

ESTRATEGIA PARA EL DESARROLLO DE PRUEBAS FUNCIONALES DE UNIDADES
DE TURBOGENERACIÓN A GAS EN EL PROYECTO EXPANSIÓN FLOREÑA.

FRANCISCO JAVIER HERNÁNDEZ JAIME

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DEL GAS
BUCARAMANGA, 2015

ESTRATEGIA PARA EL DESARROLLO DE PRUEBAS FUNCIONALES DE UNIDADES
DE TURBOGENERACIÓN A GAS EN EL PROYECTO EXPANSIÓN FLOREÑA.

FRANCISCO JAVIER HERNÁNDEZ JAIME

Trabajo de grado para optar al título de
Especialista de Ingeniería del Gas

Director
JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DEL GAS
BUCARAMANGA, 2015

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO AMPLIACIÓN DEL EPF FLOREÑA	15
1.1.1 Condiciones De Operación Actuales EPF Floreña.....	15
1.1.2 Condiciones futuras (Ampliación EPF Floreña).	16
2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE COMISIONAMIENTO	20
3. ESTRATEGIA PARA EL DESARROLLO DE LAS PRUEBAS FUNCIONALES (<i>COMMISSIONING</i>) DE LAS UNIDADES DE TURBOGENERACIÓN.....	25
3.1 Definición de equipos a intervenir durante ejecución del proyecto.....	26
3.2 Definición de sistemas funcionales	32
3.3 Parámetros de diseño y Condiciones de operación para las unidades de Turbogeneración del proyecto expansión Floreña.....	36
3.3.1 Generalidades.....	36
3.3.2 Condiciones requeridas en el sitio de montaje.	38
3.3.3 Especificaciones del sistema de Gas combustible para las unidades de Turbogeneración.....	39
4. PRUEBAS Y COMISIONAMIENTO PARA TURBINAS A GAS.....	42
4.1 Pruebas Funcionales / Operativas.....	42
4.2 Pruebas opcionales.....	45
5. ALTERNATIVAS PARA COMISIONAMIENTO DE LOS TURBOGENERADORES	48
5.1 ALTERNATIVA NUMERO UNO PARA COMISIONAMIENTO TEMPRANO DE LOS TURBOGENERADORES: ALIMENTACIÓN DESDE COMPRESORES BOOSTING EXISTENTES.	48
5.2 ALTERNATIVA NUMERO DOS PARA COMISIONAMIENTO TEMPRANO DE LOS TURBOGENERADORES: ALIMENTACIÓN DESDE LA PLANTA DE TERMOPYOPAL.....	50
5.3 ALTERNATIVA NUMERO TRES PARA COMISIONAMIENTO TEMPRANO DE LOS TURBOGENERADORES: ALIMENTACIÓN CON GAS COMBUSTIBLE DE LAS NUEVAS UNIDADES DE FUEL GAS.....	52
6. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS PARA EL ARRANQUE TEMPRANO DE LOS TURBOGENERADORES.....	57
7. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA PARA PRUEBAS FUNCIONALES.	60
8. CONCLUSIONES	63
9. RECOMENDACIONES.....	64

BIBLIOGRAFÍA..... 65

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Localización Geográfica del Proyecto.....	14
Figura 2 Panorámica EPF Floreña	15
Figura 3 Mapa de Proceso Condiciones Futuras EPF Floreña	17
Figura 4 Descripción fases ejecución de un Proyecto.....	20
Figura 5 Componentes Fase de Construcción.....	21
Figura 6 Principales actividades Fase Comisionamiento	22
Figura 7 Esquema del desarrollo de la estrategia para Pruebas Funcionales de las Unidades de Turbogeneración	25
Figura 8 Funcionamiento Tipo de servicio S1	36
Figura 9 Pruebas recomendadas a un Turbogenerador.....	43
Figura 10 Trazado Línea de alimentación de gas combustible Alternativa 1	49
Figura 11 Trazado Línea de alimentación de combustible Alternativa 2	50
Figura 12 Visualización en 3D equipos y líneas proyecto Expansión Floreña.....	52
Figura 13 Secuencia entrega de sistemas funcionales para pruebas a Turbogeneradores	54
Figura 14 Secuencia Liberación de sistemas funcionales para pruebas a unidades Fuel Gas	56

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Información Meteorológica Área del proyecto	13
Tabla 2 Listado de Equipos Proyecto Expansión Floreña	26
Tabla 3 Análisis de equipos y sistemas esenciales para Pruebas Funcionales.	31
Tabla 4 Sistemas Primarios definidos para Proyecto Expansión Floreña	34
Tabla 5 Especificaciones gas de alimentación Turbogenerador Solar®	40
Tabla 6 Matriz comparativa de alternativas de Comisionamiento.....	59
Tabla 7 Matriz de Evaluación de Alternativas	62

RESUMEN

TITULO: ESTRATEGIA PARA EL DESARROLLO DE PRUEBAS FUNCIONALES DE UNIDADES DE TURBOGENERACIÓN A GAS EN EL PROYECTO EXPANSIÓN FLOREÑA

AUTOR: FRANCISCO JAVIER HERNANDEZ JAIME¹²

PALABRAS CLAVE: COMISIONAMIENTO, TURBOGENERACIÓN, ARRANQUE, PRUEBAS FUNCIONALES

DESCRIPCIÓN:

El proyecto de ampliación de cobertura en el área del piedemonte propuesto por la empresa EQUIÓN ENERGÍA S.A. involucra la expansión de la planta ubicada en el EPF Floreña, el cual incluye: trenes de separación de crudo, planta de acondicionamiento de gas de proceso y sistemas de compresión de gas de inyección, dentro de los sistemas esenciales para la expansión.

Teniendo en cuenta la incorporación de nuevos equipos a la facilidad existente, la demanda de generación eléctrica se verá afectada en un incremento del 300%.

Actualmente el EPF Floreña cuenta con dos unidades de generación eléctrica cuya capacidad es de 1,5 MVA, las cuales no cubren la demanda proyectada de 4,5 MVA, además estas unidades implican altos costos operativos debido a la necesidad de mantenimiento frecuente. Para suplir la demanda energética requerida, la ingeniería del proyecto contempla la instalación de dos unidades de Turbogeneración a gas las cuales tendrían una capacidad de 4,7 MVA, que garantizarán el suministro requerido por los equipos de la expansión.

En el desarrollo de este documento se ilustra el proceso del Comisionamiento para proyectos en la industria, y su interacción con las demás etapas de un proyecto. Definiendo cuales son las pruebas necesarias y los criterios de aceptación para el arranque de equipos o sistemas

Con el presente trabajo de monografía se planteará una estrategia de Comisionamiento que permita identificar cuáles son los equipos y sistemas funcionales fundamentales que deben ser probados para poder realizar las pruebas de las turbinas de generación previa a la puesta en servicio de la planta. Para esto se evaluarán las alternativas de prueba de estas unidades, teniendo en cuenta las condiciones actuales de la planta y el alcance propuesto para el proyecto Expansión.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos Director: Jorge E Meneses. Ing. Mecánico

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF FUNCTIONALS TEST STRATEGY FOR GAS TURBINES IN THE FLOREÑA EXPANSION PROJECT

AUTHOR: FRANCISCO JAVIER HERNANDEZ JAIME³⁴

KEYWORDS: COMMISSIONING, TURBOGENERATION, START UP, FUNCTIONAL TEST

DESCRIPTION:

The project to increase coverage in the Piedemonte area proposed by the Company EQUION ENERGÍA S.A. Involves the expansion of the plant in the EPF Floreña, which includes: A Separation Unit for oil, a gas processing plant and compression systems for injection gas within vital systems for expansion.

Considering the inclusion of new equipment to the existing facility, the demand for electricity will increase in 300%.

EPF Floreña currently has two electric generation units with a capacity of 1.5 MVA, which do not cover the projected demand of 4.5 MVA, these units also involve high operating costs due to the need for frequent maintenance. To supply the required energy demand, the engineering of the project includes the installation of two Gas Turbogeneration units which would have a capacity of 4.7 MVA, ensuring the required supply by the expansion equipments.

Throughout this document the commissioning process for industrial projects, and their interaction with other stages of a project will be illustrated. Establishing the required tests and approval criteria for starting up an equipment or system.

With related job of monography we are posing a commissioning strategy that allow identify which are the equipment and functional systems that must be tested in order to develop generation tests in turbines before start up and get in service. To do this, we are evaluating alternatives on this units, including actual conditions in plant and the scope of the project.

³ Bachelor Thesis

⁴ Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos Director: Jorge E Meneses. Ing. Mecánico

GLOSARIO

CUMPLIMIENTO (*Compliance*): Es el aseguramiento de que el producto o servicio alcanza los requerimientos de las especificaciones, normas e ingeniería establecidas. En otras palabras es asegurar la integridad del producto final.

INSPECCIÓN (*Inspection*). Proceso por el cual se verifica que los materiales, componentes, unidades o equipos satisfacen uno o más requerimientos y/o especificaciones del cliente o proveedor.

PRUEBAS FUNCIONALES: se denomina al conjunto de pruebas que se realizan con el fin de verificar la funcionalidad de los sistemas asegurando que durante que puedan ser operados preservando la integridad y dentro de los parámetros de diseño.

PUESTA EN MARCHA (*Start Up*): consiste en la introducción inicial de hidrocarburos o cargas a los sistemas, en la cual son ajustadas las condiciones operativas para alcanzar los parámetros de diseño, esta operación está regida por lo establecido en el Manual de operación de la planta, así como, en los manuales y catálogos de fabricantes de equipos y/o unidades paquetizadas.

SISTEMA (*System*): Son los módulos funcionales creados para llevar el proceso de pruebas de Completamiento Mecánico y Comisionamiento de una manera sistemática, la planta se divide en partes sobre las cuales se establecen programas de entrega que incluyen los certificados requeridos que avalan su funcionalidad

TRAZABILIDAD (*Traceability*): Es el conjunto de procedimientos, procesos y registros que permiten reconstruir la historia o los hechos de una actividad, elemento o evento, bajo el sistema de calidad establecido.

VENDOR (*Vendor*): Es el representante técnico que da el soporte para los equipos de la casa fabricante. El soporte puede ser durante la instalación en la fase previa al Completamiento Mecánico y durante las pruebas de estos equipos en las pruebas enunciadas en el procedimiento de Comisionamiento y/o puesta en marcha. El soporte depende del tipo de contrato durante la adquisición del equipo indicado en la orden de compra. Siempre se debe garantizar la entrega del Dossier de equipos con toda la documentación respectiva

OBJETIVO GENERAL

Establecer la estrategia de Comisionamiento de las unidades de Turbogeneración para verificar su operatividad previa al arranque del proyecto.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar la importancia de la etapa de Comisionamiento en la ejecución de un proyecto
- Establecer cuáles son los equipos y sistemas requeridos para implementar la estrategia de Comisionamiento.
- Especificar las condiciones de proceso y esquema de generación eléctrica necesario para plantear alternativas de pruebas funcionales.
- Definir las alternativas para realizar las pruebas operativas de los turbogeneradores antes del arranque, que permitan garantizar el Comisionamiento de las unidades.
- Seleccionar la mejor alternativa para realizar las pruebas que ofrezca la mejor simulación de las condiciones de operación de los equipos.

INTRODUCCIÓN

Marco de Referencia

Debido a la ampliación proyectada de la capacidad de tratamiento de gas, crudo y manejo de agua de producción en el EPF Floreña, se espera un incremento en la demanda de generación eléctrica en la facilidad por la incorporación de nuevos equipos, la cual será atendida con la inclusión de dos unidades de Turbogeneración. Ya que estas unidades son nuevas, es necesario realizar pruebas funcionales previas al arranque, que permitan garantizar la operatividad de los equipos y así identificar de forma temprana las posibles fallas o problemas que repercutirían en la puesta en marcha de la facilidad.

Por tal razón, se requiere evaluar cuales serían las posibles estrategias para realizar el Comisionamiento de las unidades de Turbogeneración, definiendo los equipos y sistemas requeridos para el arranque temprano de los turbogeneradores; con el fin de seleccionar la mejor opción que permita simular de forma más precisa las condiciones operativas que tendrán estos equipos teniendo en cuenta los diferentes escenarios de operación.

Con la implementación de la estrategia para realizar las pruebas funcionales tempranamente a las unidades de Turbogeneración en el proyecto expansión Floreña, se logrará reducir los riesgos asociados a fallas que puedan presentarse durante el arranque, favoreciendo el cumplimiento en los tiempos de entrega.

Localización Geográfica EPF Floreña.⁵

El área de facilidades del EPF de Floreña, se encuentra ubicada en el departamento del Casanare, en el municipio de El Yopal, jurisdicción del corregimiento del Morro.

El área donde se proyecta la ampliación de las facilidades del EPF de Floreña se encuentra al sur del Corregimiento del Morro a 1.5 Km aproximadamente.

Las condiciones ambientales del área de ubicación del proyecto se describen a continuación (ver tabla 1).

Tabla 1 Información Meteorológica Área del proyecto

Item	Valor
Elevación	575 m.s.n.m
Presión	13.78 psia
Temperatura Ambiente	59 °F (Min)
	104 °F (Max)

⁵ Informe Diseño Ampliación Facilidades del EPF Floreña Fase II. GRADEX Ingeniería S.A.

