

# REVAMPING DE UN EQUIPO MOTOCOMPRESOR DE GAS



**LITWIN, Nicolás**

**PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del  
Comahue como requisito para la obtención del grado de  
**INGENIERO MECÁNICO**

Neuquén - Argentina

AÑO 2023

# **REVAMPING DE UN EQUIPO MOTOCOMPRESOR DE GAS**

**LITWIN, Nicolás**

Director: Ing. **CAMPOS, Damián**

Co-director: Ing. **MILES, Juan**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del  
Comahue como requisito para la obtención del grado de  
**INGENIERO MECÁNICO**

Neuquén - Argentina

AÑO 2023

# **REVAMPING DE UN EQUIPO MOTOCOMPRESOR DE GAS**

**LITWIN, Nicolás**

Aprobado en fecha xx de xxx de 2023

Tribunal evaluador:

- Ing. **NAGEL, Gustavo**
- Ing. **TROFFÉ, Mario**
- Ing. **MAZZONI, José**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, por darme su apoyo incondicional durante toda la carrera,  
por su amor y por formarme cómo persona.

A mis abuelos, que con su amor y predisposición, siempre estuvieron  
para darme el apoyo que necesitaba.

A mis amigos, por ayudarme a hacer el recorrido universitario más ameno, por estar  
conmigo cuando así lo necesitaba y por compartir tantos años de vida.

A los docentes de la Universidad Nacional del Comahue que colaboraron  
en mi formación profesional.

A mis compañeros de cursada, con quienes compartimos muchos momentos y juntos  
hicimos que el camino universitario resultara menos tortuoso.

A Catalina, por ayudarme a convertirme en la persona que soy hoy en día, estando a mi  
lado en todo momento, brindándome todo su apoyo. Este trabajo es para vos.

# REVAMPING DE UN EQUIPO MOTOCOMPRESOR DE GAS

Autor: LITWIN, Nicolás

Director: Ing. CAMPOS, Damián

Co-Director: Ing. MILES, Juan

## Resumen

La actualización (*revamping*) de los sistemas motocompresores permite asegurar su funcionamiento con un rendimiento óptimo y una adecuada confiabilidad, lo que a su vez permite extender la vida útil del activo.

El presente trabajo se centra en el desarrollo de un proyecto de *revamping* de un equipo motocompresor, compuesto por un motor Waukesha L7044GSI y un compresor modelo Ariel JGK4. Se persigue abordar de manera sistémica los diversos aspectos relacionados con las actividades llevadas a cabo en cada fase del proyecto, tales como el inicio, la planificación, la ejecución, el seguimiento y control, y el cierre.

A partir de la planificación estratégica, se definieron todas las tareas y recursos que debieron ser asignados para la concreción del proyecto. El proceso de ejecución se llevó a cabo de manera satisfactoria en relación con las necesidades del Cliente. Los resultados alcanzados permiten mejorar el *know-how* de la organización a cargo del proyecto, identificando oportunidades de mejora para proyectos futuros de similares características.

*Palabras clave: proyecto, motocompresor, revamp, mantenimiento.*

# REVAMPING A GAS MOTO-COMPRESSOR EQUIPMENT

Author: LITWIN, Nicolás

Advisor: Ing. CAMPOS, Damián

Co-Advisor: Ing. MILES, Juan

## Summary

Revamping of motor compressor systems ensures their operation with optimum performance and reliability, extending the asset's useful life.

This work focuses on developing a revamping project of a motor compressor unit consisting of a Waukesha L7044GSI engine and an Ariel JGK4 compressor. The aim is to address systemically the various aspects related to the activities carried out in each phase of the project, such as initiation, planning, execution, monitoring and control, and closure.

Based on the strategic planning, all the tasks and resources that had to be assigned to complete the project were defined. The execution process was carried out satisfactorily concerning the Client's needs. The results allow for improving the organization's know-how in charge of the project, identifying improvement opportunities for future projects of similar characteristics.

*Keywords: project, motor-compressor, revamp, maintenance.*

---

## Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. DEFINICIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO</b>	<b>2</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
3.1. Objetivo general . . . . .	3
3.2. Objetivos específicos . . . . .	3
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	<b>4</b>
4.1. Plantas compresoras de gas . . . . .	4
4.2. Equipo motocompresor . . . . .	6
4.3. Normativa de aplicación . . . . .	18
4.4. Metodología de proyecto . . . . .	22
4.4.1. Inicio . . . . .	23
4.4.2. Planificación . . . . .	25
4.4.3. Ejecución . . . . .	31
4.4.4. Seguimiento y Control . . . . .	32
4.4.5. Cierre . . . . .	34
<b>5. DESARROLLO</b>	<b>35</b>
5.1. Inicio . . . . .	35
5.1.1. Análisis de Stakeholders . . . . .	36
5.1.2. Análisis FODA . . . . .	37
5.1.3. Declaración de Misión . . . . .	39
5.2. Planificación . . . . .	41
5.2.1. Gestión de los Recursos Humanos . . . . .	41
5.2.2. Definición de las actividades generales . . . . .	42
5.2.3. Definición de las actividades específicas . . . . .	43
5.2.4. Estimación de recursos . . . . .	47
5.2.5. Cronograma del Proyecto . . . . .	48

---

---

5.3. Ejecución . . . . .	50
5.3.1. Recepción del equipo . . . . .	50
5.3.2. <i>Overhaul</i> del compresor . . . . .	52
5.3.3. Adecuación del <i>skid</i> . . . . .	54
5.3.4. Memoria de cálculo . . . . .	55
5.3.5. Inspección de las líneas de proceso . . . . .	66
5.3.6. Operaciones de soldadura . . . . .	68
5.3.7. Pruebas hidrostáticas . . . . .	70
5.3.8. Instrumentación . . . . .	70
5.3.9. Montaje final . . . . .	72
5.3.10. Puesta en marcha . . . . .	74
5.3.11. Embalaje y despacho . . . . .	76
5.4. Revisión y control . . . . .	78
5.5. Cierre . . . . .	80
5.6. Oportunidades de mejora . . . . .	82
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>83</b>
<b>7. REFERENCIAS</b>	<b>84</b>
<b>Anexos</b>	<b>86</b>
<b>A. Anexo I: Diagramas de Tuberías e Instrumentación (P&amp;ID)</b>	<b>87</b>
<b>B. Anexo II: Planificación</b>	<b>90</b>
<b>C. Anexo III: Análisis de Riesgo</b>	<b>94</b>

---



---

## Índice de figuras

1.	Esquema general de la producción de Petróleo & Gas, adaptado de (Devold, 2013).	4
2.	Equipo motocompresor.	6
3.	Vistas del motocompresor con sus componentes.	7
4.	Motor Waukesha L7044GSI.	8
5.	Compresor Ariel JGK4.	10
6.	Intercambiador de calor de tubo y aletas enfriado por aire.	11
7.	<i>Scrubber</i> de primera etapa.	13
8.	<i>Blowcase</i> montado sobre <i>skid</i> .	13
9.	Línea de recirculación, válvulas y acometidas.	15
10.	Ubicación de los Hotstart® en el equipo motocompresor.	16
11.	Botellón amortiguador de pulsaciones de primera etapa de succión.	17
12.	Metodología proyectual, adaptada de PMBOK® (2008).	23
13.	Mapa conceptual del Proceso de Inicio, adaptado de PMBOK® (2008).	24
14.	Mapa conceptual del Proceso de Planificación, adaptado de PMBOK® (2008).	26
15.	Mapa conceptual de Indicadores Clave de Rendimiento (KPIs).	31
16.	Mapa conceptual del Proceso de Ejecución, adaptado de PMBOK® (2008).	32
17.	Mapa conceptual del Proceso de Seguimiento y Control, adaptado de PMBOK® (2008).	33
18.	Mapa conceptual del Proceso de Cierre, adaptado de PMBOK® (2008).	34
19.	Equipo motocompresor en la base, previo a su traslado.	35
20.	Análisis de <i>stakeholders</i> .	37
21.	Matriz FODA.	38
22.	Organigrama de la Empresa Contratista.	41
23.	Costos obtenidos durante la valorización del proyecto.	48
24.	Incidencia de las tareas agrupadas por tipo en relación con el tiempo total asignado al proyecto.	49
25.	Recepción del equipo en la base del Contratista.	50

---

---

26.	Equipo montado en la base del Contratista. . . . .	51
27.	Desmontaje del equipo. . . . .	51
28.	Control dimensional del túnel cigüeñal del compresor. . . . .	52
29.	Indicación de la ubicación de los puntos de medición sobre el <i>frame</i> del compresor (Ariel, 2016). . . . .	52
30.	Remoción y colocación de <i>growth</i> . . . . .	54
31.	Colocación de cemento en patín. . . . .	54
32.	Plano de detalle del botellón de descarga de segunda etapa. . . . .	55
33.	Detalle cordones de soldadura niple-cabezal de descarga de segunda etapa. . . . .	57
34.	Diagrama refuerzos en aberturas según UG-37.1 (ASME, 2021). . . . .	59
35.	Ubicación de la línea de recirculación de gas en el equipo motocompresor. . . . .	61
36.	Plano isométrico de la línea de recirculación de gas. . . . .	62
37.	Factor de rango de tensión $f$ (ASME B31, 2018). . . . .	63
38.	Modelo 3D de la línea de recirculación. . . . .	64
39.	Tensiones combinadas en la línea de recirculación según discretización adoptada. . . . .	65
40.	Registro de inspección visual. . . . .	66
41.	Detalle de la brida e interior del codo con indicaciones visuales. . . . .	67
42.	Esquema junta con penetración parcial. . . . .	68
43.	Detalle de ejecución de una unión soldada. . . . .	69
44.	Detalle prueba hidrostática. . . . .	70
45.	Detalle de la instrumentación. . . . .	71
46.	Montaje preliminar. . . . .	72
47.	Detalle cañerías auxiliares. . . . .	73
48.	Instalación de aire y gas para puesta en marcha del equipo. . . . .	74
49.	Equipo pintado y preparado para el transporte. . . . .	77
50.	Aeroenfriador montado sobre remolque. . . . .	77
51.	Equipo motocompresor montado sobre remolque. . . . .	78
52.	Porcentaje de avance del proyecto. . . . .	81
53.	Primera etapa de <i>pipng</i> e instrumentación (P&ID). . . . .	88
54.	Segunda etapa de <i>pipng</i> e instrumentación (P&ID). . . . .	89

---

---

55.	Plan de proyecto realizado con software específico. . . . .	91
56.	Continuación de Plan de proyecto realizado con software específico. . . .	92
57.	Continuación de Plan de proyecto realizado con software específico. . . .	93

---

---

## Índice de cuadros

1.	Ficha técnica motor. . . . .	8
2.	Descripción parámetros del compresor. . . . .	10
3.	Resultados de medición dimensional de túnel cigüeñal de compresor. . . . .	53
4.	Resultados de medición de paralelismo entre el frame del compresor y la bancada. . . . .	53
5.	Datos técnicos para la envolvente del botellón de descarga de segunda etapa. . . . .	55
6.	Datos técnicos cabezal del botellón de descarga de segunda etapa. . . . .	56
7.	Datos técnicos niple del botellón de descarga de segunda etapa. . . . .	57
8.	Datos geométricos soldadura niple-cabezal de descarga de segunda etapa. . . . .	58
9.	Valores utilizados para verificar las modificaciones realizadas en el botellón. . . . .	59
10.	Datos geométricos y del material línea de recirculación de gas. . . . .	61
11.	Resultados obtenidos a partir de la simulación. . . . .	65
12.	Resultados de la inspección visual. . . . .	67
13.	Resultados de la inspección por ultrasonido. . . . .	68
14.	Símbolos de detalle del P&ID. . . . .	87
15.	Factores de riesgo involucrados durante la ejecución del proyecto. . . . .	94
16.	Matriz de relación directa entre factores . . . . .	95
17.	Grupos de criterio de emisor o receptor . . . . .	95
18.	Matriz de influencia entre factores de riesgo . . . . .	96
19.	Peso de los factores de riesgo identificados . . . . .	96
20.	Matriz de riesgo para actividades de Montaje . . . . .	98
21.	Matriz de riesgo para actividades de Soldadura . . . . .	99
22.	Acciones para mitigar los riesgos en las actividades de Soldadura y Montaje	100
23.	Matriz de riesgo, adaptada de ISO 9001. . . . .	100

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El éxito de un producto o servicio, depende de la capacidad que tenga una empresa para identificar las necesidades de los Clientes y poder generar un bien o un servicio que cumpla los requerimientos específicos en su mejor medida. Para generar un producto, se cuenta con equipos de proyecto que trabajan de forma conjunta para lograr los objetivos establecidos por el líder del equipo (Ulrich y Eppinger, 2009).

En la actualidad, tanto las empresas que solicitan un producto o un servicio, cómo las empresas que los brindan, utilizan diversas metodologías orientadas a la optimización de los recursos y a la verificación del grado de avance de un proyecto. Por este motivo, el equipo de proyecto debe establecer adecuadamente los requisitos y la forma de certificar los avances en el cumplimiento del proyecto.

Dentro de las empresas relacionadas con la industria, la Ingeniería de Proyecto asume el rol de nexo entre las necesidades del Cliente, el sector de finanzas y el de operaciones. En este contexto, es el equipo de proyectos el encargado de establecer los plazos de ejecución, definir las actividades a desarrollar, verificar que se cumplan los requerimientos del Cliente, establecer los criterios de aceptación y coordinar los grupos de trabajo asignando las tareas específicas. Mediante el desarrollo de este tipo de proyectos, las empresas adquieren el *know-how* específico, además de reconocimiento y la capacidad de resolver nuevos problemas. En función de la experiencia adquirida en proyectos anteriores, el equipo de proyecto, puede realizar desde un primer momento, estimaciones más precisas sobre plazos y recursos requeridos.

En la industria hidrocarburífera, cuando se explota un yacimiento, se obtiene gas y petróleo como subproductos principales. La extracción de estos recursos representa una de las actividades económicas de mayor impacto en la provincia de Neuquén. Dentro de las instalaciones que se desarrollan para extraer el recurso gasífero, comúnmente se utilizan estaciones de compresión de gas con el objetivo de aumentar la presión del fluido para su transporte, ya sea hacia el consumidor final o hacia otras estaciones de tratamiento.

Extender la vida de los yacimientos de gas cuando se ha iniciado su ciclo de madurez es un desafío recurrente para la industria petrolera. La variación de las condiciones de operación, debidas a cambios de las características del reservorio, genera la necesidad de

---

cambiar las características operativas de los equipos de compresión, entre las que se incluye: modificación de sus parámetros operativos, líneas de proceso y recipientes a presión. Por lo expuesto, habitualmente la continuidad de la operación requiere del *revamping* de las plantas compresoras existentes.

## 2. DEFINICIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El proceso de *revamp* de un equipo motocompresor de gas involucra la variación de los parámetros de *performance* de funcionamiento del compresor. Los cambios consisten en aumentar o disminuir la presión de trabajo, la velocidad de rotación del cigüeñal y la presión de succión o descarga; con la finalidad de alcanzar los nuevos requerimientos de operación. Además de variar los parámetros de funcionamiento del compresor, se varían las características de la línea de gas de proceso para que la misma sea apta para las nuevas condiciones (Sorokes y col., 2014).

Una empresa internacional (en adelante denominada el Comitente), que opera en la Cuenca Neuquina, inició en el último año, un proceso licitatorio tendiente a desarrollar nuevos proveedores locales que puedan satisfacer la demanda de servicios al momento de actualizar sus equipos motocompresores. Teniendo como objetivos principales, disminuir los tiempos de ejecución y mejorar los costos de logística asociados.

El proceso de licitación finalizó con la adjudicación de la provisión a una empresa metalmecánica (denominada a partir de aquí el Contratista), ubicada en el Parque Industrial de Neuquén. Dada la magnitud de los trabajos demandados, el Área de Ingeniería de Proyectos del Contratista, decidió desarrollar los proyectos asignados aplicando metodologías específicas que permitan garantizar el cumplimiento de los estándares requeridos por el Comitente.

En el presente trabajo se desarrolla un proyecto de *revamp* para un equipo motocompresor compuesto por un motor Waukesha L7044GSI y un compresor Ariel JGK4.

Para efectuar las tareas requeridas el Contratista definió, en primera instancia, un plan en el cuál se especificaron cada una de las tareas a realizar. Para llevar a cabo la programación se emplearon indicadores de *performance* obtenidos de proyectos anteriores ejecutados por la empresa. En el transcurso del proyecto, se utilizaron herramientas de cálculo para efectuar verificaciones estructurales y se aplicaron metodologías proyectuales. Los

---

criterios de aceptación se establecieron de acuerdo a las recomendaciones dadas por las distintas normativas internacionales de aplicación, y según requerimientos específicos definidos por parte del Comitente. Cabe destacar que todas las actividades se realizaron en las instalaciones del Contratista.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

Implementar herramientas y metodologías ampliamente reconocidas para la dirección de un proyecto de ingeniería, con el fin de realizar el *revamp* de un motocompresor de gas.

#### **3.2. Objetivos específicos**

En función de lo expuesto, se pretende:

- Generar un plan de trabajo para la ejecución del proyecto a partir de los requerimientos específicos del Comitente.
  - Revisar y completar la Ingeniería de detalle, verificando la integridad estructural de ciertos componentes que deben ser fabricados.
  - Utilizar criterios de aceptación basados en normativa específica de aplicación.
  - Establecer oportunidades de mejora para reducir los plazos de ejecución, procurando la mejora continua de los procesos involucrados.
-

## 4. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan los fundamentos de los distintos temas que requirieron una adecuada comprensión para poder abordar con solvencia el proyecto. En tal sentido se hace hincapié en el estudio de los equipos motocompresores y su función dentro de las plantas compresoras de gas. A su vez, se incluyen las normativas de aplicación y la metodología proyectual empleada para su ejecución.

### 4.1. Plantas compresoras de gas

Las plantas de compresión de gas, son instalaciones que tratan el gas natural que se obtiene de la perforación. Cuando reciben el gas, lo acondicionan y liberan con los parámetros requeridos para el consumo posterior. Una vez separado el gas del crudo o de los lodos provenientes de la perforación, se eleva su presión mediante equipos motocompresores de gas, hasta alcanzar los parámetros requeridos para su posterior consumo o reacondicionamiento. En la Figura 1 se presenta un esquema general de una planta de producción de gas y petróleo típica.

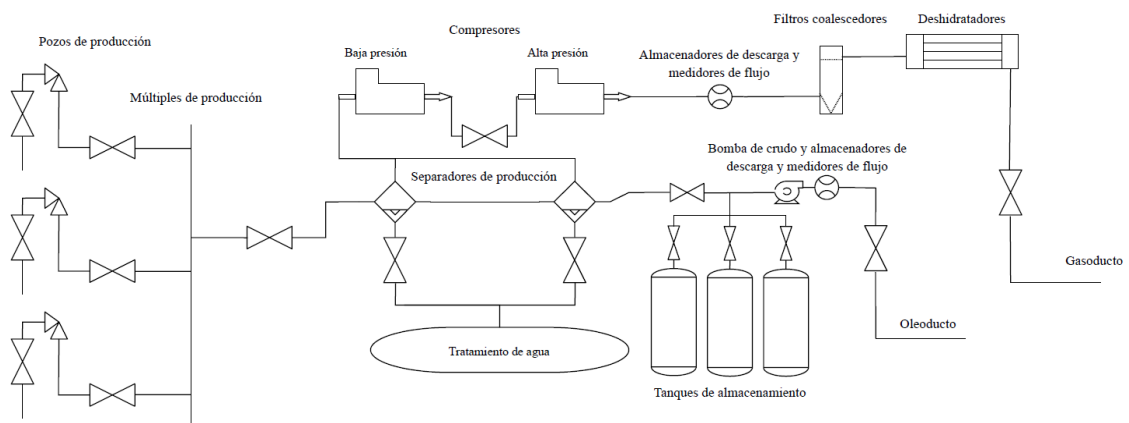


Figura 1. Esquema general de la producción de Petróleo & Gas, adaptado de (Devold, 2013).

A continuación, y en base a la Figura 1, se describen las unidades de proceso principales:

- **Pozos y múltiples de producción:** contemplan la etapa del proceso de producción donde se extrae el recurso carburífero desde el yacimiento hasta la superficie donde



se separan, transportan y acondicionan los recursos extraídos. A través de los múltiples, se canaliza la producción hacia la planta y el separador, donde se produce la separación bifásica de gas y de líquido.

- **Compresores:** una vez separada la producción, se distribuye por el múltiple de producción y prueba, hacia el equipo de compresión, para elevar su presión de acuerdo a los requerimientos de transporte.
- **Almacenador de descarga:** el gas que proviene de los compresores se distribuye en el almacenador o colector de descarga, redirigiendo el flujo a través de equipos medidores, y en última instancia, hacia los filtros coalescedores.
- **Filtros coalescedores:** son los dispositivos que remueven líquidos o aerosoles que puedan presentarse luego de las etapas de compresión en el flujo de gas. Se componen de elementos filtrantes, una sección colectora de líquido y una sección de eliminación o purga.
- **Deshidratadores:** la producción de gas proveniente de los filtros coalescedores, atraviesa el equipamiento de deshidratación con el objetivo de secar la producción y liberarla a la salida de la planta.
- **Sistema de drenaje a presión:** es un sistema formado por un recipiente (*blowcase*) que recibe líquidos a presión, provenientes de las etapas de compresión. En los *skids* de cada motocompresor, se cuenta con un *blowcase* que se conecta con el sistema de drenaje de la planta. Estos dispositivos colectan fluidos a baja presión provenientes de los separadores bifásicos (*scrubbers*). Cuando se alcanza el nivel seteado de líquido, una corriente de gas a alta presión libera los fluidos hacia los tanques almacenadores de desechos de la planta compresora.

Complementariamente, la planta cuenta con un sistema de venteo. Los separadores denominados *knock out drums*, separan el gas de venteo para ser quemado en la antorcha de la planta. Mientras que los líquidos son evacuados hacia el colector de drenaje.

---

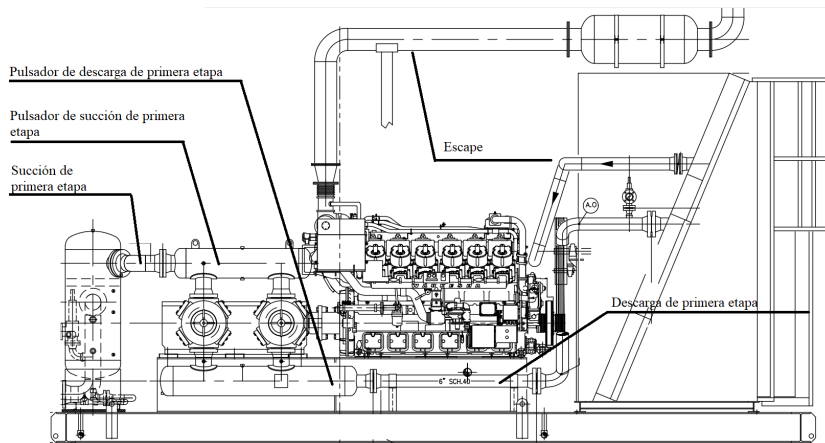
## 4.2. Equipo motocompresor

El equipo consiste de un conjunto paquetizado de un motor Waukesha acoplado con un compresor Ariel, con dos etapas de gas de proceso y una etapa de reciclo de gas, montado sobre un patín (*skid*).

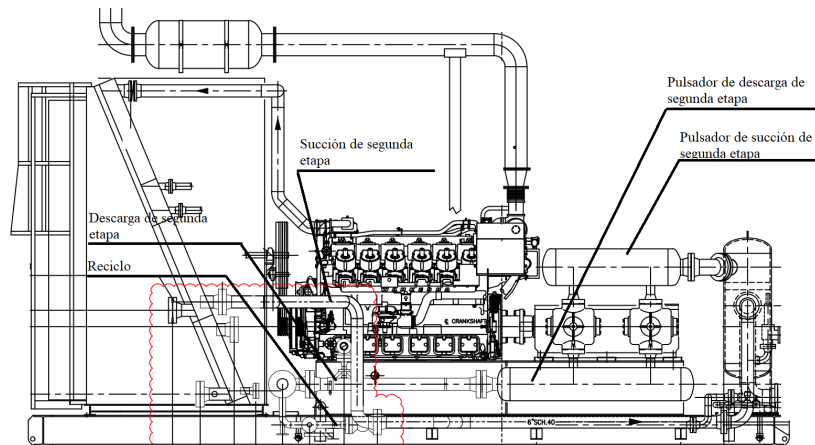
En la Figura 2, se exhibe un equipo motocompresor instalado en una locación. Mientras que en la Figura 3, se presentan las vistas del equipo motocompresor junto con los detalles de los componentes. A pedido del Comitente, se suprimieron las indicaciones de distancias y dimensiones generales. A continuación, se desarrollarán cada una de las unidades principales que incluyen: motor, compresor, intercambiador de calor, tratamiento de gas, transporte de gas, calentamiento del aceite y unidad de control.



