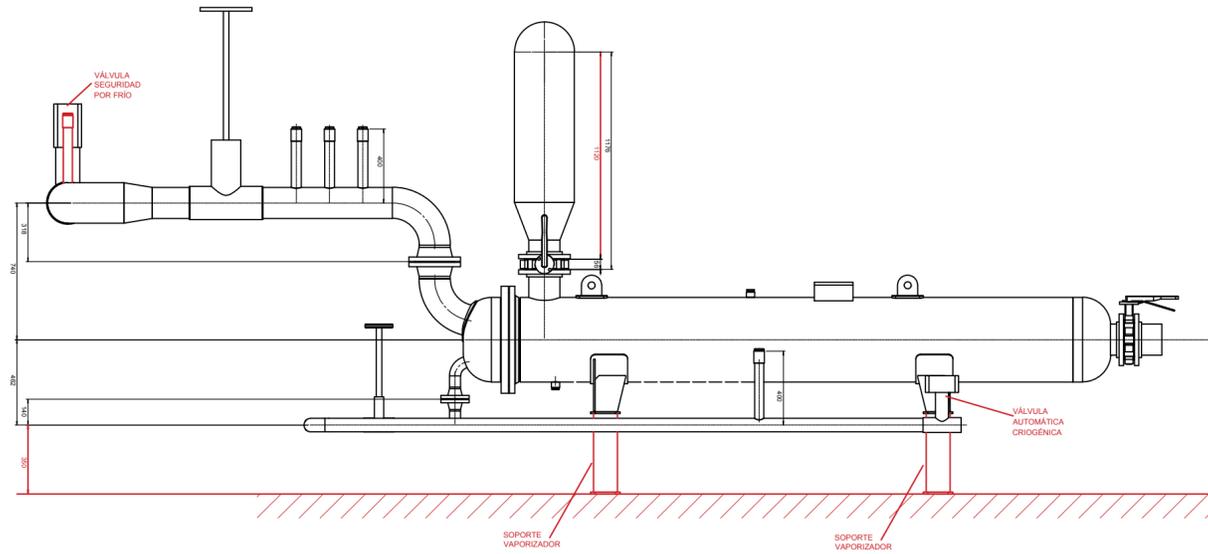


**The Hot Water Management Experts**



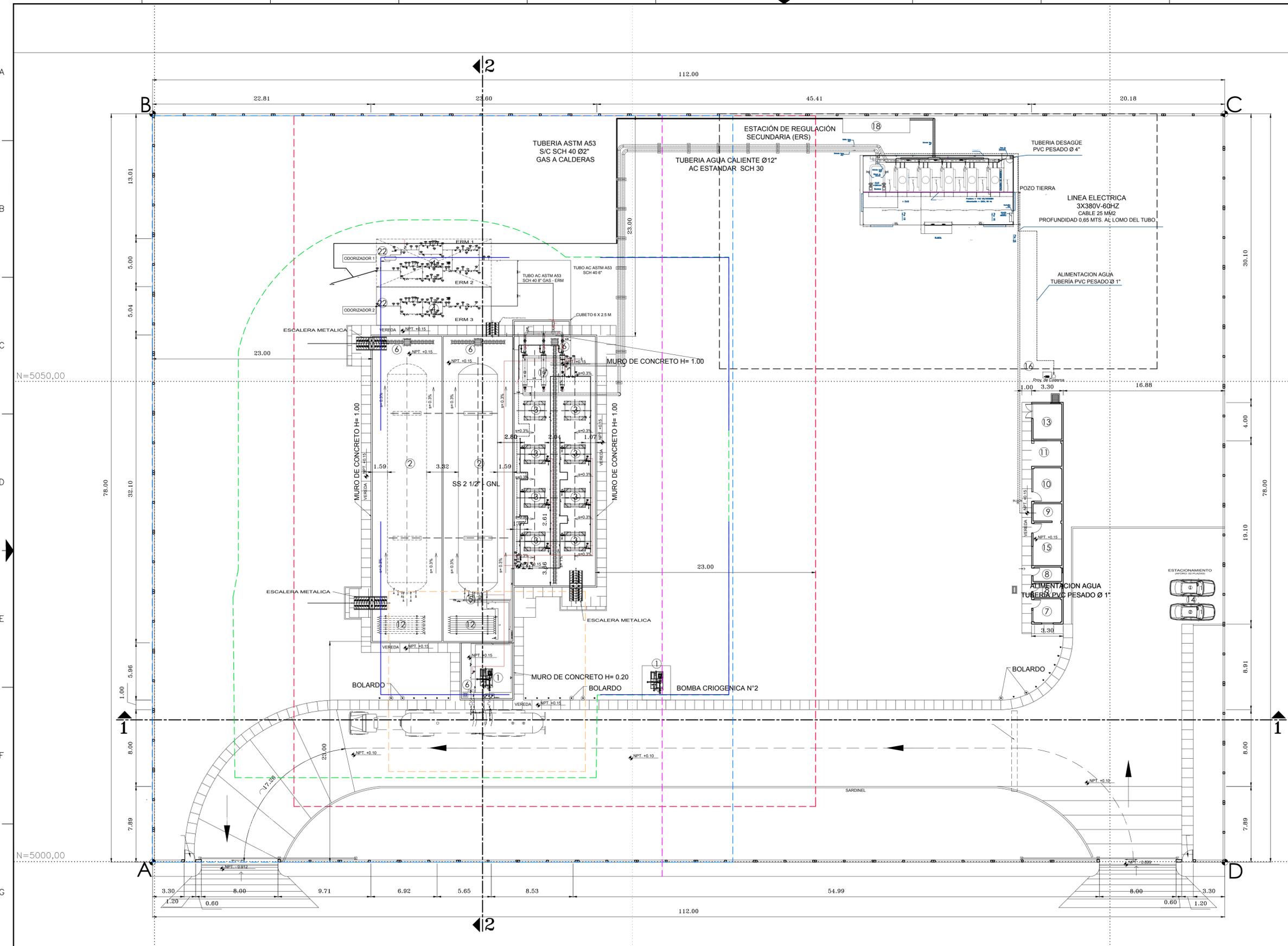
Proudly assembled in the U.S.A.

## **Anexo 9: Sistema de vaporización.**



FECHA:	JULIO 2021	 <b>UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO</b>	
NOMBRE:	LUIS FELIPE SIEDEN ROJAS		
PROYECTO:	DISEÑO DE UN SISTEMA DE VAPORIZACIÓN DE 20000 m3/h PARA REPOTENCIAR UNA PLANTA DE REGASIFICACIÓN DE GAS NATURAL		
PLANO:	<b>D1</b>	N° DE DIBUJO:	
		SKID VAPORIZADOR FORZADO	A2
		ESCALA: 1:1000	HOJA 1 DE 1

**Anexo 10: Detalle caseta.**



NP  
NG  
45°54'

E=1000,00 Mts N=5000,00 Mts COORDENADAS LOCALES DEL VERTICE A CORRESPONDEN CON E=770132,758 Mts N=8991783,805 Mts COORDENADAS TOPOGRAFICAS DEL SISTEMA WGS84. ANGULO DE GIRO = 45°54'

**LEYENDA EQUIPOS-CHIMBOTE**

1	BOMBA DESCARGA / TRASIEGO GNL
2	DEPOSITO GNL BAJA PRESION (200 M <sup>3</sup> )
3	VAPORIZADOR AMBIENTAL UNIDAD DE REGASIFICACION
4	UNIDA DE REGULACION Y MEDIDA (ERM1; ERM 2; ERM3)
5	POSTE DE VENTED
6	ZONA DE RECOGIDA DE DERRAMES
7	GARITA DE CONTROL
8	BARO
9	UPS/PLC
10	N2/DEPOSITO
11	GENERADOR
12	PBU
13	SUB ESTACION ELECTRICA
14	ESTACIONAMIENTO
15	CUARTO DE CONTROL
16	CISTERNA Y SISTEMA HIDRONEUMATICO
17	VAPORIZADORES FORZADOS UNIDAD DE REGASIFICACION
18	ESTACION DE REGULACION SECUNDARIA (ERS)
19	RECINTO DE SISTEMA DE CALENTAMIENTO
20	CALDERAS
21	BOMBAS CENTRIFUGAS
22	SISTEMA DE ODORIZACION N° 1 ; N° 2