Item	Valor
Pluviosidad	Promedio Anual 79 - 180 in
	Maxima / 24 h: 11 in
Humedad Relativa	60% (Min)
	90% (Max)
Viento	Velocidad Promedio: 15 - 20 mph
	Dirección del viento: SW
Sismicidad	NSR-98 Riesgo Alto

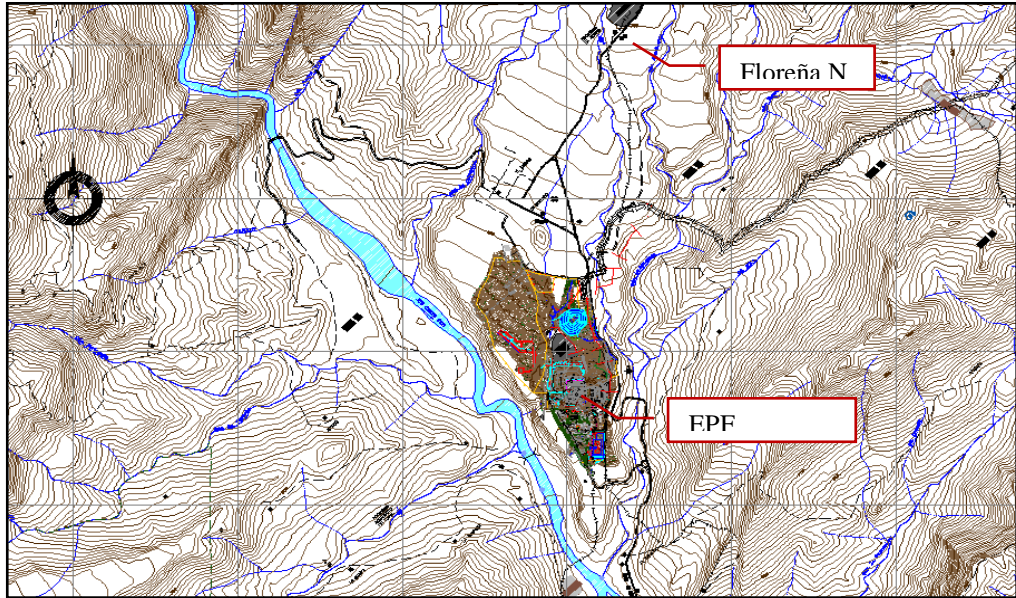


Figura 1 Localización Geográfica del Proyecto

Fuente: Informe Diseño Ampliación Facilidades del EPF Floreña Fase II. GRADEX Ingeniería S.A

Figura 2 Panorámica EPF Floreña



Fuente: Archivo digital Equion Energía LTDA.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO AMPLIACIÓN DEL EPF FLOREÑA

Para la ampliación de Piedemonte considerada por EQUION ENERGÍA LTDA., se plantea realizar la perforación de una serie de nuevos pozos tanto en las áreas de Floreña como en Pauto, estos pozos se han clasificado en dos escenarios o casos, el caso Base los cuales forman parte del proceso de ampliación inicial y el caso Upside, los cuales son pozos previstos a futuro. Estos pozos incluyen tanto productores como inyectores en ambos casos.

Teniendo en cuenta el aporte estimado en la producción debido a la perforación de los nuevos pozos, Equion Energía LTDA. Planea expandir las Facilidades de Producción Temprana (EPF) de Floreña para manejar las siguientes ratas de flujo:

En la etapa inicial de la ampliación, las facilidades existentes recibirán 330 MMSCFD de gas, 41000 bpd de crudo y 7500 bpd de agua. En una segunda etapa, las facilidades existentes recibirán 610 MMSCFD de gas, 50000 bpd de crudo y 12000 bpd de agua.⁶

Dentro del alcance de líneas de flujo se plantea construir una nueva línea, la línea troncal norte, la cual servirá para transportar toda la producción de los pozos del área de Floreña hacia las facilidades de producción.

1.1.1 Condiciones De Operación Actuales EPF Floreña

⁶ 1220-200 FRD/F-PRU-536 Rev. D4 PROCESS DESCRIPTION, TIPIEL S.A.

El EPF de Floreña cuenta con un *manifold* de entrada donde se recibe la producción de los pozos desarrollados en el área piedemonte, en el cual se realiza un proceso de filtración inicial para remover la arena producto de las actividades de perforación, el fluido filtrado es conducido hacia los trenes de separación, compuestos por tres etapas (alta, media y baja presión).

El gas producido en los separadores es enviado a la unidad recuperadora de vapores y a los compresores de gas de proceso. El gas húmedo es enviado a los compresores *boosting* para ser despachado hacia Recetor y otra parte es enviado a la torre contactora de glicol.

El gas húmedo es deshidratado en la torre contactora de glicol, El glicol remueve el agua contenida en la corriente de gas húmedo. El glicol rico que sale de la torre es llevado a una unidad de regeneración en donde por la diferencia entre los puntos de ebullición del agua y el glicol, se regenera el glicol al evaporarse el agua cuando es sometido a cambios de temperatura.

El gas seco es enviado a los compresores *Booster* de inyección y de ahí a los compresores de inyección los cuales envían gas seco a los pozos de inyección para recuperación secundaria.

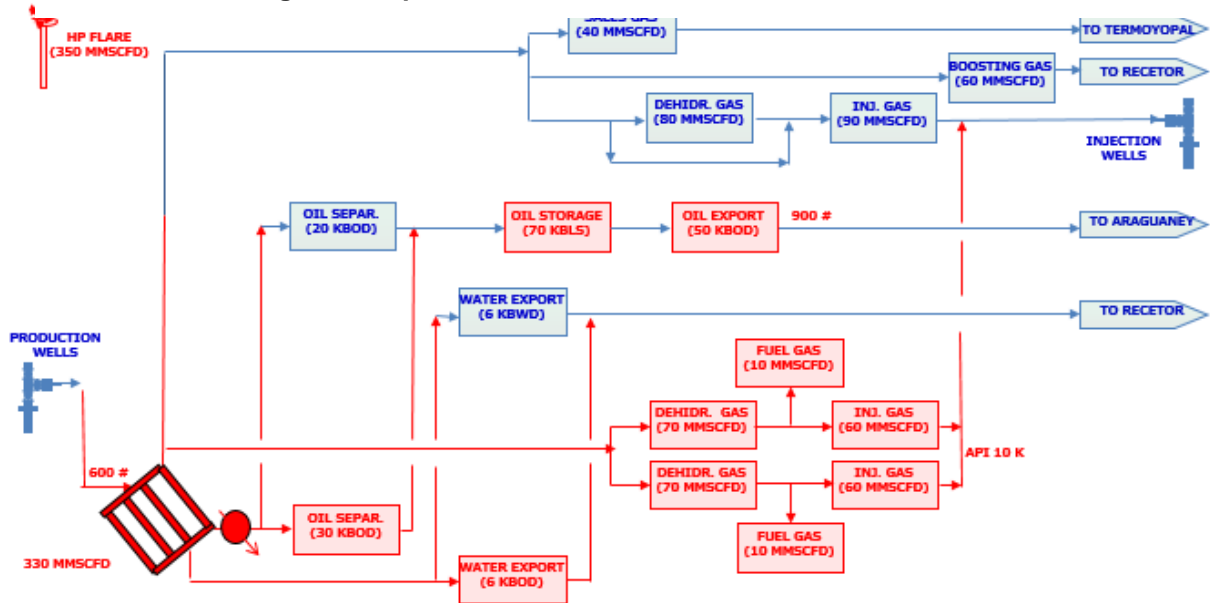
El crudo separado en el tren de separación es almacenado en dos tanques de 5000bbl de capacidad; luego es fiscalizado y bombeado hacia la estación de Arguaney de Ecopetrol. El agua separada en el tren de separación es enviada al flash drum de agua y se almacena en un tanque de 8000 barriles de capacidad, para luego ser bombeada hacia las facilidades de Recetor con inyección de gas proveniente de los compresores *boosting*.

1.1.2 Condiciones futuras (Ampliación EPF Floreña).

En el desarrollo de la primera parte del proyecto expansión, se contempla que la producción deberá ser alimentada al nuevo manifold de entrada y enviada al *Slug Catcher* tipo dedos para el control de baches que puedan presentarse en la línea troncal de producción; éste recibe los fluidos de producción (330MMSCFD de gas y 41000SBPD de crudo y 7500 SBPD de agua) a 600psig y una temperatura que está entre 120-150°F.

Después de pasar por el *Slug Catcher* el crudo es filtrado para retirar la arena producto de la producción, el fluido filtrado es enviado al tren de separación compuesto por un separador de media y baja presión y un tambor Desgasificador, en cada etapa del proyecto el crudo, agua y el gas son separados. Los fluidos filtrados van al tren de separación el cual está compuesto por tres etapas de separación (el cual incluye Separador de Media Presión, de Baja Presión y un Tambor Desgasificador), en cada etapa el crudo, gas y agua son separados.

Figura 3 Mapa de Proceso Condiciones Futuras EPF Floreña



Fuente: 1220-200 FRD/F-PRU-536 Rev. D4 PROCESS DESCRIPTION, TIPIEL S.A.

Teniendo en cuenta las facilidades que serán instaladas en la primera etapa del proyecto el gas separado del líquido en el *Slug Catcher* más el gas producido en las etapas de separación en la VRU y en los compresores de gas húmedo de proceso (compresores de gas de media y baja presión) será enviado a:

- Los compresores existentes de fase I y II (90MMSCFD)
- Los compresores boosting existentes (70MMSCFD)
- Termoyopal (30MMSCFD)
- Facilidades a ser instaladas en la primera etapa deberán manejar cerca de 140MMSCFD.

El agua obtenida de la separación es enviada al Tambor de *Flash*, almacenada en el tanque existente de 8000 BBL de capacidad y bombeada a las facilidades de Recetor con el gas de los compresores boosting.

Para la segunda etapa del proyecto el slug Catcher *Slug Catcher* recibirá cerca de 610MMPCSD de gas, 50000BPD de crudo y 12000BPD de agua a 600psig a una

temperatura entre 120-150°F, en adición al equipo que se instaló en la primera etapa, se instalarán los siguientes equipos:

- Un enfriador de Gas de Proceso con capacidad de 190MMSCFD
- Un Separador de Gas de Proceso con capacidad de 190MMSCFD
- Una contactora de Glicol con capacidad de 190MMSCFD
- Un compresor centrífugo de inyección A con capacidad de 180MMSCFD
- Un paquete de Compresión de Baja Presión con una capacidad de 7.5MMSCFD
- Un tambor de Tea de Baja Temperatura con una capacidad estimada de 300MMSCFD
- Un paquete de Tea de baja temperatura con una capacidad estimada de 300 MMSCFD.
- Un paquete de Tea de emergencia con una capacidad de 345MMSCFD
- Un intercambiador Crudo/Hot Oil
- Un paquete de Hot-Oil
- Un WHRU Hot oil/Gases de combustión

El gas separado del líquido en el *Slug Catcher* más el gas recuperado en las etapas de separación, en la VRU y en los compresores de gas húmedo, será enviado a los compresores de inyección de las fases existentes I y II; adicionalmente en la segunda parte del proyecto el gas debe ser enviado a los siguientes sistemas:

- Compresor de gas *boosting* existente (70MMSCFD)
- Compresor de Termo Yopal (30MMSCFD)
- Compresores de inyección (4 unidades) (140MMSCFD)
- Un compresor centrífugo de inyección que puede manejar hasta 180MMSCFD

La cantidad adicional de gas (cerca de 180MMSCFD) será manejada enviándola a un intercambiador de Gas de Proceso para lograr 110°F y enviarlo al futuro separador de gas de proceso, el gas será deshidratado en la futura contactora de Glicol y comprimido en el turbocompresor.

El crudo separado en el tren de separación será almacenado en dos tanques de 35000 BBL de capacidad cada uno, luego es medido y bombeado hacia las facilidades de Araguaney.

El agua separada en el tren de separación de crudo es enviada al separador flash existe, almacenado en el tanque existente de 8000 BBL de capacidad y finalmente.

Teniendo en cuenta el incremento de los equipos requeridos para el procesamiento de crudo, agua y gas, se presenta un aumento de la demanda energética para la operación del sistema, por lo cual se incluyó el montaje de dos unidades de Turbogeneración para suplir dicha demanda. El funcionamiento de estas unidades, y las características de las unidades que se instalarán en el proyecto se describirán más adelante.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE COMISIONAMIENTO

La importancia de la fase de Comisionamiento en el desarrollo de un proyecto en la industria, radica en que en esta se verifica que los sistemas, equipos o unidades operen de acuerdo a los parámetros y condiciones con las que fueron concebidos en la etapa de ingeniería, en esta fase se simulan las condiciones reales de trabajo y se ajustan las variables para garantizar la confiabilidad e integridad de los sistemas.

Por esta razón, para la etapa de Comisionamiento del proyecto Expansión Floreña se identifica la importancia que adquieren las unidades de Turbogeneración en el proceso, las cuales deben operar de forma segura, continua y confiable una vez todos los sistemas hayan sido integrados a la operación.

Para entender cuál es el alcance de la etapa de Comisionamiento de una unidad, equipo o sistema funcional se ilustrará el proceso de desarrollo de un proyecto en la industria, y las fases específicas y los hitos que enmarcan esta etapa.

A modo de ejemplo, a continuación se describe el conjunto de actividades posteriores a la etapa de Finalización del montaje y previas a la etapa de Aceptación de la planta por el cliente, estas actividades cambiarían dependiendo el tipo de proceso o planta en la que se esté aplicando la secuencia descrita. (Ver figura 6)

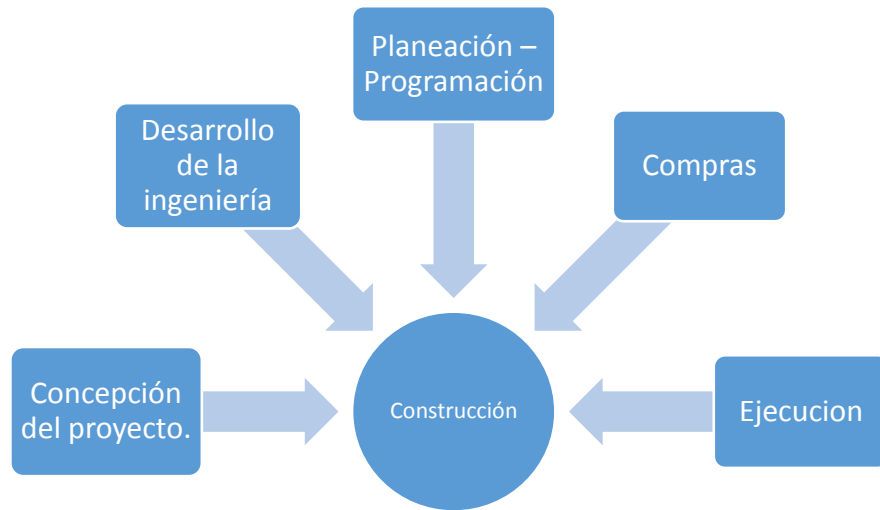
Figura 4 Descripción fases ejecución de un Proyecto



Las etapas de precomisionamiento y Comisionamiento pueden encontrarse superpuestas dependiendo de su alcance.