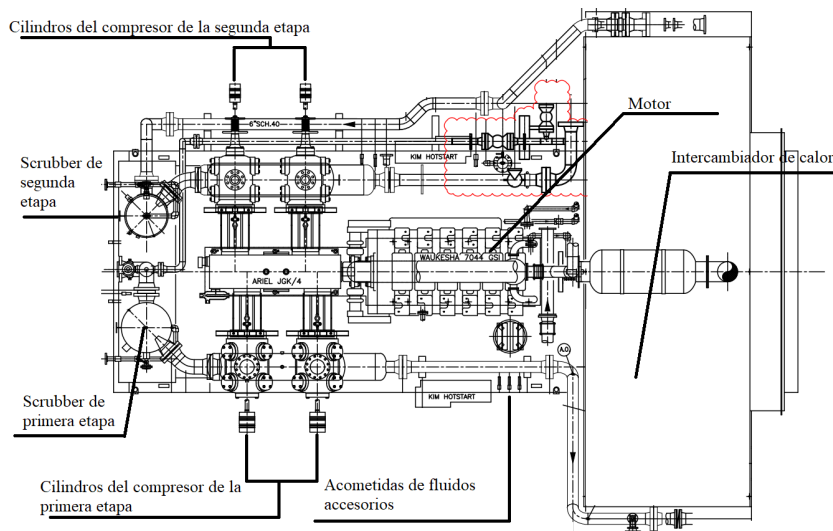
Figura 2. Equipo motocompresor.



(a) Vista lateral derecha.



(b) Vista lateral izquierda.



(c) Vista superior.

Figura 3. Vistas del motocompresor con sus componentes.

## Unidad motora

La unidad motora se trata de un motor de gas Waukesha L7044GSI con 12 cilindros en disposición en V, que funciona con una mezcla rica. Para aumentar la presión de entrada, la unidad cuenta con un turbocompresor que aumenta la capacidad de carga en el múltiple de admisión. En la Figura 4, se presenta la unidad motora.



Figura 4. Motor Waukesha L7044GSI.

Los motores de los equipos de compresión tienen las características indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Ficha técnica motor.

Motor Waukesha L7044GSI	
Cilindros	V12
Volumen desplazado	115L
Relación de compresión	8 : 1
Diámetro x Carrera	9,375 in x 8,5 in
Sistema de arranque	aire o gas a 90 – 150 psi
Potencia	1680 bhp

A continuación, se describen los componentes principales del motor:

- **Unidad de distribución:** es el componente que hace de nexo entre el interior del cilindro y el entorno, dónde se admite carga fresca y se expelen gases quemados.

Sus componentes principales son: las válvulas que permiten el ingreso y egreso de los gases durante el ciclo del motor, el botador que transmite el movimiento del árbol de levas al balancín, abriendo y cerrando las válvulas de admisión y de escape y, finalmente, la tapa de cilindros donde se aloja el sistema de válvulas de ingreso y egreso.

- **Unidad de encendido:** se encarga de llevar a cabo la ignición de la mezcla fresca contenida en el cilindro luego de la admisión. Se compone de una bujía, que genera la chispa, una bobina que aumenta la tensión de la bujía, el disco de sincronización que provee información sobre la secuencia de encendido de las bujías, y el módulo digital de encendido que recibe la información provista por el disco de sincronización y genera una descarga capacitiva en la bobina.
  - **Unidad turboalimentadora:** ubicada en la parte superior del motor, sobre la tapa de cilindros, utiliza la energía de los gases de escape para alimentar una turbina que aumenta la presión de los gases de admisión aumentando la *performance* y la capacidad de carga del motor. Tiene una válvula de descarga (tipo *wastegate*) que cumple la función de limitar la carga al desviar parte de los gases de escape a la descarga, en lugar de aprovecharlos para energizar la turbina. Por otro lado, el *intercooler* enfría el aire que ingresa al turbocargador, aumentando su densidad, lo que mejora el rendimiento global del motor.
  - **Unidad de alimentación de combustible:** se encarga de suministrar la mezcla de aire combustible requerida por el motor, en función del rango de carga en el que este funcionando. Cuenta con un carburador dotado de una mariposa, un regulador de velocidad, un sensor de oxígeno y finalmente el sistema de control de aire combustible, que controla la relación aire combustible y corrige las proporciones de la mezcla ([General Electric, 2017](#)).
  - **Unidad de control:** es el componente que hace las veces de cerebro de todos los componentes electrónicos que pertenecen al motor. Tiene la finalidad de mejorar la *performance*, disminuir la contaminación y aumentar el rango de trabajo útil del motor.
-

## Unidad compresora

La unidad compresora se trata de un compresor alternativo Ariel JGK 4 de 4 cilindros en disposición opuesta. Cada cilindro tiene tres válvulas de succión y una válvula de descarga. El compresor se encuentra acoplado al motor mediante un acoplamiento de engranajes. En la Figura 5, se presenta el *frame* y los distanciadores donde se acoplan los cilindros.



Figura 5. Compresor Ariel JGK4.

Las características principales de los compresores se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción parámetros del compresor.

Compresor Ariel JGK4	
Número de cilindros	4
Potencia nominal	1894 kW
RPM máximas	1200
Carrera	5 1/2 in

A continuación, se describen los componentes principales del compresor:

- Frame del compresor:** componente mecánico donde se aloja el cigüeñal y se conecta al *skid* del equipo motocompresor. Debe resistir todo el peso del cigüeñal sobre el alojamiento de los cojinetes.

- **Cilindro del compresor:** es el componente en el que se produce la compresión efectiva y, a su vez, hace de nexo entre la unidad compresora y la unidad de gas de proceso.
- **Pistones:** elemento mecánico acoplado entre el cigüeñal y el elemento compresor. Es el elemento que realiza la compresión efectiva del gas.
- **Aros del pistón:** cumplen la función de evitar fugas de gas, por los laterales del pistón, a medida que se produce la compresión.
- **Válvulas del compresor:** son los elementos del compresor que admiten y liberan el gas comprimido.

### Unidad intercambiadora de calor

La unidad intercambiadora de calor es la encargada de disminuir la temperatura, tanto del gas de proceso a medida que circula por el equipo motocompresor, como del agua utilizada para refrigerar el motor. Son intercambiadores de calor del tipo de tubo y aletas, enfriados por aire. Eliminan el calor del fluido en cuestión mediante un caudal de aire que atraviesa las aletas. En la Figura 6 se puede observar un intercambiador de calor típico utilizado en los equipos motocompresores.



Figura 6. Intercambiador de calor de tubo y aletas enfriado por aire.

Los intercambiador de calor enfriados por aire tienen la ventaja de no utilizar ningún fluido refrigerante adicional para llevar a cabo el enfriamiento. Los componentes principales del intercambiador son:

- **Ventilador:** dispositivo que mueve el caudal de aire.
- **Pleno:** espacio entre la batería de tubos y el ventilador para guiar el flujo de aire.
- **Batería de tubos:** tubos aletados dentro de los cuales circula el fluido a enfriar. En función de la etapa de la que se trate de enfriar, dentro de las baterías nombradas circula gas de proceso o agua refrigerante del motor.
- **Acople:** mecanismo que mueve el ventilador. El ventilador es accionado por un sistema de poleas vinculadas con el motor del equipo.
- **Soporte:** estructura sobre la que se encuentra el intercambiador.

### **Unidad de tratamiento de gas**

El gas proveniente de los separadores, ubicados en la planta de compresión, no se encuentra en el estado adecuado para ser comprimido en los motocompresores. Para evitar el deterioro acelerado de los pistones del compresor se colocan, en la entrada de cada etapa de compresión, recipientes a presión denominados *scrubbers*. La instalación de estos recipientes tiene una doble finalidad: limpiar de vapores y partículas de agua al gas de proceso, y eliminar partículas contaminantes que puedan ser liberadas a la atmósfera por los equipos.

El gas de proceso puede contener vapor de agua y otras partículas que tienen el potencial de dañar los cilindros de los compresores de gas. A su vez, en los tubos de los aroenfriadores, coalescen partículas de agua en las cañerías de proceso que deben ser eliminadas antes de que vuelvan a ingresar a la línea de compresión de gas. El principio de funcionamiento de un *scrubber* de gas, se basa en maximizar la cantidad de componentes gaseosos que pueden ser transformados en líquidos y retirados del caudal de gas. En la Figura 7 se expone un *scrubber* de primera etapa, ubicado en la entrada del equipo motocompresor.

---





Figura 7. *Scrubber* de primera etapa.

Los fluidos que se condensan en los *scrubbers* compresores, son almacenados en tanques denominados *blowcase*. Estos tanques almacenan fluidos a baja presión y, mediante un flujo de gas a presión más elevada, impulsan los fluidos hacia un sistema que opera a una presión más elevada sin la necesidad de utilizar una bomba (Exterran, 2015). Finalmente, los fluidos condensados son eliminados hacia un colector de líquidos de la planta compresora. En la Figura 8 se puede observar un *blowcase* de los equipos motocompresores.



Figura 8. *Blowcase* montado sobre *skid*.

## Unidad de transporte de gas

Todos los fluidos que circulan a través del equipo motocompresor de gas, se transportan dentro de conductos o cañerías (*piping*). Para los equipos motocompresores estudiados, el Comitente posee una clase de *piping* desarrollada con una ingeniería *ad hoc*, en la que se definen los diámetros y espesores requeridos para cada tipo de cañería y aplicación, según los requerimientos específicos dados en la normativa de aplicación.

## Líneas de gas de proceso

Son las cañerías que conducen el gas que es efectivamente comprimido. Las líneas de proceso se dividen según la etapa de compresión que se trate:

- **Succión de primera etapa:** se trata de una línea de 8 pulgadas *schedule* estándar que conecta al *scrubber* de primera etapa con el pulsador de succión, mediante bridas de la serie 300.
- **Descarga de primera etapa:** son las cañerías que conectan el pulsador de descarga de primera etapa con el *intercooler*. Se conforma con líneas de 6 pulgadas *schedule* estándar y conexiones bridadas de la serie 600.
- **Succión de segunda etapa:** son las cañerías que conectan al *intercooler* con el *scrubber* de segunda etapa. Este último se instala para remover los líquidos que puedan haber condensado en el intercambiador de calor. Para esta línea, se especifican los mismos componentes detallados para la línea de descarga de primera etapa.
- **Descarga de segunda etapa:** es la línea que conecta al equipo motocompresor hacia el suministro. Se conforma con una línea de 6 pulgadas *schedule* 160 y bridas de la serie 900.

## Línea de recirculación de gas

La línea de recirculación de gas es una cañería que conecta la descarga de la segunda etapa con el *scrubber* de primera etapa. La operación del sistema contempla la instalación

---

de dos válvulas de paso: una de comando manual y otra accionada de forma neumática. La finalidad de esta línea es regular la presión del gas de entrada al *scrubber* de primera etapa, cuando las presiones de salida de la segunda etapa sean menores a las establecidas.

En la Figura 9 se indica en amarillo la cañería de recirculación y la válvula de comando manual. La línea se conforma con tubería de 3 pulgadas *schedule* 160 y conexiones bridadas de la serie 900.



(a) Válvula de paso.

(b) Línea de recirculación.

Figura 9. Línea de recirculación, válvulas y acometidas.

### Líneas de fluidos accesorios

Estas líneas transportan los fluidos que no forman parte del proceso de compresión. Se fabrican con accesorios de 1,5 o 2 in en función del tipo de fluido, adoptándose cañerías *schedule* estándar y conexiones roscadas. Entre los fluidos considerados se encuentran:

- Aceite (lubricación del motor y compresor).
- Agua (refrigerante del motor).
- Aire (comanda las válvulas y los sensores).
- Gas (arranque del motor).

### Unidad calentadora de aceite

Los equipos motocompresores cuentan con equipos calentadores de aceite, tanto para los compresores como en los motores. Estos equipos se denominan comercialmente

Hotstart®. Tienen como finalidad calentar el aceite de lubricación previo al arranque, para aumentar la disponibilidad del equipo asegurando que los niveles de viscosidad sean los adecuados para su funcionamiento. La lubricación forzada y continua de aceite con viscosidad controlada, reduce el desgaste de componentes móviles y con ello la necesidad de mantenimiento. En la Figura 10 se presenta la disposición de los calentadores sobre el equipo motocompresor.



(a) Motor.

(b) Compresor.

Figura 10. Ubicación de los Hotstart® en el equipo motocompresor.

### Unidad amortiguadora de pulsaciones

Debido a que los compresores utilizados en los equipos son del tipo alternativo, se generan fluctuaciones de presión en la succión y la descarga de cada cilindro. Esta fluctuación genera picos de tensión y fatiga de alto ciclo en las cañerías de transporte del gas de proceso (Warzynska y Kollek, 2018).

La geometría de cada botellón amortiguador de pulsaciones es función de varios parámetros: la ubicación en el equipo, la presión y el rango de temperaturas de trabajo, y la velocidad de giro del compresor. Las conexiones quedan definidas según la ubicación del recipiente en la línea de proceso. En la Figura 11 se observa el botellón amortiguador de pulsaciones de la succión de la primer etapa, montado sobre el compresor.



Figura 11. Botellón amortiguador de pulsaciones de primera etapa de succión.

### Unidad de control

En este apartado, se describen brevemente los diversos sensores empleados en el proceso de instrumentación, los cuales son conectados a un Controlador Lógico Programable (PLC). Tienen como finalidad mensurar los parámetros operativos o emitir alertas durante la operación del motocompresor. En el Anexo I (A), se indica la ubicación de los siguientes sensores:

- Sensores PT: utilizados para medir presiones en medios líquidos o gaseosos. Transforman la señal de presión en una señal de tensión analógica.
- Sensores SS: miden la velocidad de giro del motor y compresor, emitiendo una señal de tensión mediante una medición magnética.
- Sensores VSHH: son sensores que se utilizan para medir las vibraciones. Se localizan en tres componentes: el *frame* del compresor, el *frame* del motor y en el *frame* del ventilador. Recopilan información sobre las vibraciones a las que se encuentran sujetos los componentes rotacionales. A partir del análisis de la información se pueden detectar fallas y anticipar las intervenciones requeridas, para restablecer su normal funcionamiento, antes de que se produzca la rotura del equipo.
- Sensor PY: se encuentra vinculado entre la válvula de reciclo y el PLC. Cuando la presión de descarga supera cierto valor, el PLC envía una señal que abre la válvula de reciclo y el gas a alta presión es desviado de la línea de descarga hacia la entrada del *scrubber* de primera etapa del equipo.

- Sensores LSSL y LSHH: son sensores de nivel con entrada digital. En los *scrubbers* se instalan dos, estando el primero colocado a una distancia por debajo del segundo. Miden el nivel de líquidos condensados.
- Sensores FSL: contienen un pistón neumático que se desplaza indicando aumento o reducción del flujo de gas.
- Sensores TE: son sensores de temperatura.

### 4.3. Normativa de aplicación

La fabricación de componentes para la industria del petróleo requiere el cumplimiento de diversos estándares internacionales, que definen los lineamientos de diseño, seguridad y aplicabilidad de los mismos durante el servicio.

Para este caso de estudio, se toma como referencia la recomendación de aplicación de normas y directrices desarrolladas por el foro europeo para compresores recíprocos (<https://www.recip.org/>), que cubre los requisitos mínimos para el diseño, fabricación, seguridad, monitoreo de condición, instalación, inspección y reparación. Incluyendo también el equipamiento auxiliar necesario, como ser: refrigeradores de agua y gas, silenciador de escape, equipo de control de emisiones, filtro de aire de entrada, *scrubbers*, panel de control, tuberías, entre otros. Los lineamientos dados intentan cubrir los requerimientos para instalar una unidad, de conformidad con las especificaciones de compra y con un mínimo de operaciones de instalación en su locación.

Específicamente, en relación a recipientes a presión, se refiere al Código ASME ([ASME, 2021](#)). La Sección VIII División 1 y 2 del código contienen todo lo concerniente al diseño, la fabricación y el correspondiente control. A su vez, también hacen referencia a las fuentes de consulta sobre aspectos específicos tales como Materiales, Soldaduras y Ensayos No Destructivos, a los que denomina Códigos de Referencia. Estos son: Sección II - Materiales, Sección V - Ensayos No Destructivos y Sección IX - Calificación de Soldaduras, los que también deben ser cumplidos por los Fabricantes en la medida que el Código de Construcción refiera a determinado requerimiento y remita al Código de Referencia correspondiente. Si bien, en la gran mayoría de los casos se diseña y fabrica bajo la Sección VIII División 1 (diseño por fórmula), también se dispone de la División

---

2: Reglas Alternativas que permite el diseño por análisis de tensiones, resultando muy necesaria para el cálculo de grandes recipientes, espesores gruesos de pared, condiciones de servicio severas, entre otras.

El Comitente debe informar al Contratista (Fabricante) sus requisitos operativos (presión y temperatura), tipo y características del fluido, capacidad volumétrica, forma de sustentación, limitaciones dimensionales del lugar de emplazamiento y cualquier otra característica particular que deba ser considerada. Si se cuenta con un anteproyecto previo, podrá incluir también la especificación del material constructivo, tipo de cabezales, accesorios operativos y de inspección, nivel del control de soldaduras, terminación superficial, tolerancia por corrosión, entre otros.

El Contratista, que es el único responsable del cumplimiento de todos los requisitos establecidos por la Norma, y previo a la ejecución, deberá verificar la viabilidad de todos los requerimientos solicitados, determinar el procedimiento y forma de realizar las soldaduras, la inspección considerada para las mismas, definir la tolerancia por corrosión aconsejable, calcular todos los espesores requeridos por las partes a presión para las condiciones de servicio y, finalmente, constatar la disponibilidad en el mercado de los materiales que se tiene previsto utilizar en la fabricación.

El Contratista siempre debe tratar de seleccionar materiales que puedan ser calificables bajo Código ASME. Deberá además, detallar tipo y forma constructiva de los cabezales, determinar el tratamiento térmico (en los casos que corresponda), las características y dimensiones requeridas para los accesorios soldados y toda otra información que pueda resultar necesaria para una correcta definición y evaluación del suministro a realizar.

Cuando el Comitente proporcione la Ingeniería Básica, especificando los espesores requeridos, el Contratista se limitará a verificar que los espesores de cálculo (adicionada la tolerancia por corrosión) no superen los valores solicitados, ya que ésta es una responsabilidad de la que nunca podrá ser eximido, aunque los cálculos hayan sido entregados por el Comitente.

Una vez acordada la provisión del recipiente, y previo a la iniciación de su construcción, el Contratista deberá presentar al Comitente la siguiente documentación:

- Memoria descriptiva del recipiente indicando los datos básicos de diseño.
-

- Plano constructivo en formato IRAM.
- Memorias de cálculo de envolvente, cabezales y demás componentes que en cada caso corresponda incluir.
- Lista de materiales.
- Registro de calificación del/los procedimiento(s) de soldadura, avalados por Inspector Nivelado.
- Certificado de calificación de habilidad de los Soldadores/Operadores.
- Programa de Fabricación y Plan de Inspecciones previsto para el control de fabricación.
- Certificado de provisión de las chapas ó, en su defecto, de Laboratorio reconocido que certifique la calidad de la chapa a utilizar.
- Registros del control de fabricación.

Complementariamente, el código [ASME B31 \(2018\)](#) define los requisitos mínimos para garantizar la seguridad en diseño, materiales, fabricación, verificación, inspección, operación y mantenimiento de tuberías a presión. Se compone de siete secciones y cada una de ellas se orienta a describir los requisitos para un tipo de tubería. Estas siete secciones son:

- ASME-B31.1: Tuberías de potencia para la industria termoeléctrica.
  - ASME-B31.2: Tuberías para gas combustible incluidas las de gas natural, GLP (gas licuado del petróleo).
  - ASME-B31.3: Tuberías para plantas químicas y refinerías de petróleo.
  - ASME-B31.4: Sistema de transporte de petróleo líquido por tubería.
  - ASME-B31.5: Tuberías de refrigeración que trabaja a  $T < -196\text{ °C}$  ( $-320\text{ °F}$ ).
  - ASME-B31.8: Sistemas de tuberías de distribución y transmisión de gas.
-



- ASME-B31.9: Tuberías al servicio de fábricas, industrias, comercio y unidades multifamiliares.

A continuación, y a modo de resumen, se mencionan algunos de los contenidos que el código incluye como parte de los requerimientos:

- Define una serie de condiciones de diseño que se deben observar en torno a asuntos como la presión, temperatura mínima, temperatura de diseño, en componentes sin aislación y tuberías aisladas externa e internamente.
  - Entre los criterios de diseño, se deberán observar elementos como el ratio presión-temperatura para componentes de tubería, los ratios en condición normal de operación y tolerancia para variación respecto de la operación normal, los ratios en transiciones, las tensiones admisibles, y otros límites, y los sobreespesores.
  - Especifica asimismo requisitos para el diseño por presión para tubos rectos bajo presión interna, bajo presión externa, curvados y piezas compuestas, conexiones en derivación, cierres o tapas, presión de diseño de bridas y placas ciegas, reducciones y otros componentes.
  - Aplica criterios para componentes y sus requerimientos de fluido.
  - Se enfoca en la flexibilidad y soporte que las tuberías a presión serán capaces de proporcionar.
  - Detalla las condiciones de los materiales a utilizar.
  - Incluye los métodos de ensayo y criterios de aceptación, inspección y examinación.
-

#### 4.4. Metodología de proyecto

Un proyecto es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único. La naturaleza temporal de los proyectos indica un principio y un final definidos. El final se alcanza cuando se logran los objetivos del proyecto o cuando se termina el proyecto porque sus objetivos no se cumplirán o no pueden ser cumplidos, o cuando ya no existe la necesidad que dio origen al proyecto. Temporal no necesariamente significa de corta duración. En general, esta cualidad no se aplica al producto, servicio o resultado creado por el proyecto; la mayor parte de los proyectos se emprenden para crear un resultado duradero. Aunque puede haber elementos repetitivos en algunos entregables del proyecto, esta repetición no altera la unicidad fundamental del trabajo del proyecto (PMBOK®, 2008).

Un esfuerzo de trabajo permanente es por lo general un proceso repetitivo, puesto que sigue los procedimientos existentes de una organización. En contraposición, debido a la naturaleza única de los proyectos, puede existir incertidumbre respecto de los productos, servicios o resultados que el proyecto genera. Las tareas del proyecto pueden ser nuevas para el equipo del proyecto, lo que hace necesario planificar con mayor dedicación que si se tratara de un trabajo de rutina. Además, los proyectos se llevan a cabo en todos los niveles de una organización. Un proyecto puede involucrar a una sola persona, una sola unidad o múltiples unidades dentro de la organización.

La dirección de proyectos es la aplicación de conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas a las actividades del proyecto para cumplir con los requisitos del mismo. Se logra mediante la aplicación e integración adecuadas de los diversos procesos de la dirección de proyectos agrupados lógicamente, que conforman los cinco grupos de procesos. Estos grupos de procesos se definen a continuación:

1. Inicio.
  2. Planificación.
  3. Ejecución.
  4. Seguimiento y Control.
  5. Cierre.
-

En la Figura 12, se presenta un diagrama de flujo en el que se detalla la metodología proyectual definida para este trabajo.

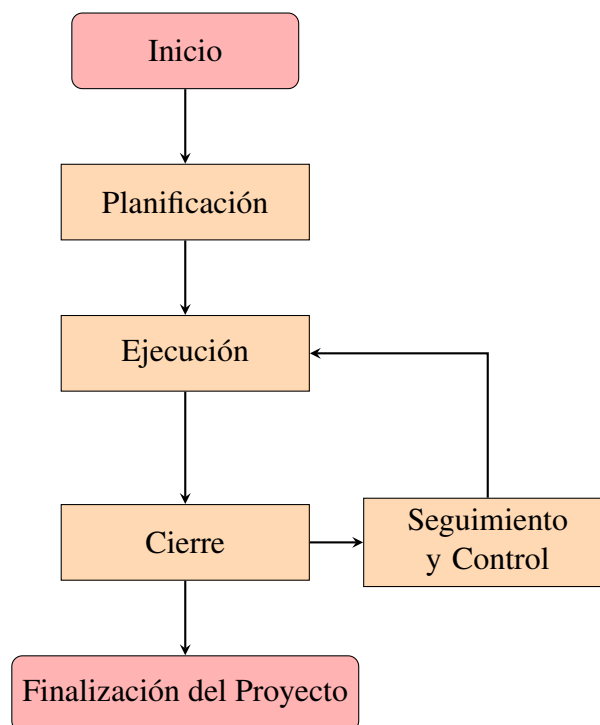


Figura 12. Metodología proyectual, adaptada de [PMBOK® \(2008\)](#).

A continuación, se desarrollan cada uno de los grupos de procesos definidos previamente, haciéndose referencia a las herramientas específicas propuestas para su aplicación en cada etapa del proyecto.

#### 4.4.1. Inicio

Este grupo se compone por aquellos procesos realizados para definir un nuevo proyecto o una nueva fase de un proyecto ya existente, mediante la obtención de la autorización para comenzar dicho proyecto o fase. Dentro de los procesos incluidos en esta etapa, se define el alcance inicial y se comprometen los recursos financieros iniciales. En la Figura 13 se presenta un mapa conceptual del proceso de inicio del proyecto.

Además, se identifican los interesados internos y externos (*stakeholders*) que van a interactuar y ejercer alguna influencia sobre el resultado global del proyecto. Finalmente, si aún no fue nombrado, se selecciona el director del proyecto.

