# ANALISIS DE RIESGO PARA EL PROYECTO "PLANTA DE COMBUSTIBLES"

## Octubre 2023

# C O N T E N I D O

I. NOMBRE DEL PROYECTO. ..... 8
II. OBJETIVO DEL ESTUDIO. ..... 8
III. ALCANCE DEL ESTUDIO ..... 8
IV. GENERALIDADES DEL PROYECTO. ..... 8
IV.1 CARACTERISTICAS GENERALES DEL PROYECTO ..... 9
IV.2 Red de distribución de combustible. ..... 50
V. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MANEJO DE TURBOSINA EN EL AIT. ..... 51
V.1 Lineamientos para el manejo de combustible en el AIT. ..... 59
VI. DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO. ..... 68
VI.1 Vulnerabilidad del sitio. ..... 85
Karsticidad en la región. ..... 91
Rasgos de la karsticidad. ..... 93
VI.2 Análisis de cercanía con polígonos urbanos ..... 110
VI.3 Áreas naturales protegidas. ..... 111
VII. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS. ..... 112
VII.1 Identificación de peligros y jerarquización de escenarios de riesgo ..... 112
VII.1.1 Análisis preliminar de peligros. ..... 112
VII.1.2 Antecedentes de accidentes e incidentes en proyectos similares. ..... 113
VII.1.3 Identificación de peligros y de escenarios de riesgo. ..... 119
VII.1.4 Jerarquización de escenarios de riesgo. ..... 129
VIII. ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGO ..... 134
VIII.1 Análisis de frecuencias. ..... 134
VIII.2 Análisis de consecuencias. ..... 138
VIII.2.1 Criteriospara la determinación de las zonas de alto riesgo y amortiguamiento. 138
VIII.2.2 Clases atmosféricas de la estabilidad de Pasquill. ..... 139
VIII.2.3 Simulación de escenarios riesgosos en el proyecto. ..... 140
IX. REPRESENTACIÓN EN PLANOS DE LOS RADIOS POTENCIALES DE AFECTACIÓN. ..... 160
X. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD E INTERACCIONES DE RIESGO. ..... 161

**X.1 Análisis de vulnerabilidad.....161**
**X.2 Interacciones de riesgo.....164**
**XI. REPOSICIONAMIENTO DE ESCENARIOS DE RIESGO.....164**
**XII. SISTEMAS DE SEGURIDAD Y MEDIDAS PARA ADMINISTRAR LOS ESCENARIOS DE RIESGO.....168**
**XII.1 Sistemas de seguridad.....168**
**XII.2 Medidas preventivas.....170**
**XII.3 Recomendaciones técnico-operativas.....185**
**XIII. CONCLUSIONES.....186**
**XIV. ANÁLISIS DE CAPAS DE PROTECCIÓN (LOPA).....189**

# INDICE DE FIGURAS

***Figura IV.1 Ubicación Física del proyecto. 8***
***Figura IV.2 Conjunto de masas del Proyecto fase 1 (inicio a 2034) 10***
***Figura IV.3 Render del conjunto del Proyecto fase 1 (inicio a 2034) 10***
***Figura IV.4 Render del edificio de zona de descargadera 1 12***
***Figura IV.5 Render del edificio de zona de descargaderas 13***
***Figura IV.6 Edificio de la descargadera 13***
***Figura IV.7 Render del edificio de llenaderas. 14***
***Figura IV.8 Render cuarto de bombas 16***
***Figura IV.9 Cuarto de bombas 16***
***Figura IV.10 Render tanque vertical atmosférico de agua 17***
***Figura IV.11 Tanque vertical atmosférico de agua 18***
***Figura IV.12 Render del dique de contención para tanques de almacenamiento de combustible. 20***
***Figura IV.13 Diques de contención 20***
***Figura IV.14 Render de los tanques de almacenamiento de combustible. 23***
***Figura IV.15 Tanques de almacenamiento de combustible. 23***
***Figura IV.16 Red Interna 24***
***Figura IV.17 Isométrico general de la Red Interna 25***
***Figura IV.18 Render del edificio Administrativo. 26***
***Figura IV.19 Edificio Administrativo. 27***

*Figura IV.19 Render de caseta de acceso administrativo.* 28
*Figura IV.20 Caseta de acceso administrativo* 28
*Figura IV.21 Render de caseta de acceso vehicular.* 29
*Figura IV.22 Caseta de acceso vehicular.* 30
*Figura IV.23 Render del edificio de Destacamento de Seguridad.* 31
*Figura IV.24 Destacamento de seguridad.* 31
*Figura IV.24 Render de la enfermería.* 32
*Figura IV.25 Edificio de la Enfermería.* 33
*Figura IV.26 Render de Laboratorio y control de calidad.* 34
*Figura IV.27 Edificio de Laboratorio.* 34
*Figura IV.28 Render del edificio de mantenimiento vehicular.* 35
*Figura IV.29 Edificio de mantenimiento vehicular.* 36
*Figura IV.30 Render de edificio de control y torre de vigilancia.* 37
*Figura IV.31 Edificio de control y torre de vigilancia.* 38
*Figura IV.32 Render depósito de residuos peligrosos* 39
*Figura IV.33 Depósito de residuos peligrosos* 39
*Figura IV.34 Render subestación eléctrica y planta de emergencia* 41
*Figura IV.35 Subestación eléctrica y planta de emergencia* 41
*Figura IV.36 Depósito de basura* 42
*Figura IV.37 Render sanitario exterior* 43
*Figura IV.38 Sanitario exterior* 44
*Figura IV.39 Cisterna de agua cruda* 44
*Figura IV.40 Conjunto de servicios P.T.A.R.* 45
*Figura IV.41 Cisterna de Agua Potable y Cuarto de Bombas* 46
*Figura IV.42 Render caseta de acceso a plataforma* 47
*Figura IV.43 Caseta de acceso a plataforma* 48
*Figura V.1 Diagrama de flujo de proceso* 54
*Figura V.2 Diagrama de tubería e instrumentación de la terminal de combustible* 55
*Figura V.3. Cadena de suministro de combustible de aviación.* 60
*Figura VI.2 Rosas de vientos media anual (NARR) y rosa de vientos anual (WRF) en la Estación Tulum, periodo 1979 - 2018.* 69

*Figura VI.3 Ubicación de las líneas de Tomografía Eléctrica Resistiva ubicadas en el sitio de proyecto _ 78*

*Figura VI.4 Ubicación y coordenadas de las líneas de Refracción Sísmica (TER´s) ubicadas en el sitio de proyecto 81*

*Figura VI.5 Evolución de la karsticidad en el área de estudio. 85*

*Figura VI.6 Modelo representativo característico del proceso de karstificación. 88*

*Figura VI.7 Aspecto de las estructuras estalagmíticas derivados de la karsticidad en el interior del Cenote Choj Ha, Valladolid, Yucatán 89*

*Figura VI.8 Distribución de las rocas karstificables según Espinasa-Pereña (1991). 91*

*Figura VI.9 Geología de la Península de Yucatán según Bauer-Gottwein et al. (2011). Los puntos rojos son cenotes y las líneas rojas indican fallas y el área delimitada en verde claro es el área de estudio. 92*

*Figura VI-10 Clasificación de las formas y estilos más comunes de lapiaz (Allen, 1984). 93*

*Figura VI.11 Conjunto de dolinas típicas de la selva maya en la Península de Yucatán. 94*

*Figura VI.12 Clasificación de las dolinas según Waltham y Fookes (2003). 96*

*Figura VI.13 Estructuras que caracterizan a los karst. 96*

*Figura VI.14 Aspecto del terreno y sedimentario de la terrarrosa presente diversas zonas de la Península de Yucatán. 97*

*Figura VI.15 Bloque representativo de los karst en etapa juvenil de acuerdo con Cvijic (1960). 98*

*Figura VI.16 Bloque representativo de los karst en etapa Madura de acuerdo con Cvijic (1960). 99*

*Figura VI.17 Bloque representativo de los karst en etapa Madura Tardía de acuerdo con Cvijic(1960). 100*

*Figura VI.18 Bloque representativo de los karst en etapa Vieja o Senil de acuerdo con Cvijic (1960). 101*

*Figura VI.19 Proceso de sufosión (lavado de materiales para relleno de cavernas). 102*

*Figura VI.20 Perforación de pozos y colocación de ademes para evitar el lavado de materiales por saturación de agua al subsuelo. 103*

*Figura VI.21 Prospección para la identificación de cavernas (cuya línea puede o no pasar por el área inestable). 104*

*Figura VI.22 Técnicas ingenieriles para construcción en suelos kársticos. 105*

*Figura VI.23 Ubicación del área de estudio de acuerdo de acuerdo con la Regionalización 106*

*Sísmica de la República Mexicana. 106*

*Figura VI.24 Trayectoria de los huracanes que se han presentado en el área 109*

*Figura VI.26 Áreas naturales protegidas cercanas al proyecto 111*

*Figura VII.1 Sistema típico de suministro de combustible en aeropuertos. 112*

*Figura VII.2 Nodos del análisis HazOp del proyecto 128*

*Figura VII.3 Criterios de categorización del nivel de riesgo ALARP.* 133
*Figura VIII.1 Tanque de almacenamiento de combustible con techo interno flotante.* 141
*Figura VIII.2 Distancias de afectación por incendio en el dique.* 144
*Figura VIII.3 Distancias de afectación por incendio en el techo de un tanque* 147
*Figura VIII.4 Distancias de afectación por sobrellenado del tanque.* 150
*Figura VIII.5 Energías mínimas de ignición de chispa, para mezclas de spray combustible/aire.* 151
*Figura VIII.6 Distancias de afectación durante falla en el llenado por hidrantes* 154
*Figura VIII-7 Distancias de afectación por incendio causado en tubería de distribución* 158
*Figura XIV-1 Gráfico de riesgo calibrado para la seguridad del personal* 197
*Figura XIV-2 Gráfico de riesgo calibrado para análisis de riesgo ambiental.* 199

# INDICE DE TABLAS

*Tabla IV.1 Almacenamiento de combustible en las fases de crecimiento del proyecto* 11
*Tabla IV.2 Coordenadas de descargadera 1 y 2* 11
*Tabla IV.2 Coordenadas de llenaderas* 14
*Tabla IV.3 Coordenadas cuarto de bombas del sistema contra incendios* 15
*Tabla IV.4 Coordenadas tanque vertical atmosférico de agua* 17
*Tabla IV.5 Coordenadas del dique de contención* 19
*Tabla IV.6 Coordenadas de tanques de almacenamiento de combustible* 22
*Tabla IV.7 Coordenadas edificio administrativo* 26
*Tabla IV.8 Coordenadas caseta de acceso administrativo* 27
*Tabla IV.9 Coordenadas caseta de acceso vehicular* 29
*Tabla IV.10 Coordenadas destacamento de seguridad* 30
*Tabla IV.11 Coordenadas enfermería* 32
*Tabla IV.12 Coordenadas Laboratorio y control de calidad* 33
*Tabla IV.13 Coordenadas mantenimiento vehicular y almacén* 35
*Tabla IV.14 Coordenadas Edificio de control y torre de vigilancia* 37
*Tabla IV.15 Coordenadas depósito de residuos peligrosos* 38
*Tabla IV.16 Coordenadas subestación eléctrica y planta de emergencia* 40
*Tabla IV.17 Coordenadas depósito de basura* 42
*Tabla IV.18 Coordenadas sanitario exterior* 43
*Tabla IV.18 Coordenadas cisterna de agua cruda* 44
*Tabla IV.19 Coordenadas conjunto de servicios P.T.A.R.* 45

*Tabla IV.20 Coordenadas cisterna de agua potable* ____ *46*
*Tabla IV.21 Coordenadas cuarto de bombas* ____ *46*
*Tabla IV.22 Coordenadas caseta de acceso a plataforma* ____ *47*
*Tabla IV.23 Estándares aplicables para el diseño del proyecto.* ____ *48*
*Tabla VI.1 Coordenadas de las líneas de Tomografía Eléctrica Resistiva ubicadas en el sitio de proyecto* ____ *79*
*Tabla VI.2 Magnitud de los ciclones tropicales medidos en la escala de Saffir Simpson.* ____ *107*
*Tabla VI.3 Ciclones tropicales registrados en el periodo de 1951 a 2020* ____ *108*
*Tabla VII.1 Análisis preliminar de peligros relacionados con el manejo de turbosina en una planta de combustibles.* ____ *113*
*Tabla VII.2 Antecedentes de accidentes e incidentes relacionados con el manejo de turbosina en aeropuertos nacionales.* ____ *117*
*Tabla VII.3 Palabras clave del análisis HazOp.* ____ *120*
*Tabla VII.4 Desviaciones típicas para cada sección de proceso.* ____ *121*
*Tabla VII.5 Causas típicas de fuga o ruptura para ciertos tipos de secciones de proceso.* ____ *122*
*Tabla VII.6 Rangos de frecuencia para la evaluación de riesgos.* ____ *131*
*Tabla VII.7 Categorías de consecuencia para la evaluación de riesgos.* ____ *131*
*Tabla VII.8 Determinación del nivel de riesgo dentro del límite de batería de la instalación.* ____ *131*
*Tabla VII.9 Determinación del nivel de riesgo fuera del límite de batería de la instalación.* ____ *132*
*Tabla VIII.1 Clases de estabilidad atmosférica de Pasquill.* ____ *139*
*Tabla VIII.2 Condiciones meteorológicas que definen la clase de estabilidad atmosférica.* ____ *140*
*Tabla IX-1 Resultados del análisis de consecuencias (simulaciones) de los eventos riesgosos identificados en el análisis HazOp del Proyecto.* ____ *160*
*Tabla X.1 Análisis de vulnerabilidad de los eventos riesgosos simulados para el Aeropuerto Internacional de Tulum.* ____ *161*
*Tabla XII.1 Categorías y peligros potenciales a considerar en la administración de la integridad de los ductos* ____ *181*
*Tabla XIII-1 Resultados del análisis de consecuencias (simulaciones) de los eventos riesgosos identificados en el análisis HazOp* ____ *188*
*Tabla XIV-1 Correlación entre el nivel SIL con el PFD & RRF* ____ *196*

## I. NOMBRE DEL PROYECTO.

"PLANTA DE COMBUSTIBLES"

## II. OBJETIVO DEL ESTUDIO.

Realizar el Análisis de Riesgo del Sector Hidrocarburos (ARSH) para llevar a cabo la actividad de Almacenamiento y Expendio de combustibles en el Arpto. Intl. Felipe Carrillo Puerto de Tulum, conforme a lo establecido en la guia por la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA).

## III. ALCANCE DEL ESTUDIO.

Esta en función de la realización del ARSH para el proyecto de Planta de Combustibles y tiene como base la información recabada y proporcionada por SEDENA.

## IV. GENERALIDADES DEL PROYECTO.

Por instrucciones del C. Presidente de la República, SEDENA tiene como fin la materialización de la construcción del Arpto. Intl. Felipe Carrillo Puerto de Tulum, el cual controlara la ya creciente población transitoria por el Arpto. Intl. de Cancún, Q. Roo, así promover el desarrollo económico y subsanar la demanda de servicios en la zona.

El proyecto estará ubicado a aproximadamente 25 Km al suroeste (SO) del Municipio de Tulum (Figura IV.1), Estado de Quintana Roo. El domicilio oficial es Carretera Federal 307 km 201, Ejido Chunyaxche, Municipio de Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, código postal 77134.

El proyecto abarca un área de 8.2125 hectáreas ubicándose al este del predio AIFCP, en el cual para el acceso y control a sus instalaciones se cuenta con 1 caseta de acceso vehicular la cual controla el acceso al área de almacenamiento, 1 caseta de acceso administrativo, y la caseta de acceso a plataforma que permite de salida de autotanques a lado aire.

***Figura IV.1 Ubicación Física del proyecto.***

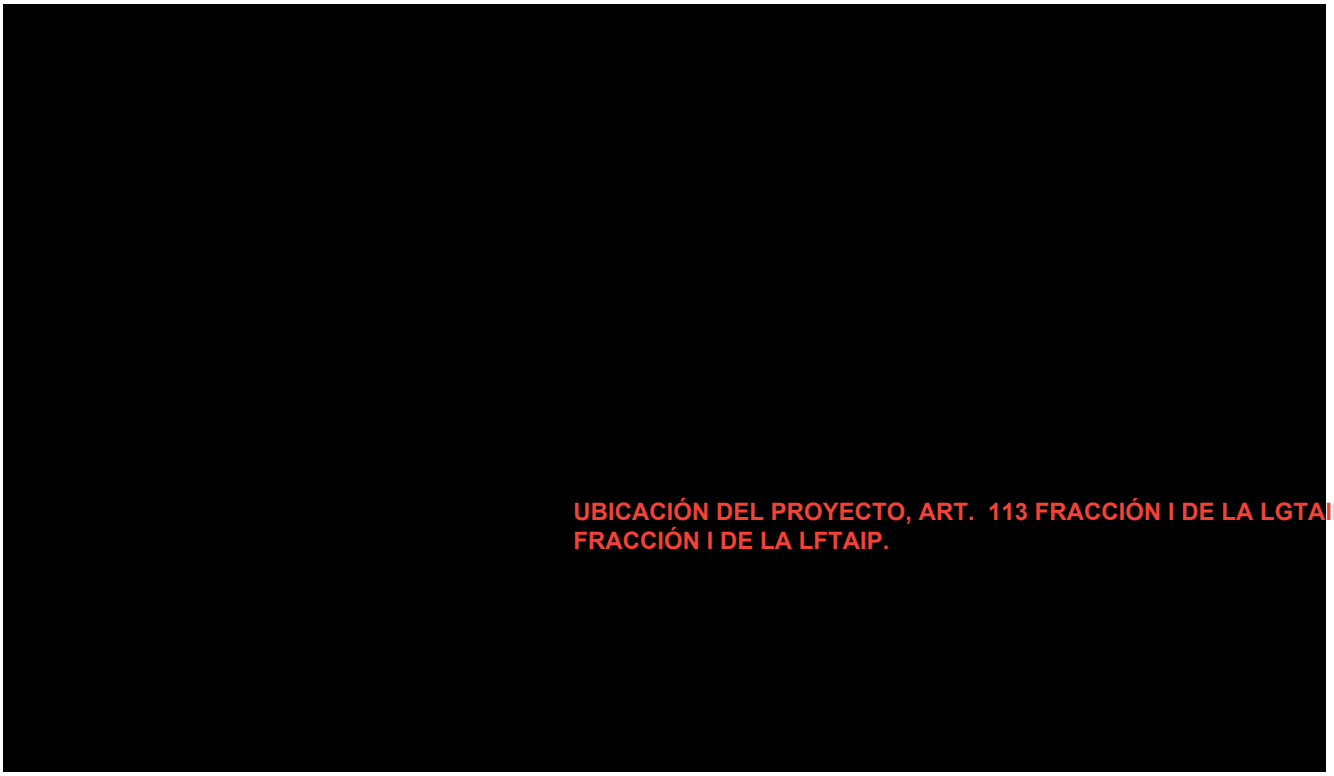
Fuente: Google Earth

El presente estudio se realizó con la finalidad de ser presentado ante ASEA previo al inicio de operaciones del Proyecto, considerando cumplir con las disposiciones establecidas por la legislación mexicana en materia de hidrocarburos, ante esto se requiere la gestión de trámites ante la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y Secretaría de Energía (SENER).

## *IV.1 CARACTERISTICAS GENERALES DEL PROYECTO*

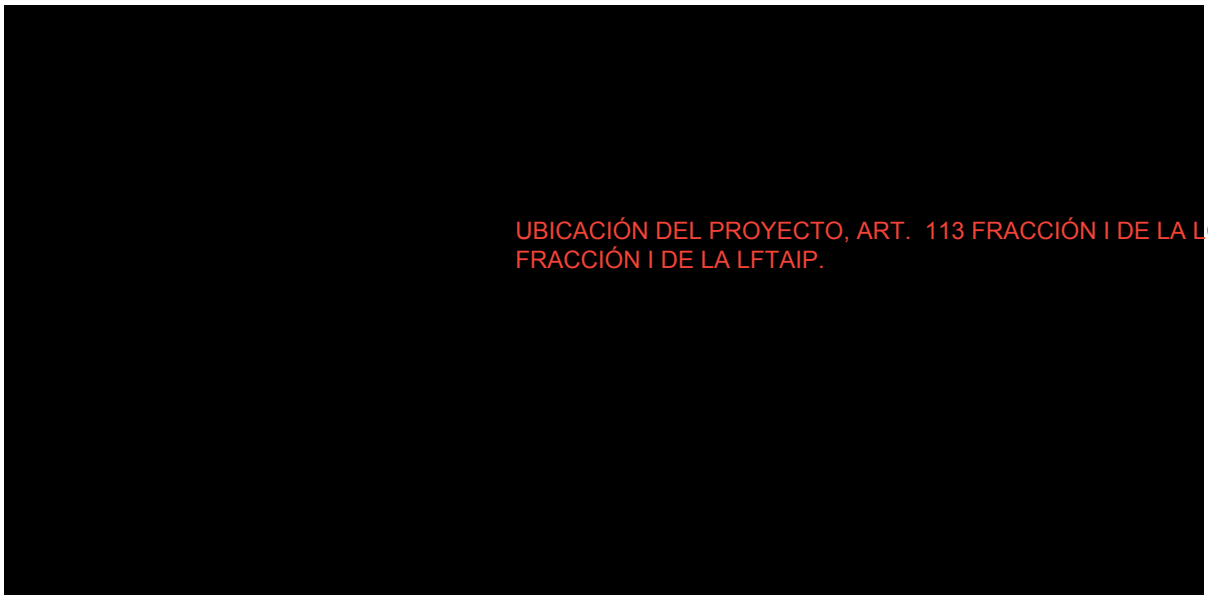
El proyecto se encuentra ubicado al Noreste (NE) dentro del polígono del Aeropuerto Internacional "Felipe Carrillo Puerto" dentro del Ejido Chunyaxché, Municipio de Felipe Carrillo Puerto y se encuentra a una altitud de 14.420 m.s.n.m. Está constituido por un área de 8.21 hectáreas. Se conformará por un área de proceso y almacenamiento con una autonomía de 10 a 11 días y en la cual se albergará una zona de descargaderas con capacidad para la descarga simultánea de 2 autotanques de 66,000 litros, un estacionamiento de autotanques en espera con 10 cajones, una zona de llenaderas con capacidad de carga simultánea para dos autotanques de 40,000 litros.
Este contará con un edificio Administrativo el cual se compone por una zona de oficinas, un comedor, una zona de baños vestidores y un alojamiento para el personal operativo.
También lo componen un edificio de laboratorio y control de calidad el cual estará adecuado para poder realizar pruebas fisicoquímicas para la certificación del combustible Jet-A y el cual albergará un equipamiento basado en los métodos ASTM 1655. Para el suministro de combustible de aviación tipo jet-a a plataforma de estacionamiento de aeronaves, se contará con una red de distribución subterránea conformada por una tubería de acero al carbón con conexión a los registros hidrantes ubicados en la plataforma de aeronaves, garantizando el suministro en todos los puestos de estacionamiento de aeronaves.
El proyecto comprende tres etapas de crecimiento y cada una corresponde con el volumen de suministro que vaya demandando el Aeropuerto Internacional "Felipe Carrillo Puerto".
Para la fase 1 el suministro al Proyecto será mediante autotanques de cap. 66,000 litros, dejando preparaciones para que en las fases de crecimiento se adapte un patín de medición y trasferencia de custodia para el suministro al Proyecto pueda ser mediante turbosinoducto.
En esta fase el proyecto cuenta con las siguientes edificaciones: edificio administrativo, casetas de acceso administrativo, caseta de acceso vehicular, destacamento de seguridad, enfermería, laboratorio control de calidad, mantenimiento vehicular y almacén, edificio de control y torre de vigilancia, depósito de residuos peligrosos, subestación eléctrica y planta de emergencia, depósito de basura, sanitario exterior, cisterna de agua cruda de. P.T.A.R. y laboratorio, cisterna de agua potable y cuarto de bombas y caseta de acceso a plataforma.
El área de proceso y almacenamiento está conformada por un área para 2 descargaderas para descarga simultánea de auto tanques de 66,000 litros, llenaderas para carga de 2 auto-tanques de 40,000 litros, cuarto de bombas para sistema contra incendio, 1 tanque vertical atmosférico de agua de cap. 1,000,000 litros y un dique compartido para tres tanques verticales de almacenamiento de combustible Jet-A (API 650) con capacidad nominal de 2'215,325 litros y una capacidad operacional de 2,000,000 de litros. (Figura IV.2, IV.3 y Tabla IV.1)

***Figura IV.2 Conjunto de masas del Proyecto fase 1 (inicio a 2034)***




***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.3 Render del conjunto del Proyecto fase 1 (inicio a 2034)***




***Fuente: SEDENA***

***Tabla IV.1 Almacenamiento de combustible en las fases de crecimiento del proyecto***

| ETAPAS AIFCP | OPS. COMERCIALES ANUALES | OPS.DE CARGA ANUALES | TOTAL DE OPS. | CONSUMO DE COMBUSTIBLE AL DÍA (litros) | ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE (litros) | MEDIOS DE SUMINISTRO A LA TERMINAL DE COMBUSTIBLE |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 2034 | 32,000 ops | 7,833 ops | 127,404 ops | 533,333 | 6,000,000 (37,738 BARRILES) PARA 10 a 11 DÍAS DE AUTONOMÍA | -AUTO-TANQUE |
| 2 2044 | 65,100 ops | 20,950 ops | 266,479 ops | 1'085,000 | 10,000,000 (62,898 BARRILES) PARA 5 D ÍAS DE AUTONOMÍA | -AUTO-TANQUE |
| ULTIMA 2054 | 108.500 ops | 50,017 ops | 534,449 ops | 1'808,333 | 18,000,000 (113,216 BARRILES) PARA 5 DÍAS DE AUTONOMÍA | -AUTO-TANQUE -CARRO-TANQUE |

***Fuente: SEDENA***

- Infraestructura Operacional

A) Descargaderas

El área de descarga está compuesta por dos islas de descarga cubiertas con techumbre de acero (Descargadera 1 y Descargadera 2) y cada una de ellas cuenta con 2 patines de descarga automatizados, con capacidad de descarga simultanea hasta los 4 patines, cada uno de ellos puede descargar una unidad móvil de un promedio de 30,000 Litros de volumen de combustible Jet A, a un flujo de descarga promedio de 300 GPM.

***Tabla IV.2 Coordenadas de descargadera 1 y 2***

[redacted]

COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

[redacted]

COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

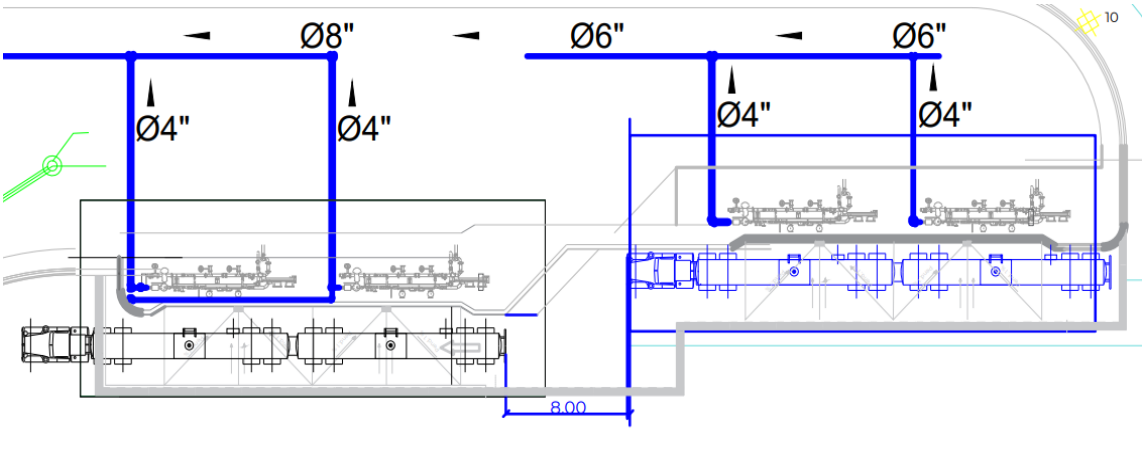
***Figura IV.4 Render del edificio de zona de descargadera 1***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.5 Render del edificio de zona de descargaderas***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.6 Edificio de la descargadera.***




***Fuente: SEDENA.***

B) Llenaderas

Punto de llenado de Combustible Turbosina Jet A de vehículos dispensadores de combustible encargados del suministro de Combustible hacia las aeronaves en posiciones de Plataforma, Contará con cubierta, 2 Islas con 1 patín de medición cada una respectivamente.

***Tabla IV.2 Coordenadas de llenaderas***

[redacted]
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.7 Render del edificio de llenaderas.***

***Fuente: SEDENA***

El área de Recepción y Entrega debe estar separada de los tanques, edificios o de cualquier límite de propiedad más cercana a la instalación, a una distancia mínima de 7.6 m punto 17.4.6 referenciado al punto 17.4.3 de la NFPA 30 vigente, equivalente o aquel que lo sustituya, cuando se manejen líquidos inflamables Clase I, y para líquidos combustibles Clase II y Clase III manejados a temperaturas igual o mayor de sus puntos de inflamación, y a no menos de 4.6 m para líquidos combustibles Clase II y Clase III manejados a temperaturas menores de sus puntos de inflamación, medidos desde el punto de carga (Entrega) o conexión de descarga (Recepción).

En este caso nos aplica para a no menos de 4.6 m para líquidos combustibles Clase II y Clase III manejados a temperaturas menores de sus puntos de inflamación y según el plano ADSÑ-7PCOM-AT002 la distancia más cercana a una banqueta de un edificio es más de 10 metros.

C) Cuarto de bombas del sistema contra incendios.

El sistema de bombeo estará controlado y monitoreado por un PLC, el cual iniciará, terminará o interrumpirá el funcionamiento del bombeo de forma efectiva. En todos los sistemas de bombeo a la descarga contarán con un manómetro para monitorear la presión a la descarga de este como se muestra en el DTI MSRC-7PCOMG001. Todo el arreglo de tubería, bridas y empaques y accesorios cumplen con las certificaciones y estándares internacionales pertinentes.

El sistema es de clase 150# ANSI con todos los elementos compatibles. Los motores, componentes eléctricos y las instalaciones eléctricas cumplirán con la clasificación de área, establecida en la normatividad nacional o internacional aplicable y vigente. El sistema de bombeo incorpora en su diseño un medio para interrumpir de forma rápida y efectiva el flujo de productos en caso de una emergencia.

Todas las bombas cumplirán con la clasificación de áreas eléctricas. El arreglo de tuberías a las bombas está diseñado para que permitan el retiro y el mantenimiento de las bombas. Cada una de las bombas cuenta con válvulas de aislamiento y válvulas de retención.

***Tabla IV.3 Coordenadas cuarto de bombas del sistema contra incendios***

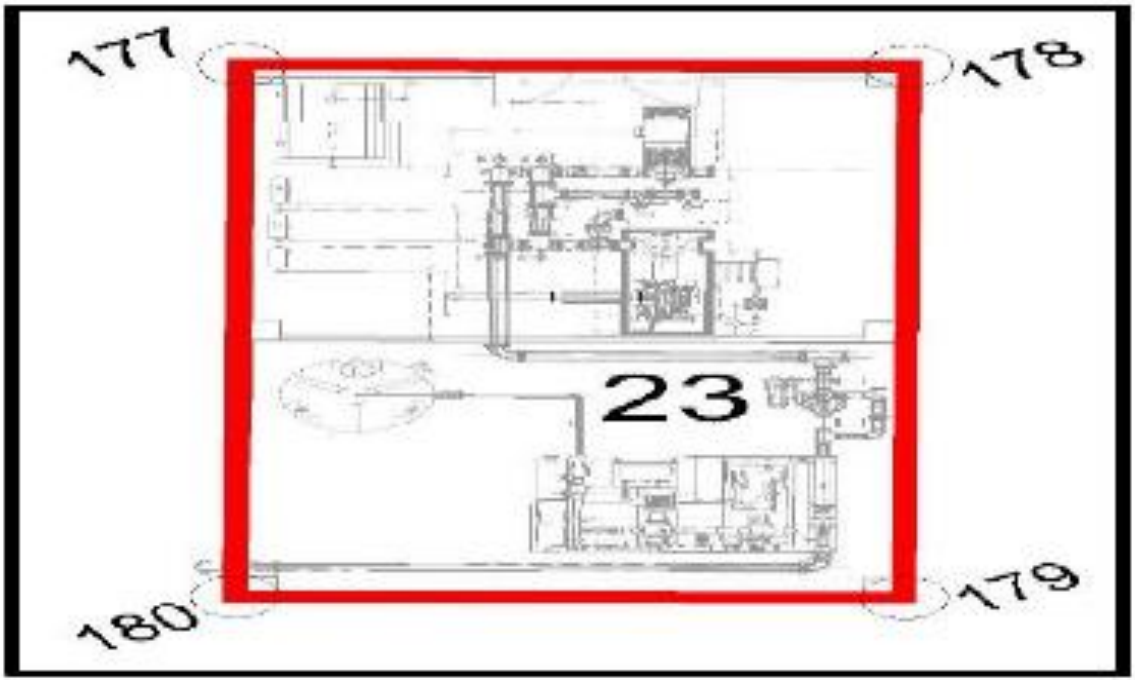
[redacted]
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.8 Render cuarto de bombas***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.9 Cuarto de bombas***




***Fuente: SEDENA***

D) Tanque vertical atmosférico de agua.