En la fase de construcción incluye todas las etapas necesarias para su desarrollo tal y como se muestra en la figura a continuación (ver figura 6):

Figura 5 Componentes Fase de Construcción



Esta fase culmina con el hito denominado completamiento del montaje en donde se requiere verificar y asegurar que la planta, los equipos o sistemas fueron construidos de acuerdo a los diagramas de tubería e instrumentación (*P&ID* 's), planos y especificaciones de construcción y cumpliendo con la normatividad y códigos aplicables.

Durante la fase de precomisionamiento o también llamado completamiento mecánico se realizan los ajustes no operacionales, controles de alineación en frío, limpieza y las pruebas a maquinaria sin que la unidad entre en operación, esta es la fase previa a la etapa de Comisionamiento y la liberación se realiza certificando las pruebas en frío, para garantizar que pueden energizar o cargar con fluidos los sistemas.

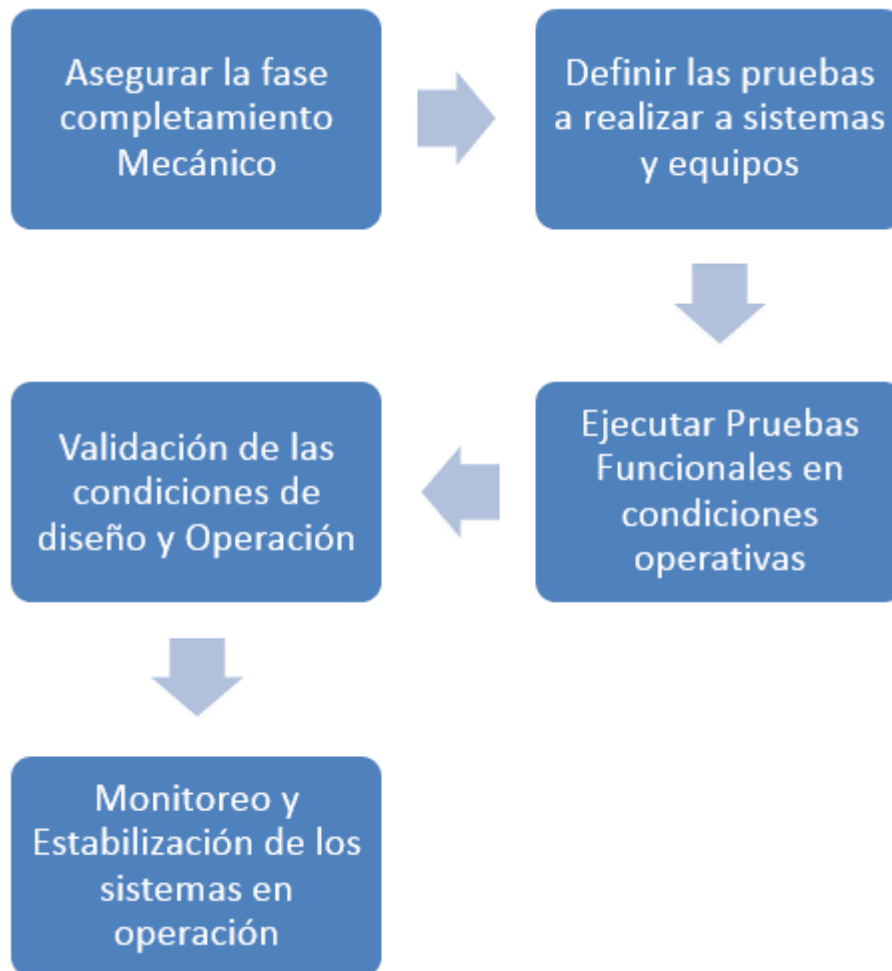
Después que haya sido expedida la certificación de la liberación del completamiento mecánico de la unidad, instalación, sistema o planta, se da inicio a la fase de pruebas funcionales o Comisionamiento en la cual enfocaremos el alcance de este documento.

Fase de Comisionamiento

Durante la ejecución de la fase Comisionamiento se busca probar los sistemas y equipos ya sea con las condiciones reales que van a tener en su entrada en operación o con la simulación de las mismas.

Los principales componentes de esta fase se ilustran a continuación:

Figura 6 Principales actividades Fase Comisionamiento



Las principales actividades que se realizan en la etapa de Comisionamiento normalmente se desarrollan siguiendo la siguiente secuencia:

- Calentamiento o enfriamiento de equipos, dependiendo del tipo de unidad a la que se vaya a realizar las pruebas.
- Pruebas iniciales en donde los sistemas son cargados utilizando productos inertes, tales como agua, nitrógeno, aire, etc.
- Ajuste de los parámetros de operación del equipo, unidad o sistema funcional.
- Alimentación en este paso se suministran cargas o fluidos requeridos para el funcionamiento del sistema probado.
- Estabilización de la operación, cuyo objetivo es garantizar las condiciones de operación segura del sistema construido o cuando se requiera integrar los equipos o sistemas a un proceso existente.
- Después de que los equipos sean estabilizados se operarán a la carga máxima definida por diseño.
- Monitoreo del sistema tomando registro de variables para verificar el funcionamiento del equipo.
- Se procede a realizar ajustes finales durante la puesta en servicio.

En todos los pasos de la secuencia para puesta en marcha, el equipo, sistema o planta debe funcionar en condiciones de seguridad de procesos, para esto se debe verificar el cumplimiento de los requerimientos y recomendaciones definidos en los diagramas de tubería e instrumentación, diagramas de bloques, manuales y filosofías de operación, especificaciones y estudios y análisis de seguridad de procesos.

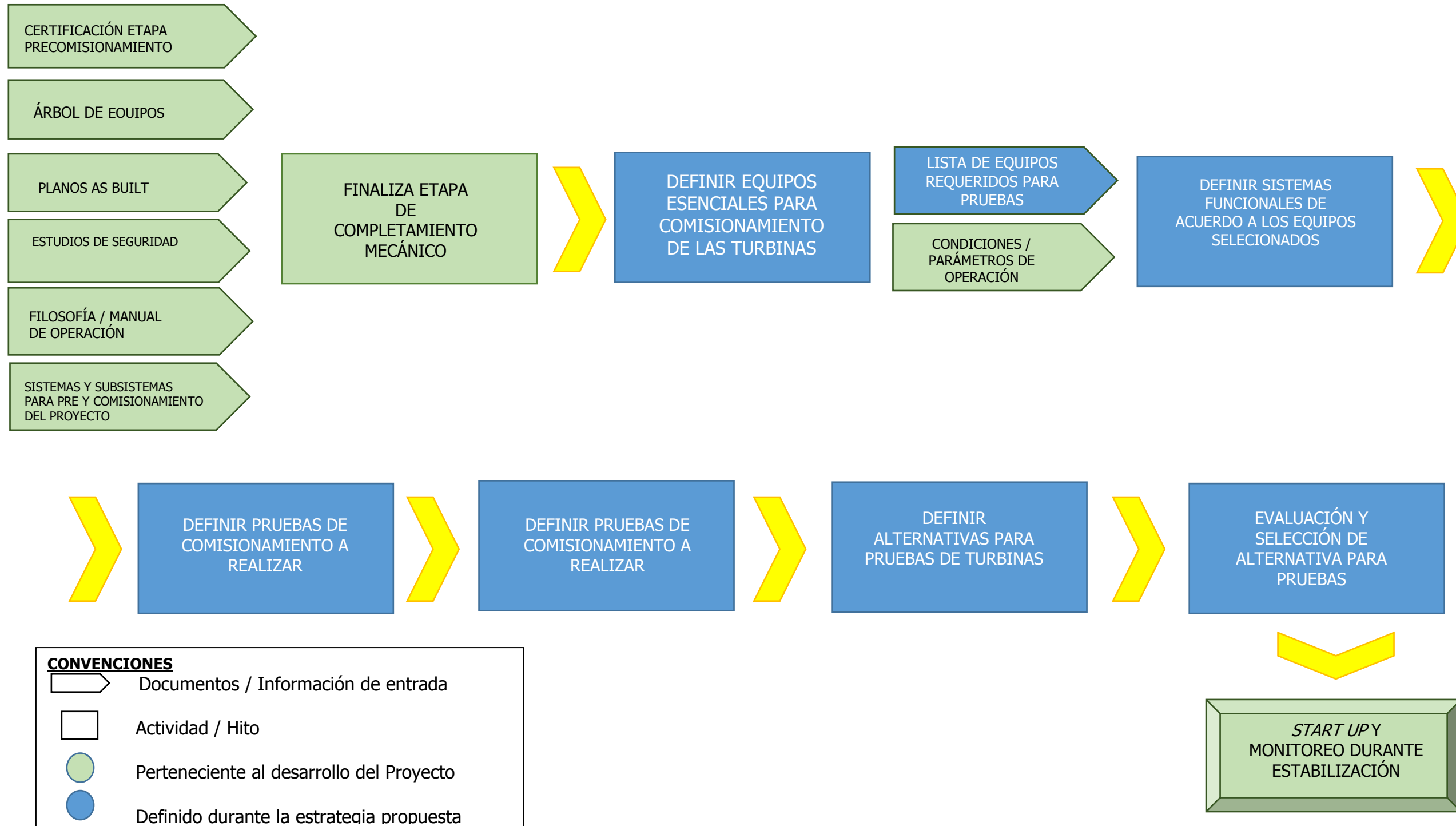
Después de la etapa de Comisionamiento en donde ya fueron operados por primera vez los sistemas bajo las condiciones de proceso, se debe realizar una prueba de desempeño para registrar los consumos y la eficiencia de los equipos. Para ejecutar esta prueba de desempeño es necesario que se cumplan con los siguientes requisitos:

- La planta debe estar operando en condiciones normales de operación cumpliendo con lo contemplado en los manuales de operación y diagramas de proceso.
- Verificar que la instrumentación, equipos de medición y sistemas de control se encuentran cumpliendo con los parámetros de operación.
- Se encuentren disponibles de forma adecuada y oportuna los recursos consumibles, materias primas o servicios auxiliares requeridos para la operación.

- Se encuentre definida la disposición final de residuos producto de la operación.
- Cualquier condición adicional previa a la ejecución de la prueba de desempeño deberá ser acordada entre los responsables.

3. ESTRATEGIA PARA EL DESARROLLO DE LAS PRUEBAS FUNCIONALES (*COMMISSIONING*) DE LAS UNIDADES DE TURBOGENERACIÓN.

Figura 7 Esquema del desarrollo de la estrategia para Pruebas Funcionales de las Unidades de Turbogeneración



3.1 Definición de equipos a intervenir durante ejecución del proyecto.

Para realizar las pruebas funcionales o Comisionamiento de las unidades de Turbogeneración que serán implementadas en el EPF de Floreña, durante el desarrollo del proyecto expansión se identifican los equipos y las unidades paquetes que se montaran en las diferentes etapas del proyecto.

Tabla 2 Listado de Equipos Proyecto Expansión Floreña

Tipo de Equipo	TAG	Descripción	
Air Cooler	23-HE-304	Cooler de Gas de Proceso	
	20-HE-301	Cooler de Crudo	
	23-HE-303	Cooler de Gas de Proceso	
Vasijas	20-V-302	Separador MP	
	20-V-303	Separador LP	
	23-V-307A	Separador de Gas de Proceso	
	23-V-307B	Separador de Gas de Proceso	
	47-V-301	KOD de TEA LT	
	57-V-302	Close Drain (Tanques)	
	26-V-321	KOD de Comp. Iny.	
	26-V-322 A/B/C/D	KOD de Turbinas	
	20-V-304	Degassing	
	23-V-304	Separador de Gas de Proceso	
	23-V-305	Vasija de Descarga de la VRU	
	23-V-306	Vasija de succión del MP Comp.	
	26-V-305	KOD de Comp. Iny.	
	27-V-306	Drenaje Cerrado de Glicol	
	43-V-301	KOD de TEA LP	
	44-V-301	KOD de TEA HP	
	57-V-301	Close Drain	
	63-V-301	Pulmón de Aire	
	43-V-302	FGU LP Blowdown	
	43-V-303	GRU LP Blowdown	
	44-V-302	FGU HP Blowdown	
	Columnas	27-CT-311A	Contactora de Glicol
		27-CT-311B	Contactora de Glicol
27-CT-301		Contactora de Glicol	
Bombas	21-P-302 A/B/C/D	Bombas Booster de Exportación	
	21-P-303 A/B/C/D	Bombas Main de Exportación	
	30-P-301 D	Bomba Booster de agua	
	30-P-302 D	Bomba Main de agua	





Tipo de Equipo	TAG	Descripción
	20-P-301 A/B/C/D	Bombas Rundown
	27-P-304	Bomba de Close Drain de Glicol
	27-P-305	Bomba del Pit del Close Drain de Glicol
	29-P-301 A/B	Bombas de agua potable
	30-P-301 C	Bomba Booster de agua
	30-P-302 C	Bomba Main de agua
	43-P-301 A/B	Bombas de KOD de LP
	44-P-301 A/B	Bombas de KOD de HP
Tanques	71-P-301 A/B	Bombas del SCI
	21-TK-301 A	Tanques de Crudo
	21-TK-301 B	Tanques de Crudo
	54-TK-301	Tanque de agua Demi
	71-TK-302 A/B	Tanque de diésel (Bombas del SCI)
	62-TK-301	Diesel Tank del generador de emergencia
Paquetes	21-ME-301	LACT Unit
	26-ME-301 C/D	Comp de Inyección (Recips)
	26-ME-302	Comp de Inyección (Turbo-comp.)
	27-ME-302	GRU
	44-ME-301 B	HP Flare
	47-ME-301	LT Flare
	46-ME-301B	Fuel Gas Unit
	46-ME-302B	Regenerador de ME
	46-ME-301C	Fuel Gas Unit
	46-ME-302C	Regenerador de ME
	63-ME-301 B	Unidad de secado de aire
	63-K-301	Compresor de aire
	71-ME-302	Proporcionador de Espuma
	20-ME-301	Slug Catcher
	20-ME-302	Waste Heat Recovery Unit + heater
	48-HE-301	Heater del LT KOD
	23-ME-301	VRU
	23-ME-303	Compresor MP
	26-ME-301 A/B	Comp de Inyección (Recips)
	27-ME-301A	GRU
	43-ME-301	LP Flare
	44-ME-301 A	HP Flare
	46-ME-301A	Fuel Gas Unit
	46-ME-302A	Regenerador de ME
	54-ME-302	Sist Hidroneumático de agua Demi
	63-ME-301 A	Unidades de secado de aire
	82-ME-301 A/B	Turbo-generadores








Del listado general de los equipos que serán montados durante la ejecución del proyecto se definen cuales equipos y/o sistemas son esenciales para el funcionamiento de las unidades de Turbogeneración.