Un proceso importante en la planeación estratégica es el diagnóstico estratégico, a

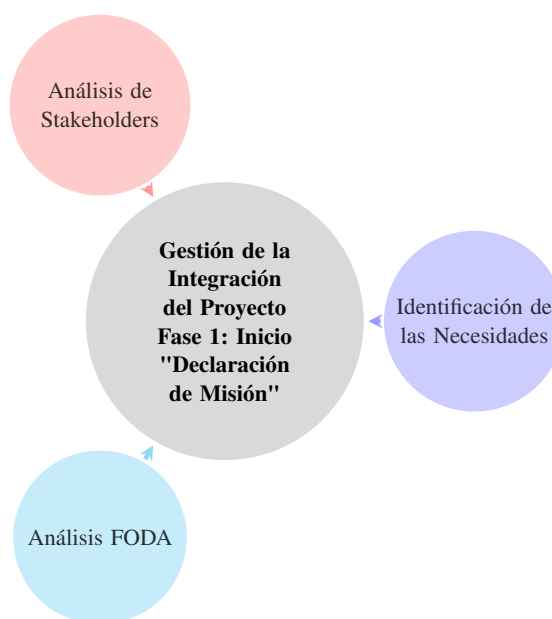


Figura 13. Mapa conceptual del Proceso de Inicio, adaptado de [PMBOK® \(2008\)](#).

través del Análisis FODA, que consiste en realizar una evaluación interna (fortalezas y debilidades) y externa (amenazas y oportunidades), según las siguientes consideraciones:

- **Fortalezas:** son las capacidades especiales con que cuenta la empresa, y que definen una posición privilegiada frente a la competencia. Recursos que se controlan, capacidades y habilidades que se poseen, actividades que se desarrollan positivamente, entre otros.
- **Oportunidades:** son aquellos factores que resultan positivos, favorables, explotables, que se deben descubrir en el entorno en el que actúa la empresa, y que permiten obtener ventajas competitivas.
- **Debilidades:** son aquellos factores que provocan una posición desfavorable frente a la competencia, recursos de los que se carece, habilidades que no se poseen, actividades que no se desarrollan positivamente, entre otros.
- **Amenazas:** son aquellas situaciones que provienen del entorno y que pueden llegar a atentar incluso contra la permanencia de la organización.

Esta información se plasma en el acta de constitución del proyecto y registro de interesados. Cuando el acta de constitución del proyecto recibe aprobación, el proyecto se considera autorizado oficialmente.

En definitiva, se pretende en esta fase definir la Declaración de Misión, donde se va a especificar cuál es el objetivo del proyecto tanto a nivel económico como de necesidades a satisfacer, además de plantear las suposiciones y restricciones a las que estará sujeto.

#### **4.4.2. Planificación**

La fase de Planificación está compuesta por los procesos realizados para establecer el alcance total del esfuerzo, definir y refinar los objetivos, y desarrollar la línea de acción requerida para alcanzar dichos objetivos. Los procesos de planificación desarrollan el plan para la dirección del proyecto y los documentos del proyecto que se utilizarán para llevarlo a cabo. La naturaleza de enfoque múltiple de la dirección de proyectos genera ciclos de retroalimentación repetidos. A medida que se recopilan o se comprenden más características o información sobre el proyecto, puede ser necesaria una mayor planificación. Los cambios importantes que ocurren a lo largo del ciclo de vida del proyecto generan la necesidad de reconsiderar uno o más de los procesos de planificación y, posiblemente, algunos de los procesos de iniciación.

Estadísticamente, los proyectos exitosos son aquellos que asignan mayor cantidad de recursos en la etapa de planificación. Si un proyecto enfoca sus esfuerzos en determinar que recursos serán requeridos, qué entregables son entregados a quién en cada etapa del proyecto, qué canales de diálogo serán establecidos entre partes interesadas y la dirección de proyecto y en determinar el alcance del proyecto, tiene más probabilidades de salvar los inconvenientes antes de que se presenten, brindando un marco de previsibilidad y capacidad de contención. En la Figura 14 se presenta el mapa conceptual con los procesos considerados en la fase de planificación.

Para aumentar el grado de previsibilidad, el ingeniero de proyectos establece un plan de trabajo. Para generarlo de forma gráfica comúnmente se utilizan los denominados diagramas de Gantt. Esta herramienta visual proporciona información sobre las actividades que se ejecutan durante el proyecto, su duración, sus relaciones y las fechas estimadas, tanto de inicio como de finalización (Gerald y Lechter, 2012).

En particular, mediante la aplicación de esta herramienta:

- Se establece un itemizado inicial aproximado de las tareas a realizar, de forma consecutiva.
-



Figura 14. Mapa conceptual del Proceso de Planificación, adaptado de **PMBOK® (2008)**.

- Se implementa un diagrama de flujo y se estudia su mejora.
- Si es necesario, del diagrama de flujo se desarrolla un diagrama analítico o de ruta.
- Se desarrolla una tabla de recursos, donde se consideran los costos directos de cada uno según corresponda, por hora o por unidad. Esta tabla se diseña con todos los datos que se crean necesarios contar.
- Se elabora una tabla con los costos indirectos, los cuales se cotizan por la unidad que corresponda.

- A partir del diagrama de flujo, se elabora el diseño de actividades ya pensando en la simultaneidad, en los tiempos estimados de cada tarea, y en los recursos necesarios para asignar a la misma para que esta pueda llevarse a cabo.

La planificación propuesta permite conocer qué tareas resultan críticas durante la ejecución del proyecto, y que grado de atraso o adelanto pueden tener. Para lograr tal fin, se aplica el método del camino crítico, que es un algoritmo para la planificación de proyectos en los que están involucradas un serie de fases, cada una con una duración determinada y con un cierto orden de ejecución que es necesario respetar. La metodología se inscribe dentro de la categoría de técnicas de optimización gráficas.

El resultado que ofrece el algoritmo es el camino crítico, es decir la sucesión de fases que bajo ningún concepto se pueden demorar en el tiempo, ya que ello implicaría un retraso en la ejecución del proyecto completo. También nos permite detectar aquellas tareas con holguras en el tiempo, esto es, fases del proyecto que admiten cierto retraso sin que ello afecte al tiempo de ejecución del proyecto en su conjunto (Mubarak, 2015).

Los cambios en el cronograma a menudo conducen a un aumento en la probabilidad de que se generen sobrecostos y retrasos en el proyecto (Cheng y col., 2020). Es de interés poder analizar la relación existente entre la gestión de riesgos y la gestión del cronograma en el proyecto, estudiando la influencia del plan de riesgo sobre la planeación, ejecución y monitoreo del cronograma de actividades.

Un riesgo es un evento o condición incierta que, si sucede, tiene un efecto en por lo menos uno de los objetivos del proyecto. Los objetivos pueden incluir el alcance, el cronograma, el costo y la calidad. Un riesgo puede tener una o más causas y, si sucede, uno o más impactos. Una causa puede ser un requisito, un supuesto, una restricción o una condición que crea la posibilidad de consecuencias tanto negativas como positivas.

Los riesgos del proyecto tienen su origen en la incertidumbre que está presente en todos los proyectos. Los riesgos conocidos son aquéllos que han sido identificados y analizados, lo que hace posible planificar respuestas para tales riesgos. Los riesgos desconocidos específicos no pueden gestionarse de manera proactiva, lo que sugiere que el equipo del proyecto debe crear un plan de contingencia. Un riesgo del proyecto, que ha ocurrido, también puede considerarse un problema.

En este trabajo, se utiliza la definición de riesgo dada en la Norma ISO-9001 (2015).

---

El nivel de riesgo ( $R$ ) es una función que se compone de la probabilidad de que un evento ocurra ( $P$ ), multiplicada por sus consecuencias en la actividad a la que afecta. Es decir,  $R = P \cdot C$ .

Para evaluar el riesgo, según la propuesta de [Baloi \(2012\)](#), se deben analizar las tareas individualmente y clasificar los riesgos considerados en el proyecto de la siguiente forma:

- **Riesgos específicos de la organización:** asignados a actores propios de la organización. Se establecen como riesgos considerables los relacionados con los siguientes items:
    - Disponibilidad de los materiales requeridos.
    - Naturaleza de las tareas a realizar.
    - Utilización de las herramientas requeridas y sus paradas, ya sea por mantenimiento preventivo o por fallas, lo que genera falta de disponibilidad del herramienta.
    - Gestión de los recursos por parte de la gerencia.
    - Administración de las finanzas por parte de la gerencia.
    - Estimaciones preliminares, en caso de que las mismas sean erróneas, el avance del proyecto puede detenerse.
  
  - **Riesgos globales.** Son riesgos de carácter político o macroeconómico, de competencia externa, de la situación social actual. Se los engloba en las siguientes categorías:
    - Económicos: son aquellos generados por las variaciones de precios y/o la falta de materia prima importada.
    - Políticos: relacionados con la situación política y el enfoque del gobierno de turno.
    - Competencia externa: generado por otras empresas que se sitúan en la zona y participan de los procesos licitatorios.
-



- **Riesgos inesperados:** son aquellos en los que ningún actor puede tomar recaudos para afrontarlos. Representan hechos extremos causados por la naturaleza y suelen ser imposibles de predecir.

En esta fase, también se debe contemplar una buena comunicación que resulta ser un componente esencial del éxito de la gestión del proyecto. Esto significa transmitir la información adecuada, a la parte adecuada, en el momento adecuado y en el formato adecuado. Para ello, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Determinar las necesidades y métodos de información.
  - La dirección del proyecto debe establecer los canales de comunicación determinando quién se comunica con quién y qué información puede recibir cada uno. El número formal de las líneas de comunicación dependerá de la estructura del equipo.
  - Los métodos utilizados para compartir información pueden variar de una empresa a otra o de un proyecto a otro.
  - Entre los factores que pueden afectar al proyecto influyen:
    - La urgencia de la necesidad de información.
    - La disponibilidad de la tecnología.
    - El personal previsto para el proyecto.
    - La duración del proyecto.
    - El entorno del proyecto.
  - Poner la información al alcance de los interesados.
  - El emisor es el responsable de que la información sea clara y completa.
  - Responder a las peticiones inesperadas de información.
  - No escatimar recursos.
  - Los métodos de distribución deben permitir recopilar, compartir y distribuir la información durante todo el ciclo de vida del proyecto.
-

El Project Management Institute (PMI) determina en su cuerpo de conocimiento, que el informe de rendimiento (o reportes de desempeño) es el instrumento que resume la situación de las actividades que se llevan a cabo para alcanzar el trabajo previsto en el cronograma del proyecto. Estos reportes apoyan el proceso de dirección y gestión de la ejecución del proyecto, y deben ser elaborados para recolectar y distribuir la situación y medición del avance, incluyendo información con respecto a: situación de los productos entregables (solicitudes de cambio, acciones correctivas, acciones preventivas, reparación de defectos), estimaciones hasta la conclusión (porcentaje del trabajo físicamente terminado), y el valor de medidas técnicas alcanzadas (fechas de inicio y finalización de las actividades del cronograma) (PMBOK®, 2008).

Para estimar con precisión los tiempos requeridos para realizar cada una de las actividades establecidas en el proyecto, se utilizan Indicadores Clave de Rendimiento (KPIs, por sus siglas en inglés) que brindan datos sobre tiempos para tomar decisiones sobre la duración de las actividades a realizar (Villazon y col., 2012). Los KPIs se establecen mediante la cronometrización de tareas, el análisis de la duración de tareas anteriormente realizadas o mediante estimación en conjunto con los operarios y supervisores de las actividades. Estos indicadores tienen la finalidad de poder enfocar los esfuerzos de planificación y los recursos en las tareas que lo requieran y poder estimar la duración particular de cada actividad y la duración total del proyecto, contemplando la calidad y los costos asociados (ver Figura 15).

---

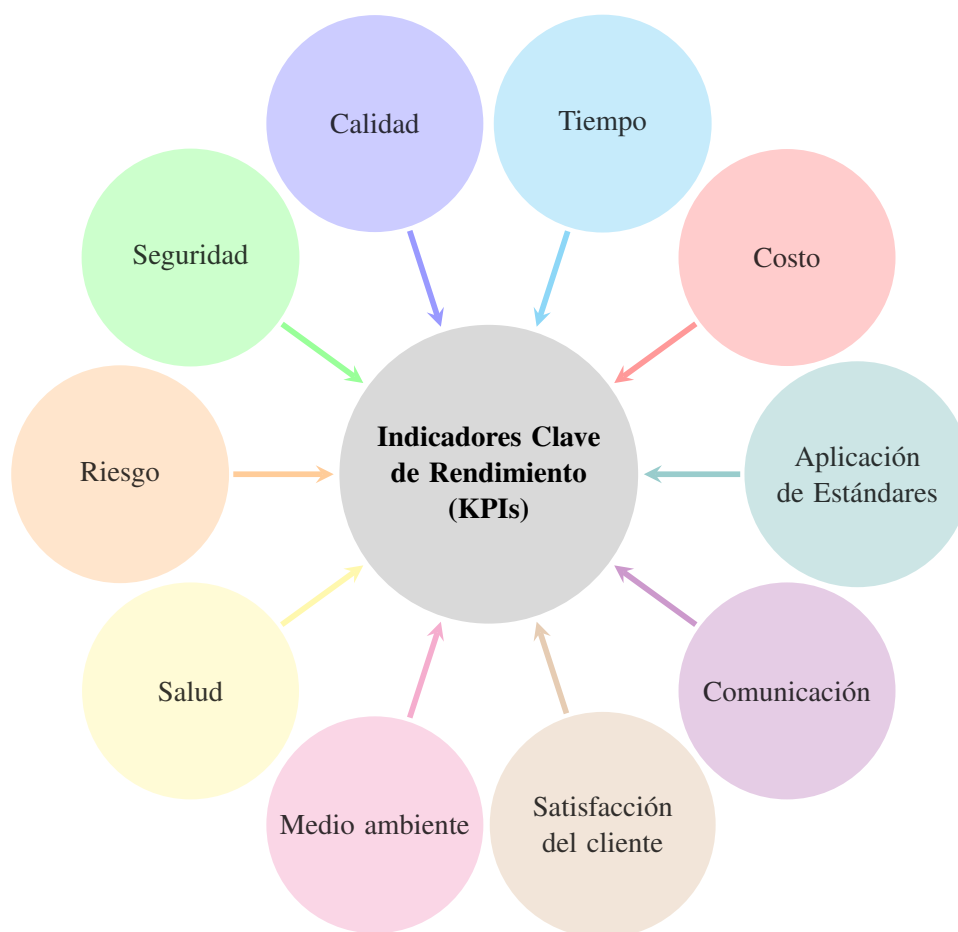


Figura 15. Mapa conceptual de Indicadores Clave de Rendimiento (KPIs).

#### 4.4.3. Ejecución

La fase de ejecución se compone por los procesos realizados y requeridos, definidos en la planificación del proyecto, para cumplir con las especificaciones del mismo. Es necesario coordinar personas y recursos, integrando actividades y tiempos para garantizar la completación del proyecto. Durante la ejecución del proyecto, los resultados pueden requerir que se actualice la planificación y que se vuelva a establecer la línea base. Esto puede incluir cambios en la duración prevista de las actividades, cambios en la disponibilidad y productividad de recursos, así como en los riesgos no anticipados. Tales variaciones pueden afectar el plan para la dirección del proyecto o los documentos del proyecto, y pueden requerir un análisis detallado y el desarrollo de respuestas de dirección de proyectos apropiadas. Se observa en la Figura 16 el esquema para la Fase de Ejecución.



Figura 16. Mapa conceptual del Proceso de Ejecución, adaptado de [PMBOK® \(2008\)](#).

#### 4.4.4. Seguimiento y Control

La fase de Seguimiento y Control está compuesta por aquellos procesos requeridos para monitorear, analizar y regular el progreso y el desempeño del proyecto, para identificar áreas en las que el plan requiera cambios y para iniciar los cambios correspondientes (ver Figura 17). El beneficio clave de este grupo de procesos radica en que el desempeño del proyecto se observa y se mide de manera sistemática y regular.

Este seguimiento continuo proporciona al equipo del proyecto conocimientos sobre el estado del proyecto y permite identificar las áreas que requieren más atención. Además de monitorear y controlar el trabajo que se está realizando dentro de un grupo de proceso,

este grupo también monitorea y controla la totalidad del esfuerzo del proyecto.

Para llevar a cabo los procesos involucrados, se utilizan diversos criterios y métodos, basados en la normativa de aplicación, requerimientos del Comitente o en criterios propios del Contratista.



Figura 17. Mapa conceptual del Proceso de Seguimiento y Control, adaptado de [PM-BOK® \(2008\)](#).

#### 4.4.5. Cierre

Una vez concluidos los pasos antes descritos, se procede con la Fase de Cierre, la cual consiste en finalizar todas las actividades para completar formalmente el proyecto (ver Figura 18). Si el proyecto se considera formalmente cerrado, se brindan al Comitente los entregables establecidos y se verifican las tareas realizadas para plantear mejoras en proyectos futuros.

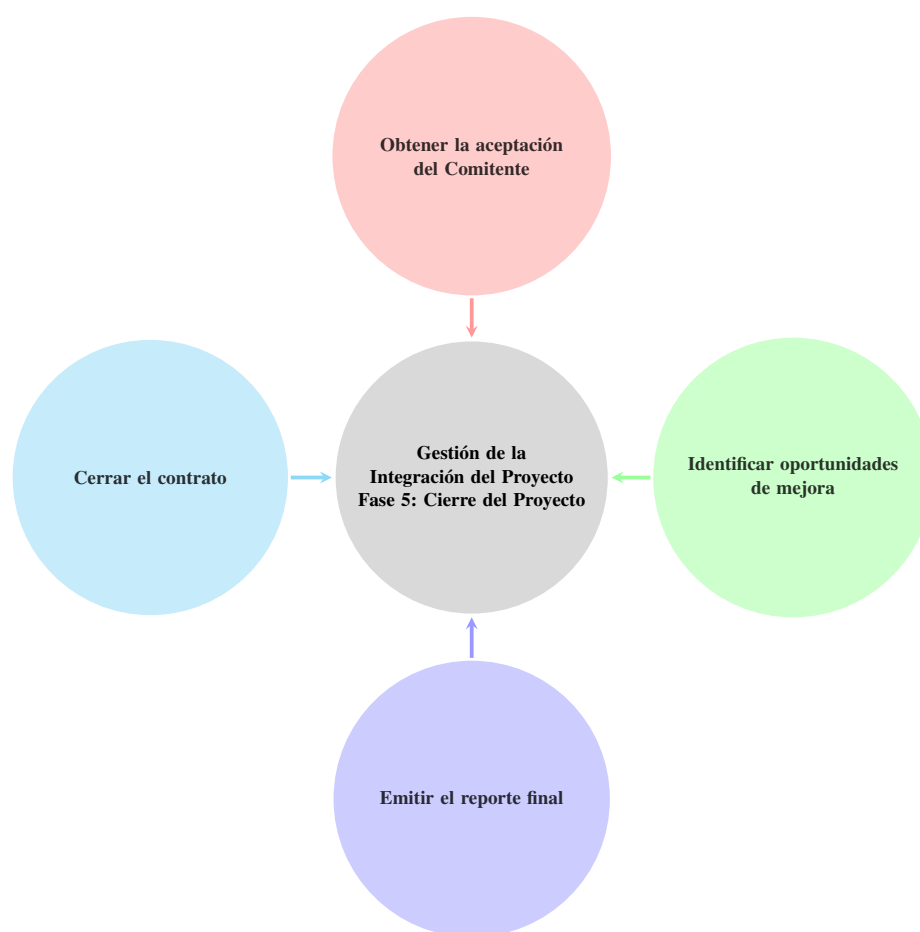


Figura 18. Mapa conceptual del Proceso de Cierre, adaptado de [PMBOK® \(2008\)](#).

## 5. DESARROLLO

En esta sección se describe el desarrollo del trabajo a partir de la metodología de proyecto propuesta.

### 5.1. Inicio

Tal como se mencionó anteriormente, el Contratista participó de un proceso licitatorio, iniciado por el Comitente, que tenía como objeto llevar a cabo una actualización (*revamp*) de una batería de equipos motocompresores de gas.

En dicha convocatoria se cursó la invitación a diversas empresas de la zona para que participen de una visita de obra, previo a la presentación de ofertas. En la Figura 19 se presenta una imagen de uno de los equipos motocompresores relevados durante la visita a la planta de compresión de gas.



Figura 19. Equipo motocompresor en la base, previo a su traslado.

En la reunión de trabajo mantenida se brindaron detalles de los equipos y de los requerimientos específicos, analizándose los siguientes documentos:

- Objeto de los trabajos a realizar.

- Bases y condiciones contractuales.
- Requisitos que deben cumplir las instalaciones del Contratista.
- Descripción general y detallada de los trabajos a realizar.
- Planos de detalle de los motocompresores, incluyendo las vistas en planta y los diagramas isométricos de las líneas de *piping*.
- Detalle de la información documentada requerida, en cada una de las etapas, por el Comitente.
- Plazo de entrega y modalidad de certificación de los avances parciales y entrega final.

En particular, se informó que el equipo funcionaba con una presión de entrada de 150 psi y una presión de salida de 600 psi sin recirculación. La actualización propuesta pretende aumentar la presión de entrada a 300 psi y la de salida a 900 psi. A tal fin, el proyecto contempla la incorporación de una línea de recirculación que conecte la descarga de la segunda etapa con la succión de la primera etapa, aumentando de esta manera la eficiencia al reducirse el trabajo requerido por cilindro.

Para realizar la presentación de la oferta, en concordancia con los requisitos especificados en el pliego de bases y condiciones, el Contratista analizó la documentación técnica. En base a este análisis, el sector de Proyectos de Ingeniería, pudo valorizar los costos asociados al proyecto, contemplando: requerimientos de materiales, insumos, logística, depreciación de maquinarias y horas hombre asignadas. Los valores obtenidos fueron volcados en una planilla de cómputo, itemizando cada tarea según lo especificado por el Comitente.

Luego de la presentación de la oferta, y el análisis de factibilidad por parte del Comitente, se adjudicó el proyecto al Contratista dándose inicio al mismo.

#### **5.1.1. Análisis de Stakeholders**

Se analizaron los actores que participan directamente del proyecto, que se ven afectados por la ejecución del mismo y que son considerados necesarios para su culminación. A

---



partir del análisis realizado (ver Figura 20) se puede comprender que es lo que cada una de las partes espera del proyecto.



Figura 20. Análisis de *stakeholders*.

### 5.1.2. Análisis FODA

En este apartado, se realizó el análisis FODA que brinda a la gerencia y al ingeniero de proyectos conocimiento sobre la posición de la empresa en el contexto socio económico actual. Para llevar a cabo el análisis FODA el ingeniero de proyectos requiere conocimiento sobre las capacidades productiva, económica, técnica y del personal de la empresa. En la Figura 21, se presenta la matriz con el análisis realizado.

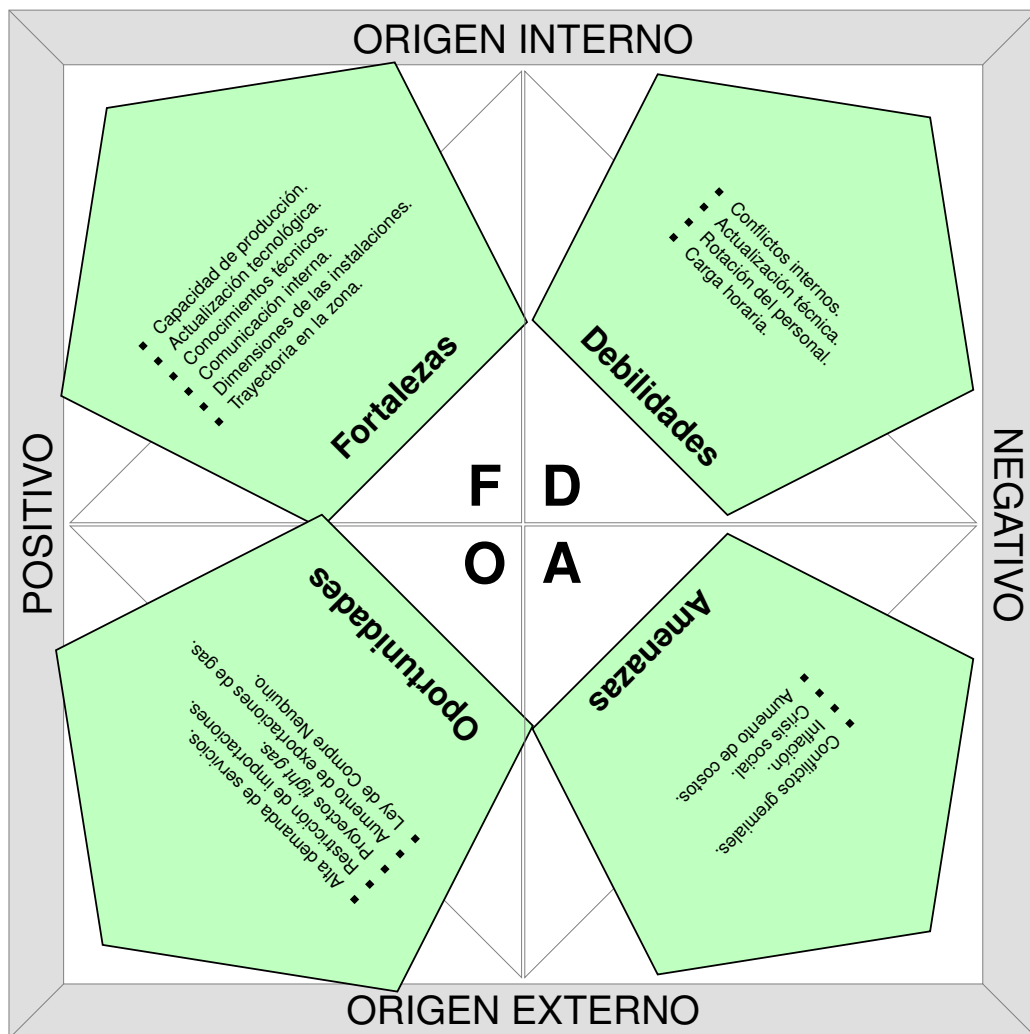


Figura 21. Matriz FODA.