**LEYENDA DISTANCIAS**

- 23 m - Distancia desde extremo embalse del contenedor hasta edificios fuera del sitio y lindes de propiedad
- 23 m - Distancia desde extremo embalse del contenedor de los vaporizadores ambientales hasta lindes propiedad.
- 15 m - Distancia desde equipo que contenga GNL, conexiones carga/descarga hasta fuentes ignición, centro de control, oficinas, talleres
- 7,6 m - Distancia desde puntos de transferencia hasta límite de propiedad o edificio no asociado a la instalación
- 15 m - Distancia desde los vaporizadores a cualquier fuente de ignición.
- 15 m - Distancia desde calentadores a Cualquier refrigerante de GNL o líquido inflamables embalsado (almacenamiento y tuberías de GNL).
- 15 m - Distancia desde calentadores a Oficinas y Cuarto de Control.

**NORMA NFPA 59A**

- Distancia entre tanque de almacenamiento igual a 2.06m.
- Distancia entre vaporizadores es igual a 1.50m.

(Ver plano YND-PL-C-CHB-002 ARQ.AREA DE PROCESO)

VERTICE	DISTANCIA
A-B	78.00 M
B-C	112.00 M
C-D	78.00 M
D-A	112.00 M

CUADRO DE COORDENADAS TOPOGRAFICAS				UTM WGS 84		UTM PSAD56			
VÉRTICE	LADO	DISTANCIA	ANG. INTERNO	ESTE (X)	NORTE (Y)	ESTE (X)	NORTE (Y)	ESTE (X)	NORTE (Y)
A	A-B	78.00	90°0'0"	770132.758	8991783.805	770132.762	8991783.783	770384.871	8992152.674
B	B-C	112.00	90°0'0"	770076.745	8991838.087	770076.721	8991838.092	770328.828	8992206.985
C	C-D	78.00	90°0'0"	770154.688	8991918.516	770154.703	8991918.562	770406.813	8992287.457
D	D-A	112.00	90°0'0"	770210.701	8991864.234	770210.744	8991864.253	770462.856	8992233.146

VERTICES CHIMBOTE				
VERTICE	LOCALES		TOPOGRAFICAS	
	ESTE (X)	NORTE (Y)	ESTE (X)	NORTE (Y)
A	1000.000	5000.000	770132.758	8991783.805
B	1000.000	5078.000	770076.745	8991838.087
C	1112.000	5078.000	770154.688	8991918.516
D	1112.000	5000.000	770210.701	8991864.234