Para realizar la selección de los equipos críticos y esenciales para la ejecución de las pruebas de Comisionamiento de las turbinas, se realizará un análisis de criticidad, basado en la siguiente información emitida para el proyecto:

- Filosofía / Manual de operación
- Estudios de Seguridad
- Diagramas de Proceso e instrumentación (P&ID 's)
- Dosieres de equipos

El análisis de los equipos y sistemas se presenta a continuación:

ÍTEM	EQUIPO / SISTEMA	DESCRIPCION	REQUERIDO PARA PRUEBAS
1	Alimentación de combustible	<ul style="list-style-type: none"> Para el arranque de las turbinas se requiere gas combustible que cumpla las especificaciones definidas por el fabricante. 	
2	Transformadores	<ul style="list-style-type: none"> Permiten realizar cambios en los niveles de tensión eléctrica de corriente alterna. Dado que la operación del banco de carga se realiza al mismo nivel de tensión, para las pruebas del turbogenerador no es necesario emplear transformadores. 	
3	Sistema de Puesta a tierra	<ul style="list-style-type: none"> Permite un camino de baja resistencia para que en caso de una falla eléctrica o una descarga atmosférica las corrientes encuentren un camino y no afecten a personas que estén en contacto o cerca a los equipos Protege los equipos al garantizar la correcta operación de las protecciones Establece el nivel de referencia para la tensión de operación de los equipos eléctricos 	
4	Switch Gear	<ul style="list-style-type: none"> Equipo de maniobra que permite energizar o desenergizar los circuitos ramales del sistema eléctrico. No aplica ya que las pruebas se realizarán conectando el generador directo al banco de cargas. No se realizara energización de los circuitos aguas abajo del Generador. 	
5	UPS	<ul style="list-style-type: none"> Garantiza la continuidad de energía para los sistemas de control e instrumentación en caso de una corte de energía eléctrica. Permite obtener niveles óptimos de calidad de energía para el 	

ÍTEM	EQUIPO / SISTEMA	DESCRIPCION	REQUERIDO PARA PRUEBAS
		<p>correcto funcionamiento de los sistemas de control.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permite que los niveles de supervisión y control mantengan su operación durante una parada de emergencia del generador o ante una falla eléctrica en el suministro de energía 	
6	CCM Sistemas Auxiliares (Energizado)	<ul style="list-style-type: none"> • Garantizar el suministro de energía Eléctrica a los sistemas Auxiliares del Turbogenerador (sistema de lubricación, Motor de Arranque, Sistema de Aire de Instrumentos). • Garantiza la protección de equipos eléctricos de los sistema auxiliares • Permite la administración y el control de los sistemas auxiliares desde el PLC de control del Turbogenerador. 	
7	Banco de Cargas	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la simulación de diferentes escenarios de carga para garantizar la correcta prueba funcional del generador. 	
8	Motor de arranque	<ul style="list-style-type: none"> • Es el encargado de llevar a velocidad de operación la turbina, una vez alcanza dicha velocidad este se desconecta. 	
9	Aire de instrumentación	<ul style="list-style-type: none"> • Garantiza el suministro de aire seco para el correcto funcionamiento de la instrumentación de la turbina y así poder medir y controlar las variables de proceso 	
10	Sistema de detección y protección contra incendios	<ul style="list-style-type: none"> • Los sistemas <i>Fire & Gas</i> y sistema contraincendio son requeridos para garantizar la seguridad del proceso, pueden ser reemplazados temporalmente para la etapa de las pruebas por planes de contingencia. 	
11	Alivios y Drenajes	<ul style="list-style-type: none"> • Requeridos para garantizar que las descargar y relevos del proceso se realicen de forma segura 	




ÍTEM	EQUIPO / SISTEMA	DESCRIPCION	REQUERIDO PARA PRUEBAS
12	Sistema de Control	<ul style="list-style-type: none"> Mediante un controlador lógico programable (PLC) instalado localmente, se controla la turbina supervisando las señales Entrada digital (DI), Salida digital (DO), Entrada Análoga (AI), Salida Análoga (AO), Elemento de Temperatura (TE), que se refieren a la instrumentación instalada de las diferentes variables de proceso (presión, flujo, nivel y temperatura) señales de comandos y permisos programadas en su sistema, garantizando su correcto funcionamiento y protección de la misma 	
13	Aire Utilitario	<ul style="list-style-type: none"> Garantiza el suministro de aire para los servicios de mantenimiento, principalmente la limpieza de los filtros de aire de admisión de la turbina 	
14	Sistema de Comunicaciones	<ul style="list-style-type: none"> El controlador de la turbina tiene la opción de suministrar por medio de un puerto de comunicación <i>MODBUS RS485</i> todas las señales controladas sean integradas a un sistema de Control Distribuido (DCS) para su supervisión y control remotamente 	

Tabla 3 Análisis de equipos y sistemas esenciales para Pruebas Funcionales.



REQUERIDO



NO REQUERIDO



OPCIONAL / PUEDE IMPLEMENTARSE CONTINGENCIA

Por lo tanto, para realizar la prueba funcional de las turbinas es requerido lo siguiente como mínimo.

- Sistema de alimentación de combustible. (gas en especificación)
- Sistema de generación eléctrica para arranque.
- Aire de instrumentación.
- Sistema de Puesta a tierra
- Transformadores.
- UPS (Sistema de Alimentación Ininterrumpida)
- Sistema de protección contra incendios (o plan de contingencia)
- Almacenamiento de carga (puede ser a través de bancos de cargas para hacer la prueba bajo condiciones de carga simulada)

3.2 Definición de sistemas funcionales

Teniendo en cuenta los equipos que serán instalados en el proyecto Expansión, se definen que sistemas primarios o sistemas funcionales tiene el proceso, con el fin de establecer que sistemas requieren ser comisionados y las pruebas requeridas por los equipos a instalar.

Los sistemas y subsistemas con los que serán liberadas las etapas de completamiento mecánico son definidos al inicio del proyecto, durante la fase de planeación, para la definición de estos es requerido contar con la ingeniería de detalle e información de los equipos y sistemas a instalar la cual es suministrada por los diferentes fabricantes.

Los sistemas funcionales para el proyecto expansión fueron definidos basados en la LTP-0021⁷ (Practica para inspección, pruebas y Alistamiento de Facilidades, Vías y Locaciones, Pozos en superficie y Líneas de Flujo) emitida por Equion Energía, el cual se identifican los sistemas primarios dependiendo del fluido o proceso a manejar, y después son definidos los sistemas secundarios obedeciendo a la función de cada sistema seleccionado.

Esta monografía no tiene como objeto la descripción del proceso de la delimitación de sistemas y subsistemas en para las etapas de completamiento mecánico y Comisionamiento, sin embargo en términos generales, se ilustrará las clasificaciones propuestas en el documento LTP-0021 de los sistemas primarios y

⁷ LTP-0021 Practica para Inspección, Pruebas y Alistamiento de Facilidades, Vías y Locaciones, Pozos en superficie y Líneas de Flujo, Rev. 5, Nov 2014 Equion Energy

secundarios, con el fin de explicar el criterio utilizado para la selección de los sistemas expuestos más adelante.

SISTEMA PRIMARIO	SISTEMAS SECUNDARIOS
GAS	<ul style="list-style-type: none"> •GAS DE COMPRESIÓN •GAS COMBUSTIBLE (<i>FUEL GAS</i>)
LIQUIDOS	<ul style="list-style-type: none"> •SISTEMA DE ALIVIOS •SISTEMA DE RECIBO DE HIDROCARBUROS •SISTEMA DE MEDICIÓN •SISTEMA DE ALMACENAMIENTO •SISTEMA DE BOMBEO
DRENAJES Y VENTEOS	<ul style="list-style-type: none"> •SUMIDERO / RELEVO •SISTEMA DE VENTEO TEAS •SEPARACIÓN
UTILITARIOS	<ul style="list-style-type: none"> •FLUIDOS •AIRE COMPRIMIDO •AGUA INDUSTRIAL •GASES COMPRIMIDOS •INYECCIÓN DE QUIMICOS
SISTEMAS DE SEGURIDAD	<ul style="list-style-type: none"> •SISTEMA CONTRAINCENDIO •FIRE & GAS •COMUNICACIONES •SISTEMA DE CONTROL DISTRUIDO
ELECTRICO	<ul style="list-style-type: none"> •GENERACIÓN •MEDIA TENSIÓN •BAJA TENSIÓN •SISTEMA ELECTRICO DE EMERGENCIA

Para el proyecto Expansión Floreña fueron definidos principalmente los siguientes sistemas funcionales para Comisionamiento:

Tabla 4 Sistemas Primarios definidos para Proyecto Expansión Floreña

SISTEMAS PRIMARIOS	PROCESO PRINCIPAL	EQUIPOS
LÍQUIDOS		Separador Baja presión
	Separación de crudo	Separador Media presión
		Desgasificador
	Almacenamiento de Crudo	Tanques de Almacenamiento
	Exportación Crudo	Equipos de Bombeo
	Medición de Crudo	Skids de medición (LACT)
GAS	Separación gas	Separadores de gas de proceso
	Tratamiento	Torres contactoras
	Compresión	Compresores de Inyección Compresores de gas de proceso
DRENAJES / VENTOS	Alivios y Drenajes	Teas
UTILITARIOS	Gas Combustible	Unidades Fuel Gas
	Suministro de Aire	Skids de Aire industrial e instrumentación
	Suministro de Agua	
	Inyección de químicos	Patines de inyección
SISTEMAS DE SEGURIDAD Y CONTROL	Sistema Contraincendio	Red contraincendio
	Sistema de detección	Sistema Fire and Gas
ELÉCTRICO	Generación Eléctrica	Turbogeneradores Transformadores Subestaciones eléctricas

Como el objetivo de la implementación de la estrategia de Comisionamiento está orientada en las pruebas funcionales de las unidades turbogeneradoras, se requiere conocer que sistemas son necesarios para poder realizar la energización y la alimentación con combustible de las unidades.

A continuación se presentan los equipos y sistemas funcionales que se requieren para las pruebas de Comisionamiento, de acuerdo a lo definido anteriormente.

GAS COMBUSTIBLE

Alimentación de gas combustible en cumpliendo con las especificaciones requeridas por el fabricante, las cuales serán expuestas más adelante.

ALIVIOS Y DRENAJE

Para realizar las pruebas funcionales las turbinas deben tener completadas mecánicamente las líneas del sistema de alivios y drenaje garantizando las descargas o relevos del proceso en forma segura
Teas

GENERACIÓN ELÉCTRICA

Turbogeneradores
UPS
Transformadores
Subestación Eléctrica
Sistema de Puesta a tierra
Estos equipos se requieren para el arranque de las turbinas y su posterior manejo de cargas generadas.

SERVICIOS UTILITARIOS /SEGURIDAD

Sistema contraincendio
Sistema de detección Fire & Gas
Aire industrial y de instrumentación

Una vez definidos identificados los equipos que serán montados en el proyecto expansión, así como los principales procesos en los que intervienen los mismos, es necesario conocer los requerimientos y las condiciones de operación mínimas para poder realizar pruebas de Comisionamiento (con carga) a las unidades de Turbogeneración, las cuales se expondrán en el capítulo a continuación.