A partir del análisis desarrollado, se establece una estrategia conservadora y previsiva para desarrollar el proyecto. La estrategia se caracteriza por lo siguiente:

- Se adquiere un excedente de materias primas para trabajar con *stock* de protección. De esta manera se reducen los tiempos de espera, y se evita detener los trabajos por falta de materias primas.
- Se verifican los planos técnicos brindados por el Comitente en la iniciación del proyecto para evitar contratiempos durante la ejecución.
- Se establecen grupos de aprendizaje que relevarán la información sobre los trabajos que se desconocen, para tener la capacidad de resolverlos sin un tercero en el futuro.

- Se trata con la gerencia de la empresa para aumentar el presupuesto y las horas trabajadas durante los momentos pico de trabajo del proyecto para cumplir o mejorar los plazos de entrega propuestos por el Comitente.

### **5.1.3. Declaración de Misión**

En base al análisis realizado en el apartado anterior, a continuación, se establece la Declaración de Misión del proyecto cuyos considerandos guiarán la ejecución del mismo:

#### **Título del Proyecto:**

- *Revamping* de un Equipo Motocompresor de Gas.

#### **Descripción del Proyecto:**

- Efectuar un *revamp* en un equipo motocompresor de gas, utilizando metodologías específicas y normativas de aplicación para el desarrollo del proyecto, dando cumplimiento efectivo a los requerimientos del Comitente.

#### **Propuesta de Valor del Proyecto:**

La empresa Contratista, mediante la fabricación de sus productos y prestación de sus servicios, busca en forma permanente la plena satisfacción de sus clientes. Siendo su objetivo principal optimizar la operación de sus clientes y disminuir los tiempos ociosos fabricando productos en tiempo y forma de acuerdo a lo programado. Esta premisa, es una responsabilidad de toda la organización, siendo el marco referencial tendiente a mantener un proceso de mejora permanente, por ello y en tal sentido se establecen los siguientes principios:

- Implementar y mejorar continuamente el Sistema de Gestión de Calidad, desde cada puesto de trabajo y función, de manera tal de obtener productos y servicios de excelencia.
  - Mantener una permanente comunicación con los clientes, medir su nivel de satisfacción y establecer relaciones de mutuo beneficio, que aseguren competitividad y rentabilidad al negocio.
-

- Generar relaciones confiables a largo plazo con los proveedores.
- Revisar, difundir y garantizar la aplicación de esta Política en toda la organización.

**Demandante:**

- Empresa del sector hidrocarburífero que opera en la Cuenca Neuquina.

**Involucrados:**

En este apartado, se identifican los diversos actores, que participan directamente del proyecto y que se ven afectados durante la ejecución de las diversas etapas, y que son considerados necesarios para la culminación del mismo. A continuación, se detallan cuáles son sus expectativas asociadas al desarrollo del proyecto:

## 1. Comitente:

- Obtener un producto que cumpla con las especificaciones técnicas (incluyendo los estándares de calidad y requerimientos normativos).
- Fortalecer las cadenas de valor entre las partes involucradas.
- Reducir los costos asociados a este tipo de proyectos.

## 2. Contratista:

- Adquirir el *know-how* para este tipo de proyectos.
  - Desarrollar el equipo de trabajo, a través del apoyo y capacitación a los empleados para que puedan hacer un trabajo de mayor impacto.
  - Reducir los costos asociados a este tipo de proyectos.
-

## 5.2. Planificación

El Comitente requiere que el *revamp* del equipo motocompresor de gas, sea realizado en un plazo no mayor a 61 días. En este sentido, establece la realización de certificaciones semanales de avances para mensurar el grado de completación del proyecto y que se utilicen correos electrónicos para efectuar la comunicación entre las partes.

### 5.2.1. Gestión de los Recursos Humanos

En la Figura 22, se presenta el organigrama del equipo de trabajo de la empresa Contratista.

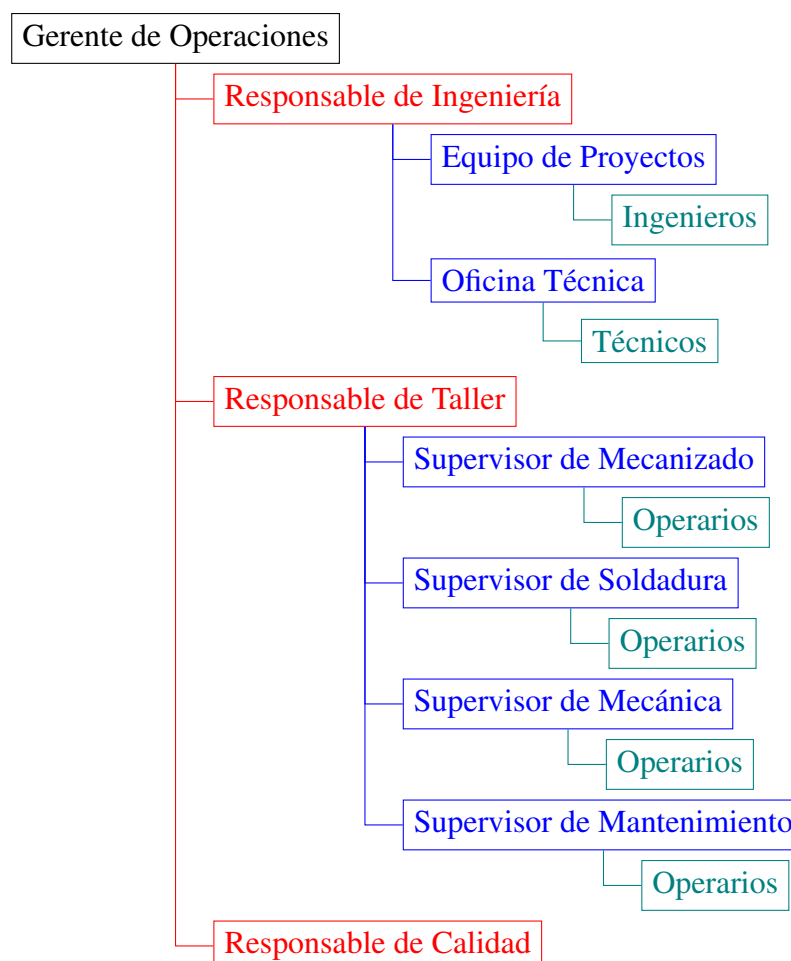


Figura 22. Organigrama de la Empresa Contratista.

La planificación del proyecto queda a cargo del Equipo de Proyectos. El análisis y elaboración de la documentación técnica del proyecto lo realiza la Oficina Técnica, quien

además brinda soporte en el seguimiento y control. Para una adecuada coordinación de las diversas actividades se establece un canal de comunicación entre los responsables de Ingeniería, Taller y Calidad que reportan directamente al Gerente de Operaciones.

En la ejecución del proyecto cobra real importancia la asignación de personal bajo la supervisión de cada sector del Taller . Cada supervisor tiene a cargo un grupo de operarios quienes efectúan las tareas que se demanden, en particular dada las características del proyecto se decide reforzar el grupo de mecánica (2 supervisores y 8 operarios) y el grupo de soldadura (2 supervisores y 6 operarios).

### **5.2.2. Definición de las actividades generales**

Se enumeran a continuación el alcance de las actividades a realizar por el Contratista, según especifica el pliego técnico. En las secciones siguientes se describen más detalladamente cada una de las mismas:

1. Recepción del equipo en el predio del Contratista.
  2. Limpieza general, previo a la ejecución de los trabajos.
  3. Desmontaje de cañerías, accesorios, líneas de proceso, instrumentación, entre otras.
  4. Modificación de los botellones de pulsaciones. Contempla el reemplazo de las bridas del *scrubber* y del botellón de descarga de segunda etapa, se incluye la elaboración de la documentación técnica a nivel de ingeniería de detalle.
  5. Adecuación de las líneas de *piping*. Se contemplan intervenciones en las líneas de descarga de primera y segunda etapa de succión, se incluye la elaboración de la documentación técnica a nivel de ingeniería de detalle.
  6. Incorporación de una conexión para la recirculación de gas en la descarga de la segunda etapa.
  7. Montaje de tres botellones de pulsaciones (succión y descarga de primera etapa, y descarga de segunda etapa).
  8. Fabricación y montaje de soportes y conexiones de *piping*.
-

9. Modificación del *skid* (rigidización de la estructura mediante la incorporación de hormigón tipo H21).
10. Fabricación y reemplazo de placas orificio.
11. Modificación de las cañerías de proceso del *aftercooler*.
12. Desconexión y calibración de las válvulas de seguridad (PSV).
13. Limpieza del *skid* y equipo.
14. Aplicación de recubrimiento sobre *skid* y equipo.
15. Montaje final de motocompresor y accesorios.
16. Controles finales y puesta en marcha del equipo (a cargo del Comitente). Para esta actividad, el Contratista debe garantizar la provisión de los recursos necesarios.

### 5.2.3. Definición de las actividades específicas

En esta sección se detalla el alcance y la duración de las actividades específicas necesarias para llevar a cabo el *revamp*, según el siguiente detalle:

1. **Soldadura:** para realizar las soldaduras, deben prepararse las uniones, biselando los extremos. A su vez se calculan las pulgadas de soldadura cómo sigue:
  - **Cañerías de proceso:** se calculan las pulgadas lineales de soldadura en función del diámetro de la cañería.
  - **Refuerzos:** se calcula la cantidad de soldaduras de refuerzo, cómo las pulgadas lineales requeridas para soldar la base de los refuerzos del *pipng*.
  - **Ventanas de inspección:** se obtienen las pulgadas de soldadura cómo la longitud lineal de cordón de soldadura de la ventana realizada sobre la superficie del *skid*.

Una vez establecidas las cantidades de soldaduras requeridas para el *revamp* del equipo motocompresor, se toman cómo referencia los rendimientos de soldadura obtenidos en proyectos anteriores. En promedio, un soldador puede realizar 30 pulgadas diarias de soldadura.

---

2. **Instrumentación:** los trabajos requeridos son realizados por un proveedor externo. Se efectúa la construcción de canalizaciones para la vinculación de los instrumentos al sistema de control. Los instrumentos se montan, cablean, acometen y conectan. Se identifica cada conexión que se realiza con el tablero de control y según los planos de proceso. En total, se tienen que realizar 32 conexiones al PLC que comanda la operación del motocompresor. Se estima que con un equipo de 4 personas, se pueden realizar en promedio 2.5 conexiones por día, considerando que las condiciones climáticas le permiten al equipo de instrumentación trabajar en los equipos al aire libre.
  3. **Inspecciones radiográficas:** una pieza fabricada o reparada requiere el marcado, traslado al lugar de inspección, solicitud de inspección y liberar el área de inspección para evitar la exposición a radiación perjudicial para la salud. En función de las condiciones climáticas, un inspector de soldadura puede inspeccionar en promedio 100 pulgadas de soldadura al día.
  4. **Pruebas hidrostáticas:** se requiere el marcado, traslado de las piezas al lugar de prueba, preparación de equipos, desarme de equipos, ejecución de la prueba, traslado de piezas al sector de montaje y elaboración del informe. En función de la duración de la prueba hidrostática y del tamaño del componente a ensayar, se determina que se tiene la capacidad de realizar hasta 4 pruebas hidrostáticas por día.
  5. **Limpieza:** según el pliego de especificaciones técnicas, para superficies de piezas nuevas se debe realizar limpieza por arenado, mientras que para superficies ya pintadas se deben realizar dos etapas de limpieza (primero limpieza con agua a presión mediante hidrolavadora y finalmente limpieza con un tensioactivo del tipo Biosolve® o Ecosolve®). En función del grado de limpieza con la que el equipo llega a la base del Contratista, pueden variar los tiempos requeridos para completar las tareas.
  6. **Montajes y desmontajes:** se consideran todas las tareas relacionadas con el ajuste, apriete, alineamiento de componentes, traslado, posicionamiento, entre otras. Estas actividades requieren en promedio de dos personas, una que se encargue de manejar el autoelevador y otra que se encargue de realizar las operaciones demandadas. En
-



promedio, se pueden montar o desmontar hasta 4 piezas grandes por día, en función de las condiciones climáticas y la cantidad de operarios disponibles. Este valor varía en función del tamaño y la disposición en el equipo.

7. **Calibración de válvulas de seguridad:** esta tarea es realizada por un proveedor externo. Las presiones se establecen en función de las especificaciones técnicas e información del proceso provistas por el Comitente. En el Anexo I (A) se puede consultar la ubicación de las válvulas.
8. **Pintura:** los requerimientos específicos de recubrimiento se establecen en función del estado de la pieza al momento de la ejecución del trabajo según el siguiente detalle:
  - Para piezas nuevas: una vez arenada la pieza, se debe realizar una imprimación o primera mano, en base epoxi con una rugosidad de 80 a 90  $\mu\text{m}$ .
  - Para piezas que ya presentan una capa de pintura, luego de la limpieza, realizar la pintura con poliuretano auto imprimante con una rugosidad de 120 a 150  $\mu\text{m}$ .

Se debe prestar especial atención al momento de realizar las tareas de pintura en relación con las condiciones ambientales (humedad y partículas en suspensión).

9. **Adaptación de skid:** la estructura se debe rellenar con hormigón H21, con la finalidad de brindar rigidez estructural al patín del equipo y reducir la fatiga, al disminuir las vibraciones resultantes en los componentes, efecto del funcionamiento del motor y el compresor. Para cementar un equipo, se requiere de un día de trabajo.
  10. **Mantenimiento del motor y compresor:** se utiliza la parada del equipo para realizar mantenimiento programado a los componentes rotativos. El Comitente especifica en el pliego que las actividades de mantenimiento deben ser realizadas por personal propio en el predio del Contratista y con la disposición de algunas herramientas, cómo ser autoelevadores, instrumentos de medición o hidrogrúas. Se debe garantizar la alineación entre el compresor y el motor. Para poder realizar las tareas de mantenimiento correspondientes, se deja en locación uno de los dos elementos, con la finalidad de no perder los centros y las alineaciones.
-

En particular, en relación a esta última actividad, el Comitente define la siguiente secuencia de pasos para realizar las tareas requeridas:

1. Se desacopla el motor impulsor, primero del compresor, y luego de la bancada.
2. Se retira al motor de la bancada del motocompresor y se coloca sobre un remolque que lo traslada a la base del Comitente donde son realizadas las tareas de *overhaul-ing*.
3. Se reemplaza el motor en servicio por un motor nuevo listo para funcionar.
4. Una vez retirado el motor, se desarman los cilindros del compresor, dejando el *frame* y el cigüeñal liberados.
5. Se realiza el reemplazo de los cilindros por cilindros nuevos.
6. Se entrega un motor nuevo a la base del Contratista, para montarlo sobre la bancada. De esta manera, se utiliza de guía para las alineaciones el cigüeñal del compresor que todavía no fue retirado.
7. Una vez montado el motor, se realizan mediciones en el túnel del cigüeñal. Se presta especial atención a los espesores del marco y a los patines donde se ubican los cojinetes. Se sigue un plan de medición y comparación con estándares propios para determinar la aptitud de cada componente al servicio (Ben-Daya y col., 2009). Una vez preparados los cilindros y el cigüeñal del compresor, el Comitente vuelve a montar los componentes sobre el *frame* del compresor, utilizando cómo guía el motor que ya estaba montado, garantizando así la alineación requerida.
8. Finalmente, se cierra el *frame* del compresor, se monta y se ajusta el acoplamiento del motor y compresor.

Dada la multiplicidad de tareas y la complejidad asociada a las mismas, se requiere una adecuada coordinación entre el Comitente, el Contratista y los Proveedores Externos.

En esta etapa también se realizó el análisis de riesgo de las tareas asociadas al proyecto con el objetivo de identificar las fuentes de riesgo que pueden generar amenazas de pérdidas o impedimentos para alcanzar los objetivos propuestos (ver Anexo C).

---

#### 5.2.4. Estimación de recursos

A partir de las actividades definidas en las secciones anteriores se desarrolló la estimación de los recursos requeridos para la completación del proyecto. Para presentar la propuesta económica al Comitente, se realizó la siguiente distinción de los costos asociados al proyecto:

- **Costos directos:** son aquellos necesarios para la realización del proyecto e inciden directamente en la ejecución del proyecto y en su valorización.
  - Costos de herramientas e insumos: requeridos para cubrir la utilización de los distintos consumibles utilizados durante la ejecución del proyecto.
  - Costos de labor: involucran a los sectores operativos. Son establecidos mediante acuerdos sindicales y se miden por hora de trabajo.
  - Adquisición de materia prima: aquellos costos relacionados con los materiales requeridos para la ejecución del proyecto.
- **Costos indirectos:** son los requeridos para el funcionamiento diario de la compañía.
  - Costos de licitación: son aquellos costos abordados, para llevar a cabo la licitación. Involucra las visitas de campo y los tiempos consumidos para el análisis de planos e ingeniería.
  - Costos generales: relacionados con la administración, instalaciones y el personal no operativo que involucra la empresa Contratista.

Una vez nombrados los costos que deben ser afrontados por la empresa para la ejecución del proyecto, se genera la valorización del mismo, incluyendo la ganancia y descuento, que se ven directamente reflejados en el precio final del proyecto.

En la Figura 23 involucrando los costos totales, sin ganancia ni el descuento, con la finalidad de mostrar la estructura de costos de la licitación presentada al Comitente.

---

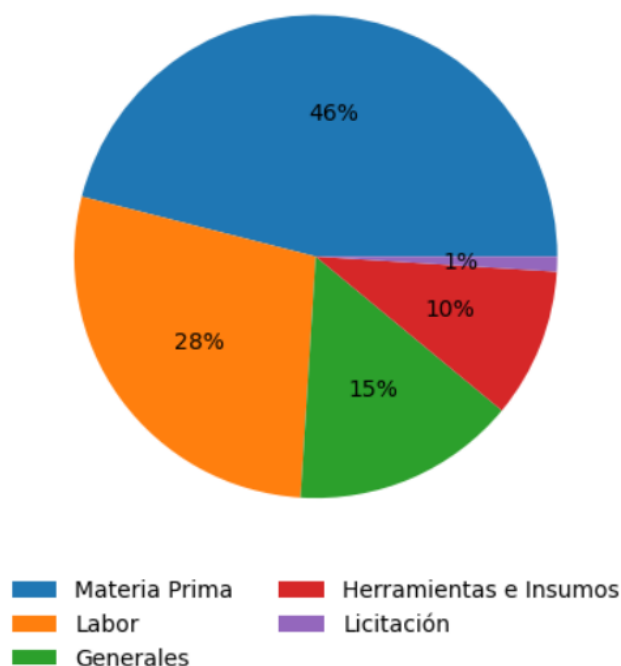


Figura 23. Costos obtenidos durante la valorización del proyecto.

### 5.2.5. Cronograma del Proyecto

A partir del conjunto de actividades estimadas en las secciones anteriores se desarrolló un diagrama de Gantt para presentar el cronograma del proyecto. El diagrama se realizó con la herramienta MS Project® y se puede consultar en el Anexo I (A). Este plan fue presentado oportunamente al Comitente para obtener su aprobación.

A continuación, y a modo de resumen, se analiza la incidencia que tiene la ejecución de cada una de las tareas principales en el tiempo total asignado al proyecto. A partir de la agrupación de tareas se obtiene el gráfico que se presenta en la Figura 24.

En base al análisis realizado, se pudo visualizar cuáles son las tareas que tienen mayor duración y criticidad, y que por ello requieren especial atención a la hora de asignar los recursos, para evitar que los plazos se alarguen y provoquen un retraso en la fecha de finalización del proyecto. Por lo expuesto, se observó que las tareas que mayor incidencia tienen en relación con el tiempo total del proyecto son:

- Trabajos de instrumentación y conexión (29 %).
- Tareas de soldadura (18 %).
- Pruebas hidráulicas (16 %).

- Tareas de montaje y desmontaje (11 %).
- Mantenimientos del motor y compresor (11 %).

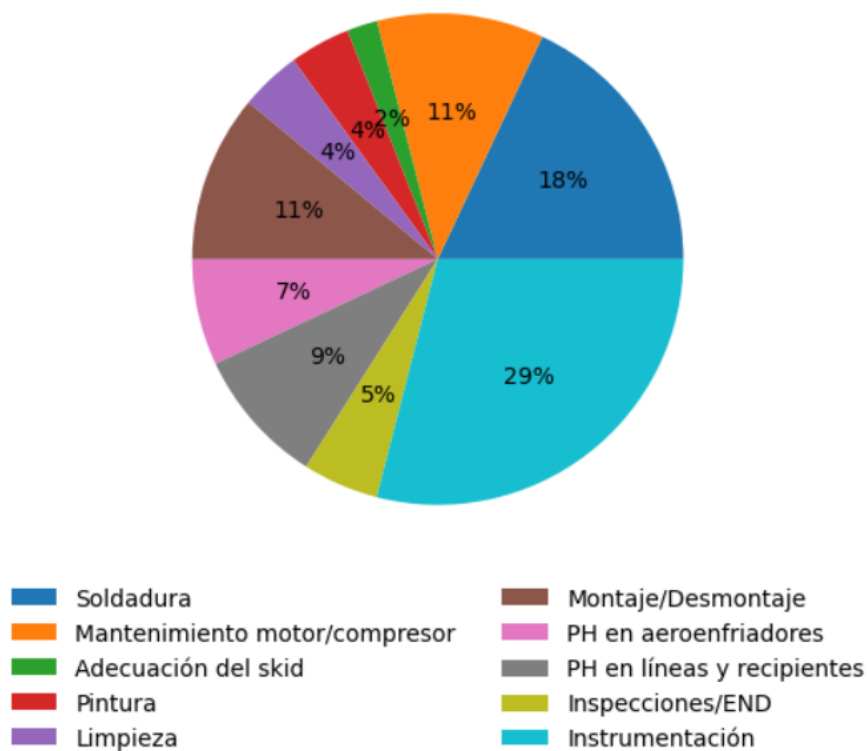


Figura 24. Incidencia de las tareas agrupadas por tipo en relación con el tiempo total asignado al proyecto.

En particular, las actividades de instrumentación y colocación de sensores en el equipo pueden generar, a priori, cuellos de botella en la ejecución del proyecto y conforman el camino crítico. Estas cuestiones debieron ser atendidas, a lo largo de la ejecución del proyecto, de manera de garantizar el orden y facilitar el seguimiento de las actividades con el objetivo de certificar satisfactoriamente los avances del proyecto.

### 5.3. Ejecución

En este apartado se desarrollan las tareas realizadas durante la ejecución del proyecto, una vez adjudicada la licitación.

#### 5.3.1. Recepción del equipo

Las operaciones comienzan con la llegada, a la base de operaciones del Contratista, del equipo motocompresor y del aeroenfriador según se puede observar en la Figura 25.



(a) Motocompresor.

(b) Aeroenfriador.

Figura 25. Recepción del equipo en la base del Contratista.

La recepción del equipo incluyó: las operaciones de descarga, posicionamiento en el sector asignado y montaje del aeroenfriador sobre el patín. La totalidad de las tareas involucradas se desarrollaron en una jornada de trabajo. En la Figura 26 se presenta la disposición final del equipo, en la base del Contratista, previo a su intervención.

Posteriormente, se retiraron las líneas de proceso, los pulsadores y las conexiones de instrumentación. Una vez que todos los accesorios fueron removidos, personal especializado designado por el Comitente realizó el desmontaje del motor y del compresor. En particular, el motor fue trasladado a la base del Comitente donde se realizó un reacondicionamiento completo (*overhaul*). Cabe mencionar, que el Comitente posee un adecuado nivel de *stock* de piezas de recambio y motores reacondicionados, con lo que se evitan atrasos durante el *revamp*.



Figura 26. Equipo montado en la base del Contratista.

En este caso, se suministró inmediatamente un motor reacondicionado, el cual fue montado sobre el patín previo al retiro del compresor con el objetivo de evitar desalineamientos entre ambos componentes. Finalmente, el compresor se desmontó para realizar las tareas programadas oportunamente. El total de las actividades detalladas demandaron un total de cuatro días. En la Figura 27 se observan algunas de las tareas comprendidas dentro del desmontaje del motor y del compresor.

Cabe mencionar que todas las tareas asociadas al montaje del motor y el compresor fueron realizadas por el Comitente.



(a) Motor.

(b) Compresor.

Figura 27. Desmontaje del equipo.

### 5.3.2. Overhaul del compresor

Dentro de los controles recomendados, el fabricante del compresor especifica realizar mediciones de paralelismo en las bancadas de los cigüeñales durante las tareas de mantenimiento periódico. A tal fin, se utiliza el método de medición con láser y objetivo para medir las desalineaciones entre las distintas bancadas de los cojinetes del cigüeñal del compresor. Se coloca el láser en la pista portacojinetes externa y el objetivo en la pista portacojinetes más alejada (ver Figura 28). La ubicación de los puntos de medición se indican en la Figura 29. Las mediciones fueron realizadas por el Comitente y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.



Figura 28. Control dimensional del túnel cigüeñal del compresor.

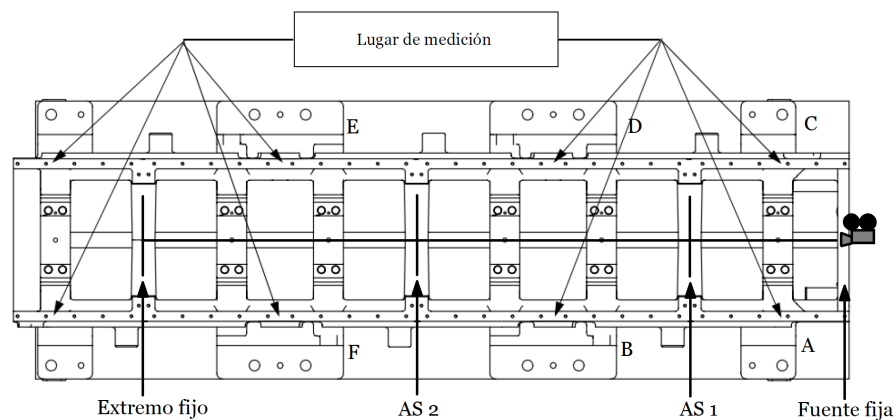


Figura 29. Indicación de la ubicación de los puntos de medición sobre el *frame* del compresor (Ariel, 2016).