Los tanques verticales atmosféricos de agua son recipientes metálicos cilíndricos destinados al almacenamiento de agua para el sistema contra incendios.
El Tanque de agua se diseñó bajo el código API 650. El cuerpo, el fondo y la cubierta estarán formados por placas de acero al carbón dual ASTM A-283-C/ASTM A-36. La estructura interna del tanque será a base de perfiles de acero ASTM A-36. El recubrimiento interior estará bajo el estándar EI 1541.

***Tabla IV.4 Coordenadas tanque vertical atmosférico de agua***

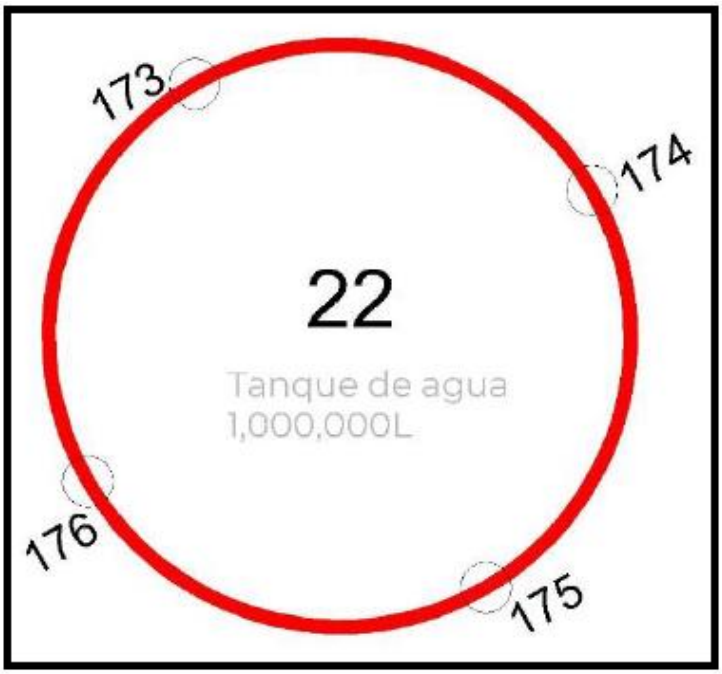
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.10 Render tanque vertical atmosférico de agua***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.11 Tanque vertical atmosférico de agua***




***Fuente: SEDENA***

E) Dique}

El área donde se instalarán los tanques de almacenamiento contará con pisos y diques impermeables, con cajas de registro de drenaje que evite la filtración de derrames al subsuelo como se muestra en el plano drenaje aceitoso. Además, contará con una pendiente mínima del 1% como se muestra en el plano HLIP-7COM-J001 drenaje pluvial aceitoso, para permitir el libre escurrimiento de líquidos hacia los registros. Será diseñado para soportar la carga hidrostática considerando el tipo de suelo y la zona sísmica del lugar.

El diseño de las instalaciones y diques permiten un acceso fácil y expedito al sistema de combate contra incendios y otorga las condiciones apropiadas para que se permita su operación manual, mantenimiento y verificación. Se presenta plano Barda Perimetral AARQ-7PCOM-A002 y Dique de contención MSRC-7PCOM-J001, donde se muestra que se tendrá un acceso peatonal individual a cada tanque de almacenamiento. En el proyecto no se consideran contra bardas. Se considera el dique de contención de 1.40m de altura con lo cual su capacidad de contención excede la capacidad nominal del mayor tanque a su máxima capacidad más la cantidad de agua anticipada ante un mayor evento pluvial típico en la zona. Ninguna tubería, instrumentación o equipo ajeno a los tanques de almacenamiento estará o pasará a través del patio interior del dique de contención. Existirá una distancia mayor de 1.5 metros entre los tanques y el pie de los muros interiores del dique.

El dique contendrá y resistirá la presión lateral que le pueda ejercer el producto almacenado en

caso de un derrame. No se consideran cruzamientos de tuberías por los muros de un dique. Se asegurará que ninguna tubería ajena a los tanques de almacenamiento pase a través del patio interior del dique de contención.

Los muros del dique se diseñarán con materiales impermeables y herméticos, para soportar la carga hidrostática total. Se considera el sellado de las juntas de unión o de expansión en el caso de muros de contención, con materiales resistentes al efecto del producto manejado y al fuego. El cableado eléctrico y de control que se integre en el área de diques, será a través de canalizaciones superficiales aéreas, cumpliendo con la clasificación eléctrica del área y normatividad aplicable nacional e internacional vigente. Para las canalizaciones superficiales, en caso de que existan al momento de construir, no se utilizarán los soportes de tuberías de los Productos y de contra incendio, ni cruzarán a través del muro del dique de contención u obstruir el paso de personal.

***Tabla IV.5 Coordenadas del dique de contención***

[redacted]

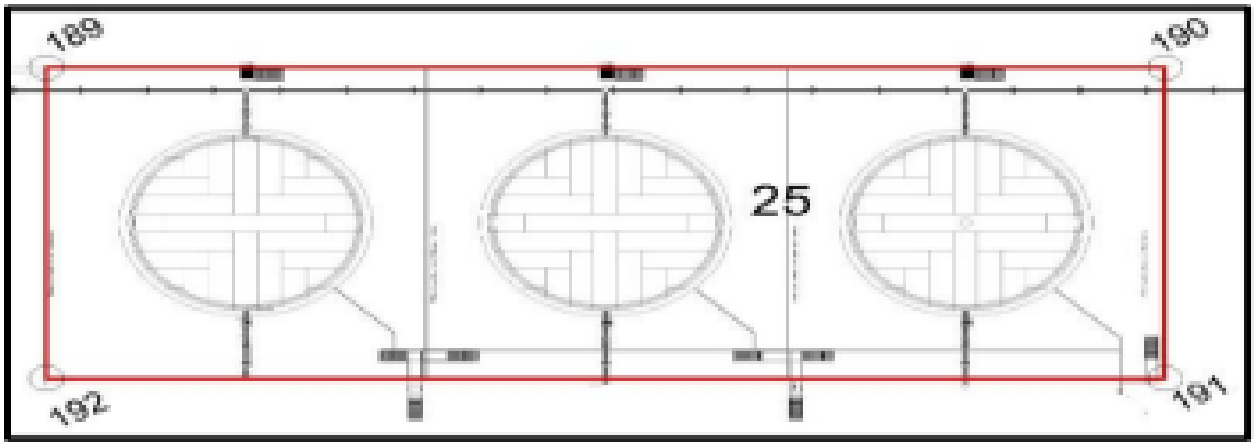
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.12 Render del dique de contención para tanques de almacenamiento de combustible.***

***Fuente: SEDENA.***

***Figura IV.13 Diques de contención***




***Fuente: SEDENA***

F) Tanque vertical de almacenamiento de combustible

Se seleccionó, para el almacenamiento de Turbosina (Jet-A), 3 tanques de almacenamientos verticales atmosféricos superficiales (Etapa inicial) como se describe a continuación:

Tanque de almacenamiento vertical atmosférico

Tipo: Techo fijo de cúpula auto portante

Dimensiones: Diámetro 18m, Altura 9.76 m

Volumen nominal: 2483.61 m3

Volumen operacional: 2000 m3

Combustible: Turbosina (Jet-A)

Succión Flotante, diseñado de acuerdo con API 650, última versión.

Todos los tanques tendrán:

-Recubrimiento interno epóxico

-Sumideros centrales

-Sistema de sobrellenado API 2350 categoría 2

-Techo frangible / junta de concha.

Para el diseño de los tanques API 650 se toma en cuenta que dentro del alcance de este código están incluidos aquellos tanques en los cuales se almacenan fluidos líquidos y diseñados para soportar una presión de operación atmosférica, menor a 18 kPa, o presiones internas que no excedan el peso del techo, con temperaturas no mayores a 93°C. Este estándar cubre el diseño y cálculo de los elementos constitutivos del tanque. En vista de los materiales de fabricación, se contemplarán secuencias en la erección del tanque, procedimientos de soldaduras, pruebas e inspecciones, así como lineamientos para su operación. El estándar API 650 cubre los requisitos mínimos para diseño, fabricación, instalación, materiales e inspección de tanques cilíndricos verticales, no refrigerados, con techo abierto o cerrado, construidos con chapas de acero soldadas.

Los tanques se instalarán sobre cimientos diseñados y construidos de acuerdo con las prácticas reconocidas de la ingeniería estructural. La cimentación de los tanques de almacenamiento será calculada con base en el estudio de mecánica de suelos, peso muerto del tanque a soportar y el peso a soportar del producto a un 100% de llenado del tanque, contando con el factor de seguridad de acuerdo con la zona geográfica. Tomando en cuenta, además, viento y sismo. Las bases de los tanques están diseñadas para atenuar la corrosión de las partes del tanque que se apoyan sobre esas bases. Se contarán con un recubrimiento interno sobre la placa del fondo de material con características para abatir la corrosión interna.

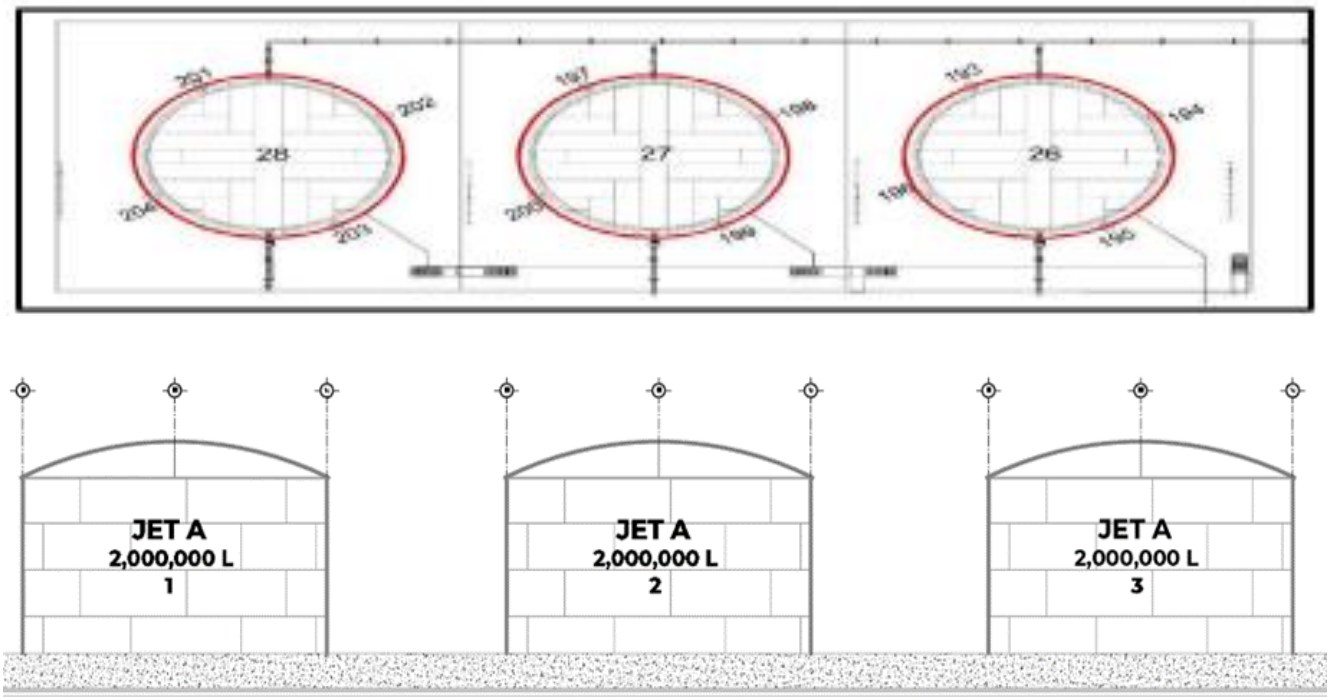
***Tabla IV.6 Coordenadas de tanques de almacenamiento de combustible***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.14 Render de los tanques de almacenamiento de combustible.***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.15 Tanques de almacenamiento de combustible.***



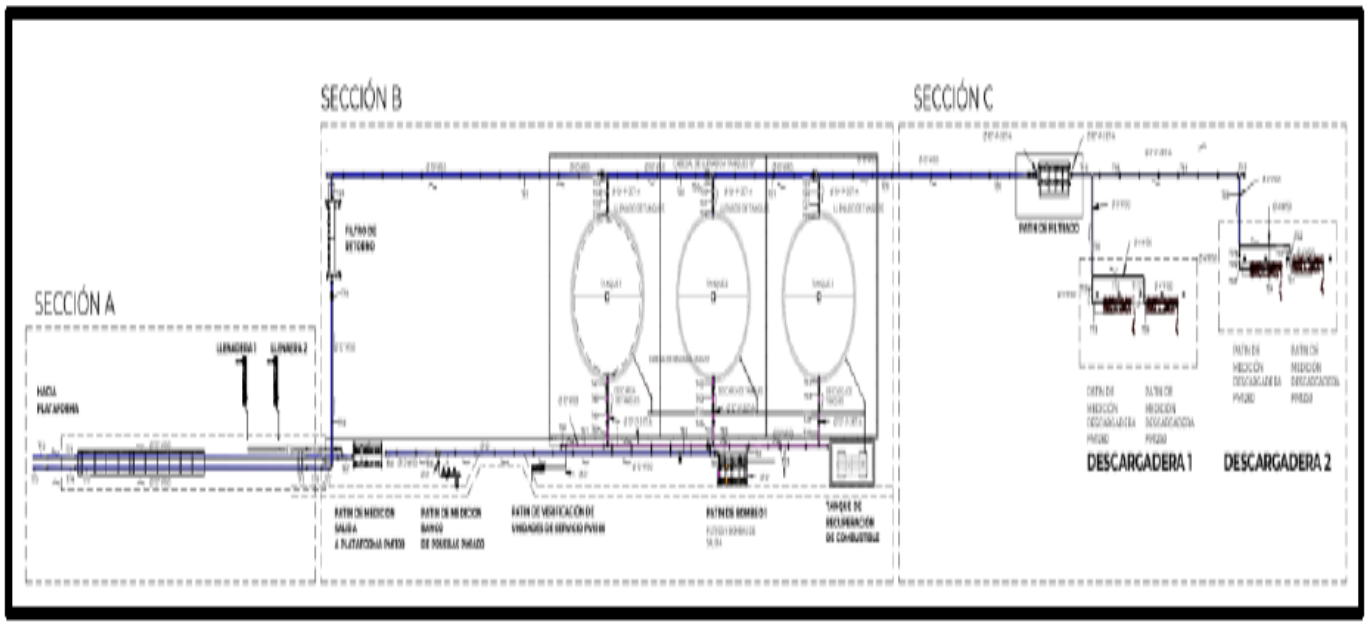

***Fuente: SEDENA***

G) Red interna

La red interna del Proyecto es una planta donde se recibe, administra y suministra combustible Jet-A a la red externa (Figura IV.16 y IV.17)
Está compuesta por los siguientes componentes y subsistemas, se describen de acuerdo con el flujo de proceso:

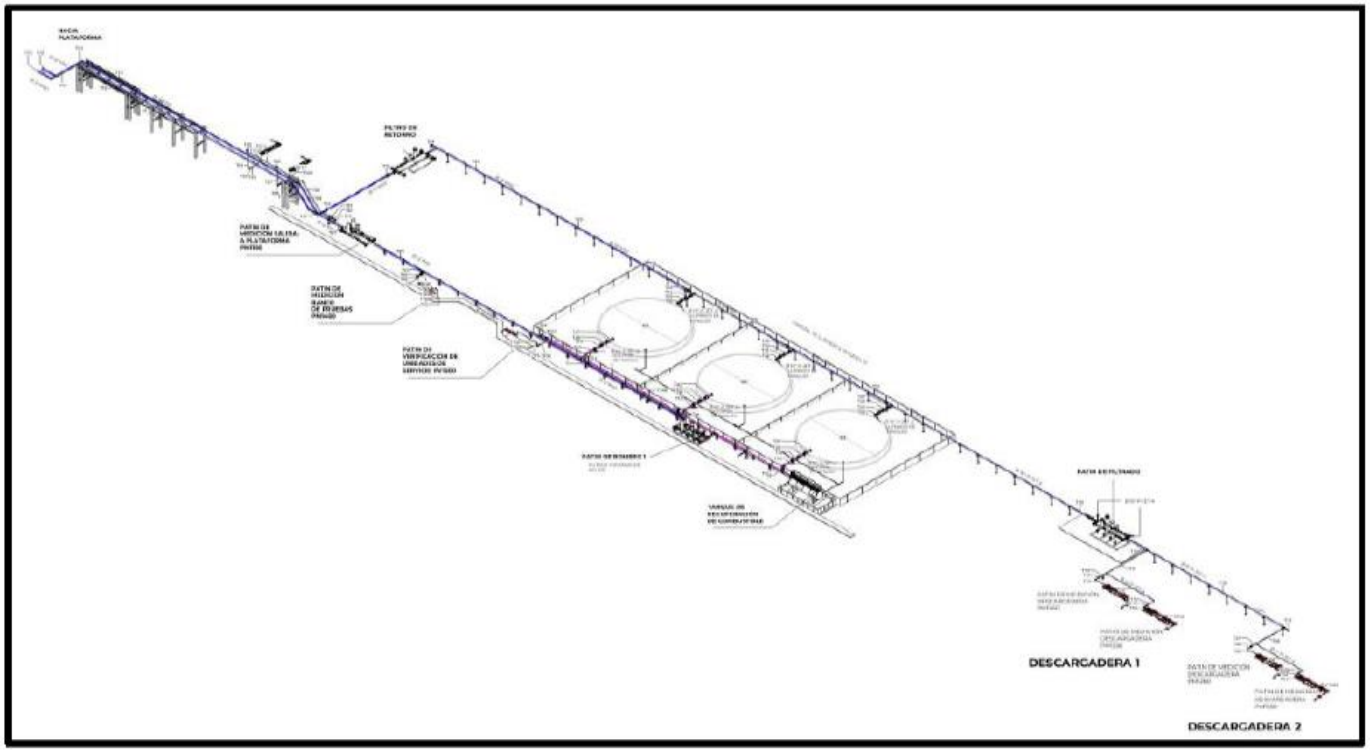
- Descargaderas.
- Etapa de filtrado.
- Tanques de almacenamiento.
- Patines de bombeo y filtrado para envió de combustible a la red de hidrantes.
- Patines de medición para envió a plataforma, Llenaderas y Banco de Pruebas.
- Válvulas y tuberías de proceso.

***Figura IV.16 Red Interna***




***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.17 Isométrico general de la Red Interna***




***Fuente: SEDENA***

- ***Infraestructura complementaria***

A) Edificio Administrativo

El Edificio Administrativo se conforma por la planta baja con un acceso para ingreso al área de vestíbulo y zona administrativa y otro acceso para el personal operativo con salida al área de descargaderas y tanques de almacenamiento.
También el edificio se compone por instalaciones como oficinas, sala de juntas, comedor, site, sanitarios y se cuenta con un área de servicios para el personal operativo el cual se compone por alojamientos para mujeres, alojamientos para hombres, ambos con baños vestidores.

***Tabla IV.7 Coordenadas edificio administrativo***

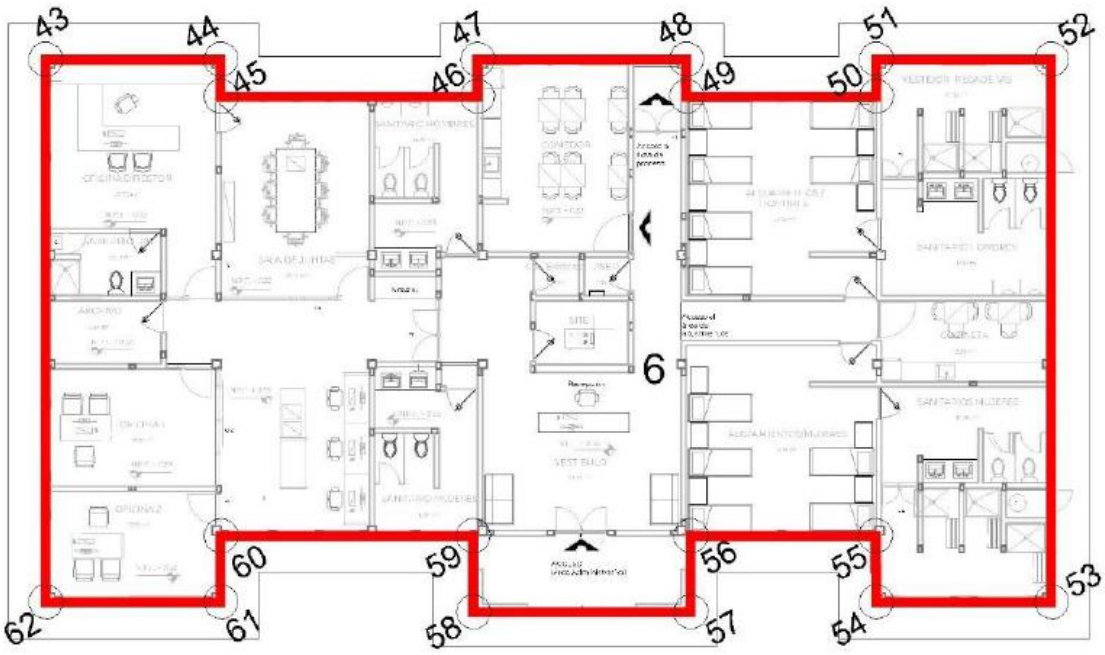
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.18 Render del edificio Administrativo.***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.19 Edificio Administrativo.***




***Fuente: SEDENA***

B) Caseta de Acceso Administrativo

Edificio de un nivel con cubierta lateral, destinada para el control de acceso y salidas de autotanques, vehículos militares y vehículos de servicio.

***Tabla IV.8 Coordenadas caseta de acceso administrativo***

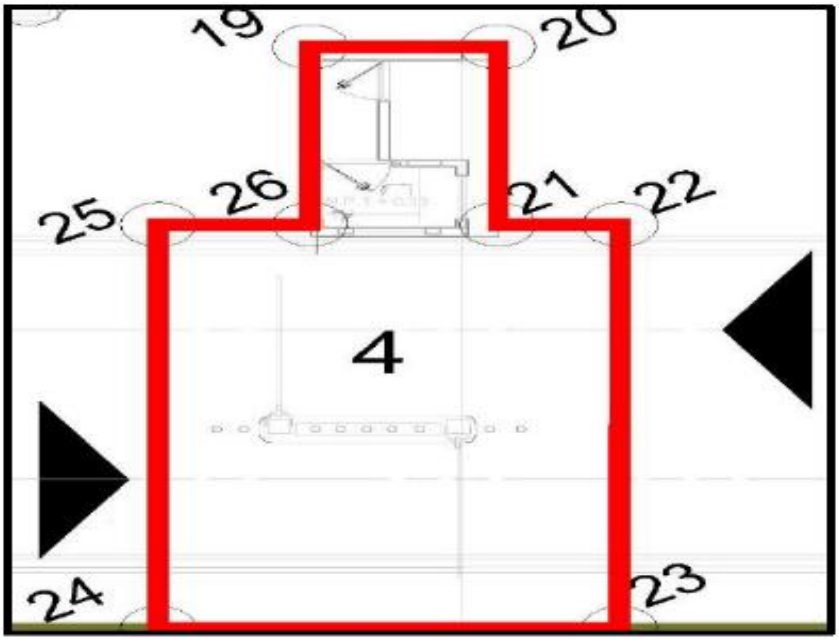
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.19 Render de caseta de acceso administrativo.***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.20 Caseta de acceso administrativo***




***Fuente: SEDENA***

C) Caseta de Acceso Vehicular

Edificio de un nivel con cubierta lateral, destinada para el control de acceso y salidas de autotanques, vehículos militares y vehículos de servicio.

***Tabla IV.9 Coordenadas caseta de acceso vehicular***

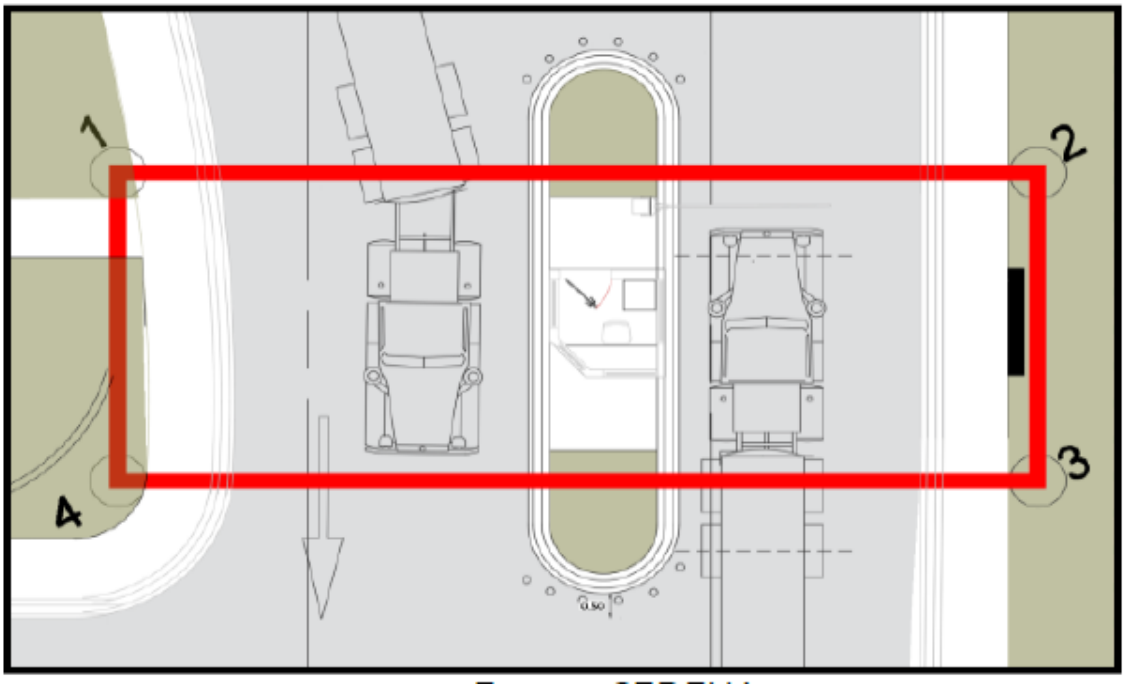
| |
|---|
| COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP. |

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.21 Render de caseta de acceso vehicular.***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.22 Caseta de acceso vehicular.***




***Fuente: SEDENA***

D) Destacamento de Seguridad

En el edificio de Destacamento de Seguridad se alojará personal encargados de seguridad y el cual cuenta con las instalaciones necesarias como: dormitorios para 30 hombres y 4 mujeres, baños, regaderas, comedor, almacén de víveres, un área de lavado y tendido, con un alojamiento y baño para un Oficial.

***Tabla IV.10 Coordenadas destacamento de seguridad***

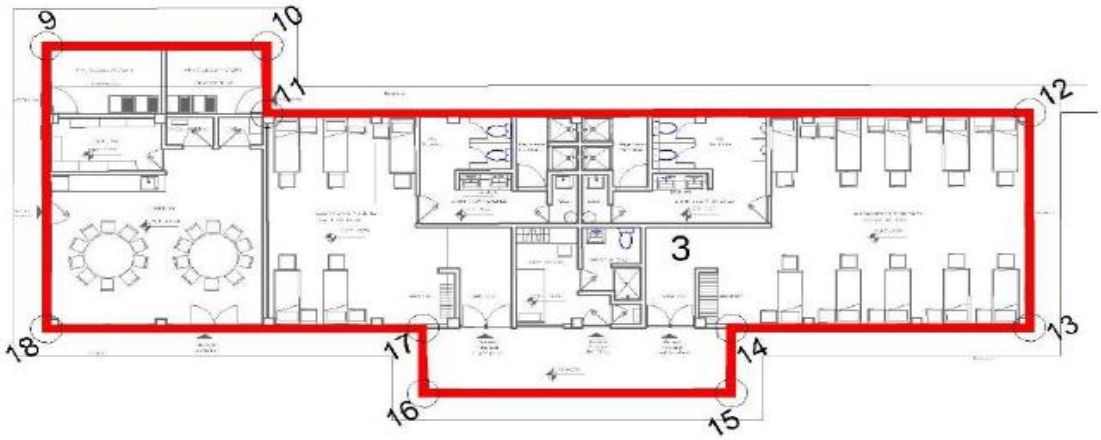
[redacted]
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.23 Render del edificio de Destacamento de Seguridad.***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.24 Destacamento de seguridad.***




***Fuente: SEDENA***

E) Enfermería

La Enfermería cuenta con un consultorio para dar servicio al personal, con un área para curaciones y observación que dará la atención oportuna en caso de que ocurra un incidente, también cuenta con una salida para ambulancia, baños, cuarto séptico y R.P.B.I.

***Tabla IV.11 Coordenadas enfermería***

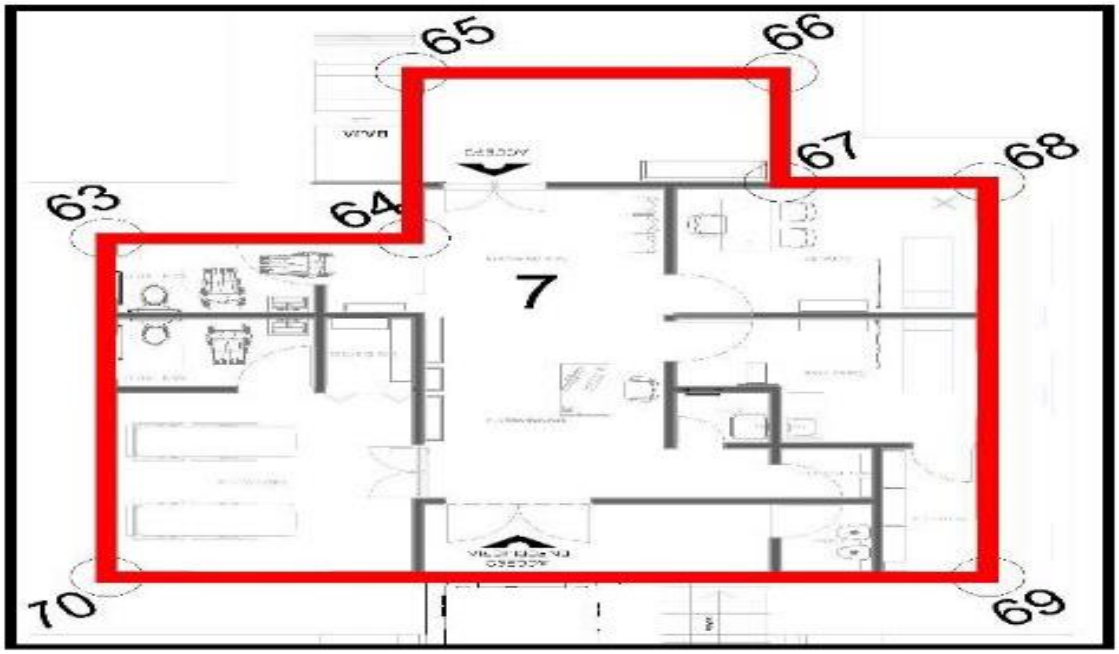
| |
|---|
| COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP. |

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.24 Render de la enfermería.***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.25 Edificio de la Enfermería.***




***Fuente: SEDENA***

F) Laboratorio y Control de Calidad

El edificio cuenta con 3 Oficinas para el área técnica encargada el procesamiento del combustible, un área de control y calidad, un laboratorio de combustibles, un área asignada para el compresor y gases especiales que son parte del funcionamiento del laboratorio, depósito, baños, cuarto de aseo y cuarto eléctrico.
En el área de laboratorio se realizarán 21 pruebas físico-químicas para la certificación del combustible jet-a y se contará con el equipamiento basados en los métodos astm 1655.

***Tabla IV.12 Coordenadas Laboratorio y control de calidad***

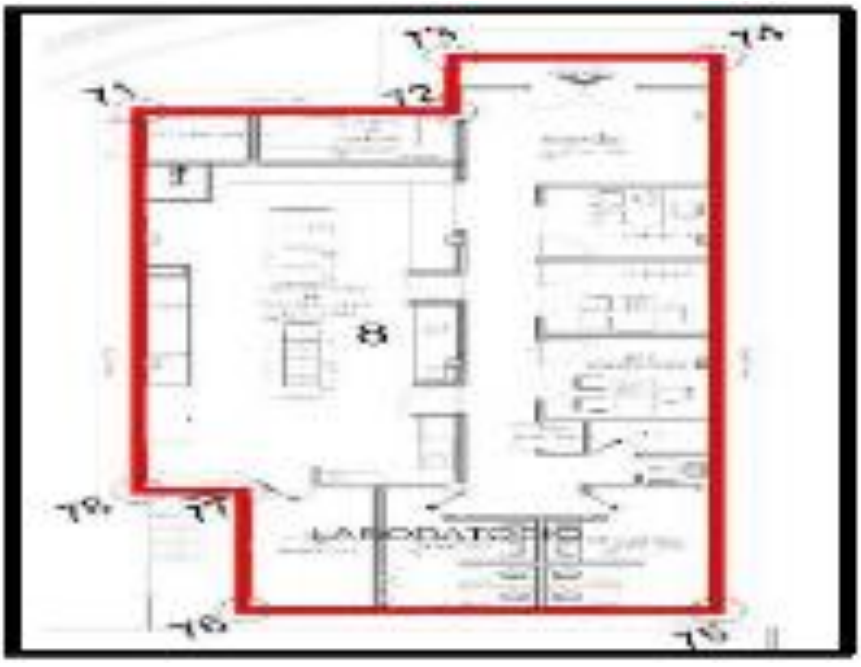
[redacted]
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.26 Render de Laboratorio y control de calidad.***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.27 Edificio de Laboratorio.***



***Fuente: SEDENA***

G) Mantenimiento Vehicular y Almacén

Cuenta con un almacén de refacciones y herramientas, taller de mantenimiento, un área de taller, un almacén con sanitarios de servicio y con capacidad de estacionamiento para 6 autotanques y una fosa de servicio, donde se les dará un mantenimiento preventivo a los auto-tanques.