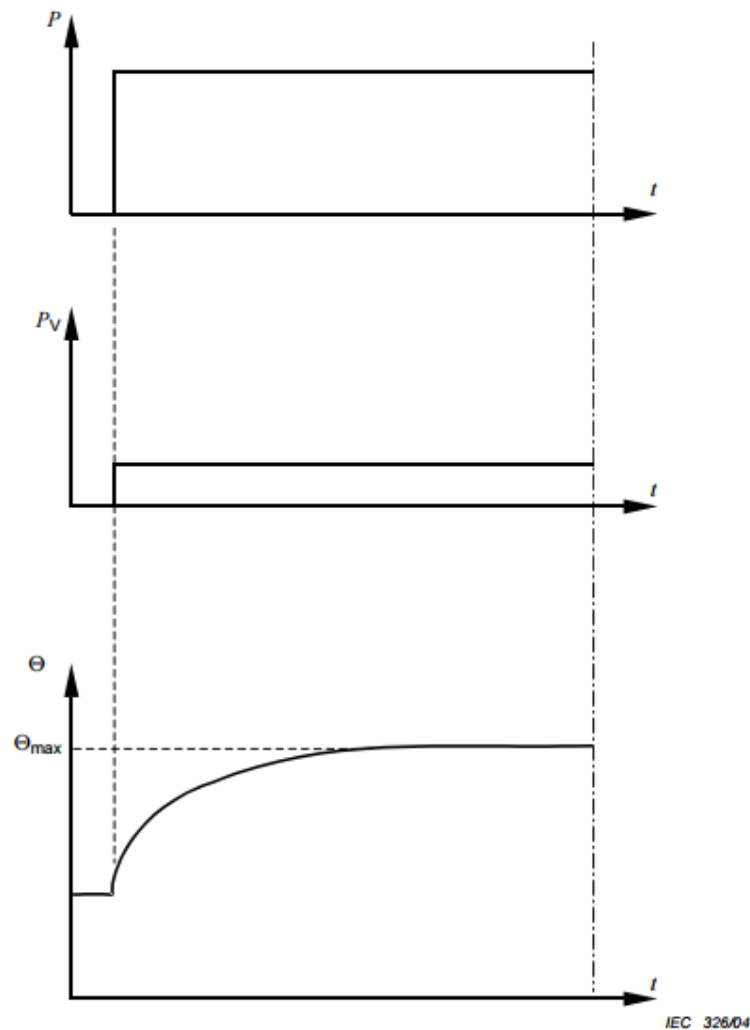
3.3 Parámetros de diseño y Condiciones de operación para las unidades de Turbogeneración del proyecto expansión Floreña

3.3.1 Generalidades.

Las unidades de Turbogeneración que serán instaladas en el proyecto Expansión de las facilidades de Floreña deben ser aptos para operación continua a plena carga, con tipo de servicio S1 según el Estándar Internacional I.E.C-60034-1⁸ (Operación a carga constante mantenida durante un periodo que permita que la maquina alcance el equilibrio térmico); como se representa en las figuras a continuación:

Figura 8 Funcionamiento Tipo de servicio S1

⁸ I.E.C-60034-1 Rotating Electrical Machines - © IEC 2004 Copyright - all rights reserved



FUENTE: I.E.C-60034-1 Rotating Electrical Machines

Donde:

- P carga
- P_V Pérdidas Eléctricas
- θ Temperatura
- θ_{Max} Temperatura máxima alcanzada
- t Tiempo.

La turbina de generación a gas deberá estar integrada con todos los accesorios, sistemas auxiliares y sistema operativo necesario para que su funcionamiento se realice como una unidad sistemática, compacta, ligera y que requiera el menor espacio para ser instalada.

3.3.2 Condiciones requeridas en el sitio de montaje.

La turbomaquinaria accionada por turbina puede instalarse en un edificio o al aire libre cuando incluye una cabina a prueba de los elementos, normalmente no requiere instalación en cabinas de insonorización para instalaciones cerradas, sin embargo debe tenerse en cuenta el ruido de la turbina si el personal se encuentra cerca de la maquinaria en funcionamiento.

Los equipos de generación y la turbina deben ser aptos para instalación en condiciones de ambiente típicas de plantas químicas o refinerías, en donde predomina el polvo y ambientes potencialmente corrosivos.

El conjunto estándar impulsado por turbina funciona desde el nivel del mar hasta una elevación de 8000 pies (2438 m) a temperaturas que oscilan entre -20°F y 115°F (-29°C y 46°C).

La viscosidad del aceite lubricante puede limitar el funcionamiento a temperaturas extremas, el aceite lubricante debe cumplir con los requerimientos de viscosidad para la temperatura ambiente durante el arranque.

El nivel de presión acústica máxima admisible es de 85 *dB* a 1 metro tomado desde la cara exterior de la unidad contenedora del equipo.

3.3.3 Especificaciones del sistema de Gas combustible para las unidades de Turbogeneración.

El sistema de gas combustible y de aire, conjuntamente con el sistema de control, programan automáticamente el flujo de combustible durante la aceleración de la turbina y el funcionamiento con carga. El sistema también proporciona un control limitador del flujo de combustible por excesos de temperatura y sobrevelocidad, y una parada automática en caso de presentarse falla.

El sistema combustible, en conjunto con el sistema de control, incluyen todos los componentes requerido para garantizar el flujo de combustible y su posterior ignición, durante todos los modos de operación disponibles, las configuraciones del sistema de combustible se listan a continuación:

- Combustión convencional con gas combustible
- Gas Combustible – Sistema SoLoNOx
- Gas y liquido (combustible dual) – Combustión convencional
- Gas y liquido (combustible dual) – Combustión Sistema SoLoNOx

Sistema de combustión convencional.

El sistema de combustión convencional de los turbogeneradores Solar® utiliza inyectores de combustible igualmente espaciados alrededor de la cámara de combustión, que inyecta combustible en la cámara de combustión, este combustible es controlado durante el arranque y estabilización para mantener una combustión estable

Gas Combustible – Sistema SoLoNOx

El sistema de combustión SoLoNOx, se encuentra como una opción de alimentación de combustible en la mayoría de las turbinas Solar®, SoLoNOx se introdujo en 1992 como un sistema de combustión con emisiones reducidas. Las turbinas de gas con SoLoNOx utilizan una tecnología de combustión con premezcla seca para asegurar una mezcla uniforme de aire/carburante para una combustión limpia.

Este sistema utiliza inyectores especiales con pilotos y puertos para el combustibles, el gas inyectado a través de estos puertos es controlado durante el arranque y estabilización para mantener estable la combustión y minimizar la formación de óxidos del nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO) y emisiones de hidrocarburos que no alcanzaron a quemarse (UHC), para regular las emisiones,

el aire de combustión es regulado usando una válvula de purga montada en la cámara de combustión.

Requisitos Del Gas Combustible Para La Turbina

La selección del tipo de combustible satisfactorio depende de la composición física y química del combustible. Los requisitos para combustible de gas natural para el gas combustible del turbogenerador, deberán cumplir con la especificación ES 9-98 del fabricante (Solar), los cuales se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla 5 Especificaciones gas de alimentación Turbogenerador Solar®

Nomenclatura	Descripción
Poder calorífico inferior del combustible	1098 a 1342 WI (Índice de WOBBE9 (43.2 a 52.8 MJ/m ³). El índice <i>WOBBE</i> es igual al poder calorífico inferior en BTU/SCF dividido por la raíz cuadrada de la gravedad específica del gas combustible. Un valor del índice de <i>WOBBE</i> que se encuentre por fuera de este rango es aceptable con la debida aprobación del grupo de ingeniería del fabricante del equipo.
Composición	La temperatura del gas combustible debe ser al menos de 50°F (27,7°C) por encima del punto de rocío del combustible a la presión de funcionamiento (con el fin de evitar la formación de líquidos en el gas combustible) y no debe ser 4°F (2,2°C) por encima o por debajo de la temperatura de gas combustible especificado para el sistema de combustible del proyecto.
Materias contaminantes	Las materias contaminantes totales no deben exceder: 30 ppm x (Poder calorífico inferior por peso BTU/lb ÷ 21500 BTU/lb) O bien, 30 ppm x (poder calorífico inferior por peso MJ/Kg ÷ 50 MJ/Kg) Las partículas no deben exceder 10 µm No se permite que haya agua de arrastre en el gas, es decir, no debe haber agua por encima del punto de saturación a la presión de funcionamiento máxima. El porcentaje en peso total de azufre, incluido el ácido sulfhídrico, no debe pasar de 1% x (poder calorífico inferior por peso BTU/lb ÷ 21500 BTU/lb) o 1% poder calorífico inferior por peso MJ/Kg ÷ 50MJ/Kg)

El sistema combustible no debe contener azufre, ni contaminantes, ni agua de arrastre ni hidrocarburos líquidos. El sistema de gas requiere un suministro constante de gas de acuerdo a la velocidad del flujo y el rango de presión especificado por el fabricante.

Ya conocidas los equipos, sistemas funcionales y condiciones de operaciones requeridas para realizar las pruebas de Comisionamiento a las unidades de Turbogeneración a continuación se describen las pruebas funcionales recomendadas a turbinas generadoras a gas, de acuerdo a los estándares internacionales.

4. PRUEBAS Y COMISIONAMIENTO PARA TURBINAS A GAS

Para conocer las pruebas que se realizan turbinas a gas, para la liberación de las etapas de montaje, completamiento mecánico (pruebas en frío) y pruebas funcionales (pruebas con carga), se tomara como referencia el estándar británico – BS ISO 3977-8:2002 *GAS TURBINE PROCUREMENT*⁹- En el cual refiere los requerimientos mínimos para las pruebas físicas de componentes, montajes, y unidades previas a la puesta en servicio.

El comprador y distribuidor deberán acordar los alcances de las pruebas a realizar, estas podrían ser seleccionadas de las pruebas opcionales, presentadas a continuación, las cuales son pruebas recomendadas para unidades turbogeneradoras a gas. (Ver Figura 11)

4.1 Pruebas Funcionales / Operativas

El alcance de las pruebas alternativas previas a la entrega de los equipos y su puesta en funcionamiento, dependen de lo contemplado durante el diseño, del tipo y tamaño de la turbina de gas y las facilidades disponibles para realizar las mismas.

El alcance y sitio donde se realizaran las pruebas deben ser acordados entre el vendedor y el comprador, las pruebas de desempeño deberán realizarse de acuerdo a lo establecido en la norma ISO 2314, a continuación se describen algunos ejemplos de pruebas que comúnmente son realizadas para la liberación de las etapas de completamiento mecánico y Comisionamiento de una turbina:

- Pruebas a turbinas de gas
- Pruebas a turbinas de gas y equipo impulsor
- Pruebas a unidades paquetizadas.

Para turbinas de potencia, se presentan estas alternativas de prueba:

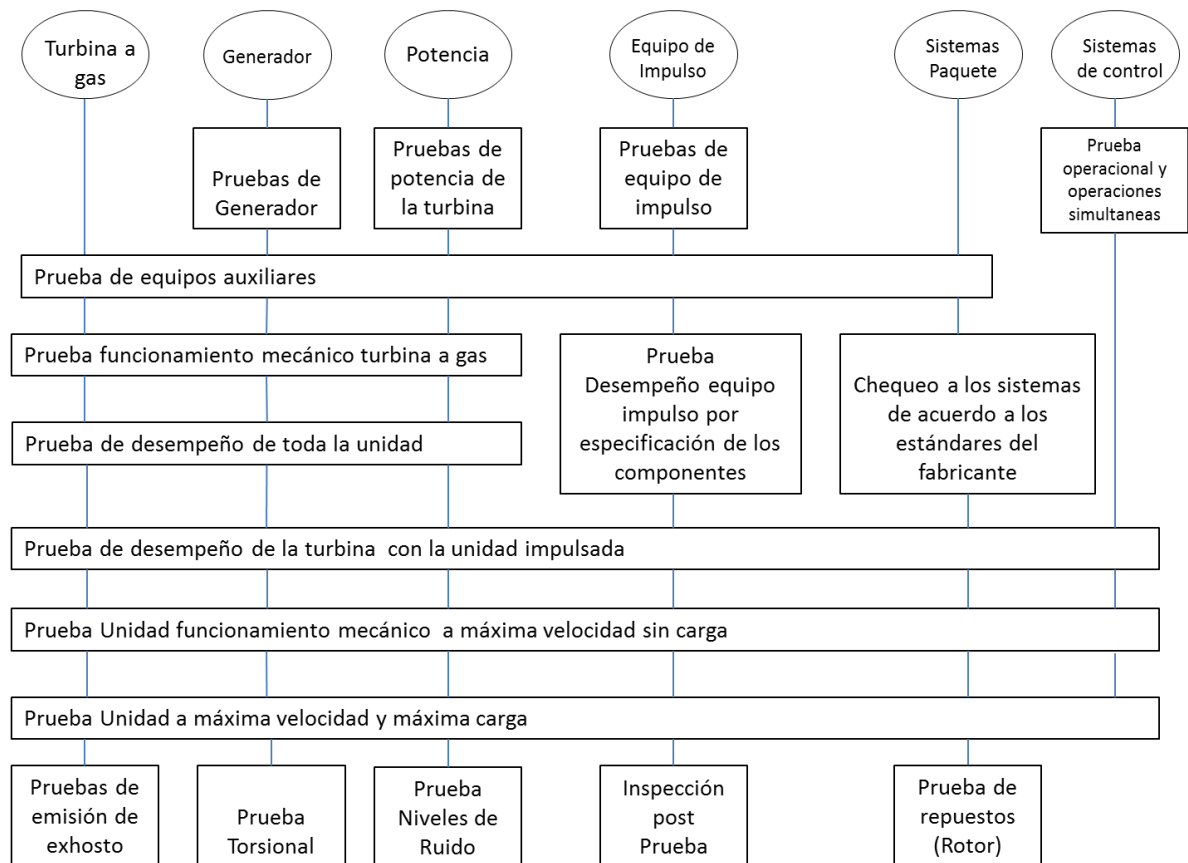
- Pruebas del generador a gas
- Pruebas de la turbina de potencia.

Estas pruebas deben ser llevadas a cabo, sin carga, con un porcentaje de la carga o a carga completa, el impulsor deber trabajar a carga total, máxima presión y máxima velocidad.

⁹ BRITISH STANDARD BS ISO 3977-8:2002 GAS TURBINE PROCUREMENT; Part 8: Inspection, Testing, Installation and Commissioning.

Durante las pruebas deben evaluarse las condiciones y parámetros de la turbina para arranque en frío y arranque en caliente, máximo rango de operación, operación de válvulas de purga.

Figura 9 Pruebas recomendadas a un Turbogenerador



Fuente: BRITISH STANDARD BS ISO 3977-8:2002 GAS TURBINE PROCUREMENT

Se debe garantizar que la presión, viscosidad y temperatura de los aceites de lubricación se encuentren dentro del rango de operación recomendado por el fabricante.

La carcasa, el sistema de lubricación, sistema de combustible y el sistema hidráulico de la turbina deber ser chequeados verificando la integridad y hermeticidad de juntas y conexiones, de presentarse fugas de aceite o combustible deben ser reparadas, las fugas de aire impactan negativamente el desempeño de la turbina y aumentando el peligro durante su operación, por esta razón también deberán ser corregidas.

El generador a gas debe ser probado como una unidad paquete o como un parte del equipo (Turbina), en las pruebas se debe verificar el funcionamiento mecánico, potencia y eficiencia térmica de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

Durante la prueba de funcionamiento mecánico y/o pruebas de desempeño, la operación mecánica de los equipos y dispositivos de seguridad que puedan ser probados debe ser demostrada satisfactoriamente, los registros de lectura de vibración no deben exceder los límites dados en 6.7.2.1 de ISO 3977-3:2002, el desempeño de la maquina debe coincidir con los criterios especificados en la norma.