Tabla 3. Resultados de medición dimensional de túnel cigüeñal de compresor.

Punto de medición	Dirección horizontal [mm]	Dirección vertical [mm]	Resultado
Fuente fija	0	0	Verifica
AS 1	0,008	0,011	Verifica
AS 2	0,017	0,015	Verifica
Extremo fijo	0	0	Verifica

Del análisis de los resultados, se consideró innecesario realizar algún tipo de acción correctiva sobre los alojamientos portacojinetes debido a que los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de valores admisibles según los estándares definidos por el Comitente (se considera aceptable, tanto en la dirección horizontal como en la vertical, una desalineación máxima de 0,05 mm).

Complementariamente, el fabricante del compresor recomienda medir el paralelismo en el *frame* del compresor. A tal efecto, se utilizó una escuadra digital en los puntos de medición indicados en la Figura 29. En la Tabla 4 se presentan los registros de las mediciones. Según lo especificado, la medición entre dos cazoletas adyacentes no debe exceder 0.15 mm, por lo que se observa una desviación mayor a la admisible según datos del fabricante. Es importante mencionar que el procedimiento de medición proporcionado por el Fabricante no detalla claramente la forma en la que se deben realizar las mediciones, por lo que optó por seguir las buenas prácticas adoptadas por el Comitente en base a su experiencia.

Tabla 4. Resultados de medición de paralelismo entre el frame del compresor y la bancada.

Lugar de medición	Valor medido (mm)	Resultado
A	0.26	No verifica A
B	0.04	Verifica B
C	0.24	No verifica C
D	0.05	Verifica D
E	0.06	Verifica E
F	0.06	Verifica F

Como medida correctiva se decide reemplazar el polímero (*growth*) sobre el que se monta el compresor. El mismo tiene la función de sostener el compresor, hacer de nexo entre la bancada del patín y los pernos que lo sujetan al *frame*, y amortiguar las vibraciones generadas durante su funcionamiento. Debido a que se trata de un material sensible a vibraciones y a la radiación solar, se tomaron los recaudos especificados por el fabricante

durante el proceso de secado. En este sentido, durante la instalación del nuevo *growth* no se realizó ningún tipo de trabajo que pudiese inducir vibraciones en la estructura del patín. En la Figura 30 se muestra el proceso de remoción e instalación del *growth*.



(a) Remoción de *growth*. (b) *Growth* colocado y secado.

Figura 30. Remoción y colocación de *growth*.

### 5.3.3. Adecuación del *skid*

Una vez finalizado el reemplazo del *growth*, se libera el equipo para realizar la cementación la cuál se lleva a cabo según se observa en la Figura 31. Esta actividad requiere de media jornada de trabajo en conjunto entre personal del Contratista y personal de la empresa proveedora del cemento.



Figura 31. Colocación de cemento en patín.

### 5.3.4. Memoria de cálculo

#### Botellón de descarga de segunda etapa

Dentro de las modificaciones especificadas, en el botellón amortiguador de pulsaciones de la segunda etapa de descarga, se requiere una nueva configuración geométrica para el niple que conecta la brida de la línea de descarga y la de recirculación (según se observa en la Figura 32). En la Tabla 5 se detalla la información de diseño, parámetros geométricos y de funcionamiento proporcionados por el Comitente.

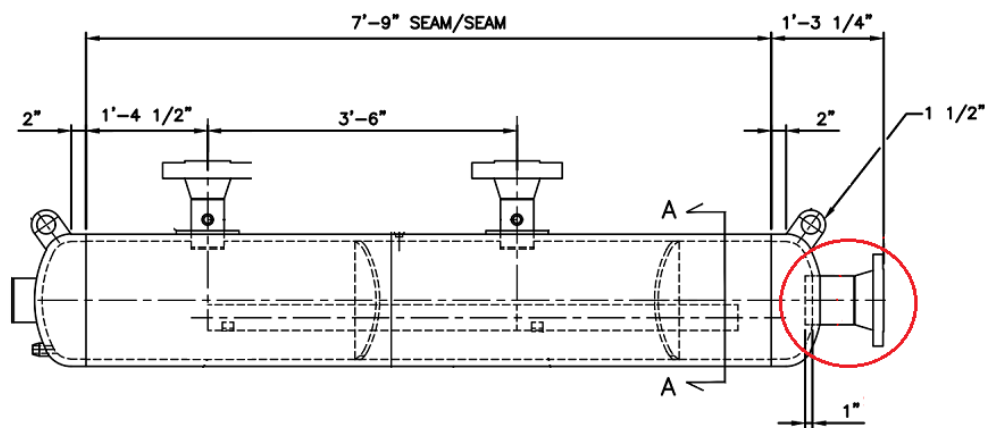


Figura 32. Plano de detalle del botellón de descarga de segunda etapa.

Tabla 5. Datos técnicos para la envolvente del botellón de descarga de segunda etapa.

Información de diseño de la envolvente			
Presión de diseño	1292 psi	Temperatura de diseño	350 °F
Material	SA-106-B sch 80	Tensión de fluencia	34809 psi
Corrosión admisible	0,125 in	Eficiencia de junta	1
Espesor de la envolvente	0,937 in	Diámetro interno	18 in

En base a esta información, se elaboró la memoria técnica de cálculo y fabricación dado que la misma no fue incluida dentro de la documentación del proyecto. A tal fin, se siguieron los lineamientos establecidos por el Código ASME VIII División 1 - Diseño por fórmula (ASME, 2021). A continuación, se desarrollan los cálculos para verificar el diseño de la envolvente.

- Cálculo de espesor requerido según tensiones longitudinales UG-27(c):

$$t = \frac{P R}{2 S E + 0,4 P} + t_{\text{corrosión}} \rightarrow t = 0,29 \text{ in} \quad (1)$$

- Calculo de espesor requerido según tensiones circunferenciales UG-27(c):

$$t = \frac{P R}{S E + 0,4 P} + t_{\text{corrosión}} \rightarrow t = 0,455 \text{ in} \quad (2)$$

Donde:

- $t$  = Espesor mínimo requerido del cuerpo.
- $P$  = Presión de diseño interna.
- $R$  = Radio interno.
- $S$  = Valor de esfuerzo máximo permitido.
- $E$  = Eficiencia de junta.

Una vez verificado el diseño de la envolvente, se procede por repetir el procedimiento de cálculo para el cabezal donde se requiere la modificación. En la Tabla 6 se presenta la información geométrica del diseño propuesto y, a continuación, se realiza la verificación del cabezal.

Tabla 6. Datos técnicos cabezal del botellón de descarga de segunda etapa.

Información de diseño del cabezal			
Presión de diseño	1292 psi	Temperatura de diseño	350 °F
Material	SA-516-70	Tensión de fluencia	37710 psi
Corrosión admisible	0,125 in	Eficiencia de junta	1
Espesor del cabezal	1 in	Diámetro cabezal	18 in

- Cálculo de espesor requerido según UG-32:

$$t = \frac{P D}{2 S E - 0,2 P} + t_{\text{corrosión}} \rightarrow t = 0,435 \text{ in} \quad (3)$$

Donde:

- $t$  = Espesor mínimo requerido del cabezal.
- $P$  = Presión de diseño interna.
- $D$  = Diámetro interior.
- $S$  = Valor de esfuerzo máximo permitido.
- $E$  = Eficiencia de junta.

Finalmente, se realizó la verificación del conjunto brida y niple seleccionados para la descarga del botellón. En la Tabla 7 se presenta la información requerida para el diseño de la conexión.

Tabla 7. Datos técnicos niple del botellón de descarga de segunda etapa.

Información de diseño niple de descarga			
Presión de diseño	1292 psi	Temperatura de diseño	350 °F
Material	SA-106-B	Tensión de fluencia	34809 psi
Corrosión admisible	0,125 in	Eficiencia de junta	1
Espesor del niple	0,864 in	Diámetro interno	6 in

En la Figura 33 se presenta un esquema en el que se indica la geometría de la unión soldada del niple con el cabezal.

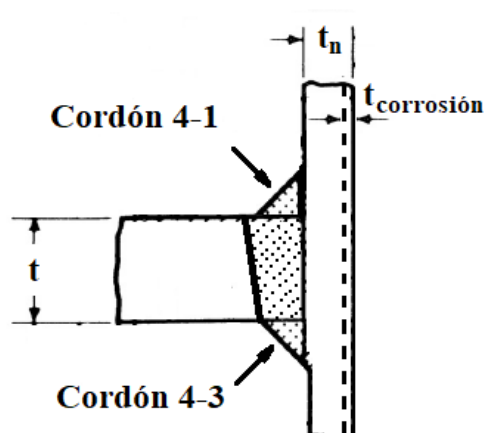


Figura 33. Detalle cordones de soldadura niple-cabezal de descarga de segunda etapa.

Tabla 8. Datos geométricos soldadura niple-cabezal de descarga de segunda etapa.

Geometría de la soldadura del niple	
$t$	1 in
$t_n$	0,864 in
$t_{corrosión}$	0,125 in
Cordón 4-1	3/8 in
Cordón 4-3	3/8 in

A partir de la información geométrica de los elementos y de las uniones soldadas, se analiza la necesidad o no de refuerzo de las mismas.

- Espesor requerido de la envolvente según UG-37(a):

$$t = \frac{P R}{S E + 0,4 P} + t_{corrosión} \rightarrow t = 0,234 \text{ in} \quad (4)$$

- Espesor requerido del niple a presión interna según UG-37(a):

$$t = \frac{P R}{S E - 0,6 P} + t_{corrosión} \rightarrow t = 0,238 \text{ in} \quad (5)$$

- Cálculo de espesores según UG-45:

- Espesor requerido de niple para presión interna:

$$t_a = \frac{P R}{S E - 0,6 P} + t_{corrosión} \rightarrow t_a = 0,238 \text{ in} \quad (6)$$

- Espesor requerido de niple para presión interna basando los cálculos en la envolvente:

$$t_{b1} = \frac{P R}{S E + 0,4 P} + t_{corrosión} \rightarrow t_{b1} = 0,234 \text{ in} \quad (7)$$

- Espesor mínimo con corrosión:

$$t_{b3} = \text{espesor mínimo (según Tabla UG-45)} + t_{corrosión} \rightarrow t_{b3} = 0,37 \text{ in} \quad (8)$$

- Espesor mínimo de niple basado en envolvente:

$$t_b = \text{mín} [t_{b3}; \text{máx} (t_{b1}, t_{b2})] \quad (9)$$

$$t_b = 0,234 \text{ in} \quad (10)$$

$$t_{UG-45} = \text{máx} (t_a, t_b) \quad (11)$$

$$t_{UG-45} = 0,238 \text{ in} \quad (12)$$

En base a los resultados obtenidos, se concluye que el espesor del niple seleccionado cumple con los requisitos de diseño.

A continuación, se verifica el diseño de los cordones de soldadura propuestos por el fabricante del botellón, utilizando la referencia de la Figura 34. A partir de la información dada en la Tabla 9, se procede a verificar si la apertura propuesta por el fabricante se encuentra correctamente reforzada.

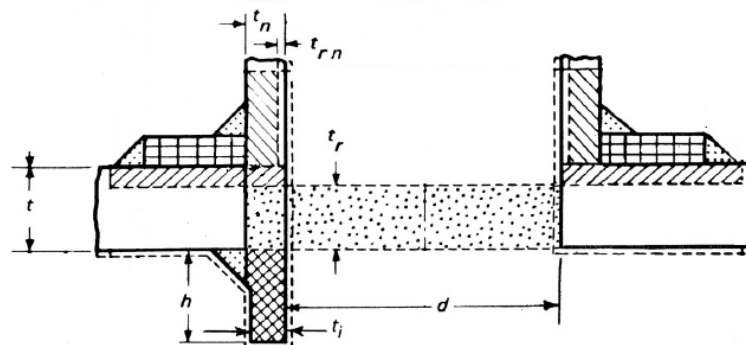


Figura 34. Diagrama refuerzos en aberturas según UG-37.1 (ASME, 2021).

Tabla 9. Valores utilizados para verificar las modificaciones realizadas en el botellón.

Información geométrica del niple de descarga		
Espesor nominal del recipiente	$t$	1 in
Espesor del niple	$t_n$	0,864 in
Espesor requerido de la envolvente	$t_{rn}$	0,435 in
Espesor requerido de la envolvente con tensiones circunferenciales	$t_r$	0,455 in
Espesor de la proyección interna del niple	$t_i$	0,864 in
Proyección del niple al interior del recipiente	$h$	1 in
Diámetro de la apertura del casquete	$d$	4,272 in
Factor de reducción de resistencia	$f_{r1}$	1
Factor de relación de tensiones (niple/envolvente)	$f_{r2}$	1
Factor de compensación por variación de esfuerzos	$F$	1
Eficiencia de soldadura	$E1$	1

A continuación, se calculan los requerimientos de refuerzo del niple según UG-37.

- Área total de refuerzo requerida:

$$A = d t_r F + 2 t_n t_r F (1 - f_{r1}) \rightarrow A = 1,94 \text{ in} \quad (13)$$

- Área de exceso de las paredes del recipiente para refuerzo:

$$X = d (E1 t - F t_r) - 2 t_n (E1 t - F t_r)(1 - f_{r1}) \quad (14)$$

$$Y = 2 (t + t_n)(E1 t - F t_r) - 2 t_n (E1 t - F t_r)(1 - f_{r1}) \quad (15)$$

$$A_1 = \text{máx} [X; Y] \rightarrow A_1 = 1,84 \text{ in} \quad (16)$$

- Área de exceso de las paredes del niple para refuerzo:

$$A_2 = \text{mín} [5 (t_n - t_{rn}) f_{r2} t; 5 (t_n - t_{rn}) f_{r2} t_n] \rightarrow A_2 = 1,85 \text{ in} \quad (17)$$

- Área disponible para refuerzo cuando el niple se proyecta dentro del recipiente:

$$A_3 = \text{mín} [5 t t_i f_{r2}; 5 t_i t_i f_{r2}; 2 h t_i f_{r2}] \rightarrow A_3 = 1,72 \text{ in} \quad (18)$$

- Área transversal de los cordones de soldadura disponibles para refuerzo:

$$A_{41} = f_{r2} L^2 \rightarrow A_{41} = 0,14 \text{ in} \quad (19)$$

$$A_{43} = f_{r2} L^2 \rightarrow A_{43} = 0,14 \text{ in} \quad (20)$$

- Verificación de cálculo de refuerzo de niple:

$$A_1 + A_2 + A_3 + A_{41} + A_{43} = 6,19 \text{ in} \quad (21)$$



Por lo expuesto, se concluye que cuando el recipiente está sometido a presión interna, el área disponible es mayor que el área de refuerzo requerido. Por lo tanto, la geometría adoptada para la unión no requiere contemplar refuerzo adicional.

En base a la memoria de cálculo realizada, respecto a los componentes sometidos a presión interna, se verifica la aptitud para el servicio del diseño propuesto para modificar el botellón de descarga de la segunda etapa, según los lineamientos del diseño por regla especificado en la Norma ASME VIII División 1 (ASME, 2021).

### Línea de recirculación de gas

En el caso de la línea de recirculación, desde la descarga de la segunda etapa hasta la entrada del *scrubber* de primera etapa, según la indicación en rojo dada en la Figura 35, se requiere fabricar una nueva conducción.

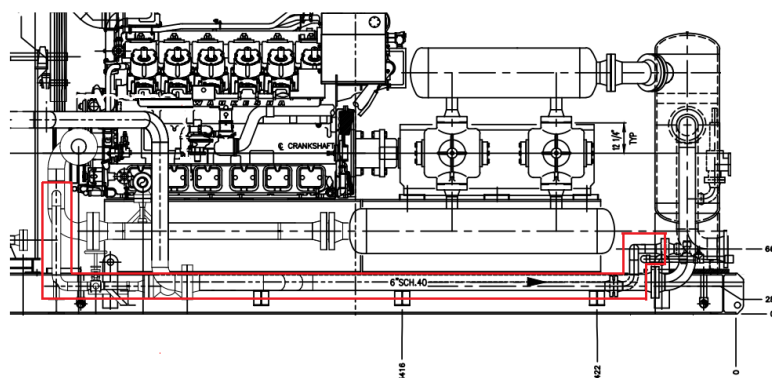


Figura 35. Ubicación de la línea de recirculación de gas en el equipo motocompresor.

Se pretende verificar la aptitud estructural del diseño propuesto en base a los datos técnicos indicados en la Tabla 10 y el plano isométrico de la línea (ver Figura 36).

Tabla 10. Datos geométricos y del material línea de recirculación de gas.

Información geométrica de la línea de recirculación	
Material	SA-106-B
Tensión de fluencia	34809 psi
Diámetro	3 in
Schedule	80
Espesor	0,3 in
Corrosión admisible	0,125 in
Presión de descarga	1292 psi
Temperatura de descarga	35 °C
Densidad del gas	158 kg/m <sup>3</sup>

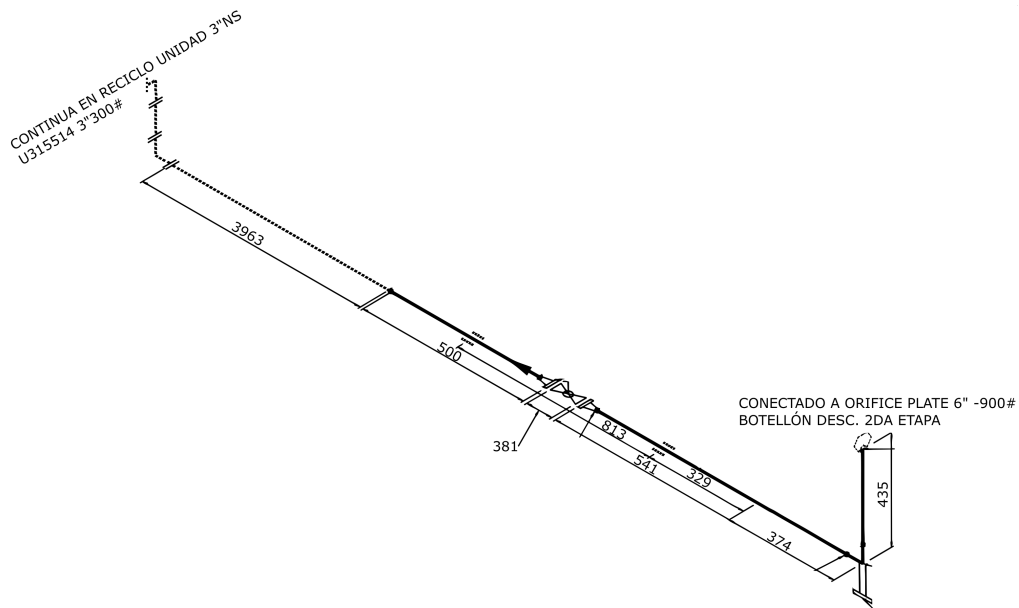


Figura 36. Plano isométrico de la línea de recirculación de gas.

A tal fin, se siguen los requerimientos dados en el código [ASME B31 \(2018\)](#) para realizar los cálculos mediante un *software* específico, partiendo de las siguientes suposiciones y lineamientos:

- Presión de diseño: se adopta la Máxima Presión de Trabajo Permitida (MAWP) del botellón de descarga de segunda etapa.
- Variaciones de presión y temperatura permitidas: se contempla el caso más severo de combinación de presión y temperatura.
- Factor de eficiencia de junta: se adopta el criterio propio del Contratista, es decir, radiografiado completo de todas las uniones soldadas ( $E = 1$ ).
- Nivel de tensiones admisible: se establece como criterio de aceptación que la tensión máxima obtenida no debe superar la tensión  $S_A$ , que se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$S_A = f (1,25 S_c + 0,25 S_h) \rightarrow S_A = 27000 \text{ psi} \quad (22)$$

Donde,  $S_c$  y  $S_h$  son, respectivamente, los esfuerzos permitidos base a la temperatura esperada mínima y máxima del metal durante el ciclo de desplazamiento. El factor

de rango de tensión  $f$ , se obtiene del siguiente gráfico asumiendo 50000 ciclos de uso ininterrumpido.

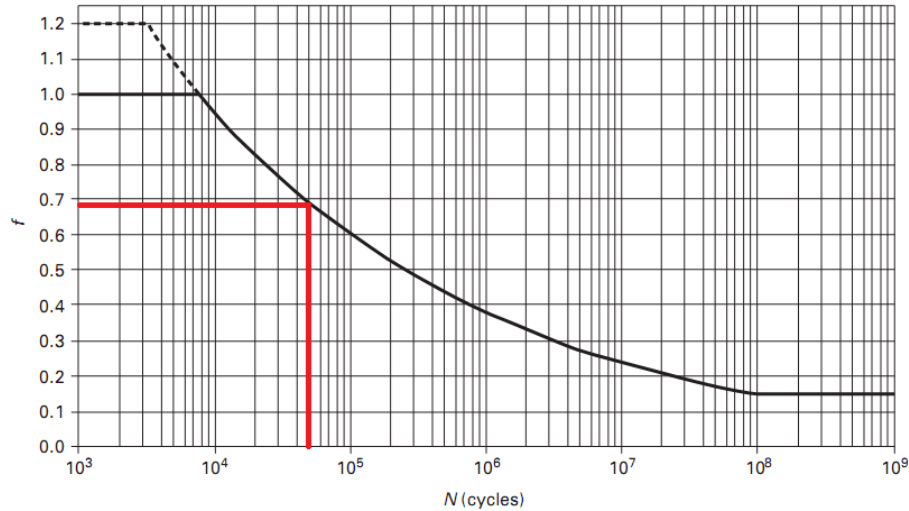


Figura 37. Factor de rango de tensión  $f$  (ASME B31, 2018).

- Espesor requerido para cañerías rectas:

$$t_m = t + c \rightarrow t_m = 0,179 \text{ in} \quad (23)$$

Donde,  $c$  es la suma de las tolerancias mecánicas incluido el sobreespesor por corrosión (debido a la falta de información, se asume para este parámetro el mismo valor de espesor por corrosión que en el botellón amortiguador de pulsaciones de la descarga de la segunda etapa), y  $t$  se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$t = \frac{P D}{2 (S E W + P Y)} \quad (24)$$

Donde, los coeficientes  $W$  e  $Y$  se obtienen de las Tablas 302.3.5 y 304.1.1 del Código ASME B31 (2018), respectivamente.

- El espesor mínimo requerido para codos se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t_{rc} = \frac{P D}{2 [(S E W/I) + P Y]} \rightarrow t_{rc} = 0,179 \text{ in} \quad (25)$$

Donde el coeficiente  $I$  se considera para la línea media del codo y se asume unitario.

- Requerimientos específicos según el apartado 319.1.2 del Código [ASME B31 \(2018\)](#): se asume que la tensión actuante en la línea, efecto de las deflexiones y de la presión interna, no puede ser en ningún punto mayor que la tensión establecida como máxima en el apartado 302.3.5 de dicho Código.
- La tensión combinada generada durante la operación ( $S_L$ ), por cargas sostenidas (como ser la presión y el peso), se obtiene a partir de las tensiones por flexión ( $S_f$ ), por carga axial ( $S_a$ ) y por torsión ( $S_t$ ), según la siguiente ecuación:

$$S_L = \sqrt{(S_a + S_f)^2 + (2 S_t)^2} \quad (26)$$

- Según los requerimientos normativos ([ASME B31, 2018](#)), el componente verifica el estado de carga si se cumple la siguiente condición:

$$S_L < S_A \quad (27)$$

En la Figura 38 se presenta el modelo implementado en el *software* específico, el análisis se realiza considerando que la línea opera en estado estacionario.

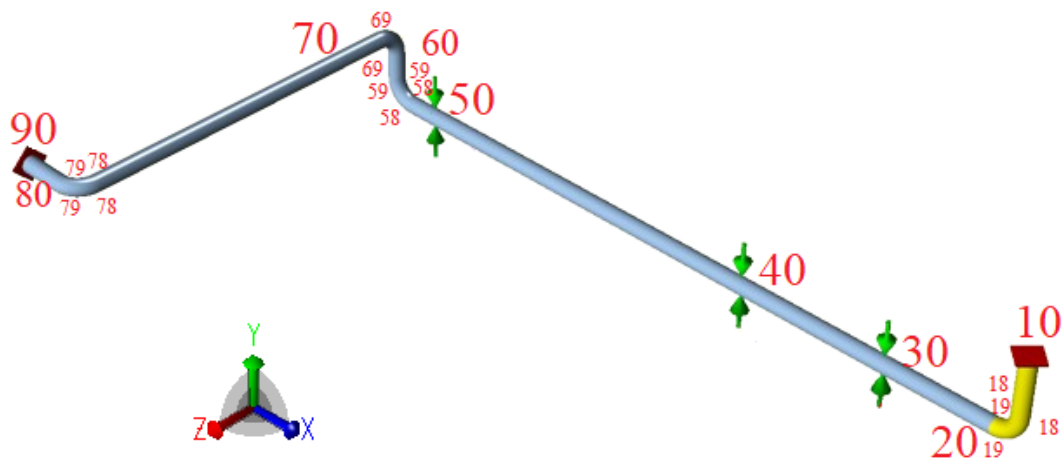


Figura 38. Modelo 3D de la línea de recirculación.