***Tabla IV.13 Coordenadas mantenimiento vehicular y almacén***

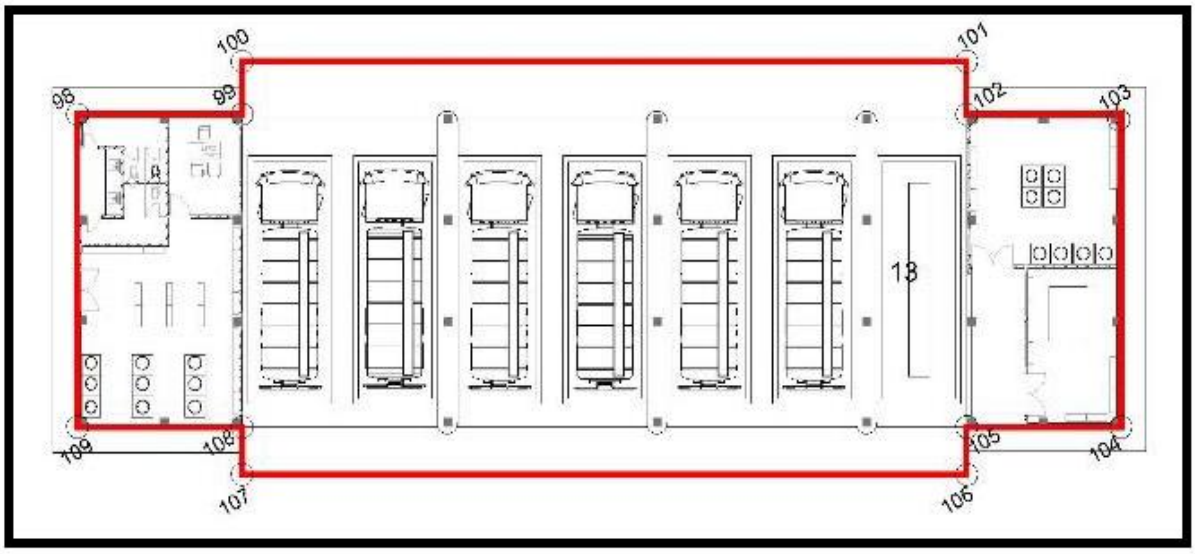
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.28 Render del edificio de mantenimiento vehicular.***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.29 Edificio de mantenimiento vehicular.***




***Fuente: SEDENA***

H) Edificio de Control y Monitoreo

El Diseño y alcance del sistema se diseñó con base al Análisis de Riesgos, contempla el dimensionamiento de los procesos operativos y complejidad en infraestructura de la instalación especificación técnica de sistemas industriales, incluye Scada, gestión del Proyecto, control de proceso y paro por emergencia.

Los Sistemas de Control se diseñaron para monitorear todas las variables del proceso, así como permitir llevar registros históricos de movimientos de producto durante la recepción y entrega.

Se contará con un sistema automatizado que proveerá el procesamiento de variables digitales y analógicas provenientes de campo hacia un PLC. Con base en esta información obtenida de las variables del sistema se ejecutarán las siguientes funciones: Elaboración de reportes, interfaz hombre-máquina, generación de alarmas sonoras y visuales ante eventos de riesgo.

El sistema cuenta con una red de puesta a tierra de todos los equipos. La conexión será totalmente efectiva para protección del personal y del equipo. El diseño del sistema de tierras se muestra en los planos de ingeniería eléctrica.

***Tabla IV.14 Coordenadas Edificio de control y torre de vigilancia***

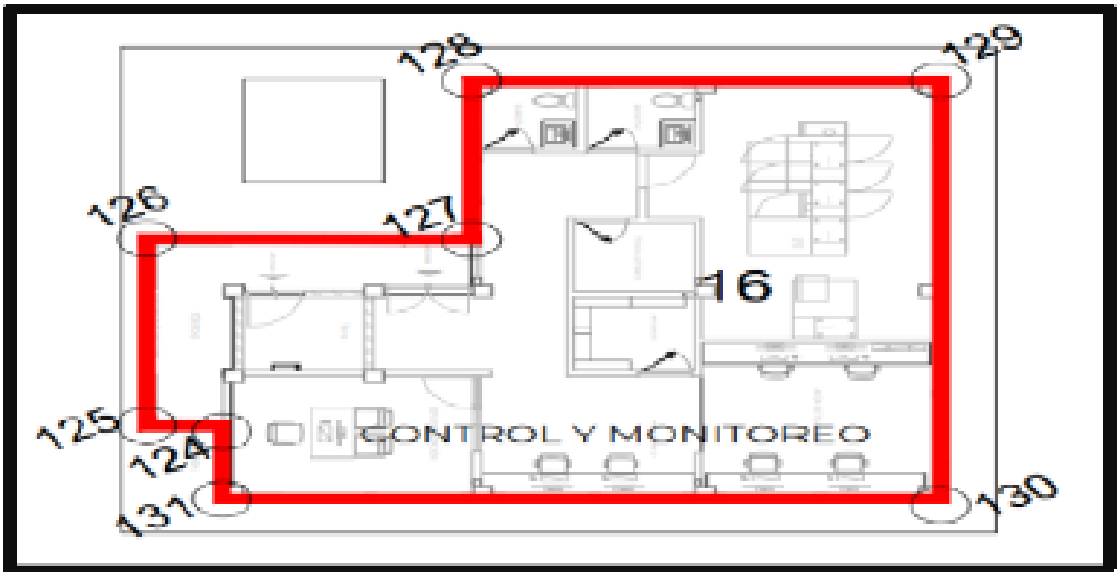
[redacted]
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.30 Render de edificio de control y torre de vigilancia.***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.31 Edificio de control y torre de vigilancia.***




***Fuente: SEDENA***

I) Depósito de Residuos Peligrosos

Edificio de un nivel, contara con tres áreas de depósito y almacenamiento de residuos líquidos, residuos sólidos y residuos contaminantes secundarios.

***Tabla IV.15 Coordenadas depósito de residuos peligrosos***

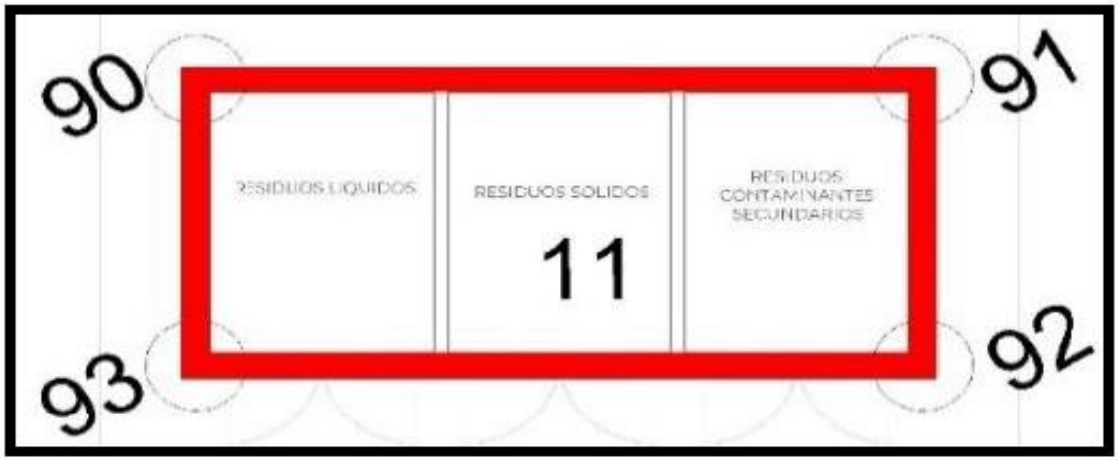
[redacted]
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.32 Render depósito de residuos peligrosos***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.33 Depósito de residuos peligrosos***




***Fuente: SEDENA***

J) Subestación Eléctrica y Planta de Emergencia

La Acometida está dispuesta de dos fuentes de energía una emergente y la preferente con una tensión de 34,500 Volts que alimenta a un seccionador ubicado en la subestación eléctrica y a su vez este seccionador alimenta a los tres transformadores tipo seco encapsulado, el arreglo de acometida de C.F.E., constituye el sistema de distribución primario.
Está constituida por siete celdas de media tensión en hexafluoruro de azufre de doble acometida con medición, de operación sin carga cuya función deberá ser aislar la subestación de la alimentación cuando se requieran trabajos de mantenimiento en el interior de la misma, 2 celdas de seccionador de carga tripolar, de un tiro, operación en grupo con fusibles integrados y apartarrayos tipo auto valvular y 3 celdas de acoplamiento, 2 celdas con seccionador de puesta a tierra con conexión directo a barras. Su diseño e instalación deberá cumplir con los requerimientos establecidos en los artículos 110, 923 y 924 de la NOM-001-SEDE-2012. Los transformadores de distribución tipo seco encapsulado de capacidad 750 KVA 34,500/480-277 Volts, 500 KVA 34,500/480-277 Volts y 500 KVA 34,500/220-127 Volts, mediante estos se obtiene energía de baja tensión que alimenta a un tren de tableros eléctricos y de estos se generan los circuitos eléctricos de fuerza y control de los equipos de bombeo de combustible de aviación y de agua, alumbrado de vialidades, alumbrado y contactos de las edificaciones.
En el Proyecto se instalaron plantas de Emergencia con las siguientes capacidades: dos unidades de 800 kW con voltaje de operación a 480/277 v.c.a. para el respaldo de los equipos de fuerza y bombeo. Una unidad de 500 kW, voltaje de operación de 220/127 v.c.a. para el respaldo de los equipos eléctricos de servicios generales. El propósito de dichas unidades es cubrir las cargas críticas en caso de que falle el suministro de energía eléctrica.

***Tabla IV.16 Coordenadas subestación eléctrica y planta de emergencia***

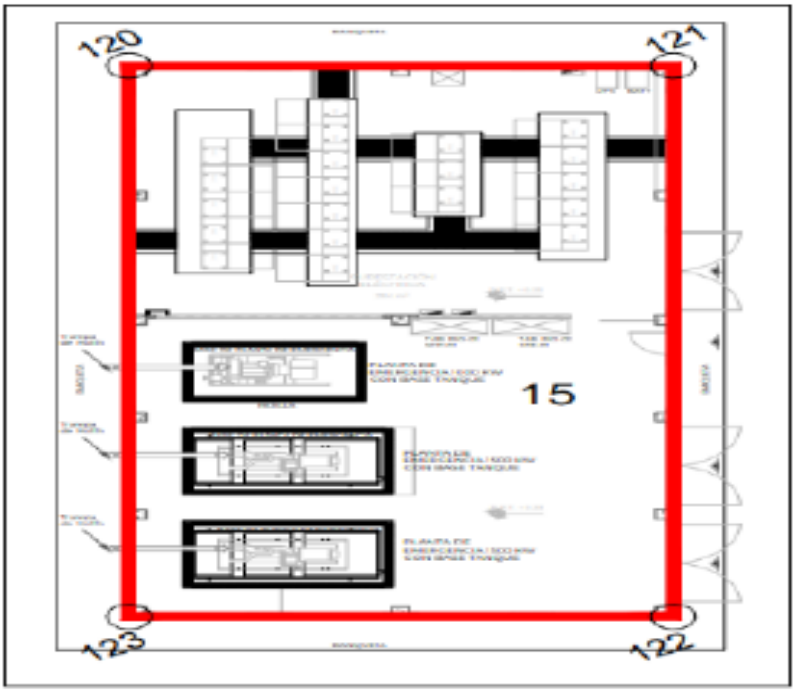
[redacted]
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.34 Render subestación eléctrica y planta de emergencia***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.35 Subestación eléctrica y planta de emergencia***




***Fuente: SEDENA***

K) Depósito de Basura

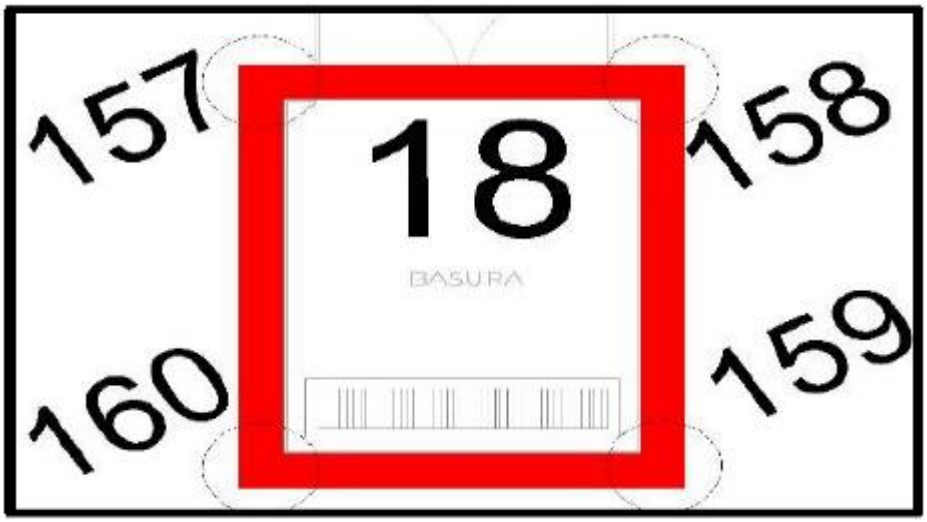
En esta área se llevará a cabo la recolección y almacenamientos de residuos específicos como orgánicos e inorgánicos producto de las actividades cotidianas de los usuarios de los edificios del Proyecto.

***Tabla IV.17 Coordenadas depósito de basura***

| |
|---|
| COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP. |

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.36 Depósito de basura***




***Fuente: SEDENA***

L) Sanitario Exterior

Sanitarios para el uso de conductores de autotanques encargados de trasladar el combustible para su descarga.

***Tabla IV.18 Coordenadas sanitario exterior***

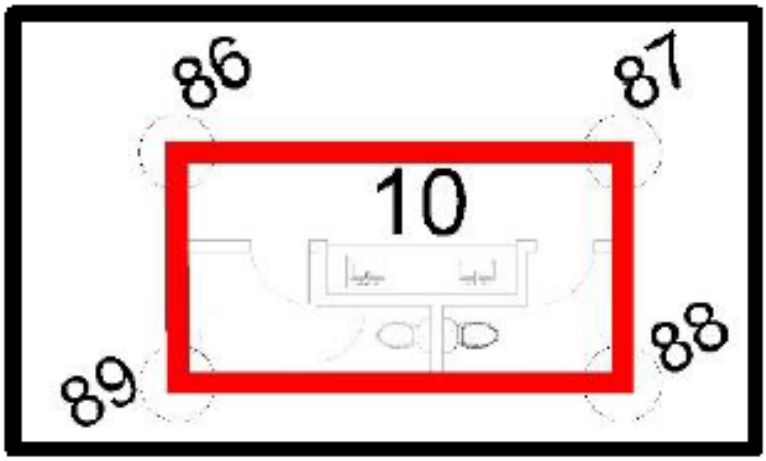
| COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP. |
|---|

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.37 Render sanitario exterior***

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.38 Sanitario exterior***




Fuente: SEDENA

M) Cisterna de Agua Cruda

La cisterna de agua cruda recolectara y almacenara el agua producto del proceso de tratamiento.

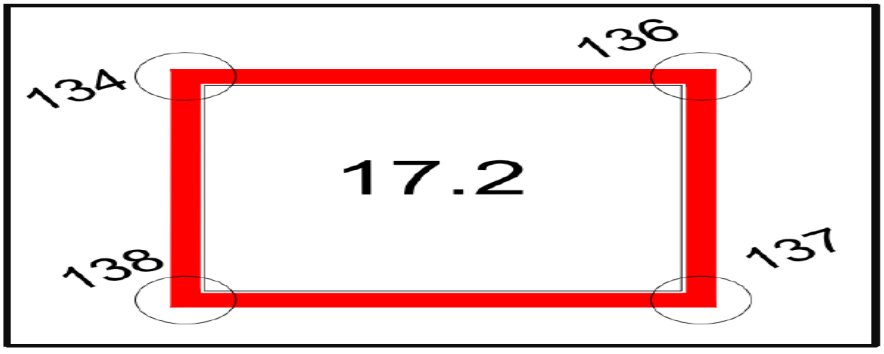
***Tabla IV.18 Coordenadas cisterna de agua cruda***

[redacted]

COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.39 Cisterna de agua cruda***




***Fuente: SEDENA***

N) Conjunto de Servicios P.T.A.R.

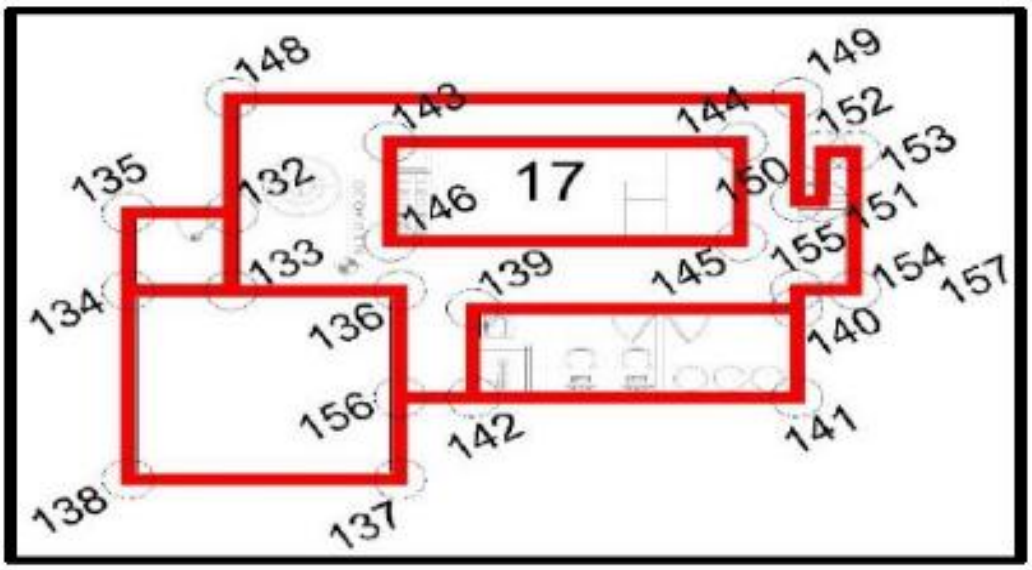
La planta de tratamiento prefabricada permitirá depurar las aguas residuales generadas dentro de las edificaciones del Proyecto. Cubriendo con las normas de vertido establecidas tanto en la NOM-001-SEMARNAT-1996*
(para descarga en cuerpos receptores) como en la NOM-003-SEMARNAT-1997 (reúso de agua tratada).

***Tabla IV.19 Coordenadas conjunto de servicios P.T.A.R.***

[redacted]
COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA.***

***Figura IV.40 Conjunto de servicios P.T.A.R.***




***Fuente: SEDENA***

Ñ) Cisterna de Agua Potable y Cuarto de Bombas

Contará con equipos hidroneumáticos y tableros que darán servicio al sistema de la Cuarto de bombas.

***Tabla IV.20 Coordenadas cisterna de agua potable***

| COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP. |
|---|

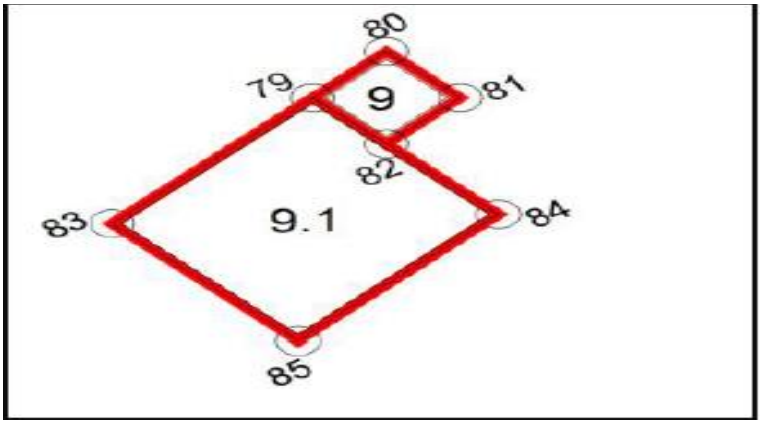
***Fuente: SEDENA***

***Tabla IV.21 Coordenadas cuarto de bombas***

| COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP. |
|---|

***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.41 Cisterna de Agua Potable y Cuarto de Bombas***




***Fuente: SEDENA***

O) Caseta de Acceso a Plataforma

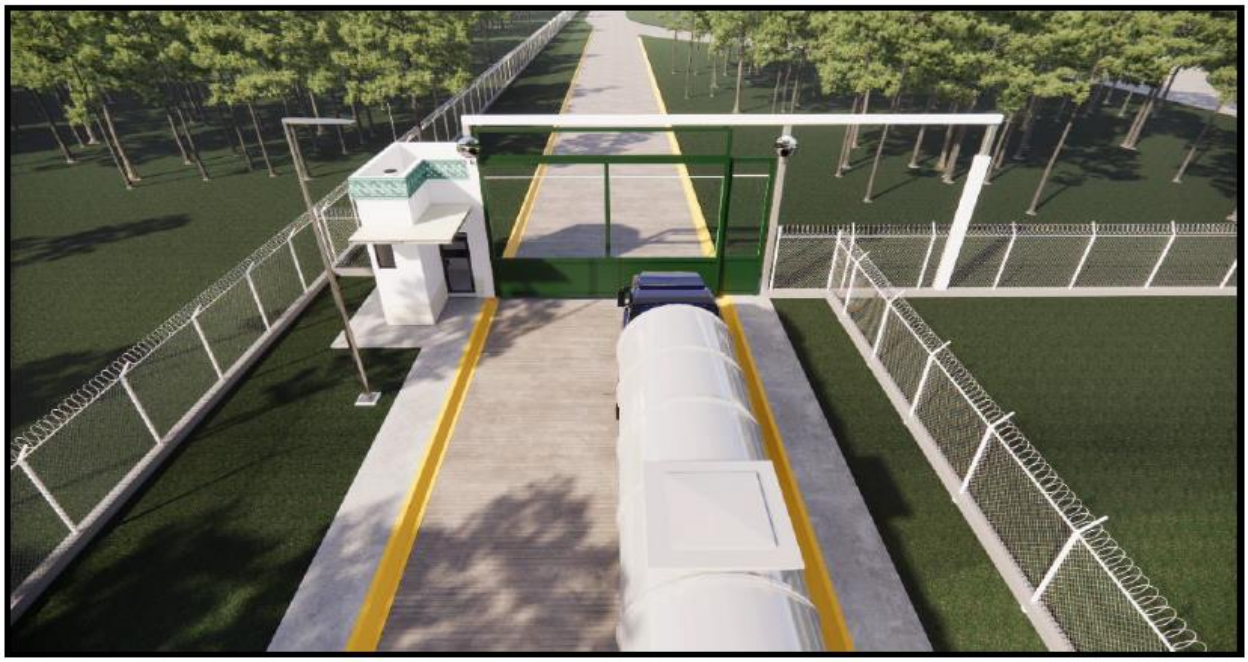
Edificio de un nivel con cubierta lateral, destinada para el control de acceso y salidas de autotanques, vehículos militares y vehículos de servicio.

***Tabla IV.22 Coordenadas caseta de acceso a plataforma***

| |
|---|
| COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP. |

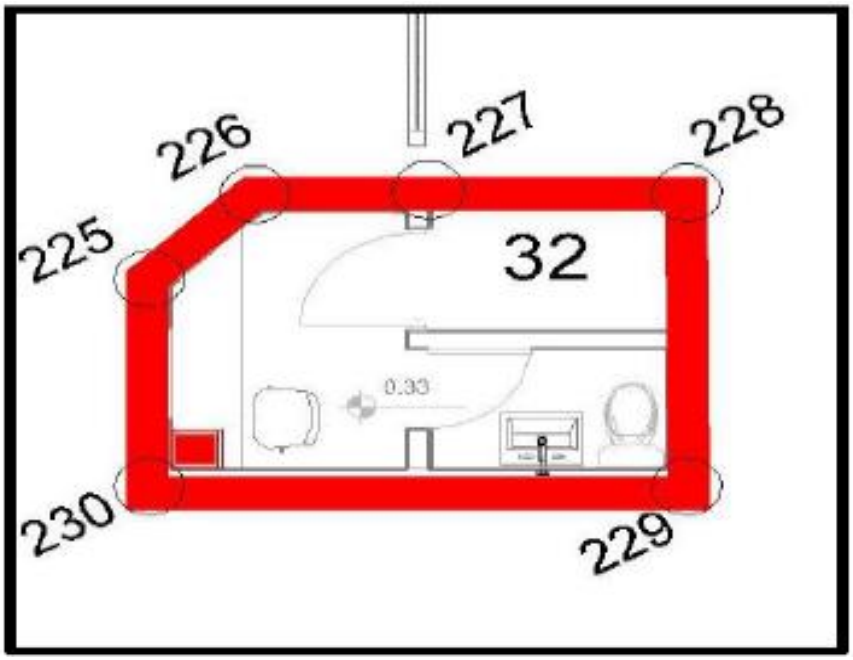
***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.42 Render caseta de acceso a plataforma***



***Fuente: SEDENA***

***Figura IV.43 Caseta de acceso a plataforma***




***Fuente: SEDENA***

- Normas y disposiciones aplicables al manejo de combustible

El diseño conceptual de la Planta de Combustibles está sustentado bajo la NOM- 006-ASEA2017, la cual se establecen las especificaciones y requisitos de seguridad industrial, seguridad operativa, y protección al Medio Ambiente.
La NOM-006-ASEA se aplicó para determinar las edificaciones que conforman el proyecto y así mismo para definir los distanciamientos entre tanques, alturas, diámetros, dimensionamiento del dique de contención, vialidades, drenaje pluvial y aceitoso, etc. La normatividad internacional americana (API, JIG, NFPA, ATA) y europea (EI) aplicable al combustible de aviación se cita en la NOM-006 ASEA, por lo cual también se tomó como estándares aplicables para el diseño de la Planta de combustibles y Red de Distribución (Tabla IV.23).

***Tabla IV.23 Estándares aplicables para el diseño del proyecto.***

| **Autoridad** | **Titulo** |
|---|---|
| Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente. | NOM- 006-ASEA 2017. |
| Joint Inspection Group (JIG) | JIG 1 y JIG2 |
| American Petrolium Instituto | API 650 Welded Tanks for Oil Storage. |
| Energy Institute. | EI 1541 Requeriments for internal protective coating systems used in aviation fuel handling systems.<br>EI 1541 Requeriments for internal protective coating systems used in aviation fuel handling systems. |

| | |
|---|---|
| | RP1540 (Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Instalaciones de Abastecimiento de Aviación).<br>1581 (Filter/Separators).<br>1583 (Filter/Monitors).<br>1529 (Fueling Hoses).<br>1542 (Identification Markings Aviation Facilites).<br>1530 (Fuel Quality). |
| National Fire Protection Association | NFPA 407 (Fueling Safety & Fire).<br>30 & 30A (Fuel Storage Tanks)<br>20 Norma para la instalación de Bombas Estacionarias de Protección contra Incendios.<br>NFPA 11 Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam, 2016.<br>NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems, Version 2019.<br>NFPA 14 Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems, Versión 2019.<br>NFPA 16 Standard for the Installation of Foam-Water Sprinklerand Foam-Water Spray Systems, Versión 2019.<br>NFPA 30 Flammable and Combustible Liquids Code, Versión 2018.<br>NFPA 70 National Electrical Code, Versión 2020<br>NFPA 72 National Fire Alarm and Signaling Code, Versión 2019.<br>NFPA 170 Standard for Fire Safety and Emergency Symbols, Versión 2018. |
| Federal Aviation Administration | FAA AC-150/5230-4 (Fuelling Safety). |
| PEI | RP1300 (Seguridad en el abastecimiento & Fuego) |
| ATA | ATA 103 (Fuel Quality). |

Como lo menciona el Análisis de Riesgo del Sector Hidrocarburos, realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se requieren ciertos aspectos para la caracterización de los tanques de almacenamiento, de los cuales a continuación se mencionan aspectos relevantes para la creación de estos en base a las Normas Oficiales:

La planta de Combustibles del Aeropuerto Internacional Felipe Carillo Puerto cuento con tres tanques verticales atmosféricos (1, 2, 3) de techo fijo con estructura autoportante diseñados bajo el "Standard API 650". La envolvente, el fondo y la cubierta están fabricados en acero dual ASTM A-36/ASTM A-283-C, mientras que la estructura de la cubierta está fabricada con perfiles de acero ASTM-A36.

La envolvente tiene una altura de 9.76 metros y un diámetro de 17 metros. La capacidad nominal de cada tanque es de 2,215,325 litros y una capacidad operativa de 2,000,000 litros, la cual cumple con lo establecido en la NOM-006-ASEA-2017.

Los sistemas de medición de nivel están diseñados con apego a las siguientes prácticas recomendadas:

- NRF-113-PEMEX, Diseño de Tanques Atmosféricos.
- NRF-053-PEMEX, Sistemas de Protección Anticorrosiva a Base de Recubrimientos para Instalaciones Superficiales.
- NOM-006-ASEA-2017, Especificaciones y criterios técnicos de seguridad industrial, seguridad operativa y protección al medio ambiente para el diseño, construcción, pre-arranque, operación, mantenimiento, cierre y desmantelamiento de las instalaciones terrestres de almacenamiento de

petrolíferos y petróleo, excepto para gas licuado de petróleo.
- API STANDARD 650, Welded Tanks for Oil Storage.
- API STANDARD 2350, Overfill Prevention Storage Tank in Petroleum Facilities
- API STANDARD 2000, Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks, Nonrefrigerated and Refrigerated.

Los componentes de los tanques son:

- Cimentación. Conformada por una viga como anillo de compresión con una sección transversal de 30x60 cm y finalmente debajo de la viga tendremos un muro con un espesor de 30 cm.
- Recubrimiento. El recubrimiento exterior está compuesto por un primario epóxico a base de poliamidas y un acabado de poliuretano acrílico, mientras que el recubrimiento interior es a base de un epóxico 100% solidos.

- Boquillas.

a) 3 válvulas de presión-vació con arrestador de flamas integrado de 12" en cubierta
b) 2 entradas hombre de 20" en cubierta
c) 2 entradas hombre de 30" en envolvente
d) 2 escotillas de supervisión de 8" en cubierta
e) 3 cámaras de espuma de 8" en envolvente
f) 1 entrada de producto de 10" en envolvente
g) 1 salida de producto de 14" en envolvente
h) 1 salida de drenado de 3" en envolvente
i) 1 boquilla libre de 10" en cubierta

- Sistemas.

a) Sistema de detección de fugas
b) Sistema de control de inventarios
c) Sistema de succión flotante
d) Sistema de gas y fuego

## *IV.2 Red de distribución de combustible.*

El proyecto de la red de distribución de combustible (red de hidrantes) se integra por una tubería de acero al carbón API 5LX42 con 4.4 km de longitud y con diámetro de 12", 15 registros para el alojamiento de válvulas de seccionamiento con un punto alto, un punto bajo primario y secundarios para alojar válvulas de seccionamiento con actuador eléctrico para los ramales de hidrantes, una red eléctrica de media y baja tensión, una red de fibra óptica, un sistema de detección de fugas, un sistema de protección catódica y el monitoreo de presión y temperatura a lo largo de la red de combustible.

La red se sustenta bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-006-ASEA-2017 y los estándares de la EI 1540, EI 1541 y API 5L. La red se compone de Loops o circuitos con el fin de garantizar el suministro de combustible hasta las posiciones de contacto de las aeronaves sin importar que se presente alguna actividad de mantenimiento o cualquier evento que pueda afectar a la distribución del combustible.
Los supuestos se realizan en función de la utilización de las instalaciones y sus tasas de

mantenimiento. Reiterar que el suministro de combustible Jet-A a las aeronaves será a través de una red hidrante, un porcentaje adicional se hará por auto-tanque y dentro de aviación general.

# V. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MANEJO DE TURBOSINA EN EL AIT.

La filosofía de operación de la planta de combustible se divide en actividades de recepción, pruebas de control calidad al combustible Turbosina (Jet A), verificación, volumen y descarga del combustible en sistemas de almacenamiento.

**1. Recepción:**

Cuando llega un autotanque, se solicita al transportista la documentación del embarque, con el certificado de origen (refinería) con las pruebas de control de calidad y se registra, se revisa e inspecciona el auto tanque que no tenga fugas y se indica el lugar de estacionamiento dentro de la planta.

Se deja reposar el auto tanque 10 minutos, después se revisan los sellos y que la numeración sean las que vienen en los documentos, se procede a quitar sellos, después se realizan pruebas de calidad en campo, si los análisis cumplen con las especificaciones requeridas y autorizadas se procede a la descarga. Si no cumple con las especificaciones de calidad se sacará una muestra para su análisis en laboratorio hasta que ellos informen, que salieron bien las pruebas de control de calidad se procede a descargar el combustible y se supervisará en todo momento.