En el caso de que la turbina de potencia sea probada por separado (cuando no se encuentra acoplada al generador a gas), esta debe ser probada para garantizar el cumplimiento de los niveles de vibración y operación satisfactoria de los dispositivos de protección e instrumentación.

El generador eléctrico debe ser probado en fábrica de acuerdo a lo establecido en IEC 60034-1 y IEC60043-4.

Las unidades de compresión de aceite, productos petroquímicos y de refinerías deben ser probadas en fábrica de acuerdo a los requerimientos establecidos en ISO 10442.

Las unidades de bombeo de aceite, productos petroquímicos y de refinerías deben ser probadas de acuerdo a los requerimientos establecidos en ISO 13709.

Los reductores de carga principales para aceite, productos petroquímicos y de refinerías deben ser probadas de acuerdo a los requerimientos establecidos en ISO 13691.

El hardware de los paneles de control deberá ser probado por completo, las pruebas funcionales deben llevarse a cabo por medio de simulaciones, o en su defecto el vendor o fabricante debe revisar completamente la operación y las variables de proceso de la turbina a gas antes de la instalación o la fase de Comisionamiento.

Los equipos auxiliares deben ser probados antes de la prueba de funcionamiento mecánico de la turbina, el alcance y detalle de las pruebas a realizar a los equipos auxiliares debe ser definido entre el comprador y el fabricante.

La revisión de los sistemas y componentes *On skid* y *Off skid* deberán ser probados de acuerdo a los estándares del fabricante y procedimiento establecidos, estas pruebas deben confirmar la integridad de sus sistemas y su capacidad de funcionar correctamente, y podrían incluir algunas de las siguientes actividades:

- Inspección visual
- Pruebas de lazos de control
- Limpieza de tuberías
- Prueba de presión (hidrostática o neumáticas)
- Prueba de fugas (*Leak Test*).
- Calibración y ajuste de instrumentación asociada.
- Secuencia de apertura y cierre de válvulas.

4.2 Pruebas opcionales.

Las siguientes son pruebas opcionales que pueden ser acordadas entre el comprador y el fabricante para ser realizadas en sitio o en fábrica, dependiendo del alcance y la facilidad para ejecutarlas:

- Pruebas de emisiones de Exhosto, la cual debe llevarse a cabo de acuerdo a lo establecido en ISO 11042-1
- Prueba Torsional, las mediciones de vibración torsional deberán ser tomadas para realizar el análisis torsional completo del tren de potencia. Estas pruebas son complejas y requieren el uso de equipo de ajuste muy sofisticado.
- Prueba de nivel de sonido, debe realizarse de acuerdo a lo establecido en ISO 6190, o en un procedimiento acordado entre el fabricante y el comprador.
- Inspección Post-Prueba, inspección por boroscopia y/o desmantelamiento y re ensamble del equipo impulsor principal para verificar el estado de los engranajes y el equipo impulsor.
- Prueba de rotor de repuesto, el cual debe probarse de según lo especifique el fabricante.
- Prueba de resistencia, el equipo debe ser probado en funcionamiento prolongado por un periodo de 24 horas o más, los objetivos y criterios de aceptación de esta prueba deben ser acordados entre el fabricante y el comprador.

Usualmente, pero no exclusivamente estas pruebas son requeridas para verificar la confiabilidad de la unidad o algún componente o sistema en particular.

Antes de las fases de montaje y Comisionamiento de la turbinas el comprador debe informar al fabricante los servicios y/o utilitarios que se encuentran disponible en el sitio.

El fabricante es responsable de proveer los procedimientos para la instalación y Comisionamiento para los equipos y servicios que se encuentren dentro del alcance de su soporte o asistencia en el proyecto.

Los equipos deben ser instalados de acuerdo a los procedimientos del fabricante en el cual deben incluirse los detalles de instalación, manuales, listas de chequeo o similares.

Estas actividades deben ser registradas y soportadas documentalmente, para llevar la trazabilidad en caso de requerirse en el futuro. Estos procedimientos deben incluir, entre otras cosas, algunos o la totalidad de las siguientes actividades:

- Instalación mecánica
- Instalación eléctrica
- Pruebas funcionales de control.
- Comprobación de secuencia de fase de motores y generadores.
- Pruebas de instalación de equipos eléctricos.
- Comprobación de continuidad de cableado eléctrico.
- Pruebas de Lazos de control y/o circuitos de instrumentos.
- Limpieza de tuberías
- Prueba de fugas de tuberías presurizadas.
- Alineamiento
- Grouting (concreto de nivelación)
- Chequeos de precomisionamiento (liberación de completamiento mecánico)
- Pruebas de facilidades y sistemas de emergencia.

De acuerdo a los sistemas funcionales y equipos esenciales definidos para las pruebas de Comisionamiento de las turbinas, se deben evaluar los posibles escenarios para la realización de las mismas, los cuales difieren básicamente en las alternativas que se tienen para la alimentación de gas combustible cumpliendo las especificaciones definidas por el fabricante.

A continuación se describen las opciones para suministrar el gas combustible a la turbina, con el fin de evaluar las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

5. ALTERNATIVAS PARA COMISIONAMIENTO DE LOS TURBOGENERADORES

A continuación se presentan los diferentes escenarios para realizar pruebas y arranque temprano de las unidades de Turbogeneración.

Para definir las alternativas de Comisionamiento de las turbinas, es necesario tener en cuenta los parámetros y condiciones operacionales requeridas por los equipos a probar, para establecer los sistemas y unidades que pueden garantizar estos requerimientos, teniendo en cuenta las condiciones actuales de la planta.

Como se ha expresado anteriormente en el desarrollo de este trabajo, el objetivo de realizar el arranque temprano de las unidades de Turbogeneración es garantizar la operación continua y segura en la puesta en servicio de las unidades, disminuyendo el riesgo de falla y los tiempos de estabilización.

5.1 ALTERNATIVA NUMERO UNO PARA COMISIONAMIENTO TEMPRANO DE LOS TURBOGENERADORES: ALIMENTACIÓN DESDE COMPRESORES BOOSTING EXISTENTES.

En la actualidad el EPF Floreña cuenta con dos compresores *Boosting* que comprimen y envían aproximadamente 60 MMSCFD hacia las facilidades de receptor. Estas unidades son compresores de dos etapas, por lo tanto la primera opción propuesta consiste en acondicionar una línea para tomar el gas caliente que sale de la primera etapa de compresión, el cual tiene las siguientes características operacionales:

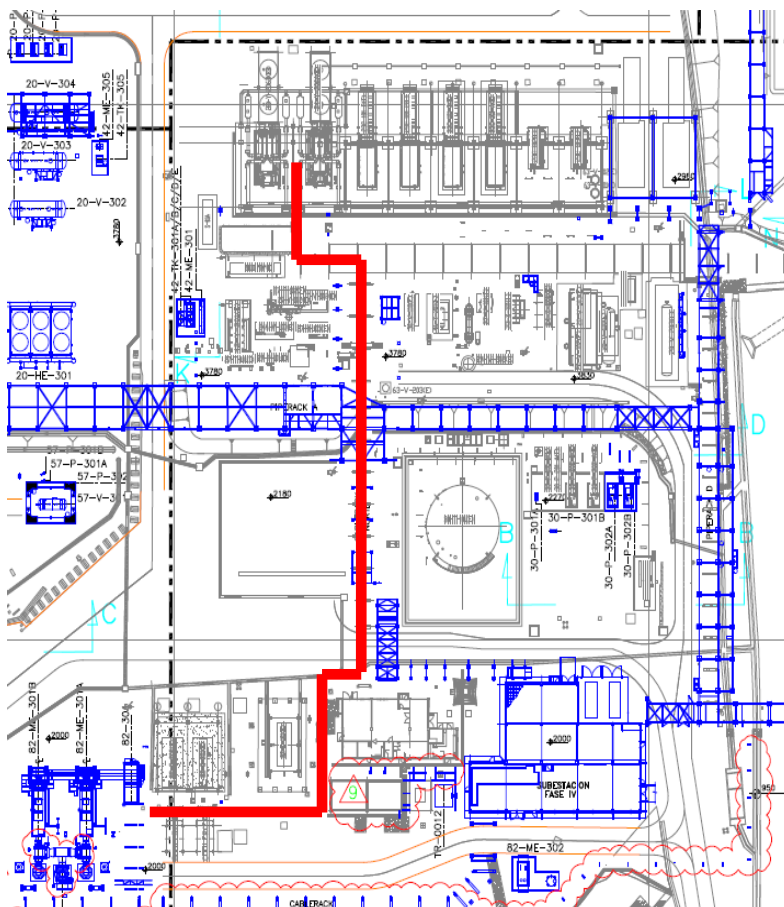
- Temperatura final del gas 185°F (85°C)
- Punto de rocío (dew point) 120°F (49°C)

Para el desarrollo de esta alternativa se requiere la construcción de la soporteria y trabajos de adecuación para el montaje de la línea de alimentación de gas desde los compresores *boosting* hasta las turbinas, línea que saldría de servicio una vez sean montados los equipos y sistemas que se encuentran dentro del alcance del proyecto Expansión Floreña, por lo tanto requerirá ser desmontada después de las pruebas, ósea que su función solo sería la alimentación de las turbinas para el arranque temprano, lo cual no está alineado con las actividades de construcción pertenecientes a la ejecución del proyecto, de acuerdo al alcance. El trazado de la línea se ilustra sobre el plot plan general del proyecto para identificar su recorrido y posibles interferencias con los equipos y líneas de proceso existente. (Ver Figura 10)

Como la alternativa plantea utilizar gas de la descarga de la primera etapa de compresión, una limitante sería la complejidad para reducir la presión, ya que la descarga de los compresores *boosting* está entre 2000 y 2080 psig, y al realizar las pruebas funcionales con este gas, no se aprovecharía el arranque de las turbinas para probar en línea la mayoría de equipos asociados a su funcionamiento, teniendo en cuenta que el gas ya se encontraría dentro de las especificaciones requeridas.

La mayor ventaja que tiene esta alternativa es que las unidades de donde se obtendrá el gas de alimentación de las turbinas ya es existente, y la implementación de esta opción no depende de otros sistemas de la planta, ni de

Figura 10 Trazado Línea de alimentación de gas combustible Alternativa 1
otros usuarios.



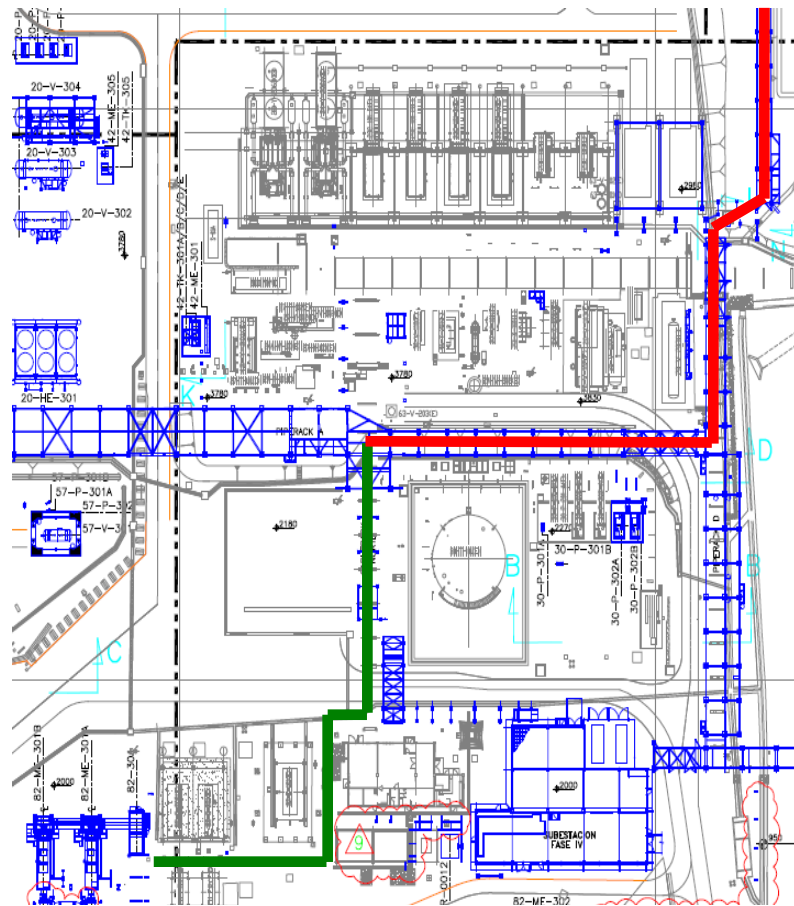
Fuente: Plot Plan Expansión Floreña

5.2 ALTERNATIVA NUMERO DOS PARA COMISIONAMIENTO TEMPRANO DE LOS TURBOGENERADORES: ALIMENTACIÓN DESDE LA PLANTA DE TERMOYOPAL.

El EPF de Floreña abastece de 30 MMSCFD de gas combustible para generación eléctrica a la planta Termoyopal la cual tiene una capacidad de 110 MW, esta alternativa contempla la construcción de una línea de gas que se derivaría desde el cabezal principal de alimentación de las turbinas de generación de Termoyopal, realizando un tie in en la entrada a las instalaciones de la planta de generación.

La línea debe ser llevada hasta las unidades de Turbogeneración del proyecto expansión, para esto el montaje se realizara a través de parte de los *racks* de tuberías que están proyectados para el proyecto expansión, y la llegada a los turbos requiere la construcción de soporteria y adecuaciones civiles como se ilustra en el trazado a continuación: (Ver Figura 11)

Figura 11 Trazado Línea de alimentación de combustible Alternativa 2



Fuente: Plot Plan Expansión Floreña

La presión del cabezal de despacho de gas ventas hacia Termoyopal es de 270 psig, con lo cual no se presentaría la condición de la alternativa número en donde se requiere disminuir la presión desde valores considerables.