En el modelo se definen las condiciones de borde indicadas previamente, y se obtienen las deformaciones y las tensiones resultantes en el sistema de cañerías. Los puntos que se

indican en verde representan los soportes que restringen el movimiento de la cañería en los ejes X e Y. En la figura, también se indican con números los nodos de referencia. En la Tabla 11 se presentan los valores máximos de tensión obtenidos a partir del análisis, considerando el efecto de la presión interna. En la Figura 39 se presentan los resultados obtenidos para las tensiones combinadas a lo largo de toda la línea.

Tabla 11. Resultados obtenidos a partir de la simulación.

Resultados		
Tensión axial máxima	$S_a$	2729 psi
Tensión por flexión máxima	$S_f$	528 psi
Tensión por torsión máxima	$S_t$	146 psi
Tensión máxima combinada	$S_L$	3368 psi

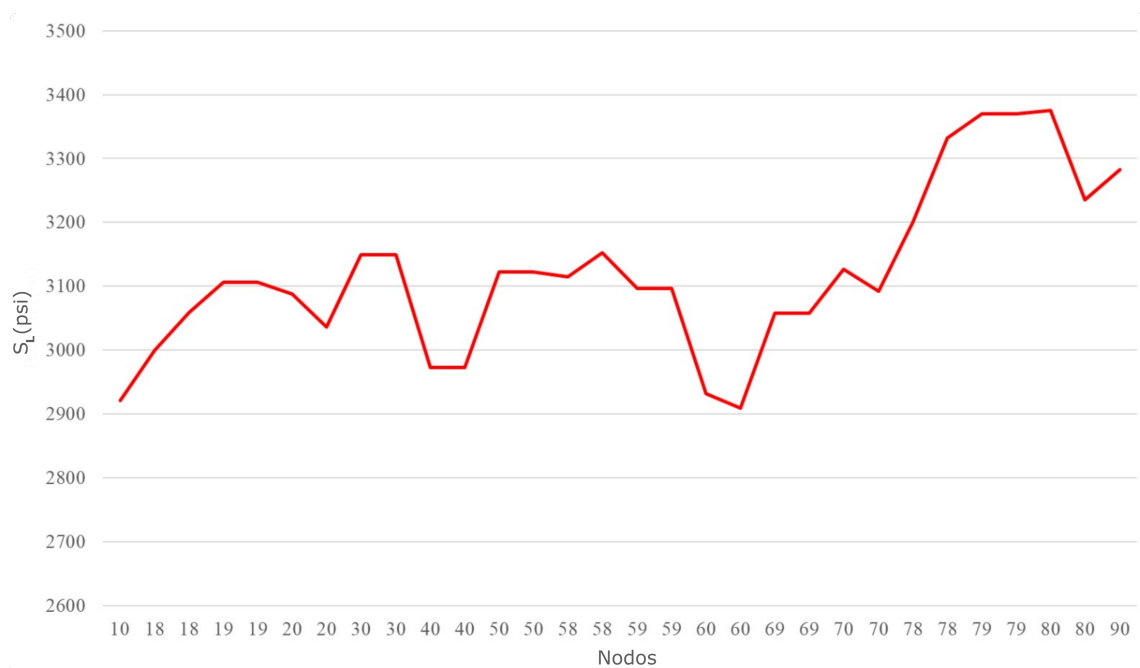


Figura 39. Tensiones combinadas en la línea de recirculación según discretización adoptada.

Resulta que la tensión combinada (efecto de la carga axial, la torsión y la flexión) es menor que la tensión máxima permitida a lo largo de toda la línea. Por lo tanto, se verifica la aptitud para el servicio del diseño propuesto para la línea de recirculación de gas en base a los requerimientos específicos del Código [ASME B31 \(2018\)](#).

### 5.3.5. Inspección de las líneas de proceso

Además de las tareas realizadas en el motor y el compresor, se llevaron a cabo inspecciones de los componentes que fueron desmontados y que debían ser reutilizados.

En primer lugar se realizaron inspecciones visuales con el objetivo de indentificar observaciones macroscópicas sobre los pulsadores, las líneas de descarga y succión, y los codos de conexión entre *scrubbers* y pulsadores. En la Figura 40 se presenta el registro fotográfico de algunos de los componentes inspeccionados.



(a) Codo conexión *scrubber* pulsador 1era etapa.

(b) Codo conexión *scrubber* pulsador 2da etapa.



(c) Línea descarga 1era etapa.

Figura 40. Registro de inspección visual.

En la Tabla 12 se detallan los resultados obtenidos en el proceso de inspección. En la misma se registran indicaciones observadas en el codo de conexión del *scrubber* de primera etapa al pulsador de succión. Como se puede observar en la Figura 41, este componente presentó evidencias de socavado y falta de fusión en las soldaduras, y corrosión por picadura en el interior del codo y el recalque de la brida. En base a estos resultados se decidió descartar este componente procediendo a la fabricación de uno nuevo para su reemplazo.

Tabla 12. Resultados de la inspección visual.

Componente	Estado	Detalle
Pulsador succión 1era	Verifica	No se observan indicaciones significativas
Pulsador descarga 1era	Verifica	No se observan indicaciones significativas
Pulsador succión 2da	Verifica	No se observan indicaciones significativas
Pulsador descarga 2da	Verifica	No se observan indicaciones significativas
Codo conexión 1era	No verifica	Defectos en soldadura y corrosión interior
Codo conexión 2da	Verifica	Se observan detalles de óxido superficial localizado
Línea descarga 1era	Verifica	Se observan detalles de óxido superficial localizado



Figura 41. Detalle de la brida e interior del codo con indicaciones visuales.

Posteriormente, los componentes que superaron de forma satisfactoria la inspección visual, fueron sometidos a una inspección por ultrasonido. En esta instancia se midieron los espesores de los componentes para evaluar su aptitud para el servicio en base a los requerimientos dados en la normativa de aplicación ([ASME, 2021](#)).

En la Tabla 13 se presentan los valores de espesores requeridos según la normativa, y los resultados de las mediciones realizadas. El servicio de medición de espesores fue contratado a un proveedor externo. En función de los resultados obtenidos, se concluye que todos los componentes verifican los espesores mínimos requeridos.

Tabla 13. Resultados de la inspección por ultrasonido.

Componente	Ubicación	Espesor requerido	Espesor medido	Estado
Botellón succión 1era etapa	Casquete izquierdo	7,14	14,84	Verifica
	Envolvente	7,14	12,20	Verifica
	Casquete derecho	7,14	11,69	Verifica
Botellón descarga 1era etapa	Casquete izquierdo	6,96	11,93	Verifica
	Envolvente	6,96	12,17	Verifica
	Casquete derecho	6,96	11,82	Verifica
Botellón succión 2da etapa	Casquete izquierdo	8,13	18,51	Verifica
	Envolvente	8,13	20,20	Verifica
	Casquete derecho	8,13	18,63	Verifica
Botellón descarga 2da etapa	Casquete izquierdo	11,80	14,44	Verifica
	Envolvente	11,80	22,44	Verifica
	Casquete derecho	11,80	24,24	Verifica
Línea	Descarga 1era etapa	4,59	10,02	Verifica
Codo	Succión 1era etapa	4,59	10,12	Verifica
Codo	Succión 2da etapa	5,16	13,05	Verifica

\*Todos los valores se expresan en milímetros [mm].

### 5.3.6. Operaciones de soldadura

El proceso de soldadura contempla cuatro etapas principales:

1. Preparación del bisel.
2. Soldadura de raíz.
3. Relleno de soldadura.
4. Amolado del cordón.

Las etapas mencionadas se llevaron a cabo, según el procedimiento de soldadura específico aplicable a juntas con penetración parcial (ver Figura 42). Para la soldadura de raíz se emplea el proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) y para el relleno el proceso FCAW (Flux Cored Arc Welding).

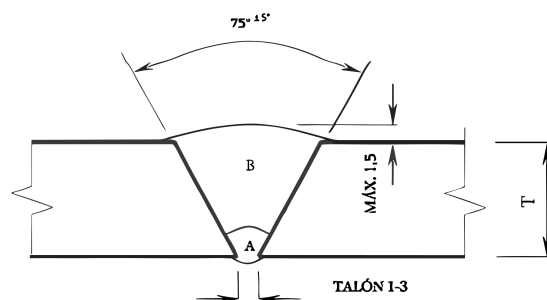


Figura 42. Esquema junta con penetración parcial.



En la Figura 43 se presenta el registro fotográfico de las operaciones de soldadura mencionadas para la unión de una brida y un codo.



Figura 43. Detalle de ejecución de una unión soldada.

Para evaluar la calidad de las soldaduras se realizaron dos tipos de inspecciones. Primero se llevó a cabo la inspección visual, y luego se realizó la inspección radiográfica. Esta tarea fue realizada por un proveedor externo, quien informó al área de ingeniería los resultados de los ensayos. Cabe destacar que, durante la ejecución del proyecto, las piezas soldadas no presentaron indicaciones que motiven ser rechazadas.

### 5.3.7. Pruebas hidrostáticas

Una vez finalizada la inspección visual y por radiografía de las piezas soldadas, se realizaron las pruebas hidrostáticas (PH). A tal fin, se colocaron bridas ciegas y juntas elastoméricas para asegurar la estanqueidad del recipiente a ensayar, y se aumentó de forma progresiva la presión hasta alcanzar el valor estipulado para el ensayo. El banco de ensayo está compuesto principalmente por una bomba y un manómetro digital (rango de presión 0-2000 bar). Las pruebas se realizaron en un sector acondicionado a tal fin y debidamente señalizado.

En la Figura 44 se presenta una disposición típica utilizada para realizar una PH sobre el pulsador de succión de la segunda etapa y el registro obtenido durante el ensayo, donde puede observarse que la presión máxima alcanzada se mantiene constante durante el tiempo de ensayo estipulado, lo cual implica que se mantiene la estanqueidad del sistema.

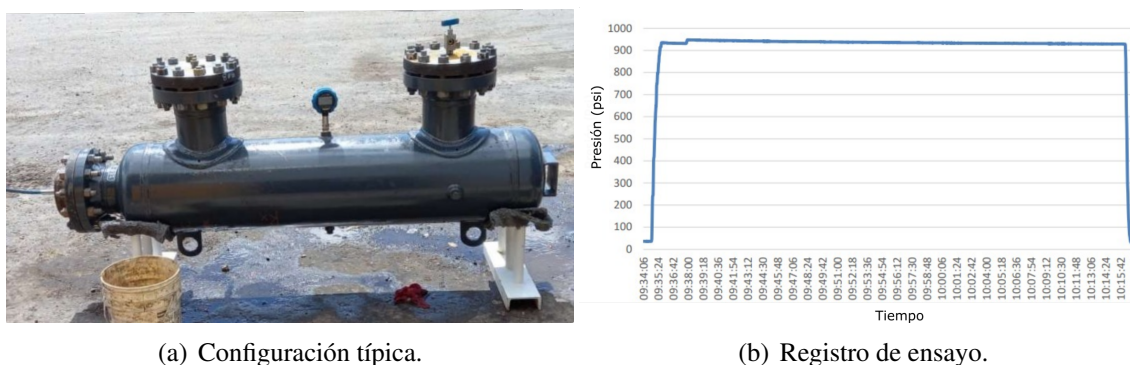


Figura 44. Detalle prueba hidrostática.

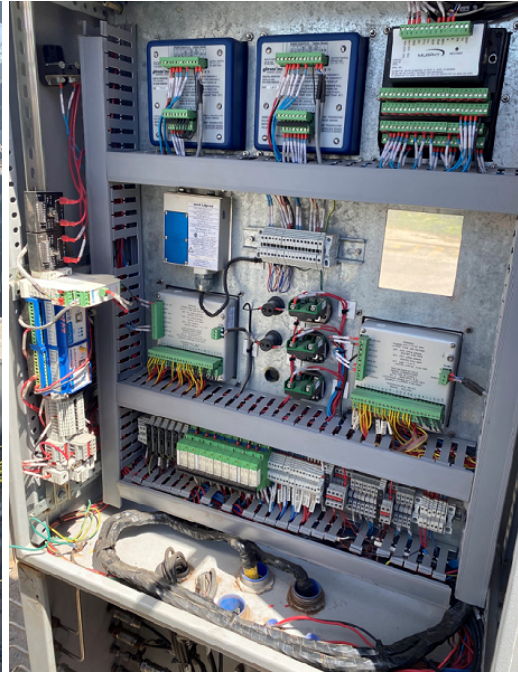
### 5.3.8. Instrumentación

La instrumentación se realizó de acuerdo al diagrama de P&ID proporcionado por el Comitente, según lo indicado en el Anexo I (A). Las tareas demandadas fueron asignadas a una empresa zonal de reconocida trayectoria. Para realizar el seguimiento del avance de las tareas se mantuvieron reuniones diarias con el personal encargado de la instrumentación. En base al parte diario generado, se informó al sector de compras sobre eventuales requerimientos de recursos o materiales adicionales y, en caso de ser necesario, se elevaron solicitudes a la gerencia para que autorice horas extras con el objetivo de completar

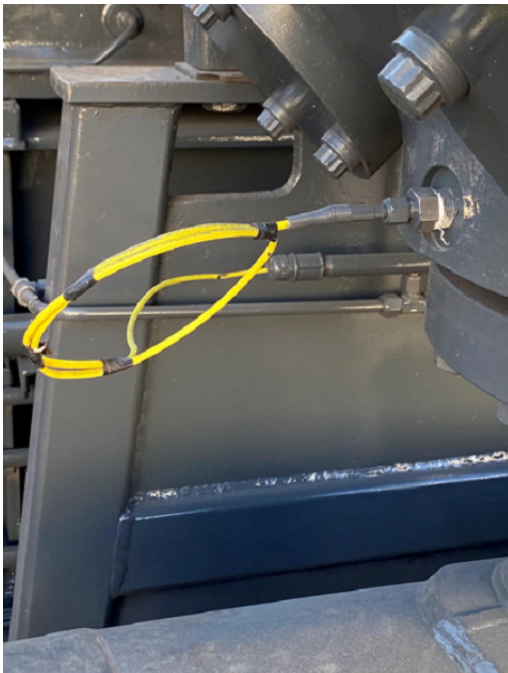
el trabajo demandado en tiempo y forma según la planificación definida previamente. En la Figura 45 se presenta un detalle del tablero con su respectivo conexionado, se indica también la instalación de sensores.



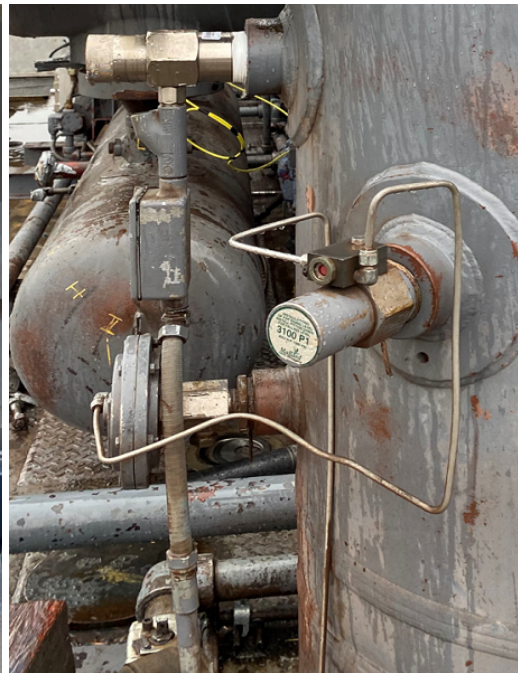
(a) Tablero de control.



(b) Conexionado del tablero.



(c) Sensor de presión.



(d) Sensores de nivel.

Figura 45. Detalle de la instrumentación.

### 5.3.9. Montaje final

Una vez finalizado el proceso de fabricación y/o reparación de todos los componentes sometidos a presión (bridas, codos, líneas de proceso, líneas accesorias, entre otros), y superada la inspección o ensayo correspondiente, se procedió al montaje de cada uno de los componentes según la disposición final.

A tal fin, se realizó en primera instancia un montaje preliminar con el objetivo de llevar a cabo eventuales ajustes menores para alinear las bridas de entrada y salida de cada segmento de tubería (ver ejemplo en la Figura 46). Una vez finalizados todos los ajustes requeridos se realizó la limpieza final de los componentes y se le aplicó el recubrimiento protector correspondiente.

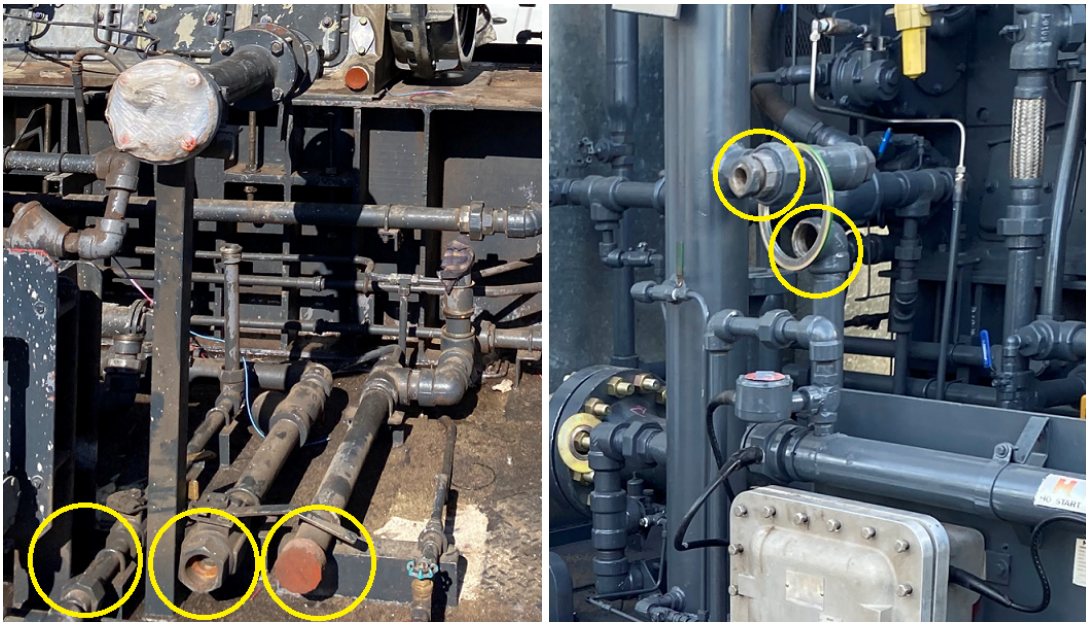


Figura 46. Montaje preliminar.

Una vez colocados los instrumentos de medición en las líneas del equipo, se procedió a realizar el montaje final. Se prestó especial atención en resguardar los componentes, para evitar cualquier daño en los mismos. También, se ubicaron las placas orificio en las líneas de proceso y se montaron las válvulas PSV calibradas en la ubicación definida según el P&ID.

Previo a la puesta en marcha del equipo, se instalaron las conexiones y las cañerías auxiliares de gas, de residuos, de agua y de aceite (ver indicaciones en amarillo en la

Figura 47). Cabe destacar, que durante la ejecución del proyecto, se modificó la ubicación de las acometidas para fluidos accesorios en relación a la definida en los planos de detalle a pedido del cliente. El equipo de ingeniería comunicó cada uno de estos cambios a través de la actualización detallada en el *Databook* del equipo.



(a) De izquierda a derecha se indica: salida de gas, entrada de agua y entrada de aceite.

(b) Entradas de gas de arranque.



(c) Conducción de residuo desde los scrubbers hasta el blowcase.

Figura 47. Detalle cañerías auxiliares.

### 5.3.10. Puesta en marcha

El objetivo de la puesta en marcha del equipo motocompresor es la verificación funcional del mismo. Este proceso de calidad se centra en verificar y documentar que la instalación, sus sistemas y ensamblajes sean verificados en operación para satisfacer los requisitos del proyecto. Como se mencionó en el apartado 5.3.1, el *overhaul* del motor fue realizado en la base del Comitente, incluyendo los ensayos de *commissioning*.

La puesta en marcha del compresor fue realizada por personal especializado del Comitente (una vez terminado el montaje final descrito en el apartado 5.3.9), con el soporte del Contratista en relación a la provisión de materiales, mano de obra y maquinaria necesarios para la realización de las tareas. En este sentido en la Figura 48, se presentan los equipos y accesorios que se emplearon.



(a) Recipientes acumuladores de aire.



(b) Tareas de conexión.



(c) Recipientes contenedores de gas.



(d) Compresor de aire.

Figura 48. Instalación de aire y gas para puesta en marcha del equipo.

La instalación para la prueba contempla el suministro de aire empleando los acumuladores indicados en la Figura 48(a), que a su vez, son alimentados por el compresor de aire presentado en la Figura 48(d). El suministro de gas se realiza con la batería de recipientes de gas natural comprimido (GNC), que puede observarse en la Figura 48(c), dotada de su correspondiente sistema de regulación.

El procedimiento empleado en la puesta en marcha del compresor siguió los lineamientos dados por el fabricante (Ariel, 2016). En particular, se tuvieron en cuenta los recaudos en relación a la operación y aseguramiento de una correcta lubricación, según se detalla a continuación:

1. Elevar la temperatura del aceite hasta la temperatura de operación recomendada.
  2. Establecer las presiones diferenciales del filtro del compresor y del aceite de lubricación de los cojinetes.
  3. Setear la capacidad de la válvula del compresor a la posición de mínima carga.
  4. Configurar la válvula inyectora de aceite para que entregue el caudal requerido que permita asegurar la circulación a través de la línea de suministro de aceite, con la finalidad de calentar los conductos.
  5. Durante el funcionamiento del motor a una velocidad de régimen, hasta que alcance la temperatura de operación, controlar la válvula de capacidad del compresor para regular la presión diferencial del lubricante. Cuando el aceite está frío, es viscoso y la presión diferencial es alta, pero este valor cae a medida que la temperatura se eleva.
  6. Mantener una presión diferencial mínima aguas arriba de la succión del compresor, hasta que el sistema llegue a los parámetros de presión operativos normales. Esta presión diferencial mínima se busca para asegurar un flujo adecuado de aceite y gas con el objetivo de prevenir el colapso de los elementos del filtro coalescente.
  7. Una vez que se alcanzaron las temperaturas de agua y de aceite para el régimen de operación, acelerar el motor hasta la velocidad mínima de carga para iniciar la carga del compresor.
-

8. Cuando el motor alcanza al 100 % de su velocidad nominal, reestablecer la presión diferencial de corte de la válvula de lubricación y cargar el compresor con la presión admitida para la carga del mismo (presión del múltiple).

El procedimiento descrito fue controlado en todo momento mediante el sistema de instrumentación y control del equipo. Este sistema calcula las posiciones óptimas de velocidad y carga.

Una vez que se alcanzaron condiciones operativas estables, se verificó mediante la instrumentación del equipo, que los parámetros operativos se encuentren dentro de los valores establecidos por el fabricante.

En estas condiciones, se realizó un prueba continua la cual se vió limitada, ya que la instalación proporcionada por el Contratista no posee un suministro ilimitado de aire en las condiciones de presión requeridas para ser usado durante un largo período de tiempo. Una vez descargados los pulmones de aire a presión, es necesario cargarlos nuevamente y repetir las pruebas la cantidad de veces que el Comitente lo considere necesario.

Una vez finalizadas las pruebas, y habiendo concluido favorablemente con el proceso de puesta en marcha, el Comitente autoriza que el equipo sea preparado para la entrega final.

#### **5.3.11. Embalaje y despacho**

En esta etapa, se realizaron las tareas finales del proyecto:

- Detalles de pintura.
- Protección de las líneas de gas y conexiones auxiliares con un film especial para evitar el ingreso de suciedad y líquidos.
- Desarme del equipo para su despacho (en condiciones análogas a las de recepción).
- Carga de los subsistemas del equipo en remolques para su traslado hacia la locación del Comitente.

En la Figura 49 se presenta el equipo pintado y preparado para el transporte, y en las Figuras 50 y 51 se observan, respectivamente, el aerofriador y el equipo motocompresor cargados en remolques para su traslado.

---





Figura 49. Equipo pintado y preparado para el transporte.



Figura 50. Aeroenfriador montado sobre remolque.



Figura 51. Equipo motocompresor montado sobre remolque.

#### 5.4. Revisión y control

En términos generales, el propósito del procedimiento de revisión y control en el proyecto de *revamp* consistió en supervisar el progreso, afrontar los riesgos, asegurar la calidad, facilitar la toma de decisiones y fomentar la mejora continua. A través de la implementación de técnicas eficaces de revisión y control, el equipo de proyecto pudo mejorar los resultados del proyecto, satisfacer las expectativas de las partes interesadas y alcanzar el éxito del mismo.

Asimismo, el proceso brindó al Contratista resguardo legal para asegurarse de que los componentes inspeccionados o fabricados cumplen con el nivel de requerimiento establecido por el Comitente y son adecuados para su posterior uso.

A medida que el proyecto fue avanzando se tuvieron que realizar ajustes y/o correcciones en las actividades programadas con el objetivo de minimizar eventuales retrasos del

proyecto y desvíos en los estándares de calidad. Entre las decisiones que se tomaron se pueden mencionar las siguientes:

- Debido a las condiciones climáticas (lluvias y bajas temperaturas) imperantes durante la realización de las pruebas hidrostáticas del aeroenfriador, no se cumplieron los estándares establecidos por el Comitente, por lo que los resultados obtenidos no fueron consistentes. A raíz de esta situación, se presentó un nuevo programa de ensayos al Comitente a partir del cual se realizaron nuevamente las pruebas de forma satisfactoria.
- Con el objetivo de acortar el plazo de entrega, se decidió programar dos turnos de trabajo los siete días de la semana. Cabe destacar que en la programación inicial se consideró un solo turno para una semana laboral de cinco días.
- Debido a cambios de último momento realizados por el Comitente, se cambiaron las presiones de trabajo de las válvulas de seguridad, que ya se encontraban instaladas. Por lo que, se tuvo que realizar nuevamente el tarado de las válvulas.
- Se tuvo que realizar modificaciones en la ubicación de algunos soportes (en relación al plano de detalle) para asegurar el montaje de cañerías y accesorios.