Se realiza la medición inicial del combustible en el tanque de almacenamiento donde se descargará el combustible, se colocará el letrero de "Recepción". Ya finalizada la descarga de varios auto tanques se procede a medir el volumen del tanque físicamente, así como en el sistema de gestión de medición de nivel, para lo cual se requieren 4 patines de descarga las cuales descargarán un flujo de 300 GPM cada una, utilizando:

- 4 Moto bombas centrifugas horizontales de 300 GPM, 25 HP.
- 4 Patines de medición utilizando un medidor de flujo tipo Coriolis de 300 GPM.

Posteriormente este flujo, será bombeado hacia los tres tanques de almacenamiento, pasando por el primer sistema de filtrado conformado por 2 patines de filtración. Se requiere descargar el combustible (Turbosina Jet A) con las mismas bombas de las descargaderas y un sistema de filtrado que consta de lo siguiente:

- 2 filtros Separadores coalescedores de 600 GPM.
- 2 filtros Micrónico 600 GPM.

Atendiendo a las recomendaciones de JIG 1, JIG 2, IATA y la NOM-006-ASEA-2017, la instalación cuenta con 3 tanques de almacenamiento atmosféricos, verticales, con techo fijo. En la estación de combustibles se contará con una autonomía de 11 días, cada tanque contará con una capacidad de almacenamiento nominal de 2,215,325 litros y una capacidad operacional de 2,000,000 de litros.

Al finalizar la descarga, se entrega la documentación debidamente sellada al transportista (Comprobante de alta al recibo del documento Comercializador, conocimiento de embarque, remisión factura, nota de remisión y formato de descarga de combustible).

El sistema de recepción de las instalaciones cuenta con equipos para la medición del producto, temperatura, flujo, densidad y presión. La instrumentación con la que contará el sistema de recepción es: Manguera API con cople API en auto tanques, arreglo de tubería y conexiones,

válvulas de mariposa con actuador neumático, línea auxiliar neumática para actuador de válvulas, medidor de flujo másico tipo Coriolis.
El área estará conformada por: manguera de descarga, sistema de filtrado, sistema de bombeo, válvulas, conexiones, sistemas de seguridad (incluye monitor de tierra), Unidad de Control Local (UCL), tuberías y/o mangueras y dispositivo para la eliminación de aire.
El sistema de Recepción de las instalaciones contemplará la instalación de instrumentación propia para la medición del producto, temperatura, flujo, densidad y presión; además de una unidad de control local, pinza de conexión a tierra física, filtro, bomba principal, filtro tipo "Y", tanque eliminador de aire, válvula check, válvula digital de dos pasos, sistema de medición y control que incluye elemento primario de medición, transmisor y computador de flujo u otro equipo similar, para temperatura, densidad y flujo, válvula de bloqueo a tanque con indicador de posición (abierta - cerrada) y válvula de bloqueo de autotanques.
Los equipos y sistemas deben cumplir con las medidas de seguridad requeridas para los procesos de medición y transferencia de custodia. Para control de la recepción de producto en cada posición de descarga se tiene una Unidad de Control Local (UCL).

**2. Almacenamiento:**

Cuando se haya llenado el tanque receptor, se coloca el letrero de "Reposo", al concluir el periodo de reposo, se tomará una muestra de combustible del dren del tanque y se realizan las pruebas de calidad y se registran los resultados.
Al cumplir con la calidad requerida, se coloca el letrero de "Liberado" al tanque; y se pone a disposición para el servicio ya sea por auto tanque o a la red de hidrantes, pasando previamente por el sistema de filtración y patín de medición.

**3. Suministro:**

Diariamente, conforme a las necesidades del servicio de suministro, se realiza la recarga de combustible a auto tanques. Se estaciona el auto tanque en la zona de llenaderas y se conecta el brazo de carga a la válvula de llenado por el fondo, se realiza el llenado del tanque cisterna y se cuantifica el combustible, se deja reposar el combustible al menos 10 minutos, se realizan pruebas de calidad. Y al finalizar se obtiene la remisión de llenado de la unidad y se registran las pruebas en el formato correspondiente.
Después del almacenamiento, el combustible será enviado a la red de distribución por medio de conexión a una válvula hidrante, pasando por el segundo sistema de patín de Filtración de Salida, conformado por un sistema de filtrado que cuenta con 3 filtros micrónicos y 3 filtros coalescedores separadores a un flujo de 600 GPM cada uno hacia la red de distribución:

- Moto bombas centrifugas verticales de 900 GPM, 100 HP.
- Filtros separadores coalescedores de 600 GPM.

Para la distribución de combustible para la entrega se usará:

- Un Patín de medición de salida utilizando dos medidores de flujo tipo Coriolis.
- Dos Patines de medición utilizando un medidor de flujo tipo coriolis de 300 GPM (llenaderas).
- Vehículo dispensador para el suministro de combustible a las aeronaves, conectados a una válvula hidrante (pit).

El proyecto de la red de distribución de combustible se concibió de tal manera que permita el incremento de acuerdo con el crecimiento y demanda en las operaciones. Con este proyecto se pretende que la conducción del combustible llegue a las plataformas de aviación comerciales y de carga, asegurando un suministro del 80% mediante hidrantes y un 20% de suministro con auto-tanques para aviación general y casos extraordinarios en los que no se cuente con el suministro de un hidrante.

El proyecto de la red de distribución de combustible (red de hidrantes) se integra por una tubería de acero al carbón API 5LX42 con 4.4 km de longitud y con diámetro de 12", 15 registros para el alojamiento de válvulas de seccionamiento con un punto alto, un punto bajo primario y secundarios para alojar válvulas de seccionamiento con actuador eléctrico para los ramales de hidrantes, una red eléctrica de media y baja tensión, una red de fibra óptica, un sistema de detección de fugas, un sistema de protección catódica y el monitoreo de presión y temperatura a lo largo de la red de combustible.

El sistema de bombeo estará controlado y monitoreado por un PLC, el cual iniciará, terminará o interrumpirá el funcionamiento del bombeo de forma efectiva. Todos los sistemas de bombeo a la descarga contarán con un manómetro para monitorear la presión a la descarga de este.

Todo el arreglo de tubería, bridas y empaques y accesorios cumplen con las certificaciones y estándares internacionales pertinentes. El sistema es de clase 150# ANSI con todos los elementos compatibles.

Los motores, componentes eléctricos y las instalaciones eléctricas cumplirán con la clasificación de área, establecida en la normatividad nacional o internacional aplicable y vigente.

El sistema de bombeo, incorpora en su diseño un medio para interrumpir de forma rápida y efectiva el flujo de productos en caso de una emergencia. Todas las bombas cumplirán con la clasificación de áreas eléctricas.

El arreglo de tuberías a las bombas está diseñado para que permitan el retiro y el mantenimiento de las bombas. Cada una de las bombas cuenta con válvulas de aislamiento y válvulas de retención.

- **Entrega por auto tanque**

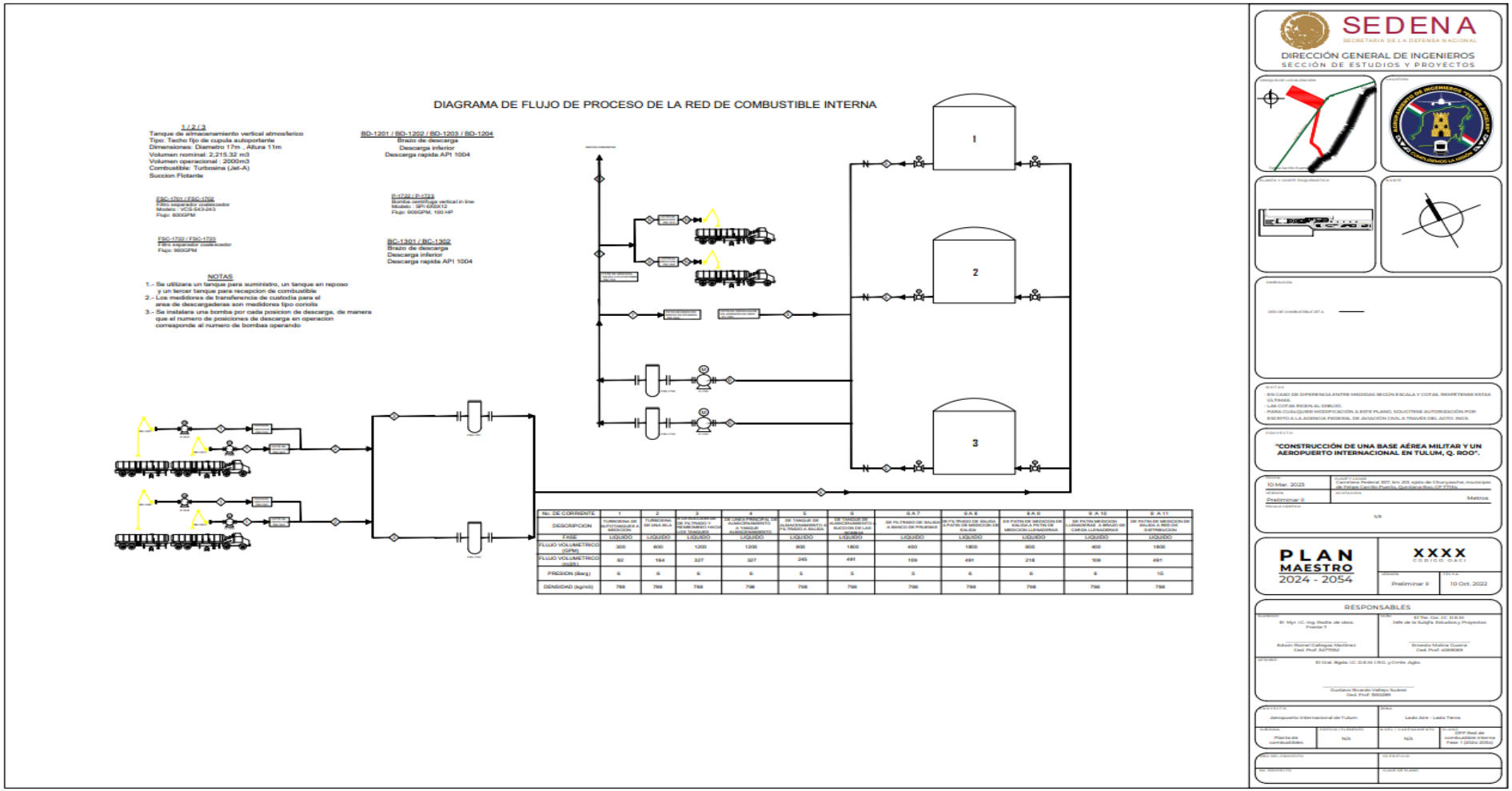
Para la entrega (carga) por autotanques se cuenta con tuberías, válvulas filtros de aire, sistema de medición y control (medidor de flujo másico tipo Coriolis, temperatura y densidad como elemento primario), transmisores, PLC, conexiones, sistema de tierras, válvula de doble paso, tuberías, brazos de carga las cuales se diseñaron bajo las normativas internacionales vigentes aplicables y compatibles con el producto a manejar.

Todas las posiciones de entrega (carga), estarán conformadas por: brazo de carga, sistema de filtrado, sistema de bombeo, válvulas, conexiones, sistema de seguridad (incluye monitor de tierra y sobrellenado), Unidad de Control Local (UCL), tuberías, dispositivo para la eliminación de aire, permisivo a tierra y sistemas de seguridad.

Todos los equipos e instrumentación cumplirán con las medidas de seguridad y condiciones eléctricas requeridas por esta área del proceso (a prueba de explosión). El sistema de entrega no tendrá interacción con el sistema de acceso a las instalaciones cumpliendo los requisitos y validaciones. El sistema dispondrá de medios de protección (interlocks) lógicos y físicos.

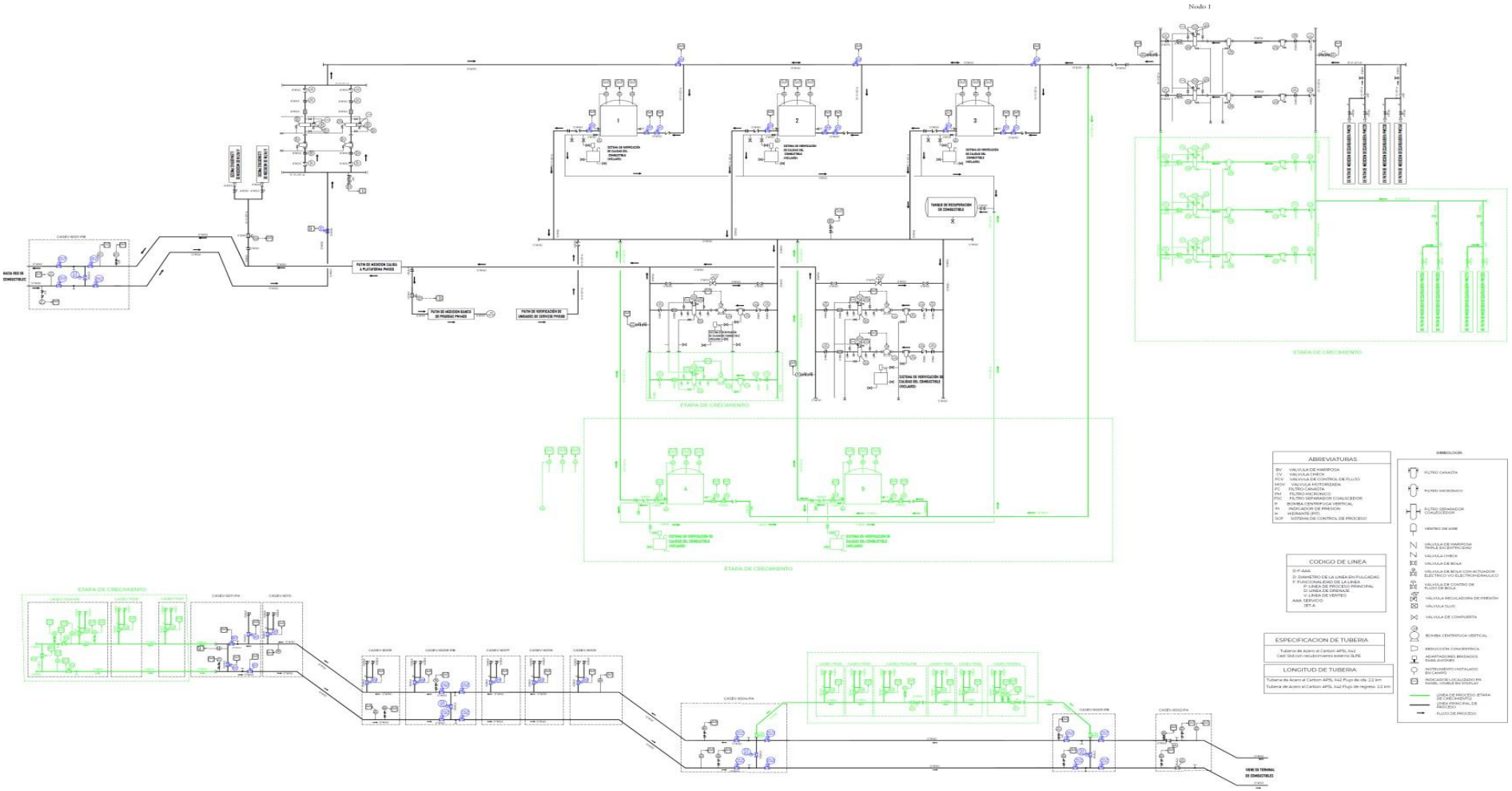
En la Figura V.1 se incluye el diagrama de flujo de proceso, y en la Figura V.2 se muestra el diagrama de tubería e instrumentación de la planta.

***Figura V.1 Diagrama de flujo de proceso***




***Fuente: SEDENA***

***Figura V.2 Diagrama de tubería e instrumentación de la Planta de combustible***




***Fuente: SEDENA***

Como se menciona anteriormente, dado que el avance de la ingeniería se encuentra en etapa de anteproyecto al momento de la realización del presente estudio, aún están por definirse los equipos auxiliares, así como la definición del sistema de transporte que abastecerá de turbosina a las instalaciones del AIT, y por ende los sitios de origen del combustible.
Los principales equipos del proyecto son los siguientes:

- **Tanques de almacenamiento TV-1, TV-2, TV-3**

Tanque de almacenamiento vertical atmosférico
Tipo: Techo fijo de cúpula autoportante
Dimensiones: Diámetro 17m, Altura 9.76 m
Volumen operacional: 2,000 m3
Volumen nominal: 2,215.32 m3
Combustible: Turbosina (Jet-A)
Equipos: Succión Flotante, Sistema de medición, entradas hombre, válvulas de venteo.

**- Patín de medición salida a plataforma PM-1100**

Medidor de flujo másico tipo coriolis con transmisor multivariable.
Filtro tipo canasta malla 40.
Válvula de control de flujo.
Actuador eléctrico.
Medidor de densidad.
Computador de flujo.

**- Descargadera PM 1210/1220/1230/1240**

Medidor de flujo másico tipo coriolis con transmisor multivariable.
Filtro tipo canasta malla 40.
Válvula digital de dos pasos.
Tanque eliminador de aire.
Unidad de control local.
Brazo de carga.
Descarga inferior.
Conexión rápida API 1004.
Conexión break away.
Detector de tierra.
Bomba centrifuga potencia 25 HP.

**- Llenadera 1310/1320**

Medidor de flujo másico tipo coriolis con transmisor multivariable.
Filtro tipo canasta malla 40.
Válvula digital de dos pasos.
Unidad de control local.
Brazo de carga.
Carga inferior.

Conexión rápida API 1004.
Conexión break away.
Detector de tierra.
Detector de sobrellenado.
Sistema de medición.

**- Banco de pruebas PM 1400**

Medidor de flujo masico tipo coriolis con transmisor multivariable.
Filtro tipo canasta malla 40.
Computador de flujo.

**- Bomba centrífuga vertical in line P-1721 / P-1722 / P-1723**

Modelo SPI 6x6x12.
Flujo: 900 GPM, 100 HP.

**- Filtro separador coalescedor FSC-1701 / FSC-1702**

Flujo: 600 GPM.

**- Filtro separador coalescedor FSC-1721 / FSC-1722 / FSC-1723**

Flujo: 900 GPM.

**- Filtro Micrónico FM-1701 / FM-1702**

Flujo: 600 GPM.

**- Sistema pararrayos**

Punta pararrayo con mástil.
Conector de Ojo de Bronce.
Conector de varilla.
Registro para electrodo.
Herraje adaptador de mástil.
Cable de cobre.

**- Equipo de bombeo y sistema contra incendios**

1 tanque vertical de 2 millones de litros.
2 bombas con capacidad de bombear 2,000 GPM (1 eléctrica y 1 combustión interna).
Válvula de tipo check ranurada de 6".
Válvula bridada tipo angular eliminadora de presión para motor de combustión interna.
Cono de inspección bridado acoplado a válvula eliminadora de presión.
Medidor de flujo ranurado de 6".
Tablero de control de bomba de combustión interna Diesel.
Tablero de control de bomba eléctrica.

Tablero de control para bomba tipo jockey.
Base de concreto para soportaría equipo de bombeo.
Válvula mariposa ranurada de 6".
Codo de 90° ranurado de 6" direccionado a descarga a sistema.
Tubo acero al carbón de 4" cedula 10.
Bomba tipo jockey de 1.5 HP.
Tubo de 1 ¼" acero al carbón cedula 40 para alimentación de bomba tipo jockey.
Motor eléctrico de 60 HP.
Bomba tipo lineal de carcasa bipartida a motor eléctrico de 2,083 GPM presión 124 psi, 1,750 RPM.
Succión de cisterna.
Descarga a sistema.
Válvula tipo vástago saliente bridada de 8".
Tanque de almacenamiento diesel.
Placa de succión de 1/4"x60x60 cm.
Placa anti bortex de 1/4"x60x60 cm.
9 cámaras de espuma modelo FP-4.0 capacidad 180-625 GPM (3 para cada tanque vertical de almacenamiento de turbosina Jet-A).
Tanque tipo vejiga de 1,000 gal.
Tanque tipo vejiga de 800 gal.
Tanque tipo vejiga de 400 gal.
6 hidrantes - monitor cuello de cisne de 4" y dos tomas para manguera de 1 ½".
6 monitores cuello de cisne de 4".
Tubería de acero al carbón cédula 40 de diámetros 6" y 8".
Monitores de descarga.
Boquillas monitoras y boquillas de mangueras.
9 cámaras de espuma tipo II.

Tanto los tanques de almacenamiento de turbosina como el sistema de abastecimiento de hidrantes de combustible deberán contar con un sistema de instrumentación y control, el cual deberá contener lo siguiente:
Las operaciones de transferencia de custodia consisten en medir y reportar la cantidad de combustible que se mueve hacia los tanques de almacenamiento y fuera del almacenamiento, recibos de auto tanques de combustible, el combustible que se carga en los reabastecedores y el combustible que se carga en las aeronaves. Las emisiones de combustible y los recibos de recepción de combustible deben ser iguales en una situación ideal.

Para las recepciones de combustible se deben hacer pruebas de agua, tierra (prueba de miliporos), densidad, claridad y color para asegurar que el combustible sea turbosina y que esté en condiciones aceptables. Estas pruebas se deben realizar utilizando equipo en el área de recepción.
Para las emisiones de combustible, cada vehículo de combustible estará equipado con medidores que tengan impresión de boletas y/o transmisores para reportar la cantidad de combustible entregada a la sala de control.

**- Hojas de seguridad.**

Es importante destacar que, en México, los aeropuertos utilizan dos tipos de combustible:

- El gas avión, que se utiliza en aviones con motores del ciclo Otto, esto es, motores con ignición por chispa eléctrica (*spark-ignition engine*) y especificaciones más estrictas.

- La turbosina, que se utiliza como combustible para motores de avión de turbina.

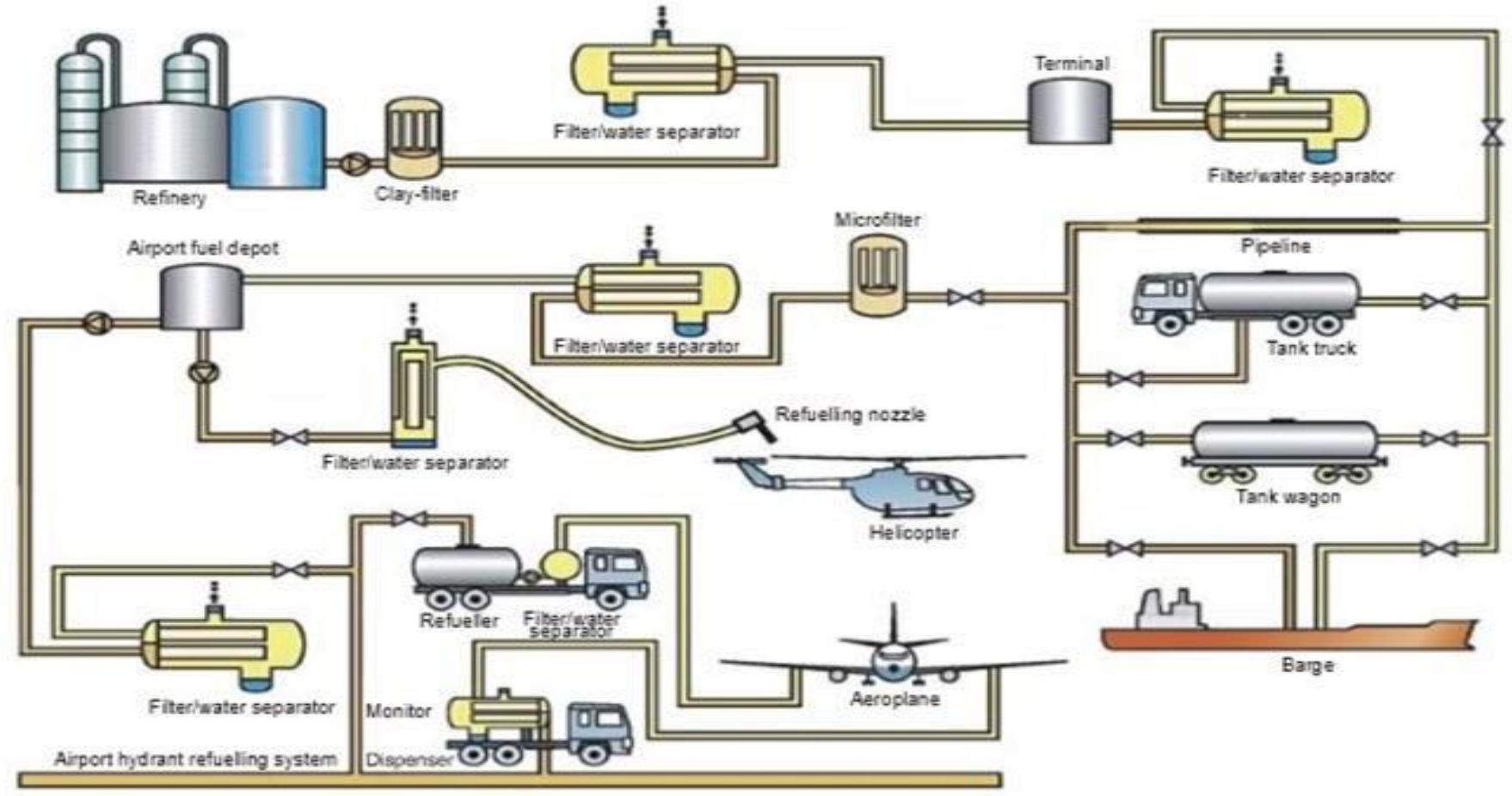
El Gasavion o gasolina de aviación es un petrolífero en fase líquida con un octanaje mínimo de 130, alta volatilidad y un bajo punto de congelación. Es el equivalente a la nafta de los transportes aéreos, ya que está pensado para motores de ignición con chispa eléctrica o bujías. Se usa en aviones de hélice con motores de pistón.
La turbosina es el combustible más utilizado en la aviación. Es un tipo de queroseno proveniente del destilado intermedio del petróleo, que es usado para el buen funcionamiento de las turbinas de aviones, jets y helicópteros. Su octanaje es mucho mayor que el de la gasolina, ya que está compuesto por hidrocarburos de diez a doce átomos de carbono. Por su potencia, puede usarse para cohetes y algunos motores diésel.
Ya que los motores de medios de transporte aéreos son más delicados que los de transporte terrestre, resulta indispensable que la turbosina sea mezclada con diversas sustancias. Entre las funciones de los aditivos están la de reducir la corrosión y oxidación de las piezas del motor, así como evitar el congelamiento de turbosina en los estanques o líneas de combustible.
Por la cantidad de sustancia que se pretende manejar en el Aeropuerto Internacional de Tulum, el análisis descriptivo y de riesgos se centrará en el manejo de la turbosina.
Cabe hacer mención que, como se ha manifestado anteriormente, la información proporcionada por SEDENA se encuentra en nivel de anteproyecto al momento de realizar el presente estudio, por lo que aún no se cuenta con el listado general de todas las sustancias que se emplearán en los procesos asociados al proyecto.

## *V.1 Lineamientos para el manejo de combustible en el AIT.*

Los lineamientos dados están basados en las recomendaciones emitidas por la OACI (ICAO por sus siglas en inglés, *International Civil Asociation Organisation*), y su manual de operaciones para el transporte, suministro e instalaciones de combustible para aeronaves.

La OACI es un organismo internacional creado en 1944 por la Organización de las Naciones Unidas, y la cual promueve la seguridad y el desarrollo del transporte global aéreo, bajo las directrices de sustentabilidad, seguridad e higiene industrial. Trabaja en conjunto para realizar los manuales de operaciones con entidades regulatorias, así como la industria privada (Boeing, Airbus, Bombardier) para desarrollar manuales de operación que garanticen la seguridad y el desarrollo eficiente de las operaciones relacionadas con la industria aérea.

***Figura V.3. Cadena de suministro de combustible de aviación.***




***Fuente: IATA IFQP Training Manual.***

En las etapas apropiadas durante la manipulación y el almacenamiento de combustibles de aviación, se requerirán muestras para laboratorio o de un examen visual con el fin de establecer que los productos de combustible cumplen los requisitos de las especificaciones pertinentes, o para detectar la contaminación del combustible o deterioro. Además, se deben aplicar los siguientes aspectos:

a) Equipo de muestreo fabricado de cobre o sus aleaciones no debe utilizarse para el muestreo de los combustibles para motores a reacción (consulte D4306 ASTM para materiales adecuados).

b) El muestreo debería llevarse a cabo por personal instruido, utilizando procedimientos y aparatos correctos, para asegurar que la muestra obtenida es verdaderamente representativa del material del que se ha dibujado.

c) El muestreo debe ser de acuerdo con los últimos requisitos de los siguientes procedimientos u otros estándares aprobados y equivalentes que pueden ser definidaspor los requisitos de las pruebas a realizar en la muestra:

- JIG 1 - Control de calidad de combustible de aviación y estándares operativos paraservicios de abastecimiento de combustible en el plano.
−JIG 2 - Control de calidad de combustible de aviación y estándares operativos paradepósitos de aeropuertos.
−JIG 3 - Control de calidad de combustible de aviación y estándares operativos para instalaciones de suministro y distribución.

La documentación es una parte integral de un sistema de seguridad y calidad robusta. La documentación se utiliza en todo el sistema de suministro y distribución para una variedad de fines, por ejemplo, para certificar la calidad del combustible, confirmar la calidad del combustible después de cheques distribución, llevar un archivo de control de calidad y de mantenimiento a lo largo de la cadena de suministro y demostrar la trazabilidad de combustible

***Normas y estándares para el proyecto del sistema contra incendio.***

Se debe establecer una estrategia de protección contra incendios y de seguridad para edificios dentro del alcance de los sistemas de combustible (almacenamiento, suministro y carga) del AIT.

El área de almacenamiento y los tanques de almacenamiento de combustible deben cumplir con el Código Internacional Contra Incendios, el Código de Líquidos Inflamables y Combustibles (NFPA 30) y la Norma 407 sobre Abastecimiento de Combustible en Aeronaves
Se recomiendan tanques de combustible de pared fija y techo flotante. Los tanques de combustible deben cubrir las distancias de separación. Se requiere ventilación de emergencia para los tanques de combustible y prevención de sobrellenado.
El proyecto, cuenta con un sistema contra incendios para combatir eventos de incendios en el interior de tanques y en sus diques de contención, así como en áreas donde se ubican líneas de proceso, descarga, llenado, bombeo y filtrado de combustible de aviación, dando protección a las instalaciones y al personal técnico-administrativo que en ellas laboran, sus componentes principales son:

1)Almacenamiento de agua-Se cuenta con 1 tanque vertical para almacenamiento de agua con capacidad de 1 millones de litros respectivamente.

2) Sistema de bombeo contra incendios- Para la alimentación de la red contra incendios se utiliza un sistema de bombeo que cuenta con dos bombas de descarga de agua, una principal accionada por motor eléctrico y otra de relevo accionado por motor de combustión interna, cada bomba tiene la capacidad de bombear 2000 GPM, cada motor de las bombas cuenta con un tablero de arranque local. El sistema de bombeo de agua contra incendios es abastecido por medio del tanque de almacenamiento de agua.
3) Red de agua contra incendios- Se cuenta con tubería de acero al carbón cedula 40 de diferentes diámetros (8"), la cual transporta el agua común hasta los Tanques vejiga generadores de espuma mecánica y monitores de descarga.
4) Monitores de descarga- Dispositivo diseñado para descargar agua y/o solución de espuma en un patrón predeterminado de 1000 GPM, fijo o ajustable. Se incluyen boquillas monitoras y boquillas de mangueras.
5) Tanques vejiga generadores de espuma - 2 Tanques vejiga verticales, con capacidades de 400 y 800 galones, fabricación de acuerdo con la Sección VIII División 1 del Código ASME con una presión de trabajo de diseño de 175 psi (12 bar), cuentan con certificación UL y FM
6) Cámaras de espuma - Brindan protección a depósitos de líquidos inflamables con techo cónico. Las cámaras de espuma combinan una cámara de mezclado y un generador de espuma con entrada de aire. Las cámaras de espuma constan del cuerpo, generador de espuma integrado, orificio, deflector, sello de vapores, juntas y accesorios para montaje. El cuerpo de la cámara de espuma está fabricado con acero

Sistema de detección de fuego y gas – Cuenta con sirena de bocina alarma a prueba de explosiones BExS110, beliza xenón estroboscópica a prueba de explosiones D1xB2X15, Pulsador de cierre a prueba de llamas con reinicio de herramienta/punto de llamada momentáneo STExCP8-PTM, detector de llama Spectrex Sharpeye 40/40m Multi IR, detector de gas combustible.

El sistema contra incendios se sustenta en la Normatividad de:

- NOM-002-STPS, Condiciones de Seguridad-Prevención y Protección Contra incendios en los Centros de Trabajo.
- NOM-001-SEDE, Instalaciones Eléctricas (utilización).
- NRF-015-PEMEX, Protección de Áreas y Tanques de Almacenamiento de Productos Inflamables y Combustibles.
- NRF-016-PEMEX, Diseño de Redes Contra-Incendio (Instalaciones Terrestres).
- NFPA 11, Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam.
- NFPA 20, Standard for the Installation of Stationary Pumps for Fire Protection.
- NFPA 15, Standard for Water Spray Systems for Fire Protection.
- NFPA 24, Standard for the Installation of Private Fire Service Mains and Their Service Mains and Their Appurtenance.
- ASTM A-53, Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless.
- ASTM A-216, Standard Specification for Steel Castings, Carbon, Suitable for Fusion Welding, for High-Temperature Service.
- ASTM A-23, Specification for Forged and Rolled, or Rolled Solid Carbon-Steel Wheels for Engine-Truck, Tender, and Passenger Service
- ASTM A-105, Standard Specification for Carbon Steel Forgings for Piping Applications.