Las características operaciones del gas suministrado a Termoyopal se presentan a continuación:

- Temperatura final del gas 120°F (49°C)
- Punto de rocío (*dew point*) -90°F (-68°C)

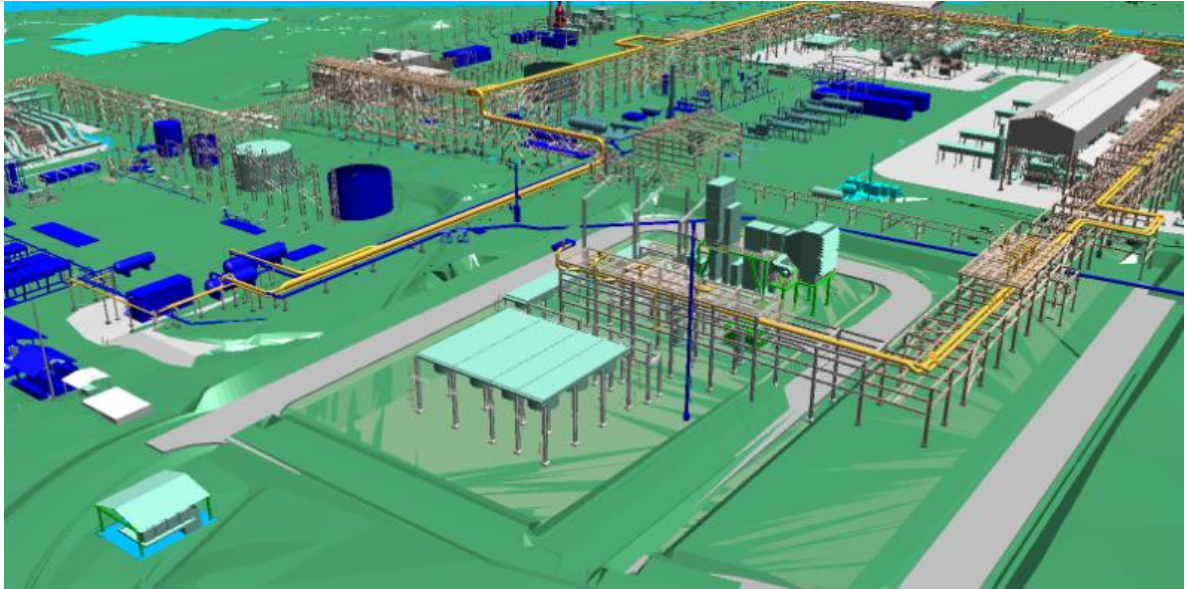
Este gas combustible tiene como ventaja que es un gas con especificaciones de alta calidad, por ser el gas ventas del proceso operacional del EPF, y por esta razón no requiere tratamientos adicionales para ser utilizado en las pruebas funcionales tempranas de las turbinas.

Como el gas ya se encuentra cumpliendo las especificaciones para ser comercializado, no es necesario la inclusión de equipos en esta alternativa, sin embargo, como sucede en la opción anterior, para la prueba funcional no sería probado el funcionamiento de los equipos y sistemas asociados a la operación de las turbinas, de acuerdo a lo proyectado en el alcance general del proyecto.

La mayor desventaja que presenta esta alternativa es la dependencia del suministro de gas combustible de Termoyopal. En el caso de alguna eventualidad o salida de servicio de la planta, se suspendería la distribución de gas por el cabezal inhabilitando la alimentación de las turbinas del proyecto expansión.

5.3 ALTERNATIVA NUMERO TRES PARA COMISIONAMIENTO TEMPRANO DE LOS TURBOGENERADORES: ALIMENTACIÓN CON GAS COMBUSTIBLE DE LAS NUEVAS UNIDADES DE FUEL GAS.

Figura 12 Visualización en 3D equipos y líneas proyecto Expansión Floreña.



FUENTE: ANIMACIÓN 3D PROYECTO EXPANSIÓN FLOREÑA -TIPIEL S.A.

Teniendo en cuenta el listado de los equipos (Tabla 2) y los sistemas funcionales definidos para el proyecto (Tabla 4), se deben establecer cuáles de esos equipos y sistemas son necesarios para hacer las pruebas de Comisionamiento de las turbinas en una fase temprana.

Para esto se definirá una secuencia de entrega de cada uno de los sistemas y sus equipos asociados de acuerdo a las prioridades operacionales.

Las obras y adecuaciones civiles preliminares para el montaje de equipos y terminación mecánica de los sistemas no se tendrán en cuenta como actividades de la secuencia planteada, es decir, se parte del hecho que las fases de movimientos de tierra y manejo de aguas subsuperficiales y superficiales ya se encuentra realizado.

Para la prueba funcional temprana de las turbinas generadoras, como mínimo, se requiere que se encuentre finalizado el completamiento mecánico de los siguientes equipos, para poder operarlos de forma segura, garantizando que sean controladas las variables del proceso y no ponga en riesgo al personal que realiza la prueba, ni la integridad de los equipos y la operación :

- Generador *Black Start* 82-ME-302
- Centro de control de motores de servicios esenciales.
- Tableros de distribución de alumbrado y tomas de la subestación eléctrica de la Fase IV del EPF Floreña, la cual está incorporada dentro del alcance de la expansión de la facilidad.
- Sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS)
- *Switch gear* de 480 V
- *Switch gear* de 4160 V
- Transformador 3.75 MVA en donde se recibe la carga generada por las turbinas.
- Así mismo se requiere contar con un banco de cargas para recibir las cargas generadas durante las pruebas funcionales.

Así mismo, para deben estar terminados y liberados los siguientes sistemas:

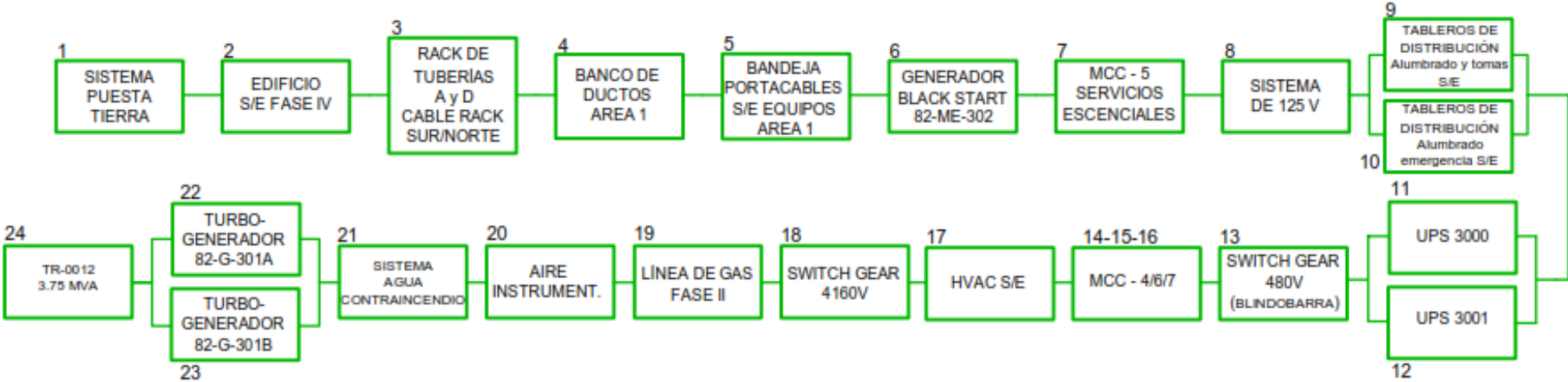
- Sistema de puesta a tierra de las áreas de proceso y donde haya intervención de equipos.
- *Rack* de tuberías para las líneas de alimentación y servicios auxiliares de equipos incluidos en la secuencia.
- Subestación Eléctrica Fase IV.
- Bancos de ductos y bandejas portacables asociadas a los equipos incluidos en la secuencia.
- Sistema de 125 V para la energización de los tableros de distribución.
- Sistema contra incendio
- El gas combustible que alimentará las turbinas para el arranque temprano será obtenido por medio de un tie in desde el cabezal de fuel gas de la fase ya operativa de la planta, por lo tanto se debe realizar el montaje de la línea de gas desde Fase II (llamado así en la secuencia).

La desventaja de la implementación de esta alternativa es el tiempo de ejecución teniendo en cuenta que requiere un gran avance de la etapa de construcción para que se encuentren liberados los equipos y sistemas necesarios para las pruebas.

Contrario a esta condición, si se realizan las pruebas funcionales teniendo en cuenta estos sistemas y equipos se garantizara la funcionalidad del conjunto, el paquete de generación eléctrica del proyecto, quedaría probado previo a la fase de puesta en servicio.

A continuación se presenta un esquema de la secuencia en la que se liberan los sistemas necesarios para las pruebas funcionales, basado en lo expuesto anteriormente.

Figura 13 Secuencia entrega de sistemas funcionales para pruebas a Turbogeneradores



Cuando ya se encuentre funcional el paquete de generación eléctrica, se procede a comisionar todos los sistemas incluidos en el alcance general de este proyecto.

La alimentación definitiva de las turbinas se realizará con gas combustible acondicionada en las unidades de *fuel gas* (nuevas para el proyecto).

En operación normal, (escenario de operación definitiva proyecto expansión) la alimentación a los sistemas de acondicionamiento de gas combustible es gas a 1300 psig y 77°F provenientes de los nuevos compresores de inyección (26-ME-301A/B/C/D). Existe una alternativa de alimentación, esta proviene de la contactora de Glicol para las operaciones de arranque en una cantidad aproximada de 70 MMSCFD.

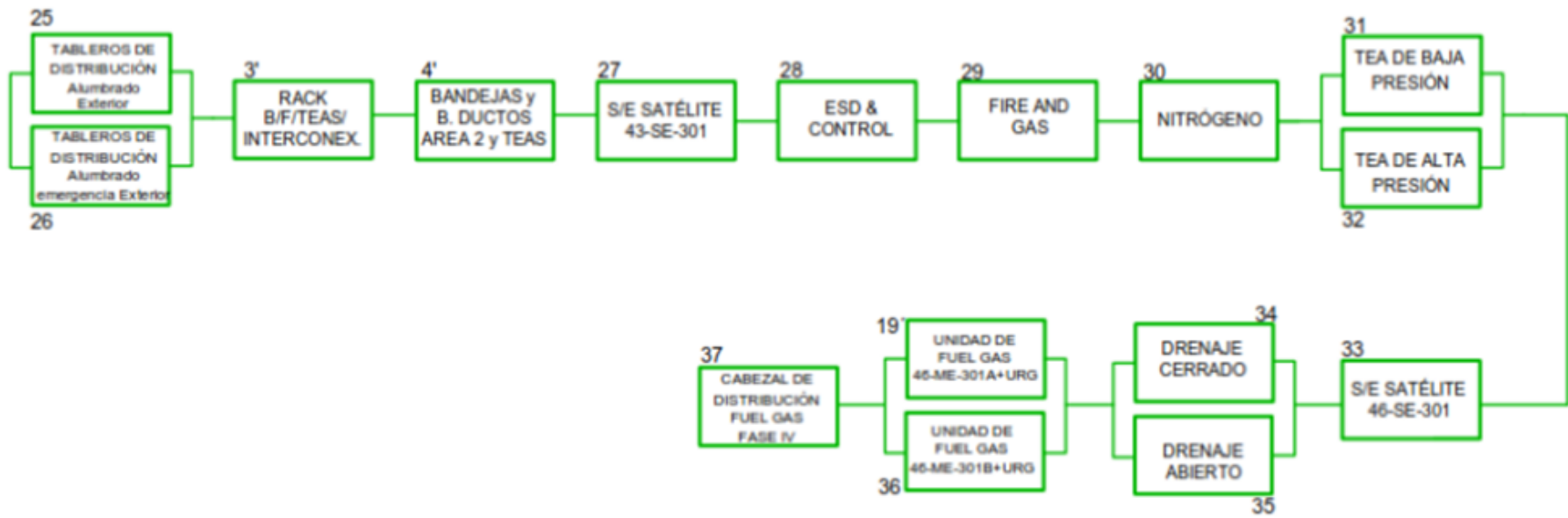
El gas de proceso fluye hacia el separador 46-V-301A para separar las trazas de líquido. El gas entonces es enfriado en un intercambiador gas/gas 46-HE-302A usando el fuel gas del separador frío como corriente de enfriamiento. Una pequeña corriente de gas de proceso es tomada aguas arriba del intercambiador 46-HE-302A y fluye hacia el segundo intercambiador gas/líquido 46-HE-301A bajo control de temperatura para dejar el condensado del separador frío. Ambos intercambiadores están provistos de by-pass para permitir flexibilidad en el control de temperatura. El gas que sale del 46-HE-302A es mezclado con el gas que sale del 46-HE-301A y esta corriente mezclada es expandida y enfriada en la válvula de expansión Joule Thompson; Las inyecciones de glicol deben hacerse aguas arriba de la válvula Joule Thompson, aguas abajo de los intercambiadores 46-HE-301A y 46-HE-302A para evitar la formación de hidratos.

El gas expandido fluye hacia el separador frío (46-V-302A) donde los líquidos son removidos y usados como medio enfriante en el 46-HE-301 A y enviados hacia el separador de media presión existente (Fase I) o al nuevo separador de media presión 20-V-302 en casos de emergencia. La presión de los condensados (en los límites del skid) deberá ser 175 psig y la temperatura no menor de 90°F.

El gas proveniente del 46-V-302A enfría el gas de entrada en el intercambiador gas/gas 46-HE-302 A y es enviado al calentador eléctrico de fuel gas 46-HE-303A antes de ir al cabezal de distribución de gas combustible.