FECHA: JULIO 2021

UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

PROFESOR: LUIS FELIPE SIEDEN ROJAS

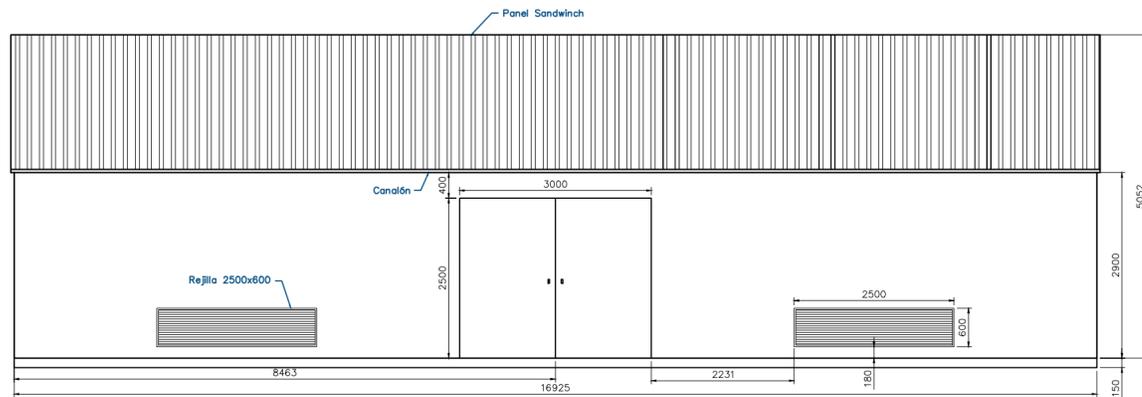
PLANO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE VAPORIZACION DE 20000 m<sup>3</sup>/DIA PARA REPOTENCIAR UNA PLANTA DE REGASIFICACION DE GAS NATURAL