***Pruebas de verificación.***

Al sistema de manejo de turbosina, y principalmente a los tanques de almacenamiento previo a su entrada en operación, se deberá realizar una inspección final para su autorización por parte de un inspector certificado en la Norma API 653 (*Tank inspection, repair, alteration and reconstruction*).

En las pruebas de verificación se toman en cuenta todos los aspectos claves de la instalación de los equipos, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante y corresponden a las especificaciones aprobadas en el diseño. Una calificación de instalación incluye los siguientes aspectos:

- Verificación de cumplimiento de especificaciones.
- Verificación de las condiciones de instalación.
- Verificación de la correcta instalación.
- Historial del equipo.
- Información del fabricante.
- Especificaciones de diseño del equipo.
- Información de la orden de compra.
- Especificaciones del equipo en planta.
- Información de mantenimiento.
- Lista de insumos que utiliza el equipo o para su mantenimiento.
- Especificaciones de sistema de apoyo crítico.
- Características de los sistemas de control y monitoreo.
- Calibración.
- Mantenimiento preventivo.
- Listado de repuestos.
- Descripción del equipo auxiliar.
- Planos de instalación.
- Calibración de instrumentos.
- Desarrollo de la documentación involucrada.
- Descripción del equipo y su capacidad de trabajo.

***Pruebas de integridad mecánica.***

Son todos los esfuerzos enfocados en asegurar que la integridad de los sistemas que contengan fluidos peligrosos y/o de proceso sea mantenida durante la vida útil de los equipos, desde la fase de diseño, fabricación, instalación, construcción, operación y mantenimiento, para garantizar la protección al personal, comunidad, medio ambiente e instalaciones.

A continuación, se presenta la descripción de pruebas e inspecciones que se realizarán durante la instalación de equipo y operación de los tanques de almacenamiento de turbosina y el sistema de distribución de hidrantes:

1. Pruebas No Destructivas (PND).

Las pruebas no destructivas son técnicas de inspección que se utilizan para la detección y evaluación de las posibles discontinuidades que puedan existir tanto en la superficie como en el interior de los materiales metálicos (placa rolada, material forjado, piezas de fundición, soldadura, etc.) que se emplean para la fabricación de recipientes sujetos a presión, tanques atmosféricos, válvulas, árboles, cabezales, tubería, etc.; porque al aplicarlas, los materiales nose destruyen ni se ven afectadas sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y/o características dimensionales.

Las principales aplicaciones de las pruebas no destructivas se encuentran en:

- Detección de discontinuidades (internas y superficiales).
- Determinación de composición química.
- Detección de fugas.
- Medición de espesores y monitoreo de corrosión.
- Adherencia entre materiales.
- Inspección de uniones soldadas.

Las pruebas no destructivas son sumamente importantes en el continuo desarrollo industrial. Gracias a ellas es posible, por ejemplo, determinar la presencia de defectos en los materiales o en las soldaduras de equipos tales como recipientes a presión, en los cuales una falla catastrófica puede representar grandes pérdidas en dinero, vida humana y daño al medio ambiente
Las principales pruebas no destructivas se muestran a continuación:

- Inspección Visual.
- Pruebas Hidrostáticas.
- Líquidos Penetrantes.
- Pruebas Magnéticas, principalmente Partículas Magnéticas.
- Ultrasonido.
- Pruebas Radiográficas.
- Pruebas Electromagnéticas, principalmente Corrientes Eddy.
- Pruebas de Fuga.
- Emisión Acústica.
- Pruebas Infrarrojas

2. Pruebas Hidrostáticas.

Es la prueba que se realiza a tuberías y equipos para verificar su hermeticidad, confirmar su integridad mecánica y avalar que estén en óptimas condiciones de operación. Este tipo de pruebas son utilizadas en cambiadores de calor, calentadores, recipientes sujetos a presión, calderas y tuberías, y deberán cumplir con la norma NOM-020-STPS-2002, Recipientes sujetos a presión y calderas-Funcionamiento-Condiciones de seguridad.

La Dirección General de Exploración y Explotación de Hidrocarburos, dependiente de la Secretaría de Energía, es la dependencia encargada de otorgar, previo estudio y dictamen de la solicitud de autorización correspondiente, los permisos de construcción, operación y

desmantelamiento de obras tales como plataformas, pozos, ductos marinos y terrestres, monoboyas, estaciones de compresión y bombeo, complejos, baterías de separación, tanques y plantas de almacenamiento, entre otros. Para el caso de los ductos de turbosina, se requieren gestionar los trámites para obtener los permisos de construcción, realización de pruebas hidrostáticas y permisos de operación.

A la tubería para transporte de hidrocarburos, ya sea nueva, reparada o en condiciones diferentes a las de diseño, se le debe probar hidrostáticamente en fábrica y antes de entrar en operación. Esta actividad consistirá en llenar el equipo con agua y someterlo a alta presión para identificar fugas o pérdidas de presión. Las pruebas hidrostáticas se realizan con la finalidad de probar la presión de diseño del ducto antes de iniciar la operación de este, con el objetivo de identificar posibles fallas de materiales o de uniones soldadas.

El buen funcionamiento de las bombas, compresores y equipos de generación eléctrica será comprobado.

La estación de bombeo y áreas de prueba deberán estar suficientemente iluminadas, cuando se tengan trabajos de noche.

Antes del inicio de las pruebas, la eficacia y la conveniencia y la presión máxima de trabajo de las partes que constituyen los cabezales de prueba, serán verificadas.

Los cabezales de prueba, las válvulas, los tanques, y demás tuberías en la estación de bombeoy prueba, etc., serán instalados de tal manera que no constituyan un peligro para el personal que opera. La comunicación entre todos los puntos de trabajo será asegurada.

Antes de proceder con las operaciones, las tuberías y/o mangueras serán revisadas para asegurar su integridad y correcto funcionamiento, además deberán estar correctamente ancladas en posición estable y segura.

La apertura de válvulas se hará de manera lenta y cuidadosa. El operador estará siempre a un costado de la válvula nunca arriba o en frente. Las válvulas se accionarán muy lentamente al inicio.

El agua de descarga será encausada mediante el uso apropiado y anclado de tubería metálica o manguera, de tal manera que evite daños a personas y/o equipos y al medio ambiente.

Durante el llenado, deben asegurarse las tuberías y mangueras de llenado de manera apropiada, para evitar daños (abrasión por rozamiento, superficies agudas, etc.).

Las estaciones de prueba, las áreas donde se realizan las operaciones de prueba, la tubería yel equipo usado en la prueba serán delimitadas con la advertencia apropiada y se proporcionarán letreros de prohibición de acceso.

El área cerca a los cabezales de prueba deberá estar señalizada de manera apropiada de tal manera que se impida el acceso a particulares y a personal ajeno a la prueba hidrostática.

La caseta de prueba será ubicada a por lo menos 15 m del cabezal de prueba.

Solo el personal autorizado podrá transitar en las áreas de cabezales e instalaciones de

bombeo y cabina de instrumentos.

Todo personal involucrado en la prueba debe permanecer a una distancia prudente del cabezal de prueba, de la bomba de llenado o de la bomba de presión.

Todo el personal asignado será equipado con el medio de comunicación entre los diferentes puntos de trabajo.

3. Líquidos Penetrantes (LP).

El método o prueba de líquidos penetrantes se basa en el principio físico de la capilaridad y consiste en la aplicación de un líquido, con buenas características de penetración en pequeñas aberturas, sobre la superficie limpia del material a inspeccionar. Una vez que ha transcurrido un tiempo suficiente para que el líquido penetrante recién aplicado penetre considerablemente en cualquier abertura superficial, se realiza una remoción o limpieza del exceso de líquido penetrante mediante el uso de algún material absorbente (papel, trapo, etc.), y a continuación se aplica un líquido absorbente, comúnmente llamado revelador, de color diferente al líquido penetrante, el cual absorberá el líquido que haya penetrado en las aberturas superficiales.

Por consiguiente, las áreas en las que se observe la presencia de líquido penetrante después de la aplicación del líquido absorbente son áreas que contienen discontinuidades superficiales (grietas, perforaciones, etc.).

Cada una de las técnicas existentes del método de líquidos penetrantes tiene sus ventajas, desventajas y sensibilidad asociada. En general, la elección de la técnica a utilizar dependerá del material en cuestión, el tipo de discontinuidades a detectar y el costo. A continuación, se muestran las técnicas de aplicación de los líquidos penetrantes:

- Líquidos visibles.
  - Lavables con agua.
  - Lavables con solvente.
  - Posemulsificables.

- Líquidos fluorescentes.
  - Lavables con agua.
  - Lavables con solvente.
  - Posemulsificables.

4. Pruebas Magnéticas.

Este método de prueba no destructiva se basa en el principio físico de magnetismo, el cual exhibe principalmente los materiales ferrosos como el acero, y consiste en la capacidad o poder de atracción entre metales. Cuando un metal es magnético, atrae en sus extremos o polos a otros metales igualmente magnéticos o con capacidad para magnetizarse.
Estas dos principales técnicas son comúnmente conocidas como: líquidos penetrantes visibles y líquidos penetrantes fluorescentes. Cada una de estas pueden, a su vez, ser divididas en tres subtécnicas: aquellas en las que se utiliza líquidos removibles con agua, aquellas en las que se utiliza líquidos removibles con solvente y aquellas en las que se utilizan líquidos posemulsificables.

5. Ultrasonido.

El método de ultrasonido se basa en la generación, propagación y detección de ondas elásticas (sonido) a través de los materiales. Se utiliza un sensor o transductor, que contiene un elemento piezoeléctrico cuya función es convertir pulsos eléctricos en pequeños movimientos o vibraciones, las cuales a su vez generan sonido con una frecuencia en el rango de los megahertz (inaudible al oído humano). El sonido o las vibraciones, en forma de ondas elásticas, se propagan a través del material hasta que pierde por completo su intensidad o hasta que topa con una interfase, es decir, algún otro material tal como el aire o el agua y, como consecuencia, las ondas pueden sufrir reflexión, refracción, distorsión, etc., lo cual puede traducirse en un cambio de intensidad, dirección y ángulo de propagación de las ondas originales.

De esta manera, es posible aplicar el método de ultrasonido para determinar ciertas características de los materiales tales como:

- Velocidad de propagación de ondas.
- Tamaño de grano en metales.
- Presencia de discontinuidades (grietas, poros, laminaciones, etc.).
- Adhesión entre materiales.
- Inspección de soldaduras.
- Medición de espesores de pared.

Como puede observarse, con el método de ultrasonido es posible obtener una evaluación de la condición interna del material en cuestión. Sin embargo, el método de ultrasonido es más complejo en la práctica y en teoría, lo cual demanda personal calificado para su aplicación e interpretación de indicaciones o resultados de prueba.

6. Radiografía.

Comúnmente, una forma de determinar la radiación que pasa a través de un material consiste en colocar una película radiográfica, cuya función es cambiar de tonalidad en el área que recibe radiación. En la parte de arriba se encuentra una fuente radiactiva, la cual emite radiación a un material metálico, el cual a su vez presenta internamente una serie de poros, los cuales, por contener aire o algún otro tipo de gas, dejan pasar más cantidad de radiación que en cualquier otra parte del material. El resultado queda plasmado en la película radiográfica situada en la parte inferior del material metálico. Como puede observarse, el método de radiografía es sumamente importante, ya que nos permite obtener una visión de la condición interna de los materiales.

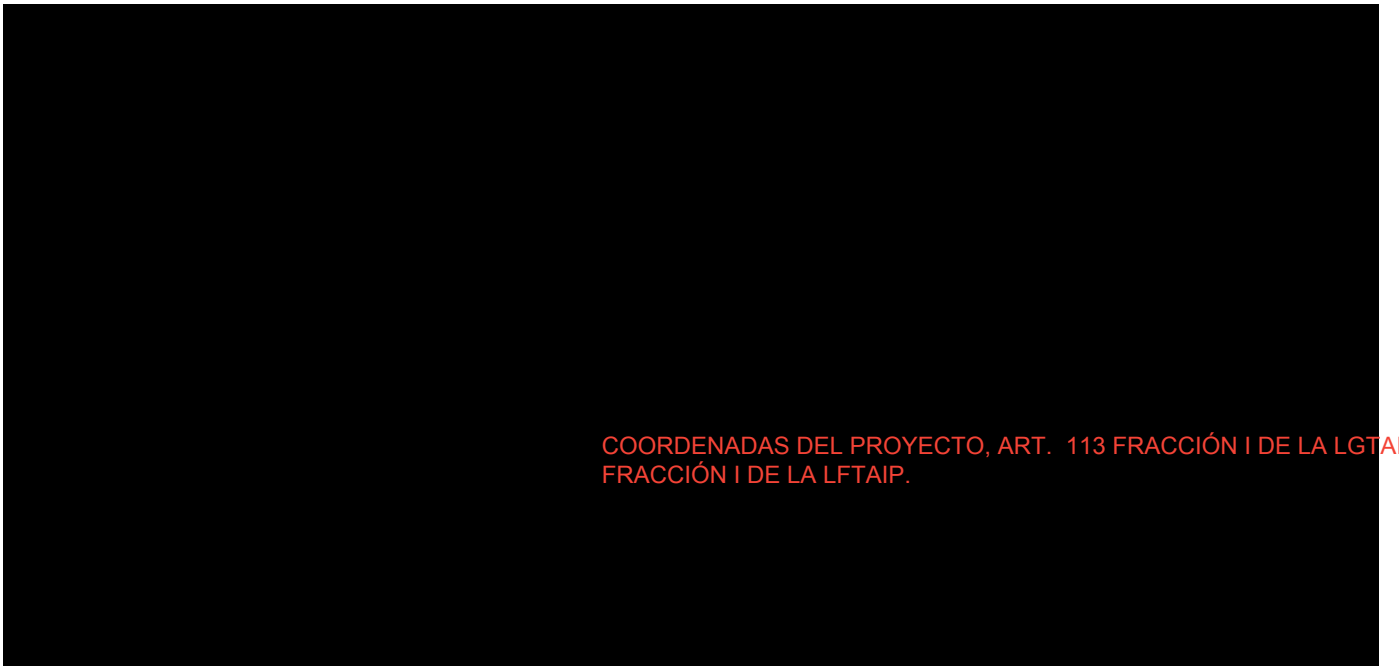
7. Pruebas Electromagnéticas.

Las pruebas electromagnéticas se basan en la medición o caracterización de uno o más campos magnéticos generados eléctricamente e inducidos en el material de prueba. Distintas condiciones, tales como discontinuidades o diferencias en conductividad eléctrica, pueden ser las causantes de la distorsión o modificación del campo magnético inducido.
Este tipo de pruebas ofrecen la ventaja de que los resultados de prueba se obtienen casi en forma instantánea; además, dado que lo único que se requiere es inducir un campo magnético, no hay necesidad de tener contacto directo con el material de prueba; con esto se minimiza la

posibilidad de causar algún daño al material de prueba. Sin embargo, la técnica está limitada a la detección de discontinuidades superficiales y a materiales conductores.

## VI. DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO.

El entorno inmediato donde se ubica el SA, el Aeropuerto Internacional de Tulum (AIT) se muestra en la Figura VI.1.




***Fuente: SEDENA***

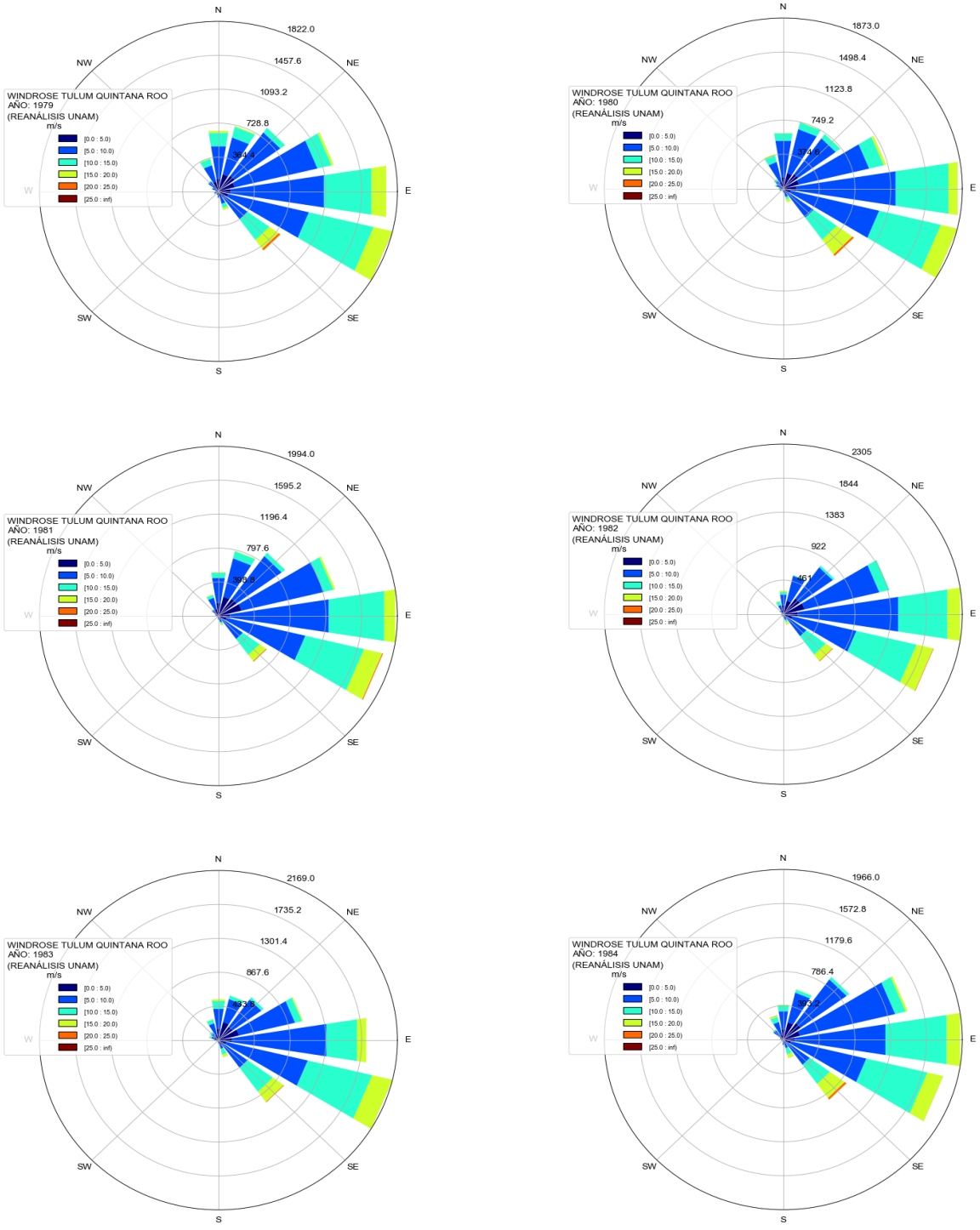
- Clima.

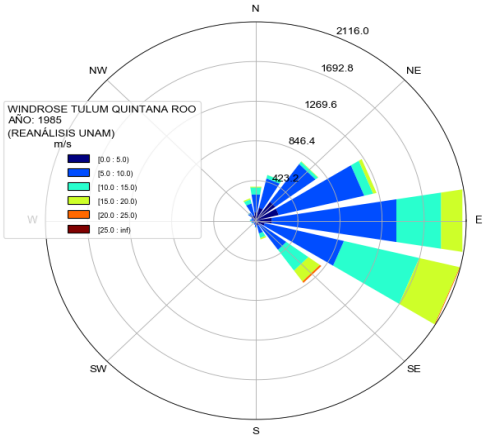
El tipo de clima que predomina en el SA es cálido intermedio subhúmedo [Aw1(x')], con régimen de lluvias de verano y un porcentaje de lluvia mayor de 6 meses, con oscilación térmica de 3.7°C; además, con temperatura media anual mayor a los 22°C, y con temperatura del mes más frío mayor a los 18°C y con lluvias de 60 mm del mes más seco.

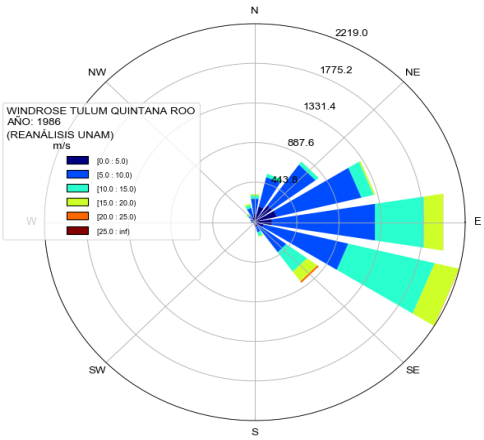
- Vientos.

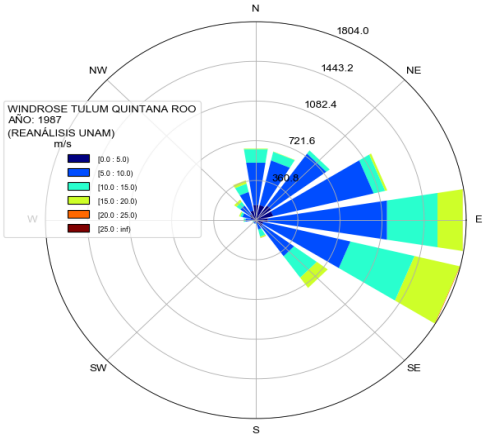
De acuerdo con los datos registrados para el periodo de 1979 a 2018, se observa que los vientos dominantes son en dirección este-sureste (E-SE), con velocidades de 0 a 20 m/s, y lasegunda dirección del viento predominante corresponde a los vientos del este, tal como se muestran en la Figura VI.2, con velocidades semejantes a la primera dirección dominante.

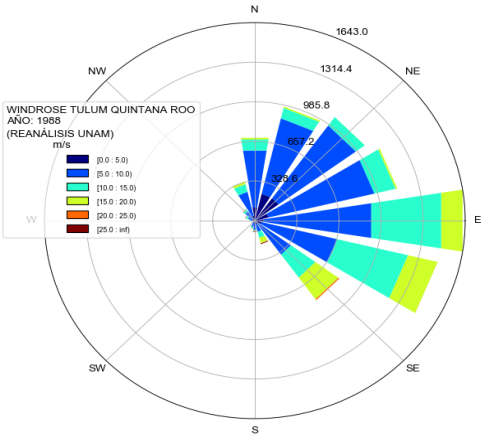
***Figura VI.2 Rosas de vientos media anual (NARR) y rosa de vientos anual (WRF) en la Estación Tulum, periodo 1979 - 2018.***

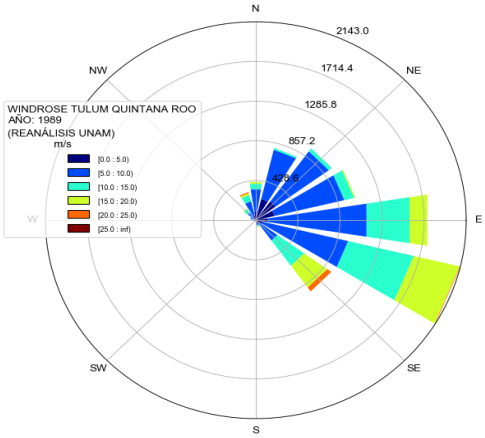


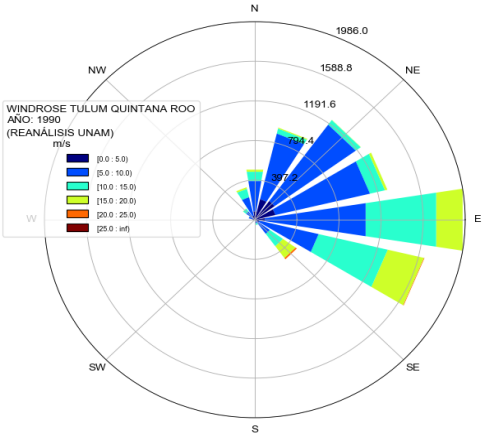

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1985
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2116.0
1692.8
1269.6
846.4
423.2

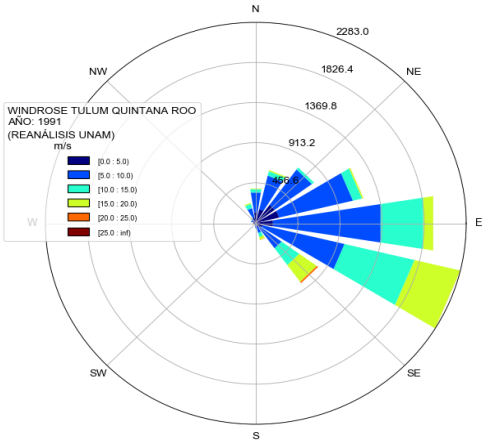

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1986
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2219.0
1775.2
1331.4
887.6
443.8

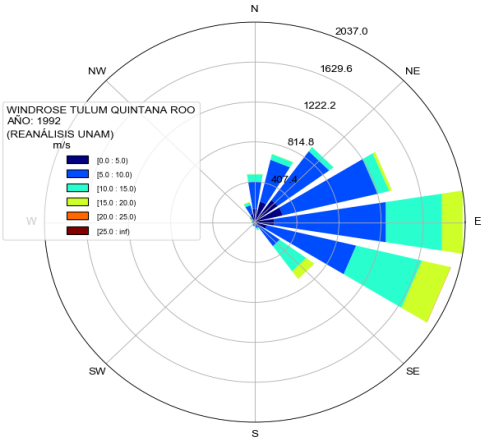

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1987
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
1804.0
1443.2
1082.4
721.6
360.8

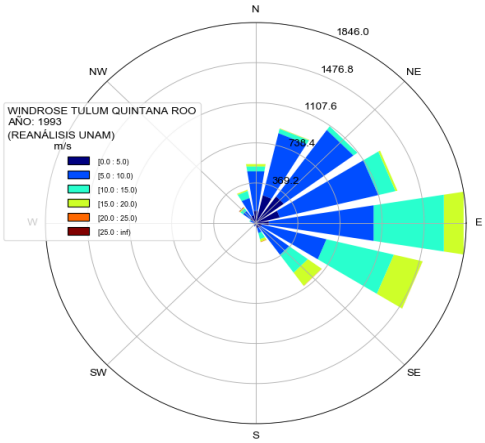

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1988
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
1643.0
1314.4
985.8
657.2
328.6

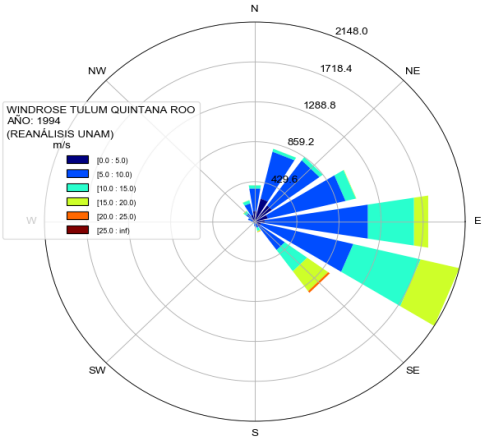

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1989
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2143.0
1714.4
1285.8
857.2
428.6

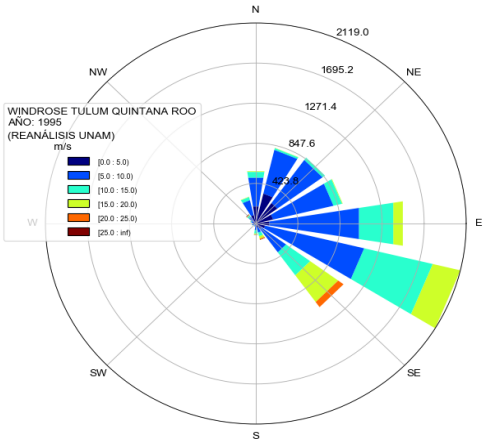

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1990
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
1986.0
1588.8
1191.6
794.4
397.2

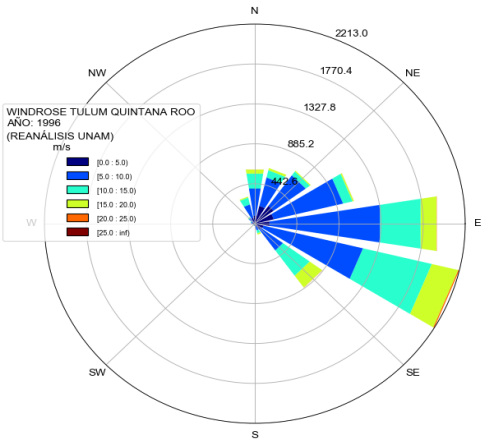

N
NW
NE
W
E
SW
SE
S
2283.0
1826.4
1369.8
913.2
456.6
WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1991
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)

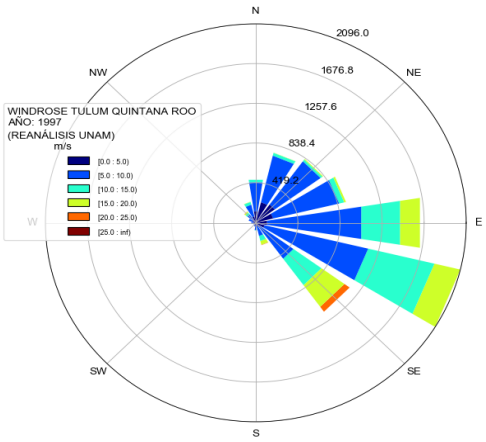

N
NW
NE
W
E
SW
SE
S
2037.0
1629.6
1222.2
814.8
407.4
WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1992
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)

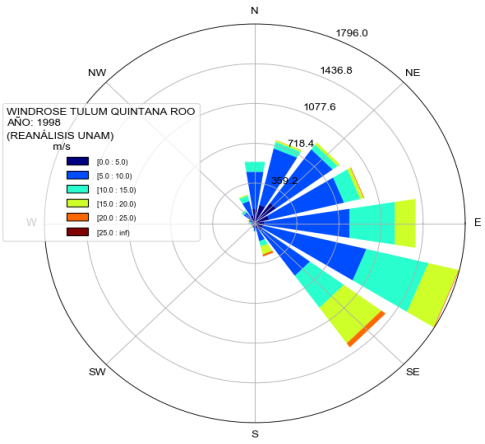

N
NW
NE
W
E
SW
SE
S
1846.0
1476.8
1107.6
738.4
369.2
WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1993
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)

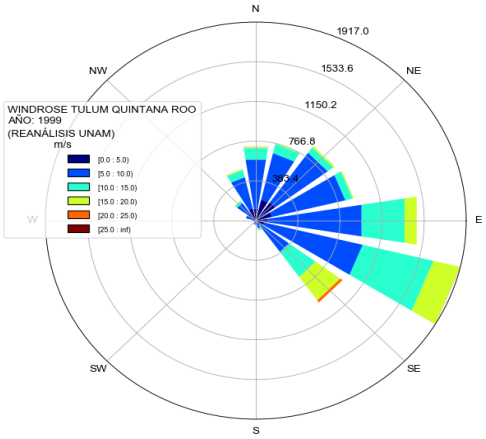

N
NW
NE
W
E
SW
SE
S
2148.0
1718.4
1288.8
859.2
429.6
WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1994
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)

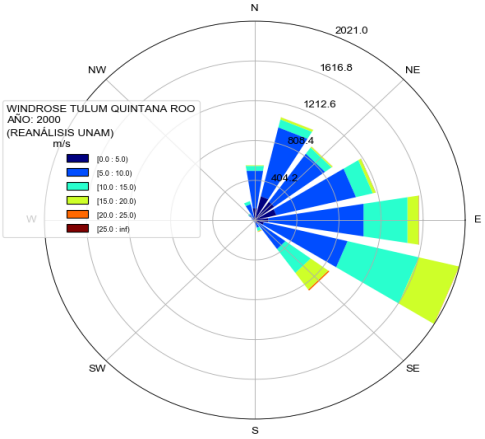

N
NW
NE
W
E
SW
SE
S
2119.0
1695.2
1271.4
847.6
423.8
WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1995
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)

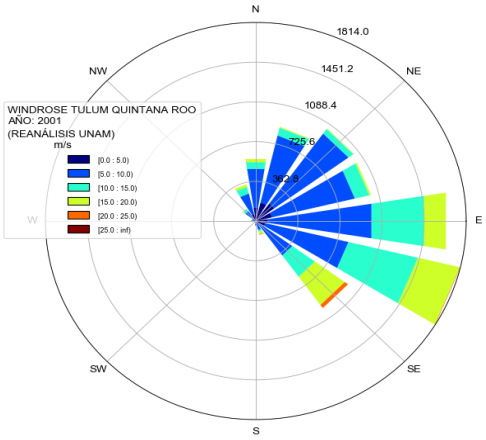

N
NW
NE
W
E
SW
SE
S
2213.0
1770.4
1327.8
885.2
442.6
WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1996
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)

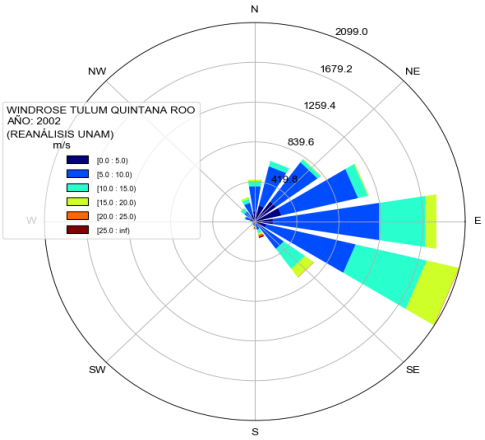

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1997
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2096.0
1676.8
1257.6
838.4
419.2