Para confirmar el grado de progreso de cada una de las actividades necesarias para finalizar el proyecto, se elaboraron tableros de control en los que se mostraba el porcentaje de progreso y se utilizó el diagrama de Gantt. El Comitente requirió la existencia de dichos informes para realizar certificaciones periódicas y para evaluar el estado del proyecto, previendo acciones futuras.

Se establecieron distintos criterios de calidad para la ejecución del proyecto:

- Criterios de aceptación: se utilizaron los criterios de aceptación propuestos tanto por el Comitente como por la normativa de aplicación. Se utilizan los procedimientos del fabricante de motor y compresor junto con las buenas prácticas adoptadas con la experiencia del Comitente.
  - Certificación: para garantizar la trazabilidad de la información se solicitaron y registraron los certificados pertinentes a cada actividad del proyecto, como ser: mate-
-

riales adquiridos, consumibles de soldadura, nivelación de soldadores, calibración de válvulas e instrumental, entre otros.

- Informes de ensayos: las empresas tercerizadas que prestaron los servicios de ensayos presentaron los informes de los resultados de cada prueba realizada, con el detalle requerido en cuanto a la metodología y equipamiento utilizado y la documentación del personal afectado (nivelación correspondiente).
- Auditorías a empresas contratistas: se realizaron auditorías a las empresas contratadas para verificar sus procedimientos y acreditar las certificaciones correspondientes.

### **5.5. Cierre**

En esta fase se realizaron todas las tareas requeridas para cerrar formalmente el proyecto. El Comitente definió que el proyecto de *revamp* del equipo motocompresor ha sido finalizado, una vez que los parámetros de funcionamiento obtenidos durante la puesta en marcha cumplieron los requisitos establecidos. La documentación referida a todas las actividades del proyecto (incluida la actualización de la ingeniería de detalle) se incorporó en el *Databook* del equipo.

La asignación de un nuevo turno de trabajo para desarrollar las tareas permitió que se concluya el proyecto antes de la fecha estimada en la programación inicial. En la Figura 52, se presenta un cuadro comparativo entre el porcentaje de avance diario de la estimación proyectada y del ejecutado. El hecho de haber terminado con anterioridad los trabajos generó un antecedente que trae beneficios significativos para la organización, en el sentido que:

- Aumenta la satisfacción del Comitente.
  - Permite estimar tiempos de entrega más cortos en trabajos futuros.
  - Libera el espacio físico requerido en la base para la aceptación de nuevos proyectos.
  - Permite estimar con mayor precisión los requisitos de provisión de materia prima y de mano de obra.
-

- Permite al Comitente actualizar mayor cantidad de equipos en menor cantidad de tiempo.

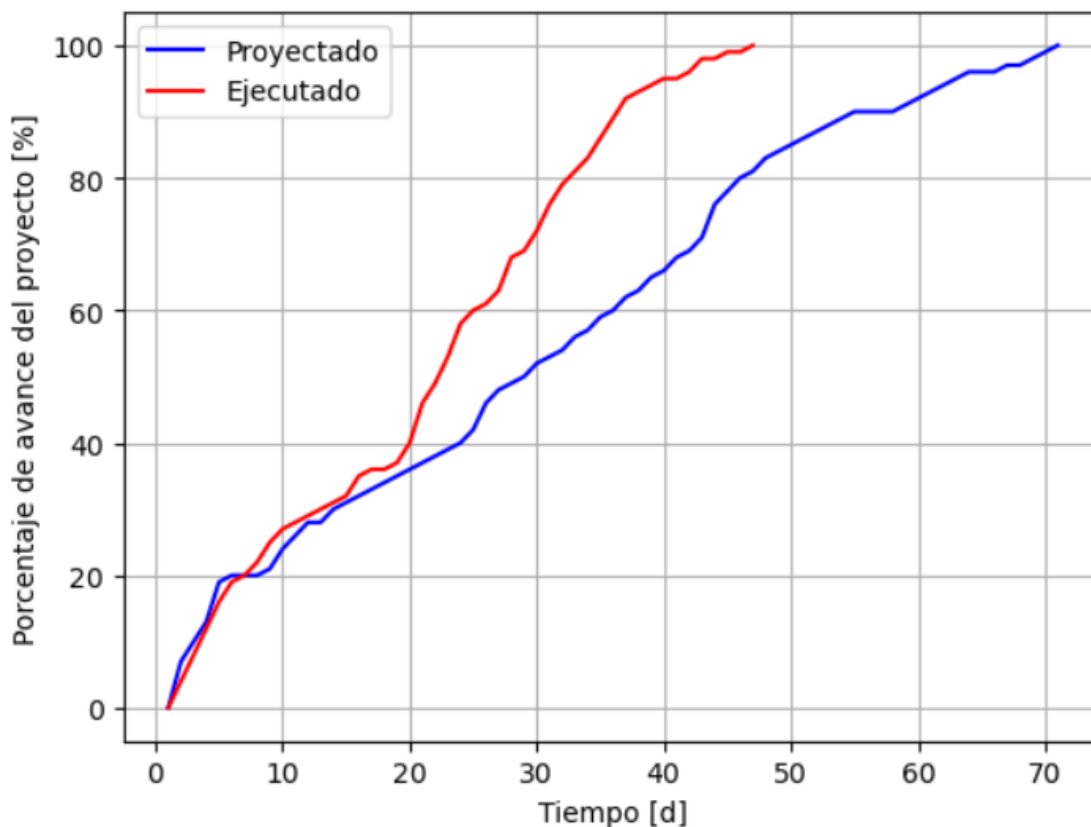


Figura 52. Porcentaje de avance del proyecto.

En base al gráfico de la Figura 52 se realiza un análisis en relación a las tendencias registradas en cada cuartil del tiempo total proyectado. A continuación, se describen las consideraciones más relevantes:

- **Primer cuartil:** se observa una concordancia en el desarrollo del proyecto en relación a la programación realizada. En la parte final de esta etapa la gerencia decide aumentar la asignación de recursos humanos al proyecto (doble turno, semana laboral de siete días y contratación de personal temporario).
- **Segundo cuartil:** la nueva asignación de recursos se ve reflejada en el cambio de pendiente positiva del avance real con respecto a lo proyectado.
- **Tercer cuartil:** la tendencia favorable consolidada en la etapa anterior permite culminar las tareas de forma satisfactoria con una reducción de aproximadamente un

30 % en relación al tiempo proyectado.

## 5.6. Oportunidades de mejora

Las oportunidades de mejora en la ingeniería de proyectos abarcan diversos aspectos que contribuyen a la efectividad y éxito general de la organización. A continuación, se presentan algunas áreas clave en las que puede centrarse la atención para mejorar en futuros proyectos:

- Definir los ítems y la descripción de tareas de forma más específica. El diagrama de Gantt utilizado resultó engorroso para mensurar el avance de algunas tareas. Se propone para proyectos futuros, especificar cada tarea a realizar individualmente, para facilitar no sólo el seguimiento, sino también la certificación de los avances.
  - Desarrollar un equipo de trabajo dentro de la organización para que adquiera las competencias necesarias para realizar trabajos de instrumentación. De esta forma se reduciría la dependencia con proveedores externos del servicio, teniendo en cuenta que las tareas asociadas a la instrumentación demandaron la mayor asignación de recursos (ver apartado [5.2.5](#)).
  - Mejorar el manejo de control del inventario, se recomienda asegurar el *stock* mínimo de materiales críticos para evitar que se detenga el avance de los trabajos por la falta de una pieza.
  - Establecer un plan de mejora de los procedimientos tecnológicos empleados (por ejemplo: automatizar los procesos de soldadura, utilizar un virolador mecánico, entre otros).
  - Sistematizar mediante el empleo de hojas de cálculo o un *software* específico el procesamiento de la información relacionada con el proyecto (criterios de aceptación y rechazo de componentes, registros de END, órdenes de trabajo, documentación del personal y proveedores externos, entre otros).
  - Establecer criterios para estandarizar y sistematizar, según alcance, los informes requeridos por el Comitente.
-

## 6. CONCLUSIONES

El presente Proyecto Integrador Profesional se completó de forma satisfactoria respecto de los objetivos planteados. En particular, la Planificación del Proyecto permitió definir las tareas a partir de la aplicación de herramientas metodológicas empleadas comúnmente en la industria, para la ejecución del proyecto desde su concepción hasta su cierre.

Asimismo, participar del metaproyecto fue una experiencia muy enriquecedora, ya que me permitió desarrollar una serie de competencias muy valiosas para el desarrollo profesional, como ser: liderazgo (asociado a la toma de decisiones), comunicación (entre los miembros del equipo, con los directivos y demás partes interesadas), gestión de proyectos (desarrollo y ejecución de planes de proyecto, gestión del tiempo y del presupuesto), trabajo en equipo (de forma eficaz, compartiendo información y colaborando en la consecución de los objetivos), resolución de problemas (identificando y resolviendo problemas de forma eficaz, utilizando distintos métodos o técnicas), y finalmente, desarrollando la capacidad de aprendizaje continuo.

También, es importante mencionar que el análisis de riesgos desarrollado se convierte en una herramienta que facilitará la identificación de los riesgos y amenazas que pueden presentar futuros proyectos, lo que permitirá generar planes de contingencia y disminuir el impacto posible en los procesos de la empresa.

Cabe destacar que esta práctica profesional supervisada me permitió complementar la formación teórica-práctica recibida en la carrera y vincularme de forma directa con necesidades reales del ámbito laboral. En particular, me permitió integrar y aplicar conocimientos respecto a organización y evaluación de proyectos, diseño, cálculo y verificación de componentes de máquinas, análisis de materiales, propiedades y ensayos, análisis de riesgos, aplicación de normativa, entre otros.

Finalmente, la ejecución del proyecto resultó en un aporte significativo para la organización, posicionándola como una alternativa local para dar respuesta con valor agregado a las necesidades de la industria hidrocarburífera regional.

---

## 7. REFERENCIAS

- Ariel. (2016). *Heavy Duty Balanced Opposed Compressors. Technical manual for models: JGM, JGN, JGP and JGQ; and JGI vertical non-balanced*. Ariel Corporation.
- ASME. (2021). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section I-XI*. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME B31. (2018). *B31 ASME Code for Pressure Piping, Section I a VII*. The American Society of Mechanical Engineers.
- Baloi, D. (2012). *Risk Analysis Techniques in Construction Engineering Projects. Department of Civil Engineering, Eduardo Mondlane University*.
- Ben-Daya, M., Duffuaa, S. O., Raouf, A., Knezevic, J. & Ait-Kadi, D. (2009). *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. Springer.
- Cheng, Y., Yuan, J., Zhu, L. & Li, W. (2020). Risk Propagation Model and Simulation of Schedule Change in Construction Projects: A Complex Network Approach. *Hindawi*.
- Ciftci, S. E. & Arıkan, F. (2020). A Multiple Criteria Risk Analysis Model and a Case Study in Metal Industry. *Open Journal of Business and Management*, 8(5), 2048-2070.
- Devold, H. (2013). *Oil and Gas Production Handbook: An Introduction to Oil and Gas Production*. ABB Oil; Gas.
- Exterran. (2015). *C-Series Configurable Compression Packages*. Compression Solutions.
- General Electric. (2017). *VHP Series Four 12 cylinder with ESM2 parts catalog*. General electric.
- Geraldi, J. & Lechter, T. (2012). Gantt charts revisited: A critical analysis of its roots and implications to the management of projects today. *International Journal of Managing Projects in Business*, 5(4), 578-597. <https://doi.org/10.1108/17538371211268889>
- ISO-9001. (2015). *Sistemas de gestión de la Calidad. ISO-9001*. International Organization for Standardization.
- Mubarak, S. (2015). *Construction Projects Scheduling and Control*. Wiley.
-



- PMBOK®. (2008). *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyecto*. Project Management Institute.
- Sorokes, J. M., Kaulius, S. T. & Memmott, E. A. (2014). Revamp/Re-Rate Design Considerations. *Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories*. <https://doi.org/10.21423/R1DD1H>
- Ulrich, K. T. & Eppinger, S. D. (2009). *Product Design and Development*. Editorial McGraw-Hill.
- Villazon, C. C., Pinilla, L. S., Otegui Olaso, J. R., Gandarias, N. T. & López de Lacalle, N. (2012). Identification of Key Performance Indicators in Project Based Organisations through the Lean Approach. *ASME and Solar Turbines Incorporated*.
- Warzynska, U. & Kollek, W. (2018). Modelling of pressure pulsation in gas compressor station. *Wroclaw University of Science and Technology*.
-

# Anexos

---

## A. Anexo I: Diagramas de Tuberías e Instrumentación (P&ID)

En las Figuras 53 y 54 se presentan los planos de instrumentación y ubicación de sensores en los equipos motocompresores (P&ID, por sus siglas en inglés: *Piping and Instrumentation Diagram*). En la Tabla 14 se indica la nomenclatura utilizada.

Tabla 14. Símbolos de detalle del P&ID.

TAG	Descripción	Tipo
PT 2100	Presión de succión	AI
PT 2110	Presión descarga 1ra etapa	AI
PT 2120	Presión descarga 2da etapa	AI
PT 1501	Presión aceite compresor	AI
PT H2O	Presión refrigerante sistema auxiliar	AI
PT oil	Presión aceite hidráulico	AI
SS 1001	Sensor de velocidad	AI
VSHH 6901	Vibración cooler poleas	AI
VSHH 6902	Vibración cooler paletas	AI
VSHH 7901	Vibración compresor lado scrubbers	AI
VSHH 8901	Vibración motor lado volante	AI
VSHH 1510	Vibración compresor lado motor	AI
VSHH 1012	Vibración compresor lado scrubbers	AI
PY 1911	Válvula de reciclo	AO
LSLL 731	Nivel aceite compresor	DI
LSLL 8301	Nivel aceite motor	DI
LSLL 8401	Tanque refrigerante compresor	DI
LSLL 8402	Nivel auxiliar de agua	DI
LSHH 3200	Scrubber succión primera etapa	DI
LSHH 3210	Scrubber succión segunda etapa	DI
FSL 7301	Switch de flujo lubricación forzada	DI
FSL 7302	Switch de flujo lubricación forzada	DI
SOV 105	Hotstart compresor	DO
SOV 205	Hotstart motor	DO
TE 1576	Temperatura aceite motor	TCI
TE 8402	Temperatura refrigerante sistema auxiliar	TCI
TE 2111	Temperatura descarga cilindro 1	TCI
TE 2113	Temperatura descarga cilindro 2	TCI
TE 2121	Temperatura descarga cilindro 3	TCI
TE 2122	Temperatura descarga cilindro 4	TCI
TE 2100	Temperatura de succión	TCI
PV 2101	Scrubber primera etapa	
PD 2101 y 2102	Botellón de pulsaciones de succión y descarga primera etapa	
C 001 y 002	Cilindros del compresor de primera etapa	
IC 2101 y 2102	Etapas del <i>intercooler</i>	
PV 2102	Scrubber de segunda etapa	
PD 2103 y 2104	Botellón de pulsaciones de succión y descarga de segunda etapa	
C 003 y 004	Cilindros del compresor de segunda etapa	
E	Válvula de seguridad entrada <i>scrubber</i> primer etapa	
F	Válvula de seguridad descarga primer etapa	
G	Válvula de seguridad descarga segunda etapa	

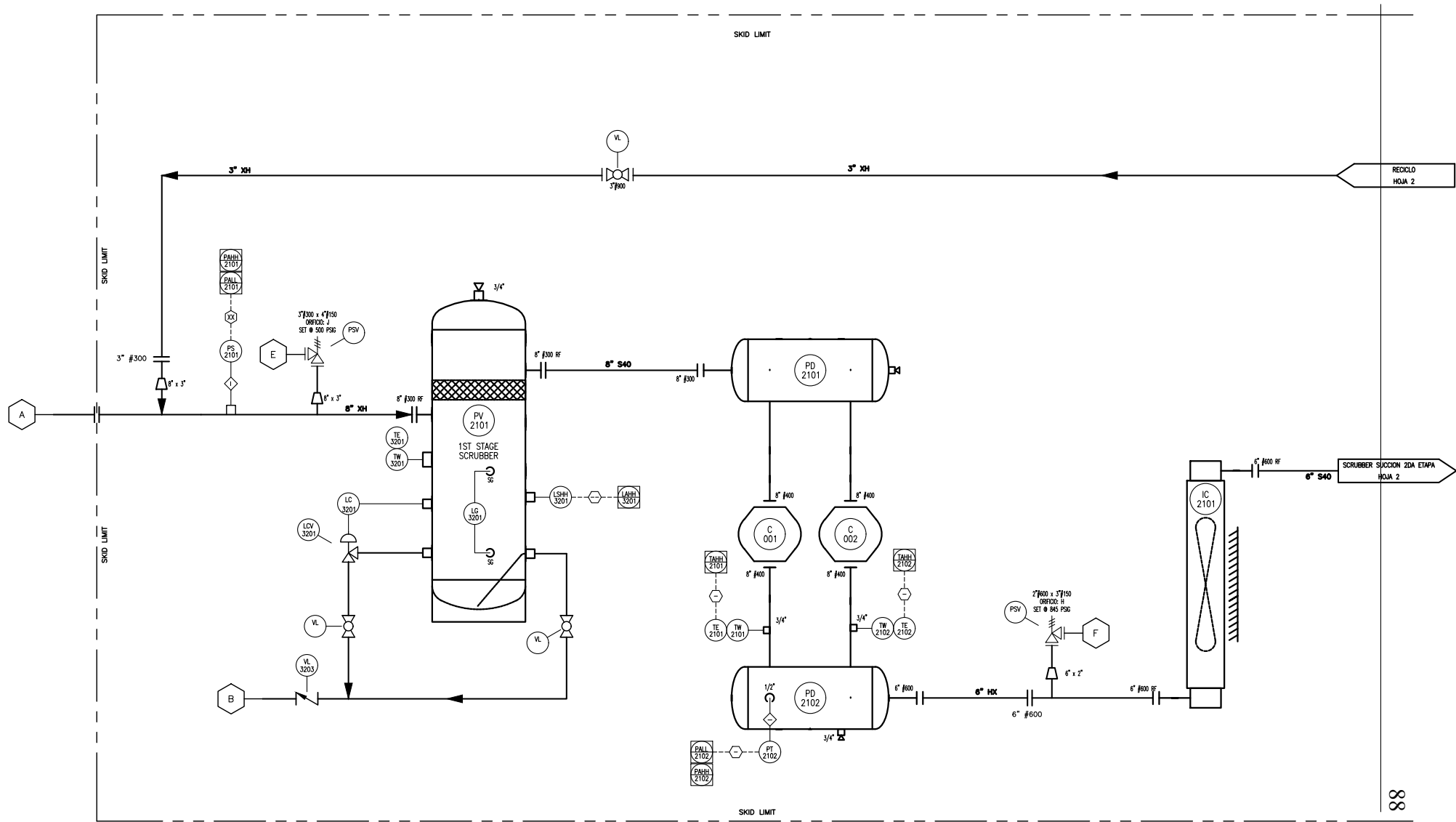


Figura 53. Primera etapa de *piping* e instrumentación (P&ID).

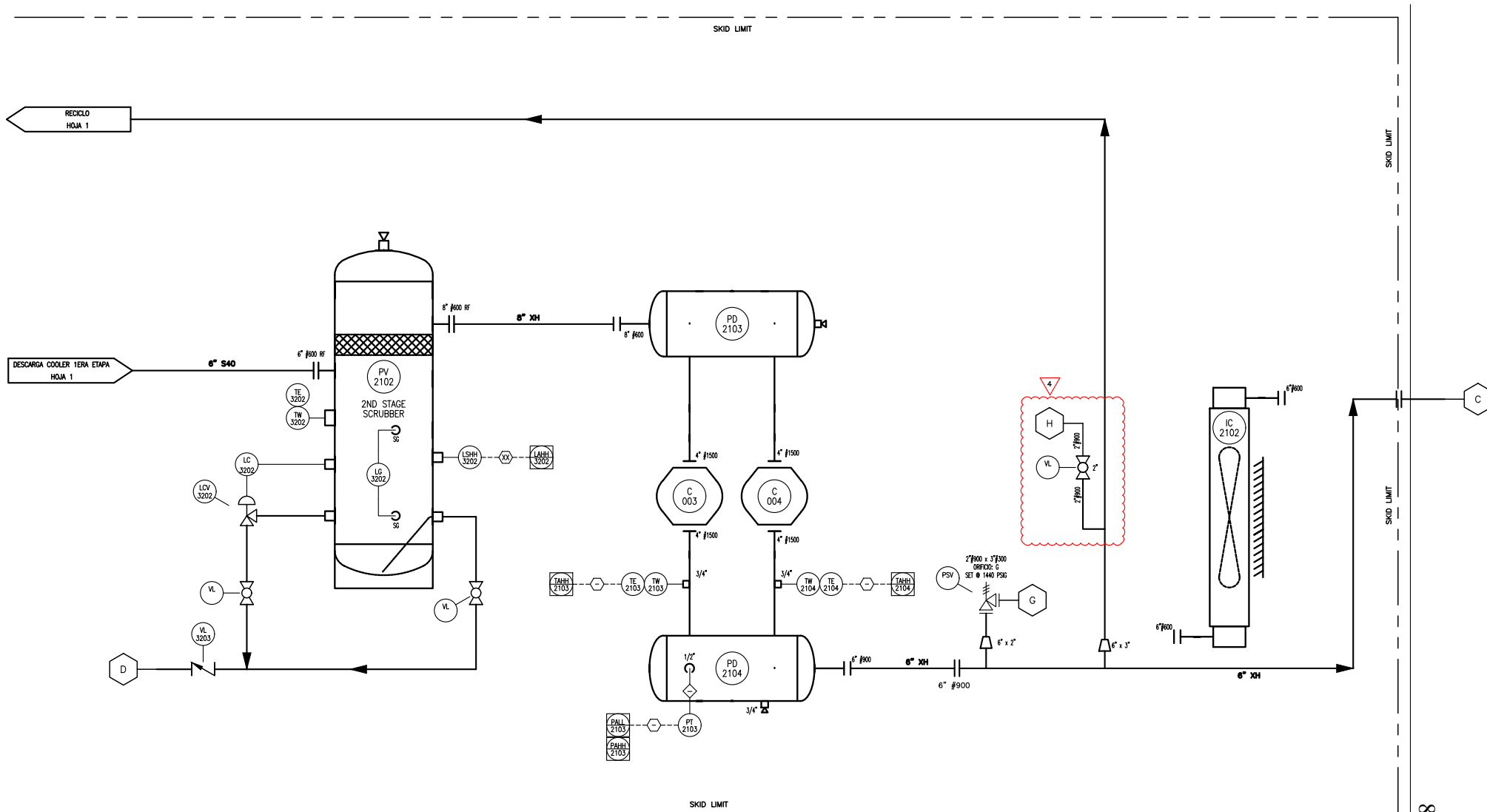


Figura 54. Segunda etapa de piping e instrumentación (P&ID).

**B. Anexo II: Planificación**

---

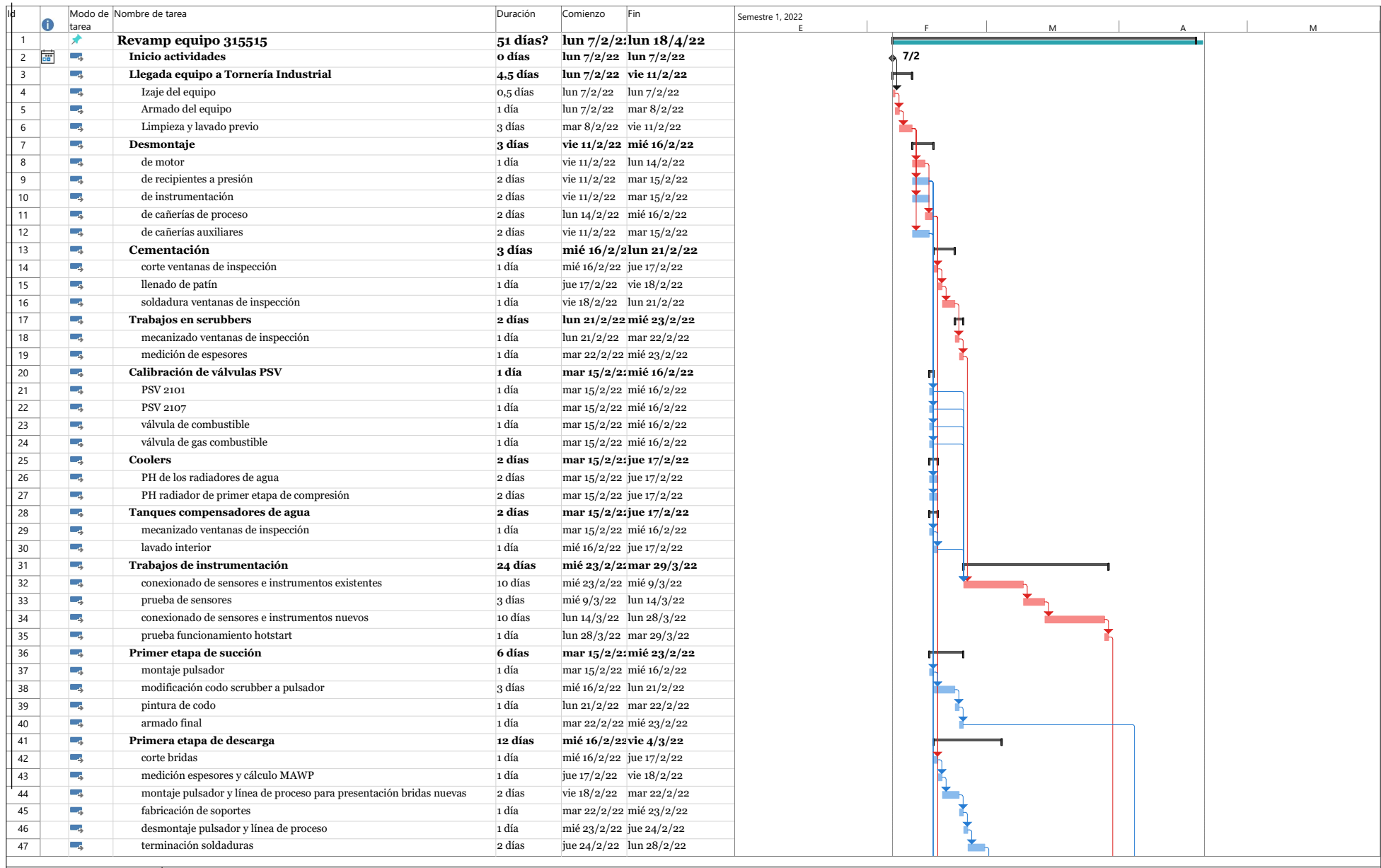


Figura 55. Plan de proyecto realizado con software específico.