El cabezal de baja presión de gas combustible suministrará gas a los motores de los compresores de gas de inyección, turbogeneradores, calentadores, purgas a la tea, pilotos de las teas, y blanqueo de tanques de crudo, con el gas combustible de alta presión se suministrara gas a los nuevos turbogeneradores, la secuencia de la liberación de los sistemas para pruebas funcionales a las unidades de gas combustible se muestra a continuación:

Figura 14 Secuencia Liberación de sistemas funcionales para pruebas a unidades Fuel Gas



6. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS PARA EL ARRANQUE TEMPRANO DE LOS TURBOGENERADORES

Ya definidas las alternativas posibles para realizar el Comisionamiento temprano de las turbinas de generación eléctrica se elabora una matriz comparativa para definir cuáles son las ventajas y desventajas de cada una, teniendo en cuenta las condiciones expuestas anteriormente:

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS		
	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ALTERNATIVA NUMERO UNO. ALIMENTACIÓN DESDE COMPRESORES BOOSTING EXISTENTES	<ul style="list-style-type: none"> - No depende de terceros para su implementación. - Disponibilidad de materiales para la construcción de la línea de alimentación. - Los requerimientos de actividades de construcción para el montaje son mínimos. <p>La ubicación geográfica entre los puntos por donde iría el trazado de la línea de alimentación es cercana</p>	<ul style="list-style-type: none"> - La presión de descarga de la primera fase de los compresores boosting es alta, lo que dificulta su regulación para garantizar las condiciones requeridas en la alimentación de los turbogeneradores. - No se probarían en el arranque temprano los equipos y las unidades asociadas al funcionamiento de las turbinas (unidades <i>Fuel gas</i>, MCC's, etc.). - Los trabajos de construcción y montajes realizados para estas pruebas, no están alineados con el alcance general del proyecto, al final se requiere desmontar la línea construida, para realizar el montaje de acuerdo a los diagramas de proceso del proyecto, lo cual se ve reflejado en el aumento de los costos de inversión. - El punto anterior también impacta en los costos y tiempos de entrega, ya que son actividades adicionales que estarían por fuera del cronograma de construcción, solo serían ejecutadas para realizar el Comisionamiento.

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ALTERNATIVA NUMERO DOS. ALIMENTACIÓN DESDE LA PLANTA DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA TERMOYOPAL		<ul style="list-style-type: none"> - No se cuenta con ingeniería para la línea de alimentación de gas desde los compresores <i>Boosting</i>.
	<ul style="list-style-type: none"> - El gas de alimentación posee alta calidad, por ser el gas ventas suministrado por Equion Energía a Termoyopal cumple las especificaciones. - No se requieren tratamientos adicionales para el uso del gas. - Disponibilidad de materiales para la construcción de la línea de alimentación. - Los requerimientos de actividades de construcción para el montaje son mínimos. - El recorrido de la línea de alimentación de gas, utilizaría en gran parte los racks de tubería que están dentro del alcance total del proyecto Expansión 	<ul style="list-style-type: none"> - Depende de terceros, ya que depende de la operación de la planta de generación Termoyopal. - No se cuenta con la ingeniería para la línea de alimentación de gas desde el cabezal de gas combustible entre el EPF de Floreña y Termoyopal. - Los trabajos de construcción y montajes realizados para estas pruebas, no están alineados con el alcance general del proyecto, al final se requiere desmontar la línea construida, para realizar el montaje de acuerdo a los diagramas de proceso del proyecto, lo cual genera un impacto en el aumento de los costos del proyecto. - No se probarían en el arranque temprano los equipos y las unidades asociadas al funcionamiento de las turbinas (unidades <i>Fuel gas</i>, MCC's, etc.).

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS		
	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ALTERNATIVA TRES ALIMENTACIÓN DE GAS COMBUSTIBLE DESDE LAS UNIDADES DE FUEL GAS NUEVAS PARA EL PROYECTO	<ul style="list-style-type: none"> - La implementación de esta alternativa conlleva a realizar las pruebas funcionales de equipos y sistemas asociados al funcionamiento de las unidades de Turbogeneración. - El Comisionamiento de las turbinas está alineado con el alcance general del proyecto, ya que las actividades y los equipos requeridos para su implementación están incluidos en la primera fase del proyecto. - No requiere el desmonte de líneas o equipos. - Disminuye los tiempos de pruebas en la fase de arranque. - Los equipos y sistemas dentro del alcance de generación eléctrica pueden ser probados en conjunto. <p>La fase de Comisionamiento puede alinearse con las fases de construcción y completamiento mecánico, de acuerdo a las necesidades de pruebas funcionales para la liberación de los equipos, disminuyendo los tiempos de ejecución de las fases de pruebas y por ende la fecha de arranque.</p>	<p>Requiere la coordinación con las fases previas de Precomisionamiento y construcción para definir las actividades requeridas para implementar la secuencia. El constructor y el responsable del montaje pueden haber definido la planeación de sus actividades de acuerdo a otras prioridades (espacio geográfico, disponibilidad de materiales y equipos, etc.)</p>

Tabla 6 Matriz comparativa de alternativas de Comisionamiento

7. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA PARA PRUEBAS FUNCIONALES.

Con el fin de evaluar las alternativas pruebas para realizar las pruebas funcionales a las unidades de Turbogeneración, en este trabajo monográfico se propone un método semicuantitativo el cual busca ponderar las alternativas basados en criterios definidos por el autor. Para de esta forma elegir la alternativa que obtenga la menor puntuación entre las opciones propuestas.

Las alternativas serán evaluadas en la matriz mostrada a continuación:

ALTERNATIVAS	CRITERIOS DE EVALUACIÓN					PUNTAJE TOTAL
	CRITERIO 1	CRITERIO 2	CRITERIO 3	...	CRITERIO n	
1						
2						
3						
⋮						
<i>n</i>						

Los criterios de evaluación serán calificados teniendo en cuenta las siguientes categorías y valoración, presentados en la escala de acuerdo a su impacto en la implementación de la alternativa:

IMPACTO	VALOR OBTENIDO
ALTO	3
MEDIO	2
BAJO	1

Cada alternativa debe ser ponderada de acuerdo a los criterios de evaluación definidos y a la escala propuesta, una vez calificados todos los criterios para cada una de las alternativas, se sumaran los valores obtenidos para determinar el puntaje total de cada alternativa.

Se seleccionará la alternativa que presente el menor valor, por ser la que representa un menor impacto para el proyecto dentro de los criterios de evaluación propuestos en este trabajo monográfico.

La ponderación de las alternativas se realizara teniendo en cuenta los siguientes criterios.

- **Impacto en el programa de construcción definido para el proyecto:** se requiere modificar el programa de construcción por la necesidad de ejecutar obras adicionales que permitan implementar la alternativa.
- **Costos adicionales por obras adicionales al alcance general del Proyecto:** La alternativa Propuesta implica la ejecución de actividades y obras adicionales a lo contemplado en la ingeniería, que representan costos adicionales a los presupuestados inicialmente.
- **Pruebas adicionales para equipos del sistema de generación:** dentro del alcance de la alternativa propuesta no se contemplan las pruebas a los equipos asociados al funcionamiento de las turbinas, lo que conlleva a la necesidad de realizar pruebas adicionales para verificar la funcionalidad de los equipos asociados al proceso de generación.
- **Dependencia de terceros para la implementación de la alternativa:** Para la implementación de la alternativa se requieren actividades, permisos, o dependen funcionalmente de terceros.
- **Diseños de ingeniería adicional:** Para la implementación de la alternativa se requieren diseños adicionales no contemplados en la ingeniería inicial del proyecto.
- **Tratamiento del gas combustible:** Se requieren tratamientos o procesos adicionales para garantizar las especificaciones requeridas del gas combustible propuestas por el fabricante.
- **Parada de planta:** después de realizar las pruebas funcionales se requiere parada de planta (*shut down*) para la incorporación de las unidades al proceso existente.

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS POR MÉTODO SEMICUANTITATIVO

Tabla 7 Matriz de Evaluación de Alternativas

ALTERNATIVAS		CRITERIOS DE EVALUACIÓN PROPUESTOS							PUNTAJE TOTAL	
		Impacto en PDT de construcción	Costos Adicionales debido a la implementación	Requerimiento de pruebas adicionales	Dependencia de terceros	Requiere Ingeniería adicional	Tratamiento del gas	Parada de Planta		
1	Alimentación desde compresores <i>Boosting</i> Existentes	2	2	3	1	2	1	3	14	↓
2	Alimentación desde la planta de generación Termoeléctrica Termoyopal	3	3	3	3	2	1	3	18	↓
3	Alimentación de gas combustible desde las unidades de <i>Fuel Gas</i> instaladas en Proyecto Expansión Floreña	2	1	2	1	1	1	2	10	↑

8. CONCLUSIONES

La importancia de la fase de Comisionamiento en un proyecto radica, en que las pruebas funcionales a los sistemas y equipos son realizadas bajo los requerimientos del fabricante y bajos las condiciones reales de operación, en donde se puede llevar la trazabilidad y el aseguramiento de las etapas anteriores del proyecto (construcción y completamiento mecánico), además de garantizar un enfoque sistemático lo cual permite optimizar los tiempos para el arranque, corrección de las desviaciones o fallas de forma oportuna previas al mismo, y la estabilización de los equipos de forma segura y confiable.

En este trabajo se monografía se ilustró una estrategia para realizar la fase de Comisionamiento de unas unidades de Turbogeneración a gas, por medio de la selección de alternativas de pruebas, basadas en el alcance del proyecto y los sistemas funcionales y equipos a instalar asociados a este.

Luego de realizar la evaluación de las alternativas de prueba propuestas en este documento, se recomienda seguir la secuencia de entrega de sistemas funcionales propuesta en la alternativa de alimentación de gas combustible desde las unidades de Fuel gas que van a ser instaladas en el proyecto Expansión Floreña.

Al implementar esta secuencia de entrega se garantizaría el Comisionamiento de equipos y sistemas funcionales que son requeridos para el funcionamiento de las turbinas, cuando se realicen las pruebas funcionales de estas, lo que permite probar de forma sistemática un paquete de equipos y sistemas que entraran a operación en conjunto, lo cual reduce los tiempos de Comisionamiento del proyecto, al disminuir el número de pruebas adicionales y al requerir de una parada de planta local para la integración del esquema de generación al proceso, no afecta la continuidad de la operación de la facilidad.

Así mismo, esta alternativa puede ser alineada con la fase de construcción, lo que permite disminuir los tiempos de entrega del proyecto, ya que no se presentarían reprocesos en las fases de completamiento mecánico y Comisionamiento, al no tener que realizar diseños y trabajos adicionales para realizar las pruebas, tal y como se evidencia en las otras alternativas propuestas.

9. RECOMENDACIONES

Para realizar el Comisionamiento de las unidades de Turbogeneración el sistema de control garantiza la operación del equipo de forma segura ya que permite la supervisión y protección mediante la programación de las señales emitidas por la instrumentación asociada, por esta razón este sistema debe estar probado previo a la puesta en marcha de la unidad.

Teniendo en cuenta que la turbina será un equipo crítico por ser la responsable de suministrar la energía eléctrica con que se alimentan los demás sistemas de la planta, para la puesta en servicio, se recomienda garantizar la redundancia en las fuentes reguladas (UPS) y cargadores de baterías con una autonomía mínima de 1 hora, garantizar la redundancia de los controladores (PLC), fuentes de poder del sistema de control y redes de comunicación.

Por ser un equipo que utiliza como combustible gas, se recomienda garantizar que todos sus equipos y elementos cumplan la normatividad de áreas peligrosas y su correcta clasificación.

En la selección de los equipos esenciales para el funcionamiento de las unidades de Turbogeneración se recomienda realizar el análisis de criticidad de todos los equipos involucrados en el alcance del proyecto, basados en los estudios de seguridad, filosofías de operación, listado de equipos críticos de seguridad, etc. con el fin de garantizar condiciones de operación seguras.

La estrategia para el desarrollo de pruebas funcionales en unidades de Turbogeneración es aplicable en proyectos similares, siguiendo la metodología propuesta, teniendo en cuenta que la evaluación de las alternativas depende de los criterios escogidos los cuales deben estar alineados a las necesidades del proyecto, para el caso del proyecto Expansión Floreña, la selección estaba enfocada en la disminución de tiempos de entrega y puesta en marcha de las Turbinas, generando el menor impacto en el desarrollo del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

BLACKBURN Timothy D, MBA PE, Commissioning fundamentals and practical approach [en línea]. [5272 Meadow Estates Drive] PDH Online CourseP146, 2012. Disponible en web:

<http://www.pdhonline.org/courses/p146/p146content.pdf>

EQUION ENERGIA LTDA, LTP-0021 Practica para Inspección, pruebas Y Alistamiento de Facilidades, Vías y Locaciones, Pozos en Superficie y Líneas de Flujo, Revisión 05, 11 de Noviembre de 2014, 41 Págs.

MATAIX Claudio. Turbomáquinas Térmicas, Tercera Edición, Inversiones editoriales, 2000 1053 pág.

MIRÓ ZÁRATE, Luis Ángel. Mejoramiento de la simulación de fallas en el diagnóstico de Turbinas de gas. México DF, Enero 2011, 163 pág. Trabajo de grado (Maestro en ciencias de Energía en Sistemas Energéticos). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Culhuacán, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación.

PEREZ Martha Ilce y CALDERÓN Zuly. Orientaciones prácticas para la elaboración exitosa de trabajos de grado en ingeniería, Primera Edición, Bucaramanga: División de publicaciones UIS, Agosto de 2011. 191 pág.

SOLAR TURBINES INCORPORATED, Manual Técnico Conjunto Generador impulsado por Turbina de gas Taurus™ 60S, San Diego, California, EEUU, 2011.

TIPIEL S.A. Filosofía de Generación del sistema eléctrico EPF- Floreña, Revisión D1, Emitido para Proyecto desarrollo integrado Piedemonte Ingeniería de detalle Etapa 2, Contrato Marco Equion Energía LTDA. 25 Enero 2013.

TIPIEL S.A. Manual de operación EPF- Floreña, Revisión A1, Emitido para Proyecto desarrollo integrado Piedemonte Ingeniería de detalle Etapa 2, contrato marco Equion Energía LTDA. 20 Diciembre 2012. 97 Pág.