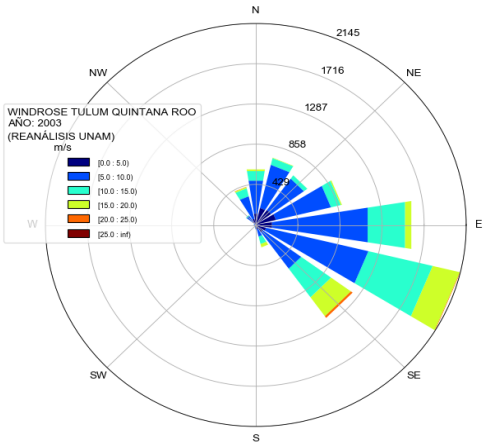

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1998
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
1796.0
1436.8
1077.6
718.4
359.2

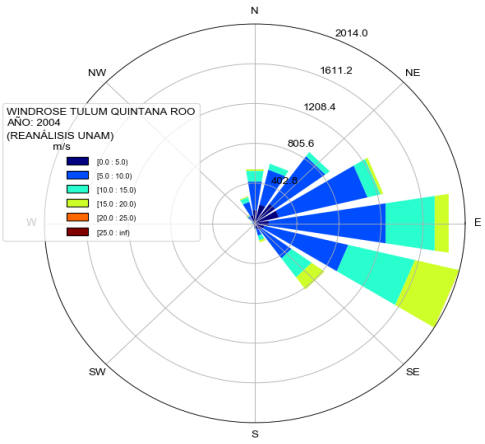

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 1999
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
1917.0
1533.6
1150.2
766.8
383.4

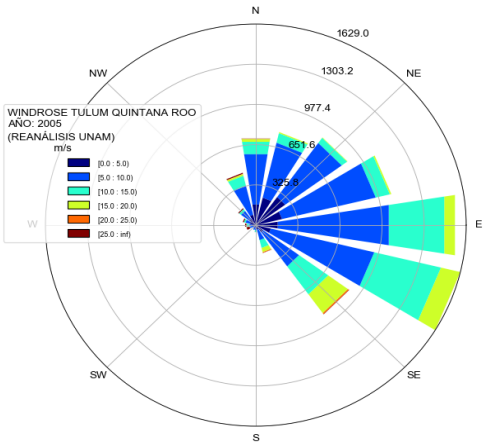

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2000
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2021.0
1616.8
1212.6
808.4
404.2

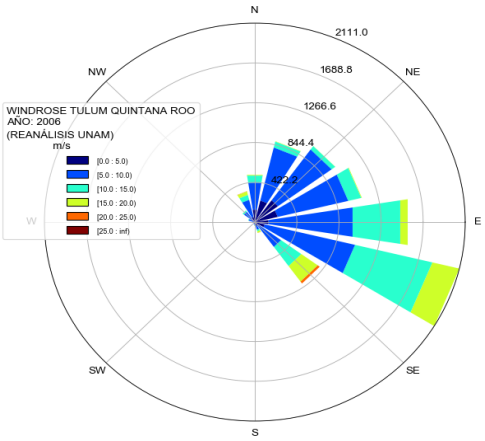

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2001
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
1814.0
1451.2
1088.4
725.6
362.8

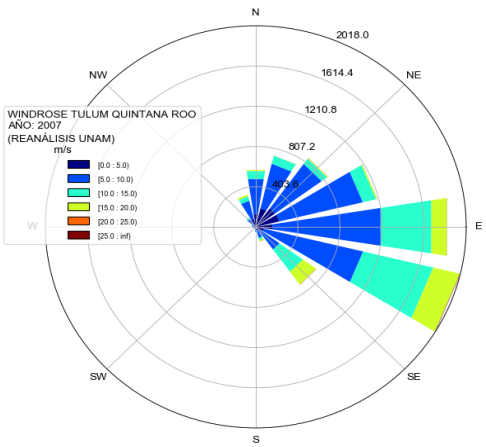

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2002
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2099.0
1679.2
1259.4
839.6
419.8

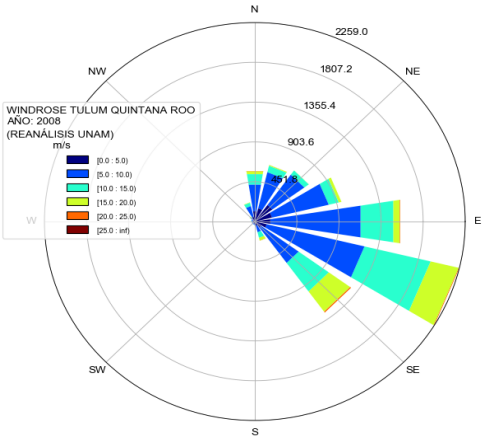

N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2145
1716
1287
858
429
WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2003
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)

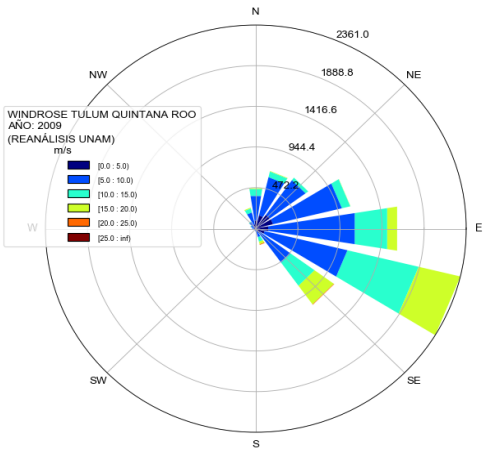

N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2014.0
1611.2
1208.4
805.6
402.8
WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2004
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)

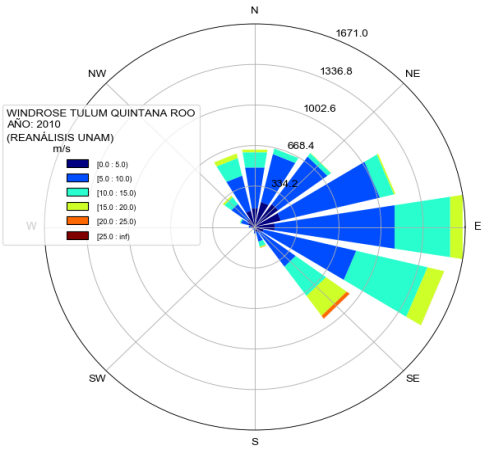

N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
1629.0
1303.2
977.4
651.6
325.8
WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2005
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)

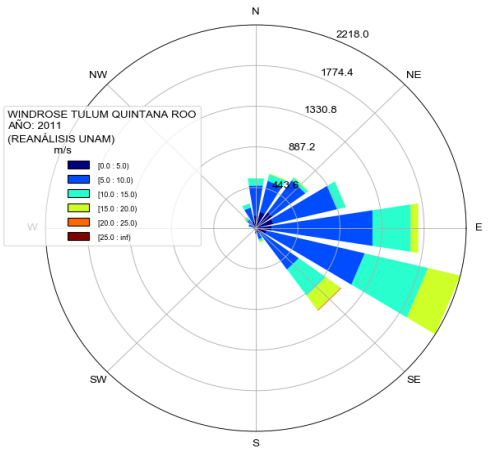

N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2111.0
1688.8
1266.6
844.4
422.2
WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2006
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)

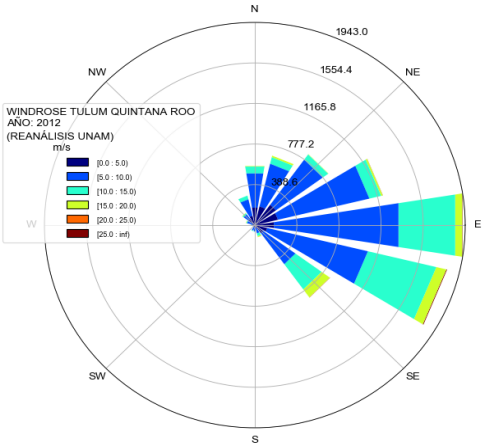

N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2018.0
1614.4
1210.8
807.2
403.6
WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2007
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)

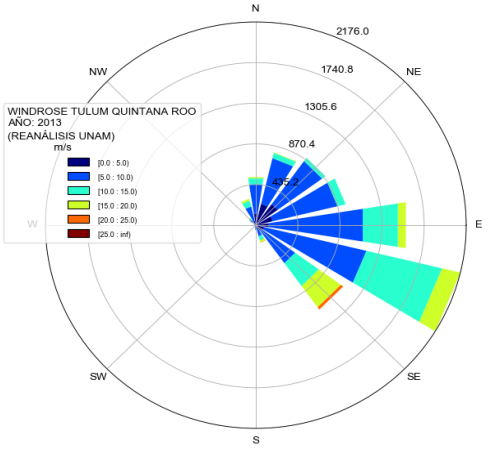

N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2259.0
1807.2
1355.4
903.6
451.8
WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2008
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)

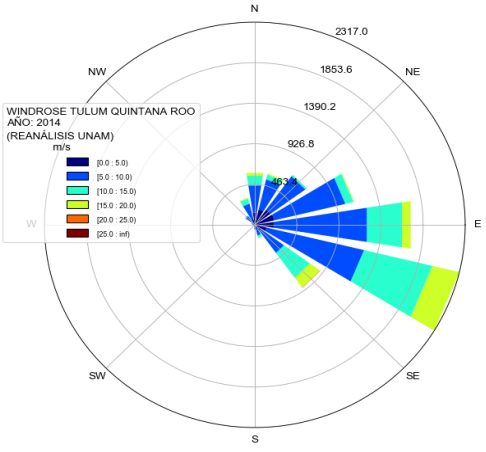

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2009
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2361.0
1888.8
1416.6
944.4
472.2

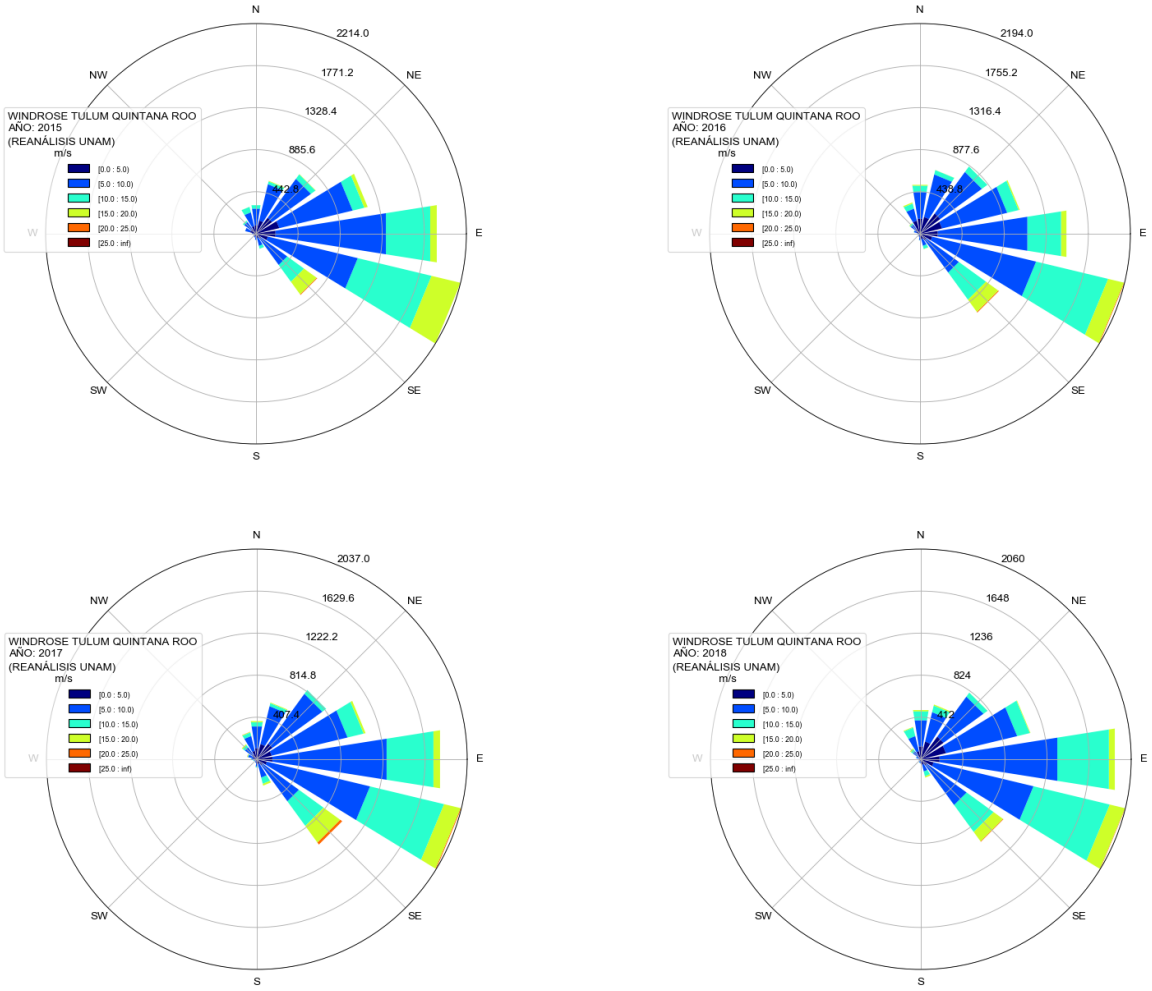

WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2010
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
1671.0
1336.8
1002.6
668.4
334.2


WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2011
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2218.0
1774.4
1330.8
887.2
443.6


WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2012
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
1943.0
1554.4
1165.8
777.2
388.6


WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2013
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2176.0
1740.8
1305.6
870.4
435.2


WINDROSE TULUM QUINTANA ROO
AÑO: 2014
(REANÁLISIS UNAM)
m/s
[0.0 : 5.0)
[5.0 : 10.0)
[10.0 : 15.0)
[15.0 : 20.0)
[20.0 : 25.0)
[25.0 : inf)
N
NE
E
SE
S
SW
W
NW
2317.0
1853.6
1390.2
926.8
463.4




***Fuente: SEDENA, 2022.***

- Geología regional.

El área de estudio está caracterizada por unidades geológicas constituidas casi por completo por carbonatos con alternancias de evaporitas y halogenuros, todos ellos de origen marino cuyas edades fluctúan entre el Paleoceno y el Plioceno. Las formaciones rocosas queconstituyen la Península de Yucatán se caracterizan por ser altamente permeables y solubles, por lo que la superficie forma parte de una plataforma marina emergida sobre la que se han formado numerosas fracturas asociadas a dolinas, cenotes y galerías subterráneas y subacuáticas típicos de un paisaje del tipo kárstico en etapa madura.

El área de estudio se ubica dentro de la Provincia de la Plataforma Yucateca, cuya porción terrestre se extiende a lo largo de más de 300 km de oeste a este y casi 400 km de norte a sur; abarca la totalidad de los estados de Yucatán y Quintana Roo, casi la totalidad del estado de Campeche, así como Belice y el norte de Guatemala. Adicionalmente, tiene un promedio de

altitud de 100 msnm y una altitud máxima de 320 msnm.

El principal rasgo distintivo de la Península de Yucatán es su paisaje tipo kart o carso, en una topografía general casi plana carente de valles y montañas, cuyas altitudes apenas alcanzan 30 msnm, con abundantes depresiones denominadas dolinas y fosos denominados cenotes. La superficie está cubierta de suelos de tipo calcáreos denominados sascab, los cuales son muy inestables ya que estos son ligeramente solubles en agua debido a su composición a base de carbonatos de calcio y magnesio.

En este tipo de suelos, es común que estén sometidos a los procesos erosivos disolutivos quedan origen a la carstificación, o karstificación, la cual consiste en la disolución de los carbonatos que constituye las formaciones calcáreas constituidas por calizas y dolomías, mismos que con el tiempo forman huecos y ductos que crecen paulatinamente dando origen a diversas galerías subterráneas de techos estalactíticos muy atractivos para los espeleólogos.

- Karsticidad en el sitio del proyecto.

Como se menciona previamente, la superficie del área en estudio tiene una forma relativamente plana, pero ondulada y rugosa por efectos de la alta densidad de vegetación. Sin embargo, a microescala y una vez que se han realizado las obras de acceso al sitio de proyecto, se puede observar la presencia de numerosas estructuras kársticas que se han evidenciado al realizar las obras de desmonte de la vegetación y el despalme de la capa edáfica.

Ya dentro de lo que es el polígono donde se desplantarán las obras del proyecto, se aprecian rasgos más pronunciados tales como depresiones (correlacionables con pequeñas dolinas) y alineamientos (fracturas), a través de las cuales se lleva a cabo el proceso de infiltración de aguas pluviales que da lugar al proceso de karstificación.

La litología y estructuras encontradas son indicativas de la vulnerabilidad de las rocas carbonatadas a su descomposición por hidratación favorecida por fracturas, poros y oquedades, que permiten el paso del agua meteórica por infiltración y escurrimiento hacia el interior del macizo rocoso sin restricción alguna; lo que implica que es susceptible a los procesos de karstificación por la disolución de los macizos rocosos carbonatados en agua acidificada, así como por el re-depósito de los mismos, favoreciendo así la formación de suelos calcáreos finos con contenido de óxidos de hierro como la terrarrosa, principalmente en el interior de las depresiones endorreicas.

Para la zona donde se construirá el proyecto se tiene una clasificación de muy baja a baja karsticidad, sin embargo, si se consideran las estructuras que se han evidenciado a lo largo del camino de acceso y de acuerdo con los criterios de Cvijic (1960), se puede inferir que en el sitio de proyecto se encuentra en una segunda etapa evolutiva kárstica, es decir, una etapa madura o juvenil tardía.

- Tomografía Eléctrica Resistiva (TER).

La Tomografía Eléctrica Resistiva (TER) es una técnica geofísica que genera secciones o perfiles del subsuelo con base en las mediciones de caída de potencial eléctrico. Este método consiste en inyectar una corriente al interior del suelo, la cual regresa al voltímetro en forma de una diferencia de potencial (ΔV) producto de las variaciones en resistencias que resultan de cada tipo de material o estrato del suelo. Sabiendo de antemano que cada tipo de material tiene diferente manera de "resistir" o impedir el flujo de una corriente eléctrica, los buenos

conductores presentan una resistencia baja a la inyección de corriente, mientras que materiales aislantes presentan resistencias eléctricas altas. Lo anterior, es relativo a diversos parámetros geológicos como el contenido mineralógico, porosidad y grado de saturación de agua.

Para el sitio de proyecto se realizaron 10 tendidos de Tomografía Eléctrica Resistiva, propiamente en concordancia con el trazo probable de la pista de aterrizaje (Figura VI.3). Loshallazgos más significativos de la prospección de la Tomografía Eléctrica Resistiva son:

- El nivel freático se localiza a 45 m de profundidad.

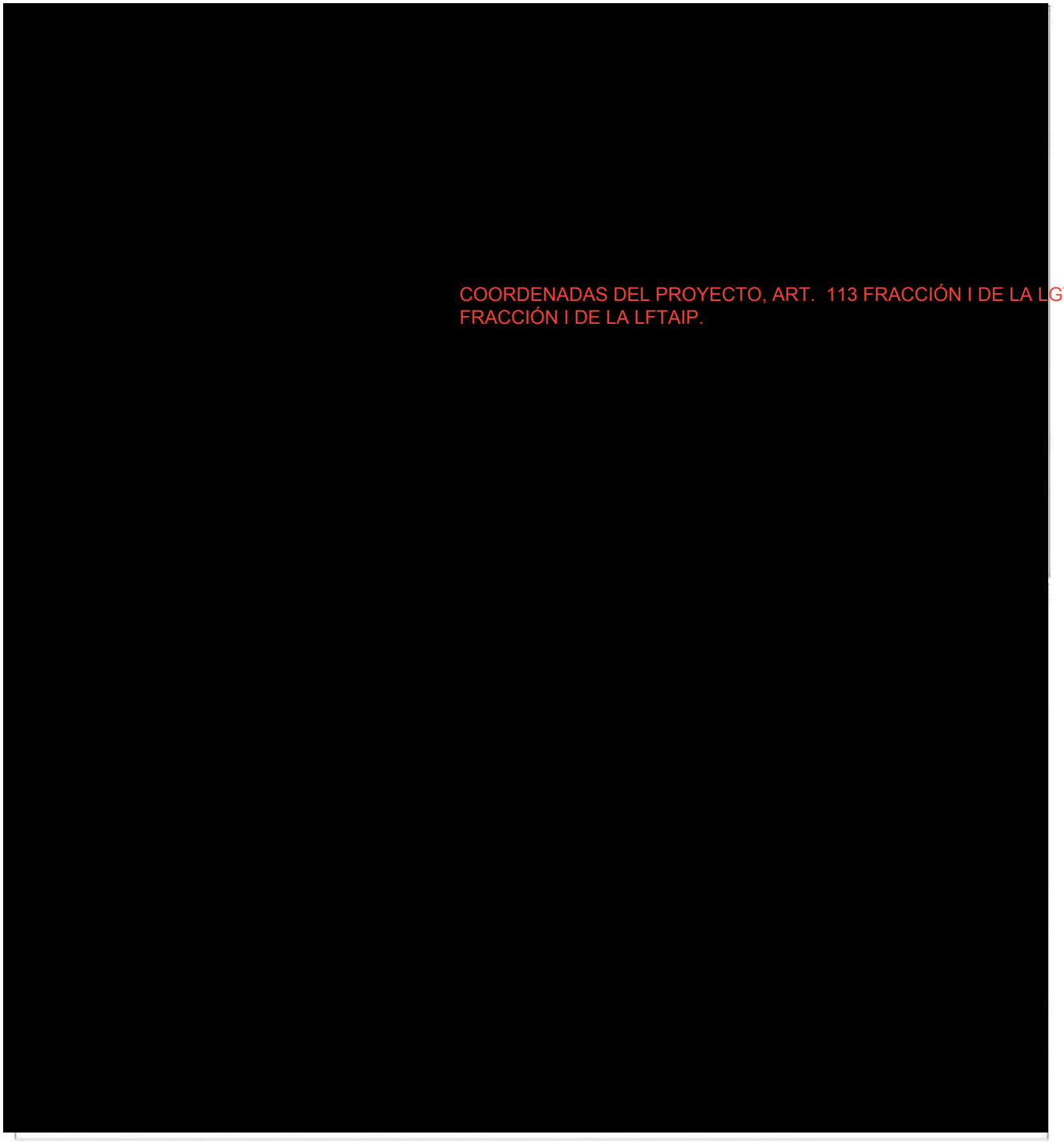
- El acuífero no es continuo a lo largo de los perfiles tomográficos integrados.

- El espesor de la roca caliza superficial o techos de caliza es muy potente con hasta 40 m en promedio, pero con una notable presencia de elementos verticales con registro resistivo extremadamente alto asociado con el efecto dieléctrico del aire, es decir cavernas huecas. Estos elementos, de verificarse que son efectivamente cavernas, son el mayor componente de peligrosidad en la pista de aterrizaje.

- Es imperativo evaluar sísmicamente y por exploración directa estas anomalías con registro eléctrico alto para validar la interpretación en términos de peligro por colapso obien descartar este escenario y concluir que hay condiciones favorables para el emplazamiento de la infraestructura contemplada.

- Se observan también elementos verticales con registro eléctrico bajo observados dentro del cuerpo resistivo interpretado como roca caliza sana, los cuales se interpretan comodesarrollos de caverna u oquedades rellenas con agua o arcillas producto de ladegradación de la caliza por el proceso de disolución. Estos elementos no presentan como tal un componente de peligrosidad por colapso importante, pero deben también ser evaluados sísmicamente y por exploración directa.

***Figura VI.3 Ubicación de las líneas de Tomografía Eléctrica Resistiva ubicadas en el sitio de proyecto***




***Fuente: SEDENA***

***Tabla VI.1 Coordenadas de las líneas de Tomografía Eléctrica Resistiva ubicadas en el sitio de proyecto***

| TER | INICIO | | FIN | |
|---|---|---|---|---|
| | X | Y | X | Y |
| TER 01 | [redacted] | | | |
| TER 02 | | | | |
| TER 03 | | | | |
| TER 04 | | | | |
| TER 05 | | | | |
| TER 06 | | | | |
| TER 07 | | | | |
| TER 08 | | | | |
| TER 09 | | | | |
| TER 10 | | | | |

COORDENADAS DEL PROYECTO, ART. 113 FRACCIÓN I DE LA LGTAIP Y 110 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP.

***Fuente: SEDENA***

## *Onda Compresional (P) por Tomografía Sísmica de Refracción (TRS).*

El método de sísmica de refracción consiste en determinar las propiedades mecánicas del subsuelo mediante la determinación de las velocidades de propagación de la onda compresional, referida como P, por ser el primer arribo en cualquier evento sísmico activo o pasivo. La velocidad sísmica es proporcional a la densidad del medio de propagación y es por consiguiente un método efectivo para inferir las propiedades elásticas o mecánicas del medio continuo. En este método se transmite energía a través de un pulso sísmico al subsuelo por medio de un martillo, fuente propulsada elásticamente o por nitrógeno. Para este estudio se empleó una fuente propulsada elásticamente. Una vez que la energía sísmica ha interactuado con las capas del subsuelo, la señal resultante de la interacción entre la fuente con el medio es medida en la superficie, y una vez procesada es utilizada para inferir propiedades del subsuelo. Los hallazgos más importantes de los estudios sísmicos radican en el hecho de que el campode velocidad es heterogéneo a lo largo de los perfiles, y estas heterogeneidades son coincidentes con las anomalías eléctricas observadas en los tendidos tomográficos procesados. Se tienen velocidades relativamente bajas en superficie son consistentes con unidades resistivas interpretadas como roca caliza porosa en tanto que la parte superficial o somera presenta velocidades poco competentes en los primeros dentro del primer metro de profundidad, las zonas sin cobertura de rayos son coincidentes con anomalías bajas interpretadas como cavernas con rellenos arcillosos. en tanto que, en profundidad.

De acuerdo a los resultados tanto de la Tomografía Eléctrica Resistiva y de Refracción Sísmica, se establece lo siguiente:

- La zona está karstificada en una etapa juvenil con abundante presencia de karren y epikarst poco competente.
- Texturalmente se registra la presencia de Packstone, Grainstone y Boundstone o coquina, la

cual es la más propensa a favorecer el desarrollo de fracturamiento secundario y karsticidad.

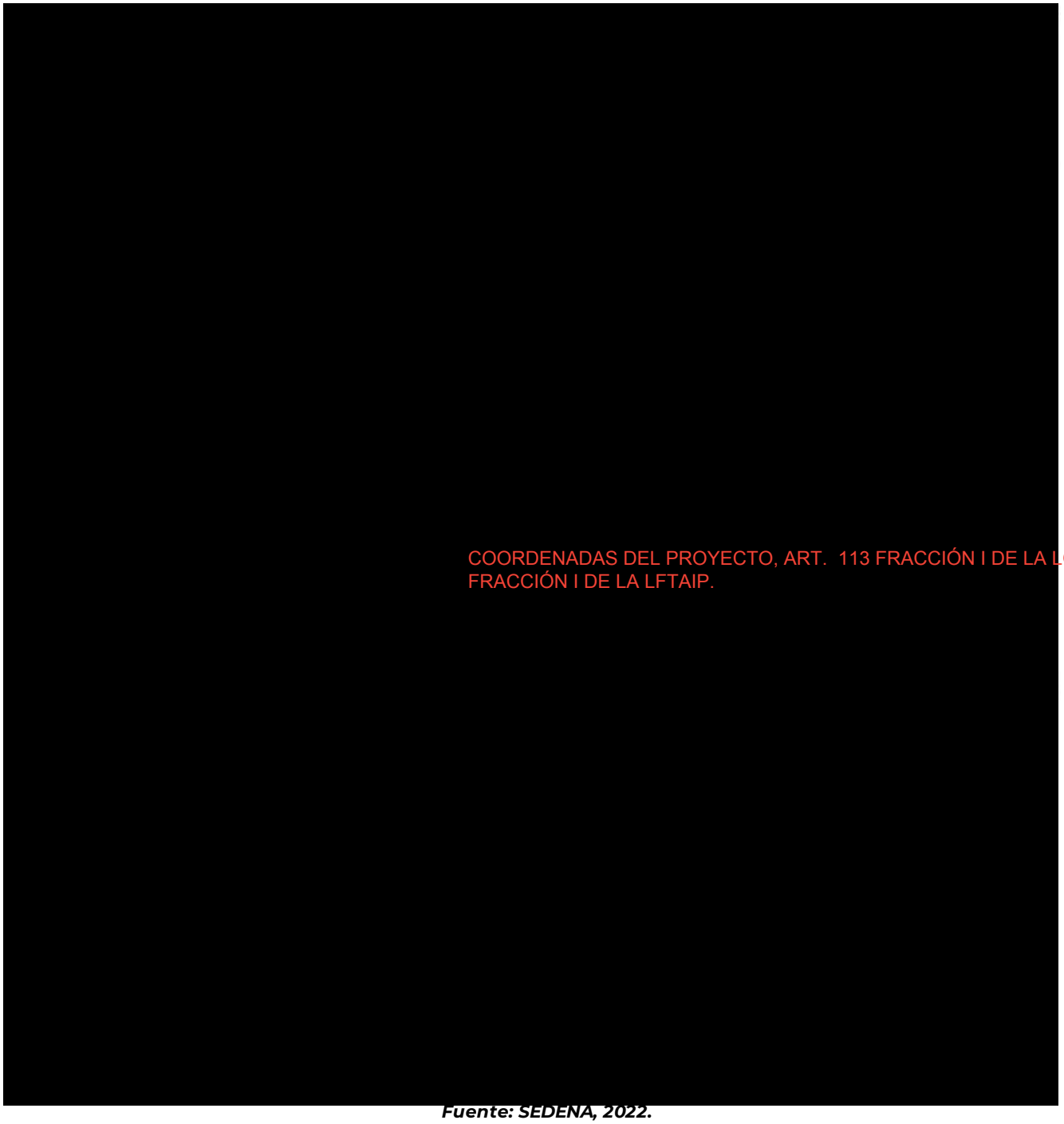
- El espesor de la roca competente es de hasta 30 metros en promedio, el cual sin embargo presenta heterogeneidades laterales en términos estructurales.

- La zonificación de resistividad indica que en la pista de aterrizaje hay una densidad de estructuras proclives al colapso, las cuales sin embargo son muy puntuales y avizoran una solución geotécnica sencilla, dado que no exceden 5 m de longitud, siempre y cuando se valide la calidad de la roca interpretada como caliza porosa.

- El terreno, conforme a sus características, presenta condiciones que implican una calidad de regular a buena, considerando que las unidades de roca porosa son estables para el emplazamiento de infraestructura como parece ratificarlo la sísmica. Es decir, se deben contemplar mayor cantidad de tomografías sísmicas y exploración directa.

- A partir del cruce de información geofísica, topográfica y geológica, se concluye que existen zonas puntuales no mayores a 5 m en promedio, interpretadas como proclives a colapsar.

***Figura VI.4 Ubicación y coordenadas de las líneas de Refracción Sísmica (TER´s) ubicadas en el sitio de proyecto***




***Fuente: SEDENA, 2022.***

**Sismicidad.**

En el mapa de Regionalización Sísmica de la República Mexicana indicada en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), están catalogadas las características y frecuencia de la localidad del sitio del proyecto. En estos términos de sismicidad, el área de estudio se localiza dentro del área de la zona A.

La Zona A es de baja intensidad sísmica y con baja frecuencia. Aunque sí se han generado, sus registros históricos han sido muy pocos focos sísmicos, se caracteriza por una baja probabilidad de ocurrencia de focos sísmicos, donde las aceleraciones horizontales del terreno en general no sobrepasan el 10% de la aceleración gravitatoria.

**Edafología.**

Los suelos de la Península de Yucatán proceden de una base calcárea o de una mezcla compleja de partículas de roca madre desintegrada por los agentes del intemperismo, con desechos orgánicos de animales y vegetales, los que unidos en una comunidad biológica liberan los nutrimentos que sirven de alimento a las plantas. En particular, la distribución de los suelos del área de la cuenca de Quintana Roo, según la clasificación FAO/68 corresponden a la asociación Leptosol en su mayor parte, de textura media; estos reflejan claramente el proceso de formación partiendo de la roca madre, la vegetación que cubre estos suelos ocasiona una rápida filtración del agua y gradual acumulación de materia orgánica en las partes bajas, estos suelos son importantes para la agricultura de roza-tumba-quema de la Península. Los suelos son delgados, de 3 a 5 centímetros de profundidad y en algunos lugares inexistentes, siendo su cobertura menor de 50% en zonas altamente erosionadas; compuesto de materia orgánica parcialmente descompuesta, con coloración café oscuro a negro, a tierra roja de color café rojizo, compuestas de caolinita probablemente cristalina con cantidades menores de clorita, talco y calcita (fragmentos no alterados) y ocasionalmente bohemia y cuarzo.

En el área en estudio predominan los suelos de génesis calcárea, mismos que se caracterizan por ser suelos muy delegados que no tienen más de 10 cm de espesor, con abundante pedregosidad, de color gris pardo claro en seco y negro en húmedo con menos de 10 cm de espesor que yacen directamente sobre la capa dura, continua o quebradiza y coherente con alto contenido de materia orgánica, su textura es arcillosa y su estructura granular.

En el sitio donde se construirá el proyecto predomina el suelo de tipo Leptosol, cuya característica principal es su poca profundidad (0 a 40 cm). El horizonte superior O (orgánico), se encuentra de 0 a 18 cm de profundidad. De textura migajón limosa, poseen color café-rojo oscuro y la cantidad de materia orgánica es de mediana a abundante. El pH es de 7 a 8. La rocosidad (afloramientos de roca calcárea) y la pedregosidad son considerables.