ESCALA: 1:500

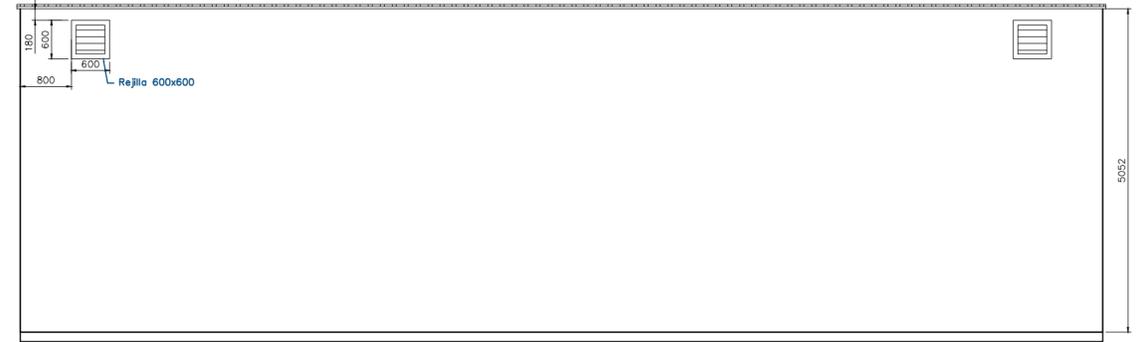
HOJA 1 DE 1

**A1**

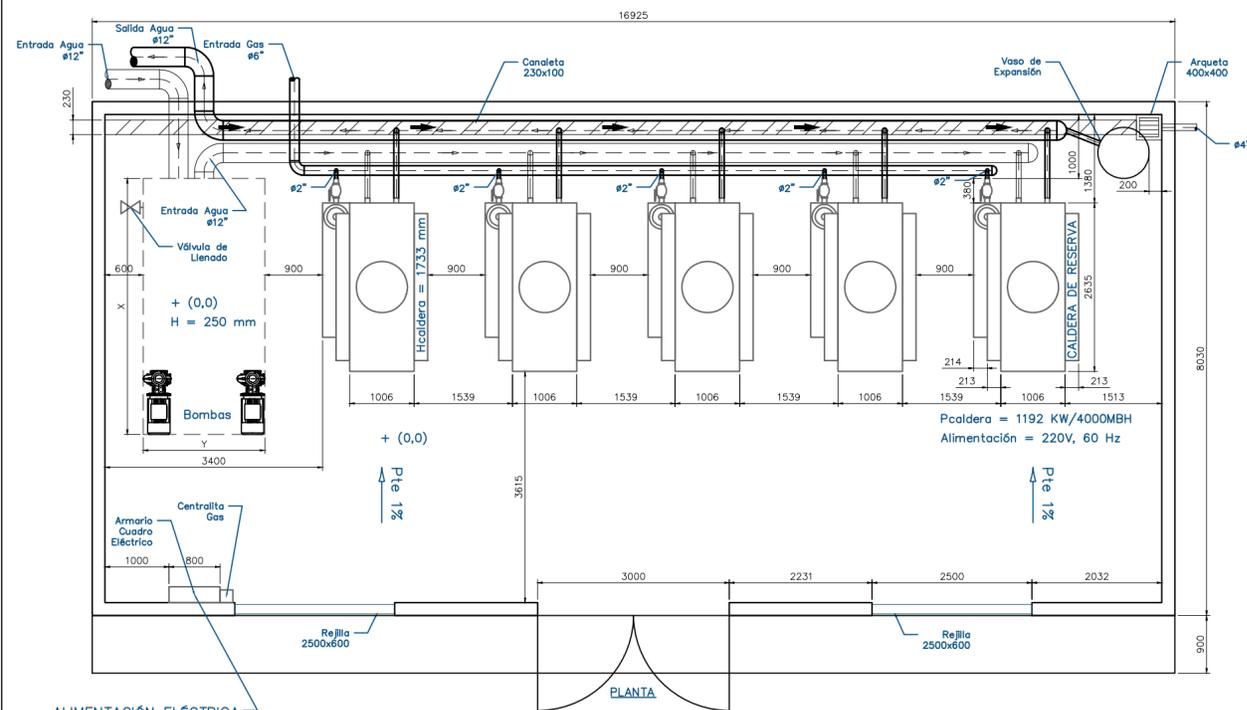
**Anexo 11: Detalle de recinto.**



ALZADO DELANTERO

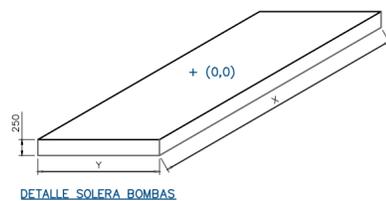


ALZADO POSTERIOR

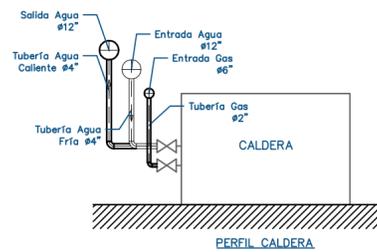


ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

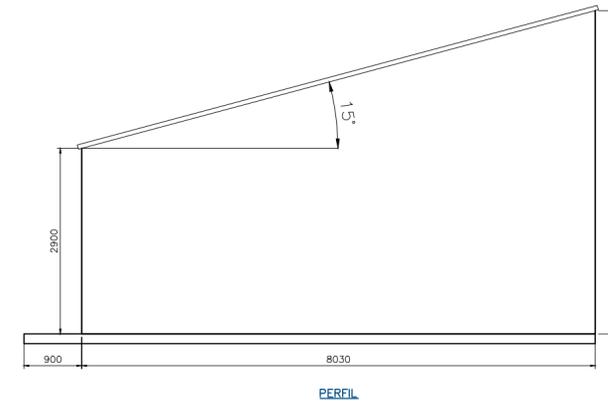
POTENCIA: 40KW  
 TENSIÓN: 380V (3 FASES + NEUTRO)  
 FRECUENCIA: 60Hz



DETALLE SOLERA BOMBAS



PERFIL CALDERA



PERFIL

FECHA: JULIO 2021		
NOMBRE: LUIS FELIPE SIEDEN ROJAS	PROYECTO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE VAPORIZACIÓN DE 20000 m <sup>3</sup> /h PARA REPOTENCIAR UNA PLANTA DE REGASIFICACIÓN DE GAS NATURAL	
PLANO: <b>D1</b>	N° DE DIBUJO: DETALLE DE CASETA (ORIENTATIVO)	A2
	ESCALA: S/E	HOJA 1 DE 1

**Anexo 12: Proveedor de intercambiador.**

2020

PO 19-1907-2-0393 / PD-6966

DOSSIER DE CALIDAD

QUALITY DOSSIER



**ARROSPE** 

**S.Coop.**

*Stainless Steel  
Equipments & Piping*