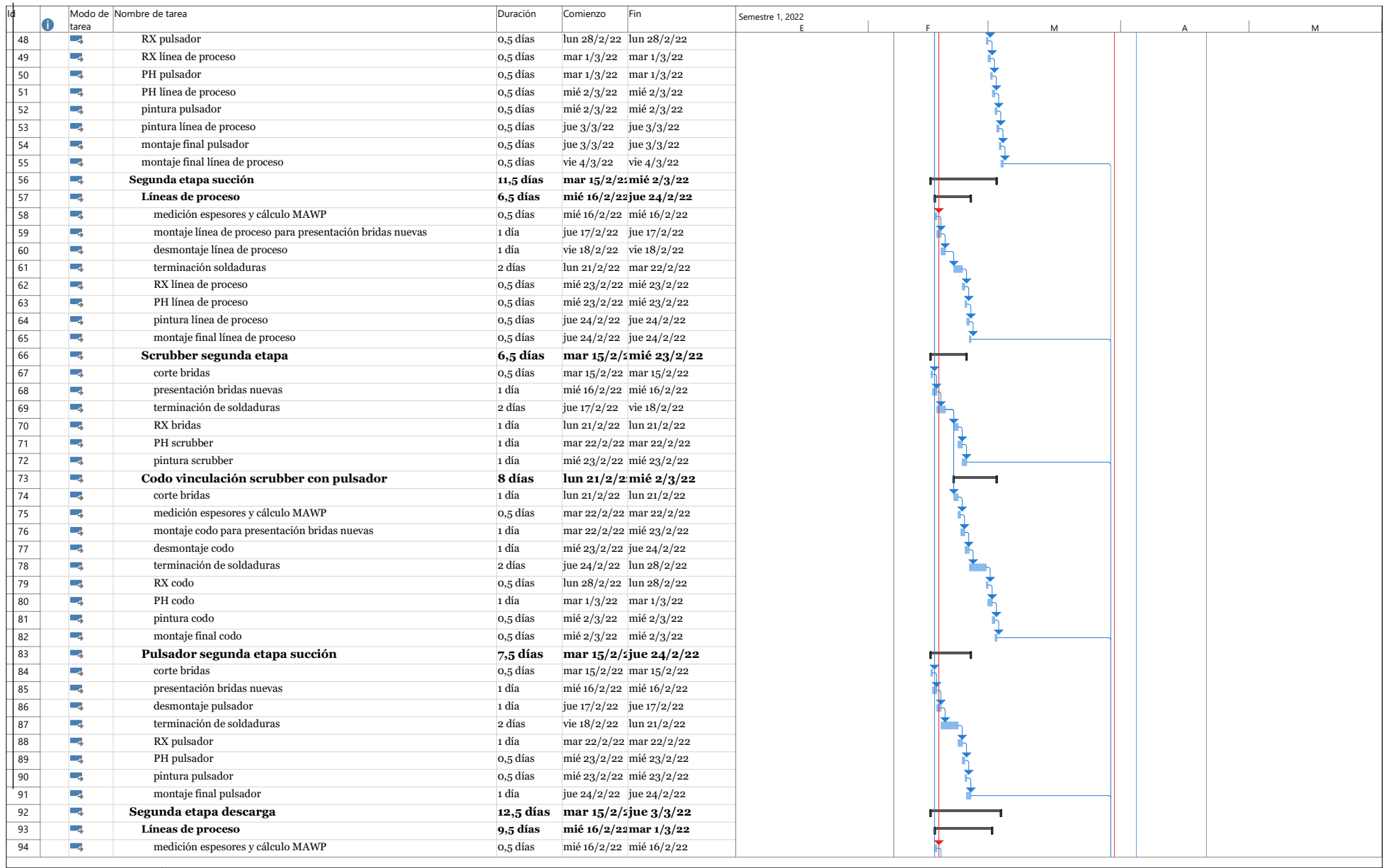


Figura 56. Continuación de Plan de proyecto realizado con software específico.



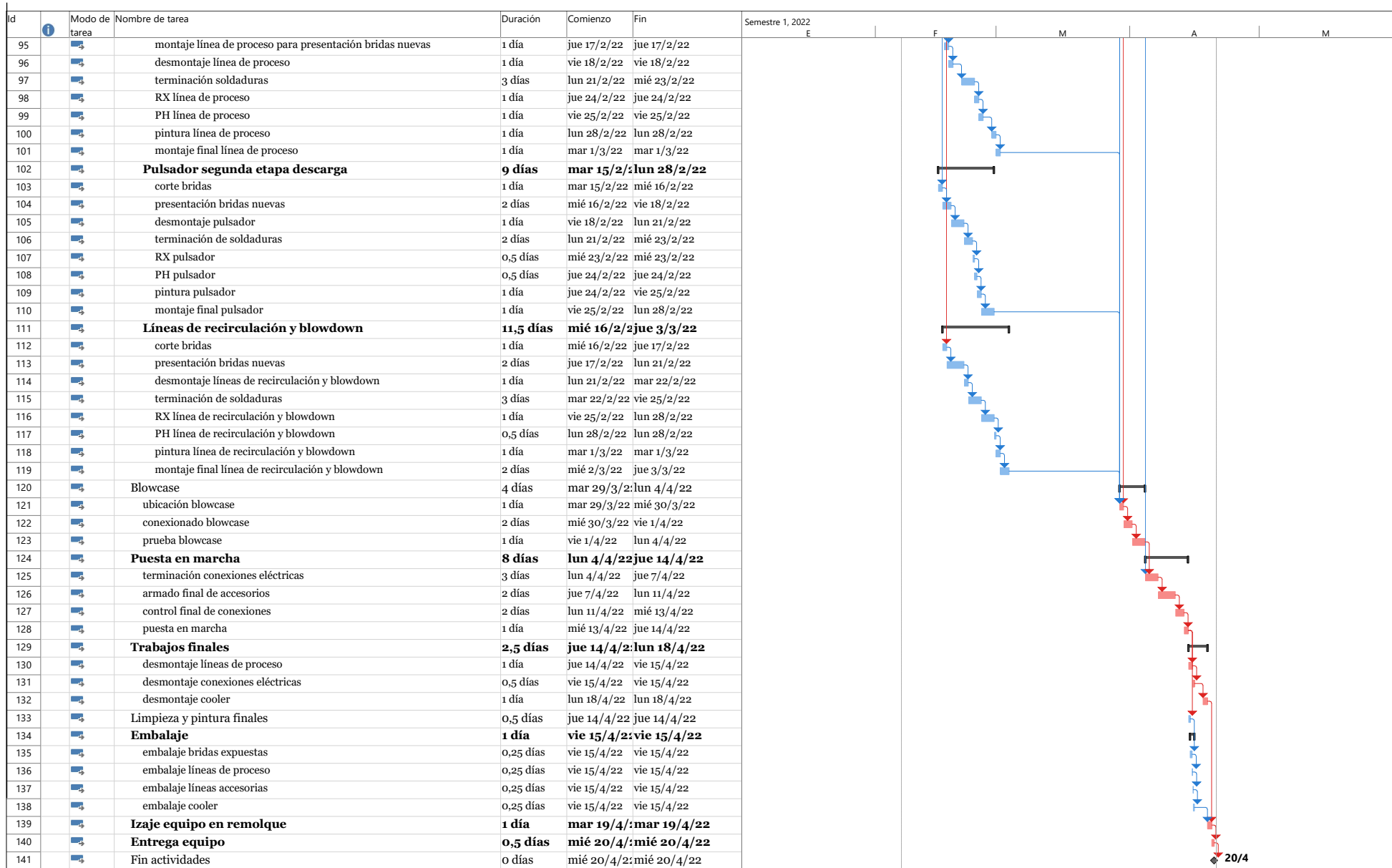


Figura 57. Continuación de Plan de proyecto realizado con software específico.

### C. Anexo III: Análisis de Riesgo

En este apartado se aplica la metodología propuesta por (Ciftci y Arikan, 2020), a través de la cual se pretende analizar y evaluar relaciones causales entre los elementos que componen la matriz de riesgo del proyecto de *revamp* del equipo motocompresor.

En primer término, se determinaron los factores de riesgo que pueden afectar directa o indirectamente a los trabajadores durante su labor diaria. En base a esta información, se generó la Tabla 15 que muestra los factores de riesgo considerados para el proyecto.

Tabla 15. Factores de riesgo involucrados durante la ejecución del proyecto.

Criterio	Sub-Criterio
Factores Físicos (K1)	Ruido (K11)
	Vibración (K12)
	Ventilación (K13)
	Confort Térmico (K14)
	Iluminación (K15)
Factores Químicos (K2)	Contacto químico con piel u ojos (K21)
	Exposición al polvo (K22)
Factores Eléctricos (K3)	Estado de la instalación eléctrica (K31)
Factores Mecánicos (K4)	Estado de la maquinaria (K41)
	Protección de maquinaria (K42)
Comportamientos Inseguros (K5)	Transporte de cargas (K51)
	Seguir instrucciones operacionales (K52)
	Uso de EPPs (K53)
	Estibo de materiales (K54)
Factores del ambiente de trabajo (K6)	Orden y limpieza del ambiente de trabajo (K61)
	Condición de vías de circulación (K62)
	Señalizaciones (K63)
	Preparación para emergencias (K64)
Factores Ergonómicos (K7)	Movimientos repetitivos (K71)
	Posiciones de trabajo inadecuadas (K72)
Factores psicosociales (K8)	Carga laboral (K81)

A partir de los factores de riesgo, considerados para la ejecución del proyecto, se generó la matriz de influencia (ver Tabla 16), que asigna valores de 0 a 4 (considerando el valor 0 a factores sin influencia y 4 a los de muy alta influencia). La matriz de relación directa entre factores (ver Tabla 17) permitió encontrar que factores de riesgo son emisores y cuales son receptores, es decir, cuales son afectados y cuales afectan a otros factores.

Tabla 16. Matriz de relación directa entre factores

	K11	K12	K13	K14	K15	K21	K22	K31	K41	K42	K51	K52	K53	K54	K61	K62	K63	K64	K71	K72	K81
K11	0	2	0	0	0	0	2	1	3	0	2	2	4	0	0	0	0	2	0	1	2
K12	2	0	0	0	0	0	1	1	3	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
K13	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1
K14	0	0	4	0	1	1	0	0	1	1	0	1	2	0	1	0	0	0	0	2	1
K15	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	2	1	2
K21	0	1	1	1	0	0	2	1	1	0	1	0	3	1	2	0	0	0	0	1	1
K22	0	1	3	0	1	2	0	2	1	1	1	0	3	1	4	0	0	0	1	1	2
K31	0	1	1	0	0	1	2	0	2	3	0	1	2	0	2	0	1	0	0	1	1
K41	3	2	1	0	0	1	3	2	0	1	0	3	0	0	2	0	0	0	0	0	1
K42	1	1	0	0	1	0	1	1	2	0	0	0	0	1	0	3	0	0	1	1	0
K51	1	1	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1	2	2	1	1	0	1
K52	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	2	0	3	1	2	0	0	0	1	0	0
K53	4	1	0	2	0	4	3	1	0	1	1	4	0	0	2	0	0	4	2	2	2
K54	0	1	0	0	2	0	1	0	0	0	2	2	1	0	2	3	2	2	0	2	0
K61	0	0	1	1	1	0	1	1	2	1	0	2	2	1	0	3	1	3	0	1	1
K62	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	2	3	0	2	4	0	0	1
K63	0	0	0	0	3	0	2	1	1	1	0	0	0	1	3	1	0	4	0	1	0
K64	1	0	0	0	3	0	0	1	2	1	0	4	4	0	4	4	4	0	0	1	0
K71	1	0	0	2	1	1	3	0	1	1	2	2	2	1	2	0	0	0	0	2	3
K72	1	1	1	1	1	1	2	1	0	0	1	2	3	0	1	0	1	2	0	0	2
K81	3	1	1	4	3	1	3	0	1	1	0	2	4	0	1	0	1	1	2	3	0

Tabla 17. Grupos de criterio de emisor o receptor

	R	C	R+C	R-C	Emisor/Receptor
K11	-0.54	-1.70	-2.24	1.15	Emisor
K12	-0.78	-0.87	-1.65	0.09	Emisor
K13	-2.64	-0.66	-3.30	-1.97	Receptor
K14	-1.30	-0.41	-1.72	-0.89	Receptor
K15	-0.41	-1.42	-1.82	1.01	Emisor
K21	-2.86	-0.85	-3.70	-2.01	Receptor
K22	-2.97	-1.28	-4.25	-1.70	Receptor
K31	-1.37	-0.81	-2.18	-0.57	Receptor
K41	-0.39	-0.98	-1.37	0.59	Emisor
K42	-0.91	-1.06	-1.97	0.15	Emisor
K51	-0.56	-1.08	-1.64	0.51	Emisor
K52	-0.90	-0.85	-1.75	-0.06	Receptor
K53	-2.25	-1.81	-4.05	-0.44	Receptor
K54	-1.60	-1.25	-2.86	-0.35	Receptor
K61	-2.16	-1.19	-3.34	-0.97	Receptor
K62	-0.32	-1.25	-1.57	0.93	Emisor
K63	-0.90	-1.22	-2.12	0.32	Emisor
K64	-0.34	-1.59	-1.93	1.25	Emisor
K71	-1.16	-2.44	-3.61	1.28	Emisor
K72	-1.47	-1.67	-3.14	0.21	Emisor
K81	-1.16	-2.61	-3.78	1.45	Emisor

En la matriz de influencia de factores de riesgo se asignan valores de 0 o 1 a aquellos factores identificados que tienen influencia directa sobre otros factores. A partir de la metodología propuesta, se calcularon también los pesos globales y locales de las relaciones entre factores, con el objetivo de asignar una prioridad a cada uno de los factores de riesgo identificados durante el proyecto. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 19.

Tabla 18. Matriz de influencia entre factores de riesgo

		K1					K2			K3		K4				K5				K6				K7		K8
		K11	K12	K13	K14	K15	K21	K22	K31	K41	K42	K51	K52	K53	K54	K61	K62	K63	K64	K71	K72	K81				
K1	K11	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00		
	K12	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00		
	K13	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
	K14	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
	K15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00		
K2	K21	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	K22	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00		
K3	K31	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00			
K4	K41	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00			
	K42	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
K5	K51	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	K52	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00			
	K53	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			
	K54	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
K6	K61	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			
	K62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00			
	K63	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	K64	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
K7	K71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00			
	K72	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00			
K8	K81	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00			

Tabla 19. Peso de los factores de riesgo identificados

Criterio	Peso local	Peso global	Peso global porcentual	Prioridad
K81	1	0.1891	18.91	1
K71	0.8571	0.17	17	2
K72	0.8571	0.17	17	2
K61	0.8571	0.1659	16.59	3
K53	0.5714	0.097	9.7	4
K54	0.5714	0.097	9.7	4
K62	0.4286	0.097	9.7	4
K63	0.4286	0.0819	8.19	5
K64	0.4286	0.0819	8.19	5
K41	0.2857	0.0711	7.11	6
K52	0.4286	0.0689	6.89	7
K15	0.4286	0.0673	6.73	8
K13	0.2857	0.0505	5.05	9
K14	0.4286	0.0505	5.05	9
K31	0.4286	0.0505	5.05	9
K42	0.2857	0.0505	5.05	9
K51	0.4286	0.0505	5.05	9
K11	0.2857	0.0337	3.37	10
K12	0.2857	0.0337	3.37	10
K21	0.2857	0.0337	3.37	10
K22	0.2857	0.0337	3.37	10

A partir de los resultados obtenidos de las matrices de relación y de influencia de los factores de riesgo, se obtuvieron los resultados del análisis de riesgo sobre los factores que fueron identificados en el proyecto.

En la Tabla 17 se puede observar que los factores de carga laboral (K81), movimientos repetitivos (K71), preparación para emergencias (K64), ruido (K11) e iluminación (K15), son aquellos que inciden en mayor medida.

En relación a la matriz de influencia entre factores de riesgo, se observa que los fac-

tores que más influencia tienen durante la ejecución del proyecto, en orden de prioridad, son: carga laboral (K81), movimientos repetitivos y posiciones de trabajo inapropiadas (K71 y K72), orden y limpieza del ambiente laboral (K61), uso de EPPs, acopio de materiales y condiciones de vías de transporte (K53, K54 y K62) y finalmente en quinto lugar, señalizaciones y preparación para emergencias (K63 y K64). Cabe destacar, que a pesar de ser obtenidos los resultados, mediante el análisis de la metodología DEMATEL, se recomienda prestar especial atención a las condiciones y demarcación de las rutas y espacios de trabajo, realizando planes de acción, garantizar posiciones de trabajo correctas y finalmente chequear el estado de la maquinaria y las protecciones utilizadas en las herramientas para salvaguardar la salud y reducir la exposición al riesgo de los operarios.

El procedimiento de análisis de riesgo desarrollado, como se presentó en este apartado, se constituye en una muy buena herramienta para la toma de decisiones. La discretización de los factores o parámetros de riesgo se establecieron en base a la experiencia con la que cuenta la empresa, permitiendo obtener una estimación sobre el grado de importancia que debe darse a cada parámetro.

En la primera parte del análisis, se identificaron los factores con mayor relación en el entorno laboral donde se llevó a cabo el *revamp*. Se encontró que los factores directamente vinculados a la fatiga, el estado físico de los operarios y la preparación para situaciones de emergencia tienen una influencia significativa en otros factores. Por lo tanto, es fundamental implementar medidas para reducir la exposición a estos riesgos.

En la segunda parte del análisis, se realizó un análisis detallado de la matriz de influencia para determinar los factores prioritarios en el estudio. Nuevamente, se confirmó que los factores más influyentes se relacionan con la salud física y mental de los operarios. Además, se observó que el uso de Equipos de Protección Personal (EPPs) puede mitigar el impacto de un factor de riesgo en todos los demás riesgos considerados.

En colaboración con el sector de Seguridad e Higiene de la compañía, se llevaron a cabo las siguientes acciones basadas en los resultados del análisis:

- Reducción de la exposición de los operarios a peligros potenciales.
  - Disminución del tiempo dedicado a tareas que generan un gran cansancio físico y mental, ya sea mediante la reducción de la duración de los turnos o una mayor
-

rotación de los operarios encargados de realizar dichas tareas.

- Aunque no fue considerado como prioritario en el análisis, se reconoce que el adecuado mantenimiento del equipamiento, incluyendo maquinarias y herramientas, puede reducir la exposición al riesgo. Por lo tanto, se pone un especial énfasis en la implementación de planes de mantenimiento.
- Se propone una mejora en el orden y la limpieza del entorno de trabajo para reducir la exposición a maniobras peligrosas y garantizar una rápida evacuación en casos de emergencia. Además, se programaron simulacros de evacuación con el objetivo de asegurar que cada persona conozca sus roles y responsabilidades en situaciones de emergencia.

Para analizar los riesgos y sus consecuencias en las actividades de Montaje y Soldadura, se generan las matrices de riesgo observadas en las Tablas 20 y 21. Con el objetivo de reducir los daños identificados, se establece la Tabla 22.

Tabla 20. Matriz de riesgo para actividades de Montaje

Peligro Identificado	Probabilidad			Consecuencias			Estimación del Riesgo				
	MPP	PP	P	LD	D	ED	NS	PS	M	S	IN
1 Caída de persona a diferente nivel		x				x					x
2 Caídas al mismo nivel		x		x				x			
4 Caída de objetos por manipulación			x	x					x		
5 Caída de objetos desprendidos. Caída de cargas suspendidas		x			x					x	
6 Pisada sobre objetos			x	x					x		
9 Golpes por objetos o herramientas			x	x					x		
10 Proyección de fragmentos o partículas			x		x					x	
11 Atrapamiento por o entre objetos		x			x				x		
13 Sobreesfuerzos			x	x					x		
15 Contactos térmicos			x	x					x		
16 Contactos Eléctricos		x				x				x	
20 Explosiones		x				x				x	
21 Incendios		x				x				x	
23 Atropellos, golpes y choques con o contra Vehíc.		x			x					x	
28 Agentes físicos (ruido)			x		x					x	

Tabla 21. Matriz de riesgo para actividades de Soldadura

Peligro Identificado		Probabilidad			Consecuencias			Estimación del Riesgo				
N°	Descripción	MPP	PP	P	LD	D	ED	NS	PS	M	S	IN
1	Caída de persona a diferente nivel		x				x				x	
2	Caidas al mismo nivel		x		x				x			
4	Caída de objetos por manipulación			x	x					x		
5	Caída de cargas suspendidas		x			x				x		
6	Pisada sobre objetos			x	x					x		
7	Golpes contra objetos inmóviles		x		x				x			
9	Golpes por objetos o herramientas			x	x					x		
10	Proyección de fragmentos o partículas			x		x					x	
11	Atrapamiento por o entre objetos		x			x				x		
13	Sobreesfuerzos			x	x					x		
15	Contactos térmicos			x	x					x		
16	Contactos Eléctricos		x				x				x	
17	Inhalación o ingestión de sustancias nocivas		x		x				x			
19	Exposición a radiaciones			x	x					x		
20	Explosiones	x					x				x	
21	Incendios		x				x				x	
23	Atropellos, golpes y choques con o contra Vehíc.		x			x					x	
25	Causas naturales (Infarto, embolia, etc.)	x					x			x		
27	Enfermedades causadas por agentes químicos		x			x				x		
28	Agentes físicos (ruido)			x		x					x	

En la [Tabla 23](#), se presenta la matriz de análisis de riesgo utilizada durante la ejecución del proyecto.

Tabla 22. Acciones para mitigar los riesgos en las actividades de Soldadura y Montaje

Peligro N°:	Medidas de control de riesgo existentes	Norma o procedimiento existente	Situación del control operativo existente
4	Caída de objetos por manipulación	PO-13.05-SH Uso y entrega de EPP	Capacitación en manipulación de carga Uso de EPP Señalización de obligatoriedad de uso de EPP
5	Caída de cargas suspendidas	Procedimiento de trabajo con carga suspendida	Capacitación en uso de equipos de izaje Uso de EPP
6	Pisada sobre objetos	PO-13.05-SH Uso y entrega de EPP	Capacitación en orden y limpieza Uso de EPP
9	Golpes por objetos o herramientas	Procedimiento de inspección de herramientas	Capacitación en uso de herramientas manuales Checklist de herramientas Uso de EPP
10	Proyección de fragmentos o partículas	PO-13.05-SH Uso y entrega de EPP	Uso de EPP Señalización de obligatoriedad de uso de EPP
11	Atrapamiento por o entre objetos	PO-13.05-SH Uso y entrega de EPP	Capacitación en operación de maquinas y herramientas Uso de EPP Señalización de riesgos Protección mecánica de partes móviles
13	Sobreesfuerzos	N/A	Capacitación en manipulación de carga, Uso de EPP Señalización de obligatoriedad de uso de EPP
15	Contactos térmicos	N/A	Capacitación Uso de EPP
16	Contactos Eléctricos	Procedimiento de trabajo con riesgo eléctrico.	Capacitación en riesgo eléctrico. Uso de EPP Señalización de peligro riesgo eléctrico
20-21	Explosiones e Incendios	Memoria de incendio	Capacitación en prevención y extinción de incendio Simulacros periódicos Ubicación de extintores según memoria y señalización Control de extintores portátiles y luces de emergencia

Tabla 23. Matriz de riesgo, adaptada de ISO 9001.

PROBABILIDAD	GRAVEDAD		
	Ligeramente Dañino (LD)	Dañino (D)	Extremadamente Dañino (ED)
Muy Poco Probable (MPP)	Riesgo no significativo (NS)	Riesgo poco significativo (PS)	Riesgo moderado (M)
Poco Probable (PP)	Riesgo poco significativo (PS)	Riesgo moderado (M)	Riesgo significativo (S)
Probable (P)	Riesgo moderado (M)	Riesgo significativo (S)	Riesgo intolerable (IN)

Durante el proyecto se identificaron cuestiones que deben ser priorizadas:

- La utilización de EPPs debe ser incorporada en la cultura de la empresa para reducir la exposición al riesgo.
- Mantener el orden y limpieza, y una correcta demarcación de las zonas de descarga, transporte y trabajo.
- El *checklist* y la verificación del estado de las herramientas a utilizar, con sus respectivos protectores, deben ser realizados periódicamente para garantizar su aptitud para el servicio.