**Hidrología superficial.**

El área del proyecto se localiza dentro de la Región Hidrológica Administrativa (RHA) XII Península de Yucatán (porción sureste de la República Mexicana), la cual comprende los estados de Quintana Roo, Yucatán y Campeche. Está formada por las regiones hidrológicas (RH) 30 Grijalva-Usumacinta, 31 Yucatán Oeste, 32 Yucatán Norte (Yucatán) y 33 Yucatán Este (Quintana Roo). Regionalmente, el área de estudio se ubica en la RH 32, cuenca A, Quintana Roo, subcuenca a, Quintana Roo; esta última limita al norte con el Golfo de México, al sur con la RH 33 (Yucatán Este, Quintana Roo), al este con el mar Caribe y al oeste con la subcuenca a, Mérida, de la cuenca B, Yucatán de la RH 32.

**Hidrología subterránea.**

Geohidrológicamente, el área del proyecto se ubica en el denominado Acuífero Península de Yucatán, clave 3105, en la zona sureste de la República Mexicana. Este cuerpo de agua subterránea está comprendido entre las coordenadas geográficas 17° 49' 00" y 21° 36' 00" de latitud norte y 86° 45' 00" y 91° 20' 00" de longitud oeste. El acuífero es la única fuente permanente de agua para abastecer los diversos usos en esta zona.

El Acuífero Península de Yucatán se caracteriza por estar conformado por sedimentos kársticos y ser de tipo libre, por lo tanto, carece de corrientes superficiales importantes, ya que, por lo regular, sólo se manifiesta un drenaje incipiente que desaparece en resumideros o cuerpos de agua superficial, situación que favorece la infiltración del agua al acuífero a través de fracturas, oquedades y conductos kársticos. Una vez dentro del sistema acuífero, el agua sigue diferentes trayectorias de flujo, controladas por el desarrollo o evolución del karst profundo Son 13 las unidades hidrogeológicas que integran este acuífero, seis de ellas ubicadas en Quintana Roo. El área del proyecto se asienta en las unidades de Cuencas Escalonadas y Costas Bajas.

**Vegetación.**

El área del proyecto se encuentra en la Provincia Florística Península de Yucatán. Esta provincia comprende la provincia fisiográfica con el mismo nombre; sus límites meridionales no se pueden determinar aún con exactitud. Incluye también al menos una parte de Belice y el Departamento de Petén en Guatemala. El clima es cálido y húmedo en la base de la Península y existe un gradiente de aumento de sequedad en dirección sureste-noroeste.

La vegetación consiste primordialmente de bosques tropicales caducifolios, subcaducifolios y perennifolios. La flora, en general, presenta una gran similitud con la provincia anterior, pero destaca un número considerable de endemismos y, además, sus relaciones con las Antillas son más acentuadas que en cualquier otra parte de la República. Al igual que en las provincias de la Costa Pacífica y de la Costa del Golfo de México, es notable el empobrecimiento de la flora hacia el noroeste. Los géneros de plantas vasculares sólo conocidos en la Península de Yucatán son los siguientes: Asemnanthe, Beltrania, Goldmanella, Harleya, Plagiolophus. (Rzedowski, 2006).

En el área del proyecto la vegetación presente consiste en Selva Mediana Subperennifolia (SMQ).

Se desarrolla en climas cálido-húmedos y subhúmedos. Comprende temperaturas típicas entre 20 y 28 grados centígrados. La precipitación total anual es del orden de 1,000 a 1,600 mm. Se le puede localizar entre los 0 a 1300 metros sobre el nivel medio del mar. Ocupa lugares de moderada pendiente, con drenaje superficial más rápido o bien en regiones planas, pero ligeramente más secas y con drenaje rápido, como en la Península de Yucatán. El material geológico que sustenta a esta comunidad vegetal son predominantemente rocas kársticas. Los árboles de esta comunidad, al igual que los de la selva alta perennifolia, tienen contrafuertes y por lo general poseen muchas epífitas y lianas. Los árboles tienen una altura media de 25 a 35 m, alcanzando un diámetro a la altura del pecho menor que los de la selva alta perennifolia aun cuando se trata de las mismas especies. Es posible que esto se deba al tipo de suelo y a la profundidad. En este tipo de selva, se distinguen tres estratos arbóreos, de 4 a 12 m, de 12 a 22 m y de 22 a 35 m. Formando parte de los estratos (especialmente del bajo y del medio) se encuentran las palmas. Destacan las siguientes especies Lysiloma latisiliquum, Brosimumalicastrum (ox, ramón, capomo), Bursera simaruba (chaka', palo mulato, jiote, copal), Manilkara zapota (ya',zapote, chicozapote), Lysiloma spp. (tsalam, guaje, tepeguaje), Vitex gaumeri (ya'axnik), Bucida buceras (pukte'), Alseis yucatanensis (Ua'asché), Carpodiptera floribunda. En las riberas de los ríos se nota a Pachira aquatica (k'uyche'). Las epífitas más comunes son algunos helechos y musgos, abundantes orquídeas y bromeliáceas y aráceas.

**Fauna.**

El estado de Quintana Roo se encuentra inmerso en la región biogeográfica Neotropical, además, confluyen dos provincias bióticas del País (provincia biótica Yucatanense y provincia biótica Campechano-Petenense: subprovincia Rooena). Aunado a ello, su topografía, climas y tipos de hábitat, han dado como resultado que, para el Estado de Quintana Roo, se tenga registrada la presencia de 24 especies de anfibios, 105 especies de reptiles, 517 de aves y 108 especies de mamíferos, para un total de 754 especies de vertebrados terrestres.

Para la identificación de especies e individuos de fauna de talla mediana y grande presentes en la zona del proyecto, se instalaron un total de 29 cámaras-trampa, con un esfuerzo de muestreo de 928 días-trampa. Se obtuvieron 77 registros fotográficos de 18 especies de fauna silvestre (una especie de reptil, tres especies de aves y 14 especies de mamíferos). La especie con mayor número de registros fue el Coatí (Nasua narica), seguida por el hocofaisán (Crax rubra), mientras que nueve especies solo fueron registradas en una sola ocasión en cámaras trampa. Para las dos especies de roedores, para su identificación se consideró que cerca de la cámara trampa en donde fueron registradas, también se colocaron trampas Sherman en donde fueron capturadas dos especies que presentan las mismas características a las de las cámaras trampa. 13 especies fueron registradas en el predio del proyecto.

## *VI.1 Vulnerabilidad del sitio.*

A continuación, se incluye un análisis de la vulnerabilidad de la zona donde se ubica el proyecto.

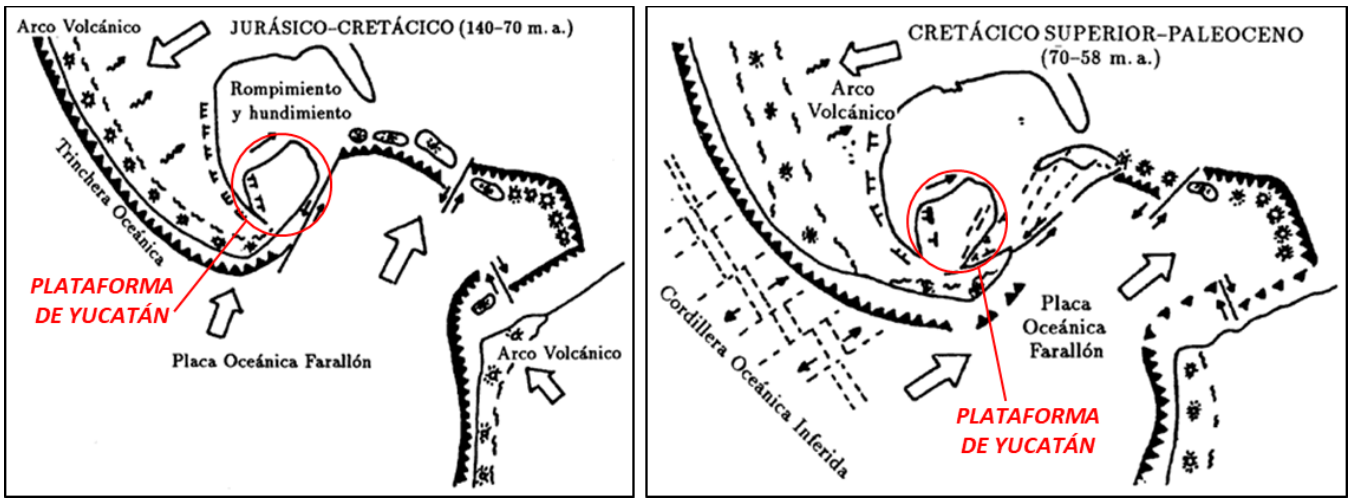
i) Riesgos geológicos.

El área que comprende el Proyecto se ubica en el extremo oriente de la República Mexicana, forma parte de la Plataforma de Yucatán y se caracteriza por ser una zona de topografía predominantemente plana, ligeramente rugosa y ondulada de pendientes suaves que en su mayoría no rebasan los 35 msnm.

En toda el área de estudio aflora la Formación Carrillo Puerto de la Provincia Fisiográfica de la Península de Yucatán, constituida por secuencias carbonatadas de estratos horizontales de calizas tipo boundstone denominada también coquina, con variaciones a packstone, grainstone y wackestone, toda porción aflorante está afectada por el fenómeno de la karsticidad. Cuenta con fases arcillosas de dolomitización de alteración a sahcab y calichosas. Su espesor varía de 163 a 240 m y le sobreyacen sedimentos calcáreos arenosos en estratificación cruzada con un cubrimiento superficial de caliche. Su rango de edad abarca del Mioceno al Plioceno cubierta parcialmente por depósitos de sedimentos carbonatados periféricos del Cuaternario y del Reciente, confinados en una franja periférica angosta a lo largo de la costa del Caribe, estos depósitos se caracterizan por ser supramareales, es decir, formados por encima del nivel de las mareas y son paralelos a la costa.

Como parte del sistema kárstico (Figura VI.3), el área de estudio forma parte de una plataforma de origen marino somero con abundantes depresiones y fosas acuíferas conocidas como dolinas, a las de mayor dimensión en la región comúnmente se les conoce como cenotes. Está influenciada por los sistemas costeros del Mar Caribe, mismos que a su vez están constituidos por sistemas de barras costeras dominadas por el oleaje, así como la erosión marina diferencial en los macizos que sobresalen significativamente en altura.

***Figura VI.5 Evolución de la karsticidad en el área de estudio.***




Fuente: SEDENA

En términos hidrológicos, el área de estudio se caracteriza por tener una red hidrológica superficial arreica, indefinida debido a su intensa karsticidad, lo que favorece la recarga y la circulación hídrica subterránea, por lo que no es posible la existencia de cuencas hidrológicas, ni es posible aplicar la totalidad de sus conceptos.

Entre los mayores lineamientos estructurales presentes destacan los sistemas kásrticos de la zona, visibles en imágenes aéreas y satelitales, tales como la presencia del Graben o Depresión Ignacio Zaragoza-Chumpón, formado por un sistema de fallas normales distensivas. Tiene un promedio de orientación de NE 30° SW y longitud 122 km de norte a sur y de 19 a 42 km de ancho. Se extiende desde Hol Box hasta Carrillo Puerto. Afecta rocas de la Formación Carrillo Puerto, misma en que aflora en el área destinada para la futura terminal aérea.

En el área de estudio se presenta una zona de karstificación en una etapa madura, ya que los planos de estratificación son casi horizontales, sin ondulaciones significativas. Lo anterior sugiere que el paisaje kárstico de la zona se halla en una segunda etapa evolutiva kárstica, de acuerdo a los criterios de Cvijic (1960), es decir, está en una etapa madura o bien, juvenil tardía.

***Concepto y problemática de la karsticidad.***

En la terminología geológica, particularmente geomorfológica, los karst son sistemas de paisajes caracterizados por un relieve accidentado de grietas y crestas agudas originadas por los procesos de erosión por disolución de los minerales solubles que constituyen las masas de rocas, particularmente calcáreas y evaporíticas que son las que más abundan en provincias geológicas de esta naturaleza.

El término karst proviene del idioma serbio-croata y significa "campo de piedras calizas"; a su vez, es el nombre de una región en la Península de Istria, al norte del Mar Adriático, lugar donde se realizaron los primeros estudios científicos sobre la circulación del agua en calizas. En algunos textos en español se le ha castellanizado como carst. Adicionalmente al grado de vulnerabilidad y al modo en que un área caracterizada por unidades de roca está o pudiera presentar la formación de karst, es lo que en el presente estudio se le denominará karsticidad.

Por otra parte, al conjunto de procesos que desarrollan la formación de karst se le denomina karstificación y esta es la combinación los factores químicos como la solubilidad de los minerales de las rocas, hidratación, sustitución iónica y óxido-reducción con factores físicos como transferencia de masa y difusión.

Por lo anterior, en el presente estudio se menciona el término karst para referirse a aquellas áreas y zonas con estructuras constituidas por rocas calcáreas o evaporíticas que han sido significativamente afectadas por los procesos de erosión por disolución en agua meteórica y subterránea que ha sido acidificada. Los karst se dividen básicamente en dos grupos: los exokarst que son aquellos apreciables sobre la superficie y los endokarst que se caracterizan por ser enteramente subterráneos. Ambos escenarios están completamente relacionados e interconectados entre sí.

***Proceso de karstificación.***

En las masas rocosas karstificables está estrechamente involucrado el ciclo hidrológico como el principal agente responsable formador y modelador de este tipo de paisajes. Sin embargo, cabe mencionar que en la karstificación también están involucrados el clima, la vegetación, la topografía del terreno, así como las condiciones geológicas que imperan en las masas rocosas. En el caso de la Península de Yucatán, todas ellas son originadas en un ambiente de plataforma marina.

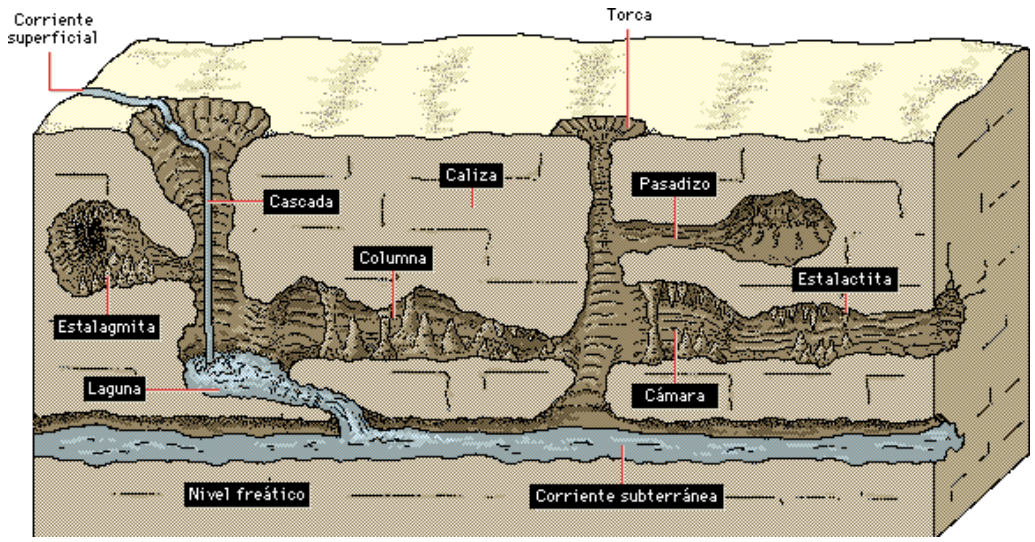
Este inicia en la atmósfera y en la biósfera por medio de la mezcla del agua meteórica con el bióxido de carbono para producir ácido carbónico diluido en cantidades relativamente pequeñas. En esta mezcla, el bióxido de carbono reacciona con el agua formando así ácido carbónico, el cual queda diluido en las gotas de lluvia.

Tras la precipitación pluvial, seguido de posible escurrimiento fluvial, la infiltración del agua meteórica acidificada ingresa hacia el interior de la masa rocosa a través de fisuras, poros y discontinuidades preexistentes en la roca diluible encajonante, en este caso las rocas carbonatadas, mismos que pueden tener su origen desde su depósito, como los procesos diagenéticos en las cuencas sedimentarias, tales como estructuras sedimentarias primarias, pliegues o fisuras synsedimentarias, planos de estratificación, entre otras; o bien, estructuras formadas a posteriori, como los sistemas de fallas, fracturas, grietas de tensión, pliegues y otras deformaciones causadas principalmente por influencia del tectonismo que pueden o no ser determinantes para condicionar la karstificación.

Cuando el ácido carbónico diluido en el agua infiltrada queda en contacto con la masa sólida de la caliza constituida esencialmente por carbonato de calcio, mineral que no es soluble en agua, en el proceso se produce una segunda reacción química que transforma al carbonato de calcio de la roca en bicarbonato de calcio, el cual sí se diluye en el líquido que ya forma parte de las aguas subterráneas que transitan entre las discontinuidades descritas, o bien entre las galerías subterráneas que erosionan el interior del macizo rocoso calcáreo.

Lo anterior, realiza el trabajo de devastación y horadación de las paredes entre las fisuras y diversas discontinuidades, poros y oquedades de las rocas, incrementando paulatinamente el espacio de aire y agua tanto en la superficie como en el interior del macizo rocoso afectado, mismos que con el tiempo van acrecentando y formando oquedades de diversos tamaños, cavernas y pasadizos subterráneos (Figura IV.6), a través de los cuales circulan corrientes fluviales subterráneas, así como constante goteo y escurrimiento. En diversas ocasiones, el karst puede quedar debajo de los diferentes niveles de aguas freáticas.

***Figura VI.6 Modelo representativo característico del proceso de karstificación.***




El bicarbonato de calcio diluido en diversas ocasiones ejecuta una tercera reacción química en sentido inverso de las ocurridas, La reacción inversa es de síntesis y en ella el bicarbonato de calcio se convierte de nuevo en carbonato de calcio, liberando también bióxido de carbono y agua. El nuevo carbonato de calcio se precipita por goteo en los techos de las galerías subterráneas formando estructuras columnares estalactíticas y estalagmíticas, constituidas en una de las variedades de la calcita cristalina conocida como aragonito (Figura IV.7), o bien este material circula de nuevo al exterior del karst para incorporarse a los cuerpos fluviales o a las aguas del mar. El proceso es similar para las dolomías constituidas. En el caso de los halogenuros, no se producen reacciones químicas, ya que estos son directamente solubles en el agua.

***Figura VI.7 Aspecto de las estructuras estalagmíticas derivados de la karsticidad en el interior del Cenote Choj Ha, Valladolid, Yucatán***

***Imagen de Adriano Vives***

El caliche es una roca que se forma por la cementación de partículas entre las capas de los suelos calcáreos, por tal razón, suele ser similar a algunas capas de suelo. Los cementantes en general son calcita recristalizada entre los espacios vacíos que unen partículas clásticas. Si hay una buena cementación, el agregado tendrá una buena resistente y alta densidad. Sin embargo, el caliche son partículas de carbonato de calcio con abundantes impurezas pobre o nulamente cementadas y acumuladas por arrastre y decantación de aguas fluviales.

***Proceso hidroquímico de la karstificación.***

Como ya se ha mencionado, la karstificación es el resultado de la alta solubilidad que tiene la mayor proporción de los minerales que constituyen determinados grupos de rocas, particularmente las sedimentarias químicas, en este caso, las carbonatadas y las evaporíticas que prevalecen.

A diferencia de las rocas evaporíticas (yeso, anhidrita y halita), que son solubles directamente en

el agua sin dejar residuos mediante un proceso físico reversible, las calizas y dolomías, que son principal litología del desarrollo kárstico, tienen una alta vulnerabilidad a la oxidación de los carbonatos que las constituyen, es decir su corrosión.

El proceso de corrosión de los carbonatos se realiza a partir de la disolución del bióxido de carbono atmosférico (CO2) que se disuelve en el agua meteórica (H2O) que ingresa al macizo rocoso calcáreo por infiltración, disuelto en una pequeña porción que reacciona produciendo ácido carbónico en un primer nivel de oxidación (H2CO3):

$$CO_2 + H_2O \longrightarrow H2CO_3$$

El pH de una solución saturada de dióxido de carbono alcanza un pH aproximadamente de 6.5. El ácido carbónico disuelto se disocia parcialmente y se forma el ión bicarbonato, mismo que queda disuelto en el agua meteórica. En estas condiciones, el agua que se acidifica reacciona con los carbonatos de la caliza:

$$H_2CO_3 \longrightarrow (HCO_3)^- + H^+$$

Las reacciones químicas que posibilitan el modelado kárstico tienen lugar cuando el agua acidificada reacciona con la caliza y la disuelve. La caliza (carbonato de calcio), es insoluble en agua, sin embargo, es atacada por el ión bicarbonato disuelto en el agua de lluvia. Esto transforma el carbonato de calcio en bicarbonato de calcio, el cual es soluble en agua:

$$CaCO_3 + (HCO_3)^- + H^+ \longrightarrow (HCO_3)_2Ca$$

De inmediato el bicarbonato de calcio se diluye en el agua que fluye entre las fisuras y los ríos subterráneos y viaja hasta ciertas distancias dentro de la masa rocosa calcárea, o bien, se incorpora de nuevo en el mar, ya que en la Península de Yucatán casi no hay sistemas fluviales como en casi todo el resto del país:

$$(HCO_3)_2Ca \longrightarrow 2(HCO_3)^- + Ca^{2+}$$

Lo anterior se pueden resumir en el equilibrio entre las reacciones opuestas reversibles: aquella que transforma a la caliza en bicarbonato de calcio que de inmediato es transportado una vez disuelto en el agua y aquella que hace que el bicarbonato de calcio precipite de nuevo, pero con otros hábitos cristalinos que dependen de las condiciones físicas del sitio al que fue transportado:

$$(HCO_3)_2Ca \rightleftharpoons CaCO_3 + H_2O + CO_2$$

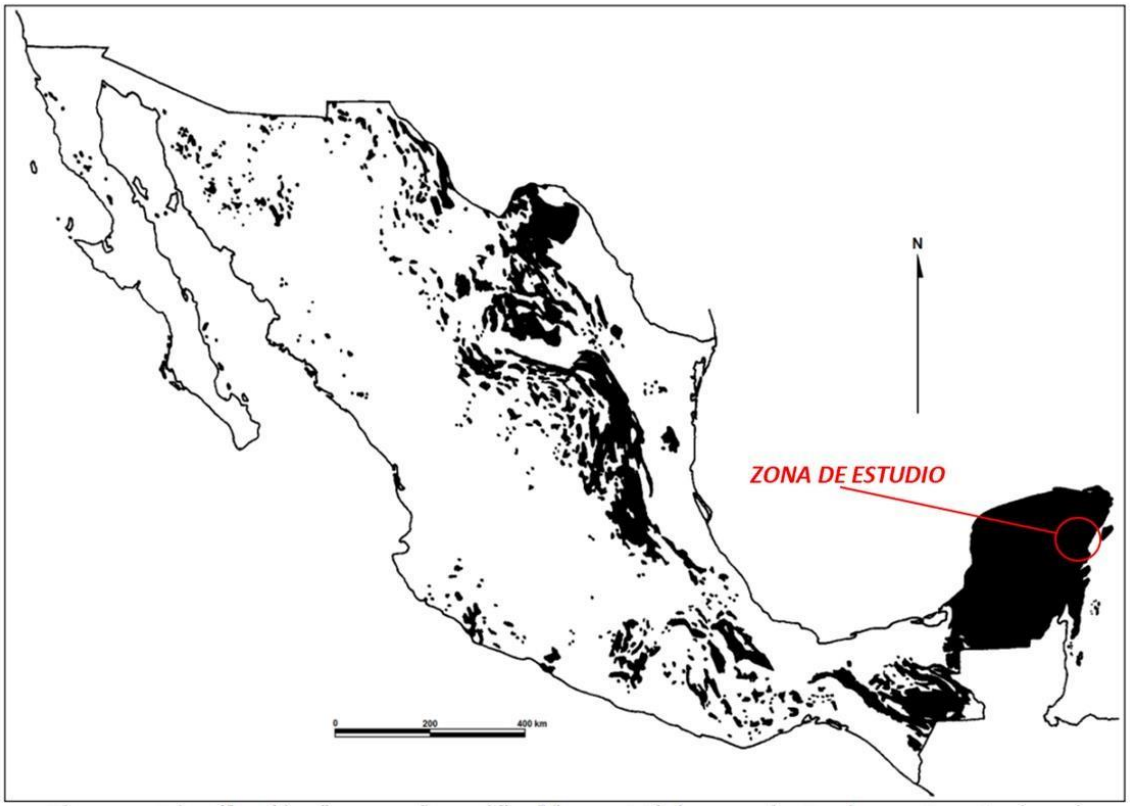
Ocurre lo mismo con la dolomita, en vez de carbonato calcio es de magnesio, sin embargo, las condiciones del contacto roca-solución son mucho más complejas. Cabe mencionar que la solubilidad de la calcita varia inversamente con la temperatura, es decir, es más soluble a temperaturas bajas que a elevadas.

***Karsticidad en la región.***

Como se mencionó previamente y tal como lo realiza el ARSH elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el karst de la Plataforma de Yucatán se desarrolló tras la emersión de una antigua plataforma calcárea de origen marino de bajo relieve. Se caracteriza por la presencia de abundantes cenotes, numerosas depresiones rellenas de suelos, y cúpulas en las porciones de mayor relieve. Presenta un importante desarrollo de sistemas de drenaje kárstico asociado a diversas resurgencias, principalmente la costa de Quintana Roo.

Aproximadamente en el 20% del territorio nacional afloran y subyacen rocas carbonatadas y evaporíticas, ambos grupos de rocas son rocas solubles y son principalmente calizas y en menor proporción yesos. La mayoría de estas rocas están distribuidas a lo largo de la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur, la Sierra Norte y Depresión Central de Chiapas y la Península de Yucatán (Figura VI.8). Las variaciones entre estructuras geológicas y el clima arrojan como resultado una gran variedad de formas kársticas.

***Figura VI.8 Distribución de las rocas karstificables según Espinasa-Pereña (1991).***

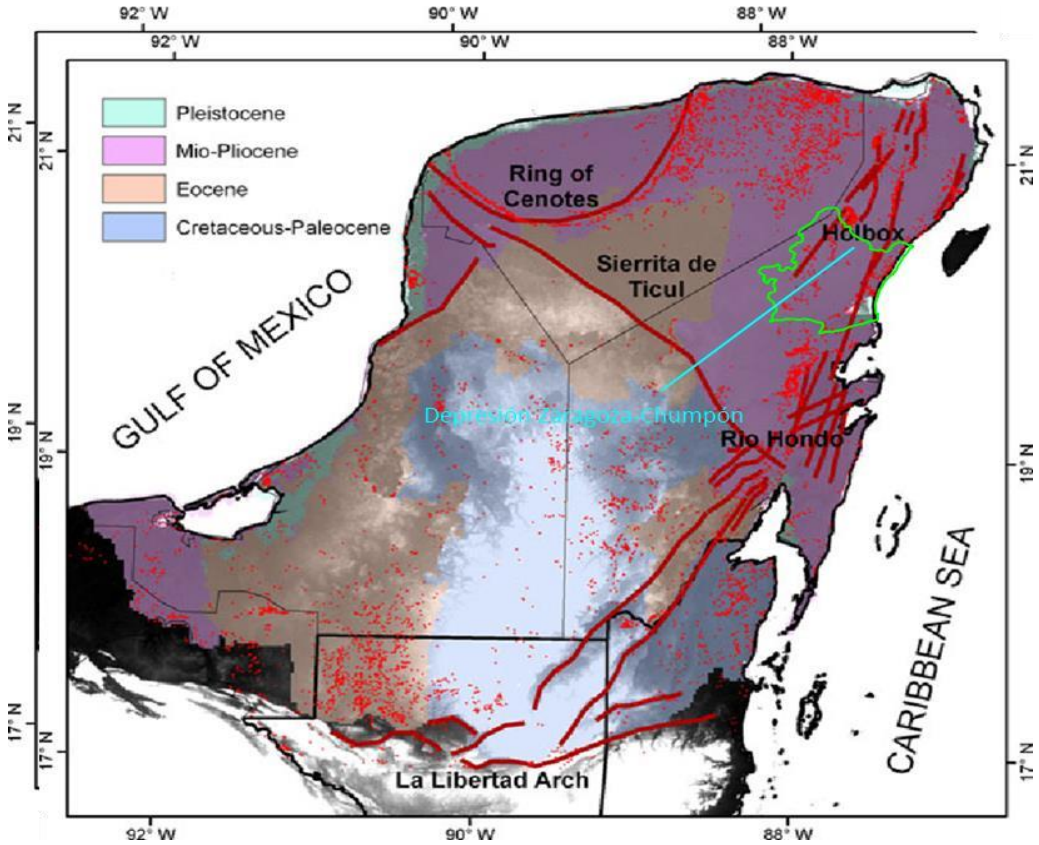


La Península de Yucatán representa el afloramiento continuo de caliza más extenso del país, incluyendo casi todo el país vecino de Belice y el norte de Guatemala. Mediante los estudios geológicos estructurales de la misma (Figura VI.9), se ha dividido básicamente en dos regiones distintas:

1) Planicie del Noreste: es la porción de la plataforma emergida geológicamente más reciente sin deformación alguna a excepción de los sistemas de fallas de orientación de nor-noreste a sur-suroeste de su planicie oriental, adyacente a la costa del Mar Caribe, así como las fracturas anulares asociadas entorno al punto de impacto del Cráter de Chicxulub en su planicie norte y nor-occidental.

2) Sierrita de Ticul: Consiste en unos lomeríos y planicies en la porción central y suroeste de la península, estos tienen deformación con echados de hasta 40 grados.

***Figura VI.9 Geología de la Península de Yucatán según Bauer-Gottwein et al. (2011). Los puntos rojos son cenotes y las líneas rojas indican fallas y el área delimitada en verde claro es el área de estudio.***

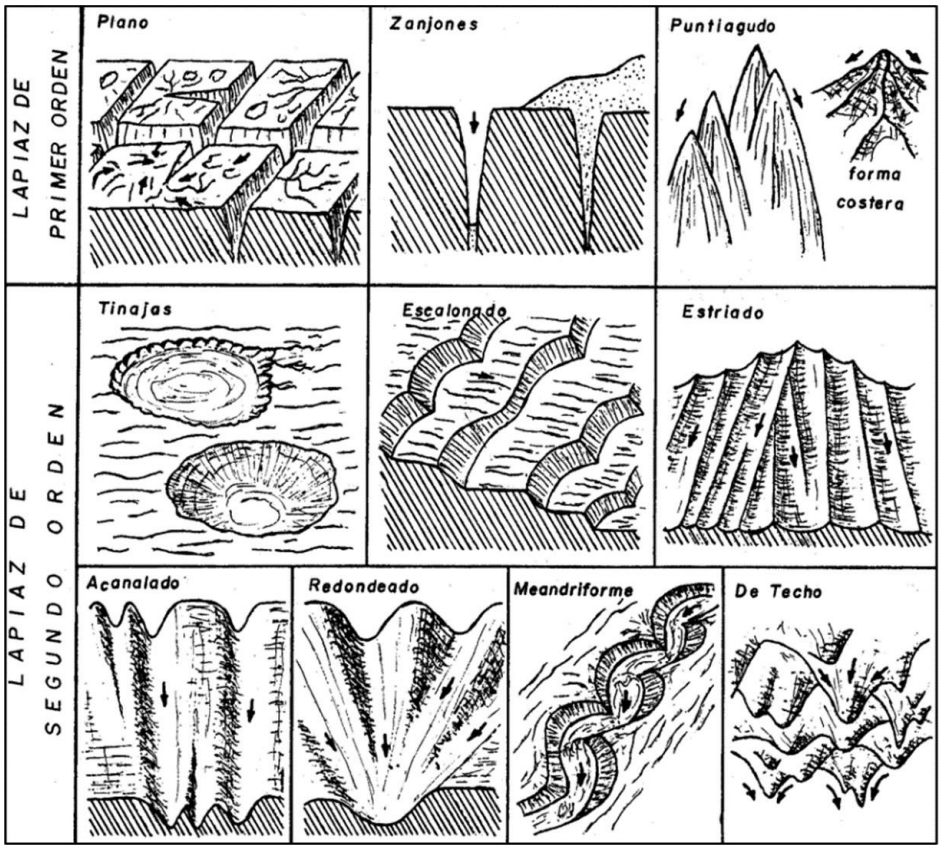



El paisaje kárstico de Yucatán se caracteriza por un relieve ondulado constituido por planicies estructurales y lomeríos, con depresiones y cavernas cuyas dimensiones se amplían hacia el sur del estado, donde predominan las planicies y rocas sedimentarias.

***Rasgos de la karsticidad.***

Las superficies de rocas ya sea carbonatadas o evaporíticas que afloran y quedan expuestas directamente a la intemperie suelen estar afectadas por el desgaste dilusivo de aguas meteóricas y fluviales. Los patrones de formas que adquieren las superficies derruidas por la disolución se les conoce como lapiaz y a las porciones de suelo erosionadas como epikarst. Allen (1984) propuso una clasificación de las diferentes formas y estilos más comunes de lapiaz mismas que dividió en tres órdenes, con base en la escala general y su superposición (Figura VI.10).

***Figura VI-10 Clasificación de las formas y estilos más comunes de lapiaz (Allen, 1984).***




Estas formas dependen, en su mayor parte, de la precipitación, así como de otros factores como la concentración del ácido carbónico disuelto en el agua, la pureza de la roca, temperatura y la cubierta de suelo y vegetación existente, etc.

La superficie de casi toda la Península de Yucatán es relativamente plana y ligeramente ondulada, sin embargo, las geoformas kársticas que predominan se caracterizan por ser depresivas y cerradas. Varias de ellas son difíciles de apreciar en fotografías aéreas debido a la exuberante vegetación, y estas son básicamente de tres tipos: dolinas, uvalas y poljes.

Las dolinas (sink hole en inglés) son depresiones cuya forma vista en planta son de forma circular

a semicircular, semejantes a los cráteres volcánicos (Figura VI.11). En general su diámetro varía de unos cuantos metros a 1 km. Están muy relacionadas con el grado de fisuramiento de la masa rocosa, su permeabilidad y sus fracturas, de manera tal que el grado de trituración y concentración de material sedimentario fino no siempre alcanza a reducir ni limitar la permeabilidad.

***Figura VI.11 Conjunto de dolinas típicas de la selva maya en la Península de Yucatán.***

Las dolinas de colapso se producen a partir del hundimiento brusco de una cavidad que le subyace, formando fosas que pueden rebasar algunos centenares de metros, produciendo contornos irregulares y paredes verticales que progresivamente tienden a suavizarse por el relleno de los sedimentos coluviales, o, por el contrario, con el proceso erosivo continúa su profundización.

Aquellas dolinas profundas abiertas o semiabiertas a la superficie que forman fosos invadidos parcial o totalmente por las aguas freáticas, pueden rebasar más de cien metros de profundidad, sin embargo, en la región de la Península de Yucatán, Belice y el norte de Guatemala se les denomina cenotes, palabra originaria de la lengua maya ts'ono'ot, que significa hoyo con agua.

Entre los peligros que implica la presencia de los karst, así como el uso que se hace de ellos son esencialmente dos:
1) Aquellos involucrados en las condiciones estructurales pueden causar hundimientos graduales o súbitos formando hundimientos o dolinas inducidas, así como por la presencia de un considerable contraste en relieve del terreno epikárstico;
2) Contaminación de los acuíferos.

Hay una clasificación de seis tipos de dolinas kársticas, estas dependen del mecanismo que les

dio origen, así como del material que las constituyen (Figura VI.12):

***Dolinas de disolución***. Se forman por una reducción paulatina del volumen de roca de los estratos que afloran entorno a un punto sobre el terreno por medio de la disolución del material lítico que la constituye. Inician a partir de la percolación diseminada, con ayuda de pequeños socavamientos y colapsos y tienen constante absorción de drenes fluviales.

***Dolinas de colapso***. A partir de la reducción del volumen de un conjunto de bloques de roca calcárea por disolución, llega el momento en el que se pierde la capacidad de soporte de los estratos provocando un colapso súbito. Con el tiempo, mientras los bloques caídos pierden volumen por el mismo proceso de disolución, estos se reacomodan al mismo tiempo que pueden seguir cayendo bloques de la pared de la dolina. Estas dolinas son poco comunes y suelen combinarse con las de disolución.

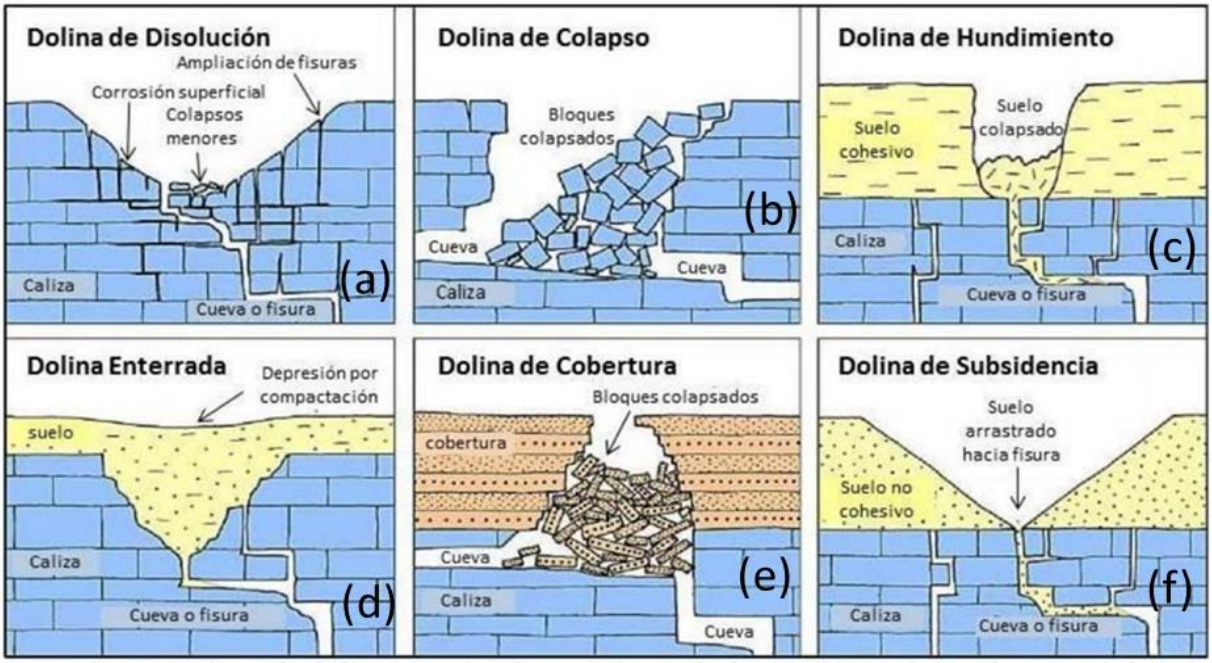
***Dolinas de hundimiento***. Se forman por hundimiento rápido de la superficie del terreno cubierto por estratos de suelo o sedimento poco cohesivo que se erosiona por lavado de material fino que se percola llevándose el material fino hacia una fisura o cavidad de un estrato de roca subyacente, hasta provocar un hundimiento súbito de una porción de sedimento, posteriormente continúa el relleno de la oquedad inferior con un mecanismo semejante al de una tolva o un embudo.

***Dolinas enterradas.*** Suele ocurrir con antiguas dolinas de cualquier tipo que son rellenadas por suelos o sedimentos debido a la ocurrencia de un evento geológico de ambiente erosivo a deposicional, que pudiera ser causada por una subsidencia tectónica o una transgresión marina.

***Dolinas de cobertura.*** Son similares a las dolinas de colapso, pero estas ocurren por socavamiento y colapso de una litología no soluble sobre una cavidad kárstica en calizas subyacentes. Ocurren únicamente en terrenos de paleokarst cubierto o karst desarrollado en estratos solubles de una secuencia que incluye rocas no solubles, pero con cavidades importantes que pueden formar parte del relieve de un afloramiento de rocas no karstificables.

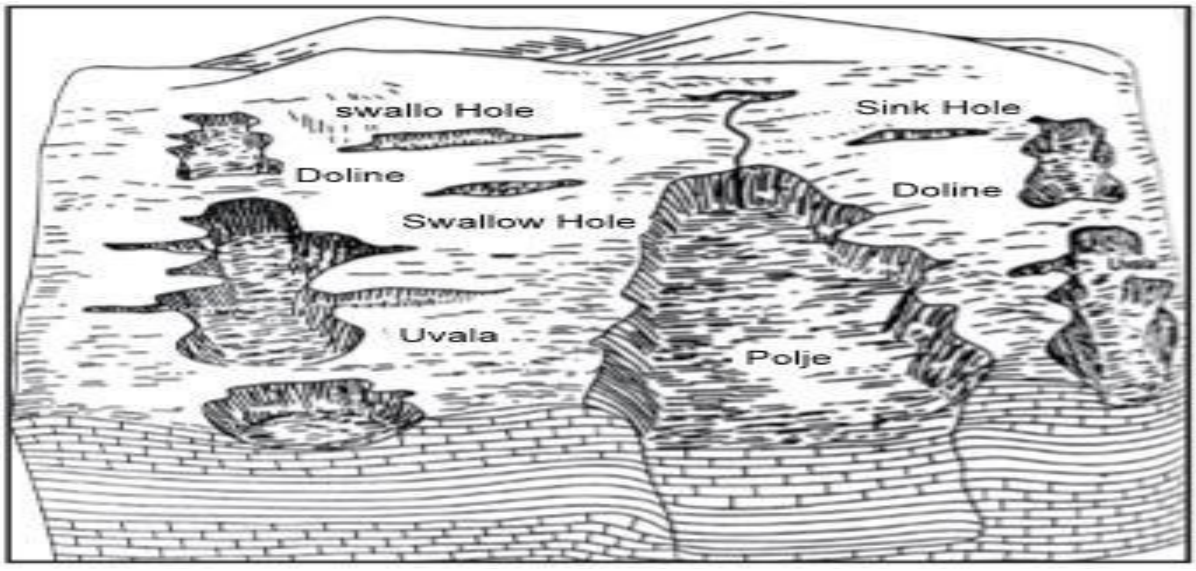
***Dolinas de subsidencia***. Se forman por subsidencia lenta del terreno, conforme un suelo no cohesivo se hunde o se erosiona removiendo sus restos por medio de lavado hacia las fisurasy cavidades desarrolladas en los estratos de roca calcárea subyacente. Al igual que en las dolinas de hundimiento, esta continúa creciendo en tamaño por medio con el mismo mecanismo de tolva o embudo.

***Figura VI.12 Clasificación de las dolinas según Waltham y Fookes (2003).***




Las **uvalas** son dolinas superiores de 1 km, tienen forma irregular o alargada y se forman a partir de la coalescencia de dos o más dolinas que crecen hasta juntarse en una sola depresión que cuya forma se asemeja a la de una alveola (Figura VI.13), de ahí su nombre, o bien tienden a forma amiboidea.

***Figura VI.13 Estructuras que caracterizan a los karst.***



Los **poljes** son dolinas o uvalas cuyo fondo está total o parcialmente cubierto por sedimentos coluviales y aluviales, mismos que conforman un fondo de superficie horizontal, plana y cercana al nivel freático, por lo que con frecuencia son vadosas o se inundan tras la caída de lluvias. Las zonas cercanas a este tipo de sumidero suelen ser pantanosas, principalmente cuando precipitan importantes caídas de lluvia. Ocurren cuando una depresión externa que tiene un fondo plano y dimensiones kilométricas se cierra por unas vertientes escarpadas. Se podría decir que es una uvala de grandísimas dimensiones. Dentro de un poljé pueden formarse o aflorar nuevas estructuras kársticas menores como lapiaces, dolinas y uvalas.

Se han identificado y contado 6,717 depresiones sólo en el estado de Yucatán, de las cuales a 4,620 las clasificadas como dolinas, entre ellos varios cenotes, así como 2,021 uvalas y 76 oljes.
En diversos casos, en la Península de Yucatán, debido a las impurezas de algunos grupos de calizas, se forman depósitos de una arcilla rojizo cuyas tonalidades varían de obscuro a rosado, denominada terrarosa, debido a la cantidad de óxidos de hierro que se acumulan desde el depósito del material carbonatado que puede depositarse en el fondo de la dolina, rellenándola parcialmente, con lo cual adquiere un fondo plano (Figura VI.14).

***Figura VI.14 Aspecto del terreno y sedimentario de la terrarrosa presente diversas zonas de la Península de Yucatán.***

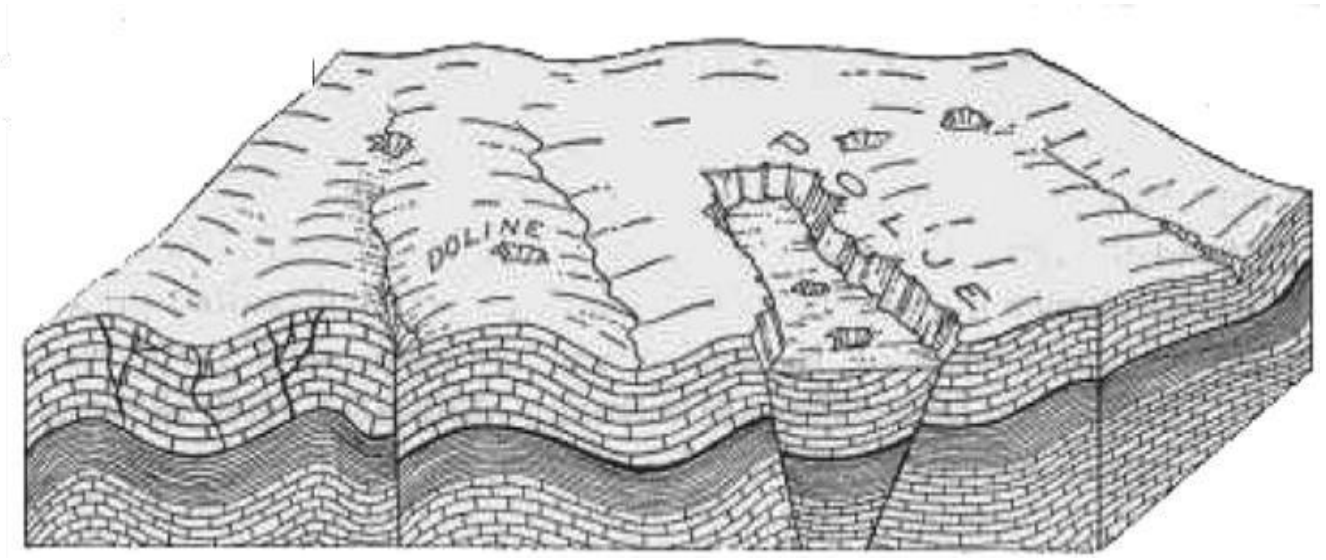
***Evolución de los paisajes kársticos.***

Todos los macizos de rocas carbonatadas y evaporíticas que emergen sobre el nivel del mar, independientemente del proceso que los levantó, ya sea por subsidencia o por plegamiento orogénico, estos quedan expuestos a los agentes modeladores de la geodinámica externa, en este caso un constante intemperismo. Por tanto, los efectos del modelado kárstico se hacen presentes con frecuentes cambios en el paisaje kárstico durante cientos de miles hasta varios millones de años en diferentes etapas. En todos ellos tiene gran influencia los climas a los que son sometidos, fueren estos de cálidos a gélidos, así como de secos a húmedos, incluyendo los rangos extremos considerando también las numerosas etapas de cambios climáticos que se han presentado a lo largo de la historia geológica. De igual manera, el registro fósil, inclusive el arqueológico, muy posterior al depósito de la roca carbonatada pudiera ser también indicativo de las etapas kársticas que se hayan presentado.

Las estructuras descritas son los principales elementos que constituyen la superficie de los paisajes kársticos de Yucatán. Con ellos también, en gran medida se puede inferir la presencia de estructuras endokársticas. Derivado del grado de erosión de las masas calcáreas que contienen estructuras kársticas, las diferentes geoformas que se forman a través del tiempo, se establecieron cuatro etapas del desarrollo de los paisajes kársticos: juvenil, madura, madura tardía y senil.

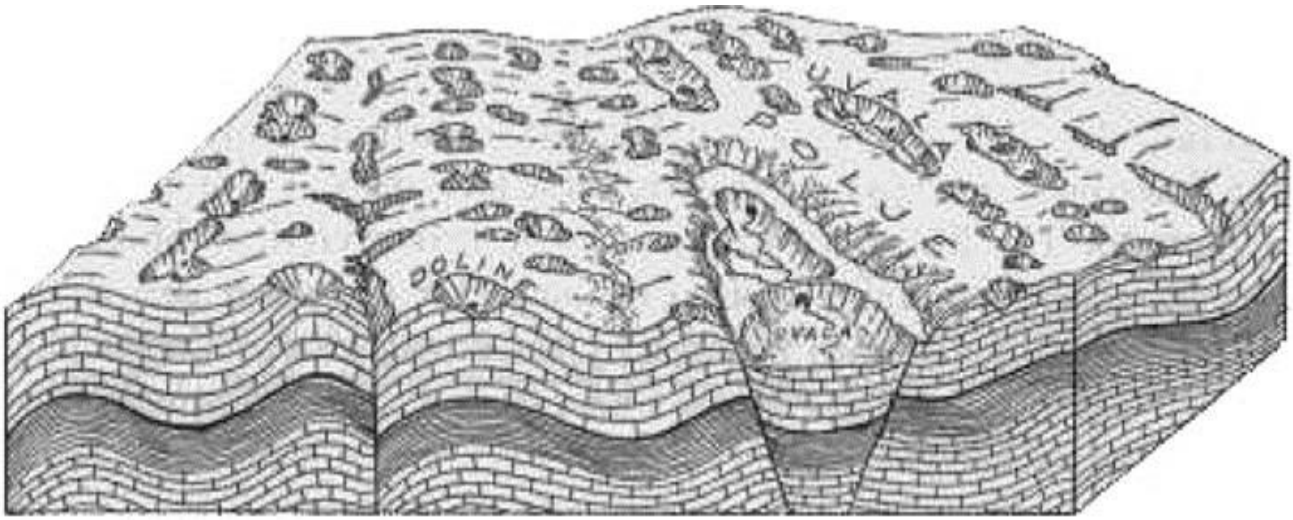
***Etapa Juvenil***. También llamada etapa temprana. Inicia cuando el agua meteórica y fluvial apenas inicia a disolver la roca carbonatada, en la superficie aparecen lapiaces y dolinas poco desarrolladas de unas decenas a algunos cientos de metros de diámetro y de baja a mediana profundidad, asimismo se forman algunas uvalas y poljes poco desarrollados, es decir poco pronunciados y alargados (Figura IV.15). Asimismo, se forman los primeros drenes superficiales sobre macizo rocoso, mismos que tienden a perderse cuando se inicia a desarrollar el subterráneo.

***Figura VI.15 Bloque representativo de los karst en etapa juvenil de acuerdo con Cvijic (1960).***



***Etapa Madura***. Llamada también Juvenil Tardía. La acción pluvial y/o fluvial de las corrientes de agua continúa ensanchando grietas. Aumenta la densidad de dolinas y su coalescencia, produciendo más uvalas y poljes (Figura IV.16) que rebasan algunos kilómetros. Aparecen dolinas más profundas y cenotes, se desarrolla el drenaje subterráneo, aparecen cavernas y galerías estalactíticas y estalagmíticas poco o moderadamente desarrolladas.

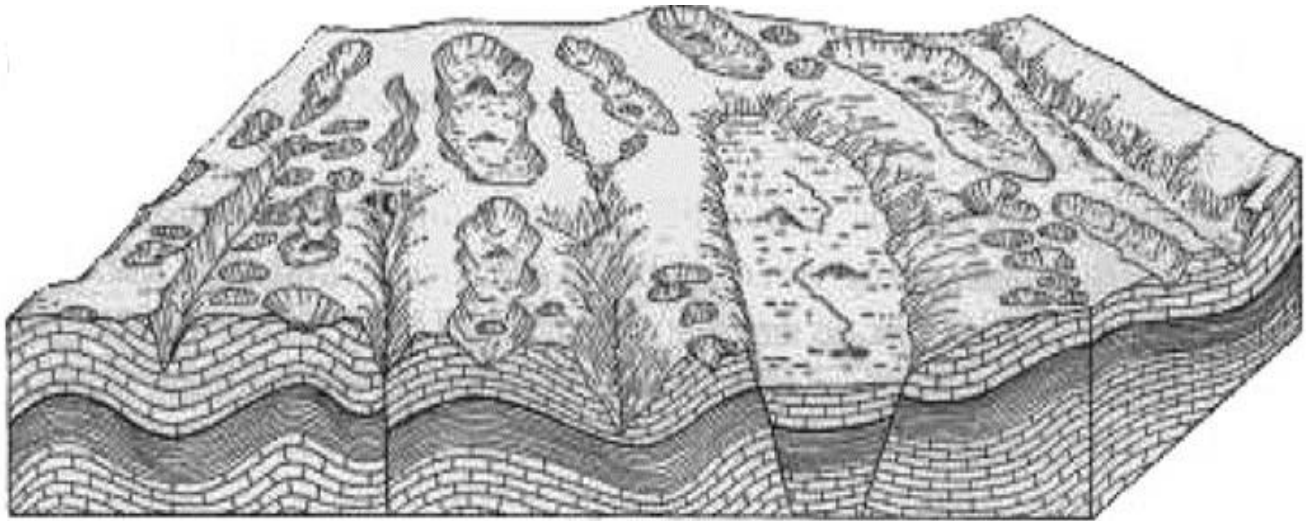
***Figura VI.16 Bloque representativo de los karst en etapa Madura de acuerdo con Cvijic (1960).***



***Etapa Madura Tardía***. Otros autores a esta etapa la consideran Madura. En esta fase, llamada también hundimiento, surge cuando el macizo calcáreo ha sufrido tanto desgaste erosivo interno por disolución y tiene galerías subterráneas de máxima dimensión (Figura IV.17).

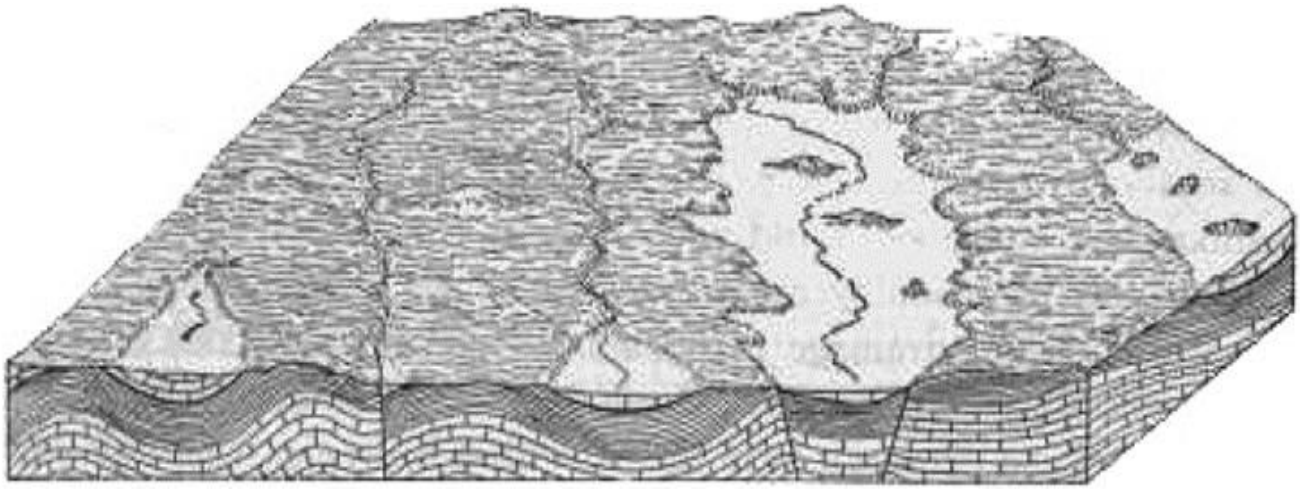
Desaparición de cenotes y aparecen más poljes y uvalas más alargadas, sin embargo, pueden aparecer algunas formaciones kársticas jóvenes. Sus techos empiezan a perder estabilidad sufriendo derrumbes, o bien por perdida de soporte de sus bases. Varias depresiones se rellenan total o parcialmente de diversos tipos de sedimentos. Se hunden las cavernas formando profundas circulares depresiones llamadas también torcas. Si el hundimiento es lineal se forman cañones kársticos.

***Figura VI.17 Bloque representativo de los karst en etapa Madura Tardía de acuerdo con Cvijic (1960).***



***Etapa Vieja o Senil***. Conocida también como etapa terminal. En esta fase, llamada también terminal, reaparecen los escurrimientos superficiales, afloran las galerías subterráneas quedando al descubierto el modelado interno del macizo calcáreo o bien, casi erosionado por completo dejando vestigios (Figura VI.18). Se disuelve la mayor parte de la caliza e inician otros procesos como el eólico o formación de una amplia depresión interrumpida por montículos rocosos.

***Figura VI.18 Bloque representativo de los karst en etapa Vieja o Senil de acuerdo con Cvijic (1960).***



Dado que la península es una plataforma marina que está emergiendo, se atribuye que las zonas kársticas más bajas en altitud son las más jóvenes y viceversa. Las grandes zonas de la península diferenciadas por su morfología expresan dos etapas principales de formación del relieve y del karst: una más antigua en el sur, cuya edad oscila del Mioceno y el Cuaternario; asimismo, otra más joven en el norte esencialmente del Cuaternario. Lo anterior tiende a coincidir con la geología general levantada en diversos estudios geológicos de la región.

Las observaciones en la zona que abarca el área de estudio para el Aeropuerto Internacional de Tulum, permiten inferir que se ubica en una zona de karstificación en una etapa madura, ya que los planos de estratificación son casi horizontales, adicionalmente, hasta el momento no se han apreciado ondulaciones significativas del terreno, lo que sugiere que el paisaje kárstico de la zona se halla en la segunda etapa evolutiva de los karst de acuerdo a los criterios de Cvijic (1960), es decir, está en una etapa madura o bien, juvenil tardía.

***Inestabilidad de suelo/subsuelo por karsticidad.***

Las formaciones o suelos kársticos son para los ingenieros, una condición de diseño muy variable e impredecible. Deben entonces realizarse estudios previos a la prescripción del diseño conceptual y de detalle, que permita una factibilidad segura de las estructuras, con un costo razonable. Como se explicó anteriormente, el primer paso para tener un buen diseño conceptual de las estructuras a cimentar es la verificación en campo de estructuras correlacionables con karsticiadad, como son oquedades, fracturas, cavernas, etc.; seguida a estas se deberán de realizar estudios indirectos a través de metodologías geofísicas de tomografía eléctrica resistiva y/o refracción sísmica, para posteriormente ser corroboradas de manera directa mediante

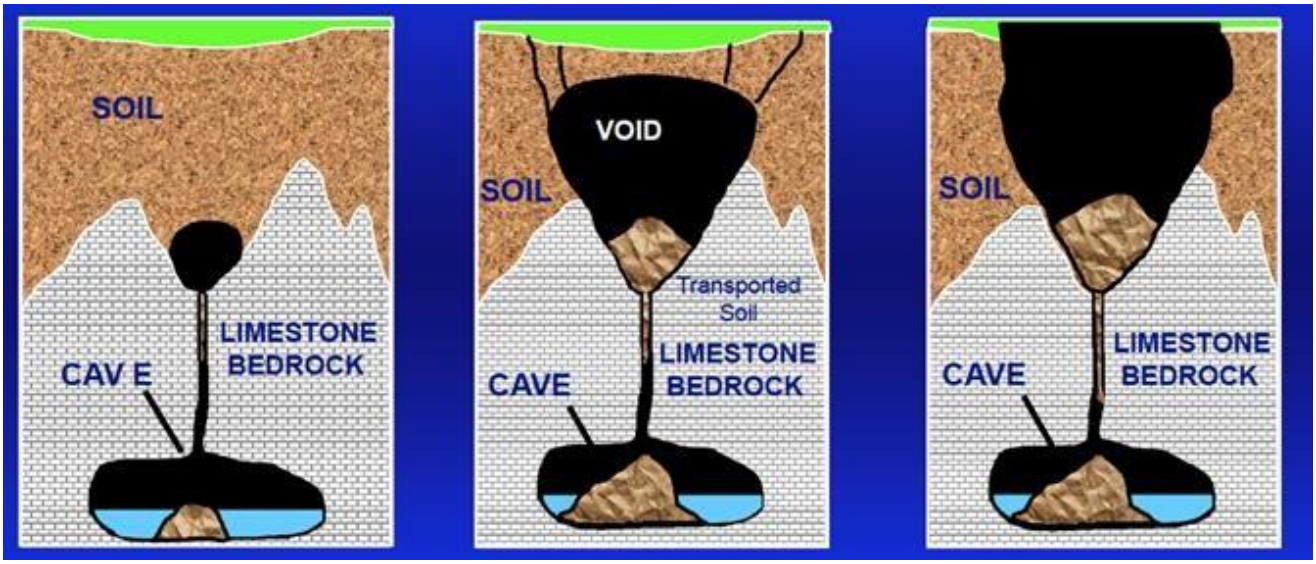
sondeos de penetración estándar y/o perforaciones direccionadas mediante el método de avance controlado.

La clasificación ingenieril de los suelos kársticos representa sólo generalidades de las condiciones esperadas del subsuelo, y el peligro geológico se puede estimar con la identificación de la escala de tres factores clave en construcción, siendo estos los siguientes:

- Perfil del suelo que refleja el desarrollo de dolinas (sinkhole),
- El / los pináculos de la roca maciza, y
- Las cavidades del suelo.

El mayor peligro geotécnico se presenta por un alto número de dolinas desarrolladas, o bien en proceso de desarrollo, en perfiles del suelo sobre fisuras en la caliza. Ocurre entonces la subsidencia por el 'lavado' de materia por dichas fisuras, debido al drenado de agua, en un proceso denominado "sufosión" (Figura VI.19).

***Figura VI.19 Proceso de sufosión (lavado de materiales para relleno de cavernas).***




Si bien este fenómeno puede ocurrir después de una lluvia intensa, está bien documentado que la mayoría de las dolinas ocurren por la actividad antropogénica, esto es, por un incremento del flujo de agua debido a un mal diseño de sistemas de drenaje, o bien por una baja del nivel freático por exceso de extracción del acuífero. En vez de perdurar miles de años para la disolución de la roca que provoque fisuras suficientemente amplias para el 'lavado' del suelo, se puede generar un socavón (sinkhole) en el orden de horas o días, por el ingreso de una nueva corriente de agua.

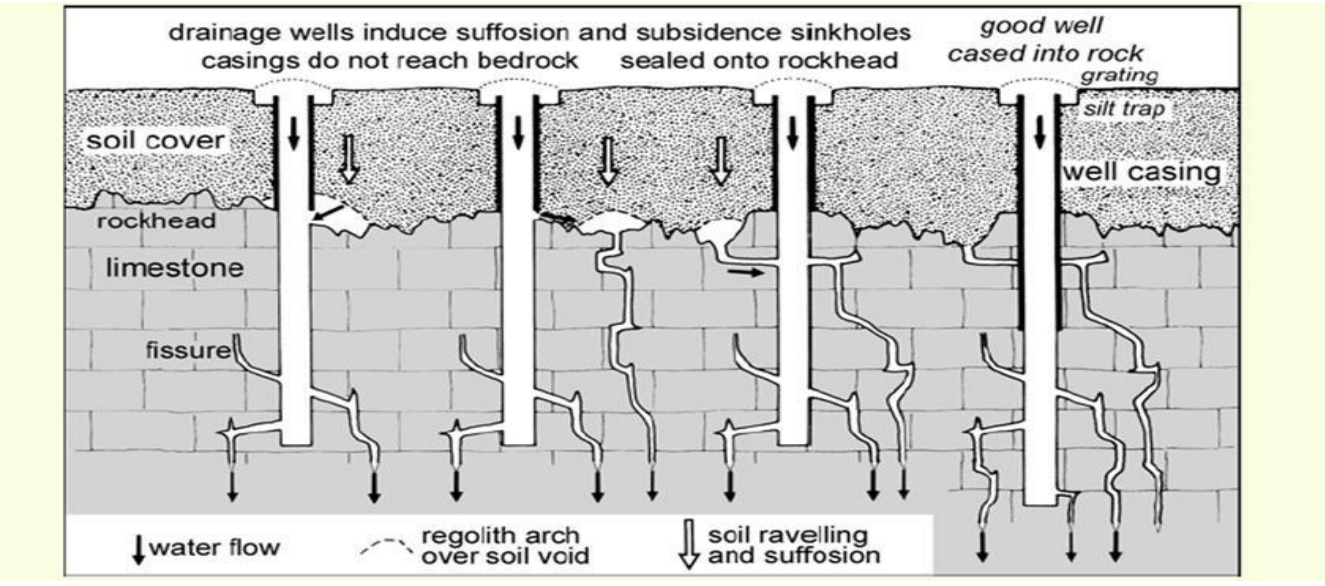
También, un exceso de carga en la caliza por estructuras que estén sobre una caverna puede provocar el colapso del techo de la misma, lo cual conlleva a un socavón.

La predicción de la ubicación de nuevas dolinas es imposible, excepto notar que posiblemente ocurran donde se presenta un nuevo 'sumidero' de agua en la superficie del suelo, por lo que se deberá realizar exploración en el entorno al desplante de las obras. Por otro lado, sólo eliminando la capa del suelo superficial se podrían revelar las fisuras y los potenciales sitios de dolinas, lo cual implica que no existe un método práctico de investigación superficial.

Cuando se construye una estructura que 'concentra' el escurrimiento natural de la lluvia, hacia puntos perimetrales, es cuando se genera un sitio potencial de una nueva dolina. La manera más efectiva en costo para minimizar el riesgo de este peligro geotécnico es el control del escurrimiento superficial de agua, para evitar su infiltración al subsuelo con el consecuente 'lavado' del suelo en cavidades kársticas.

Si existen lagunas de retención en el diseño del escurrimiento, éstas deberán estar muy alejadas de las estructuras, para evitar cualquier infiltración al subsuelo circundante a éstas. El drenaje directo al subsuelo (a través de pozos de inyección), en la formación de roca firme subterránea, evitaría el 'lavado' de materia previamente descrito. El factor crítico es el aseguramiento del sello del ademe del pozo con la roca firme, de suerte que no se presenten caminos para la fuga de agua hacia el suelo, o bien flujo de materia hacia el pozo, tal como se aprecia en la Figura VI.20.

***Figura VI.20 Perforación de pozos y colocación de ademes para evitar el lavado de materiales por saturación de agua al subsuelo.***

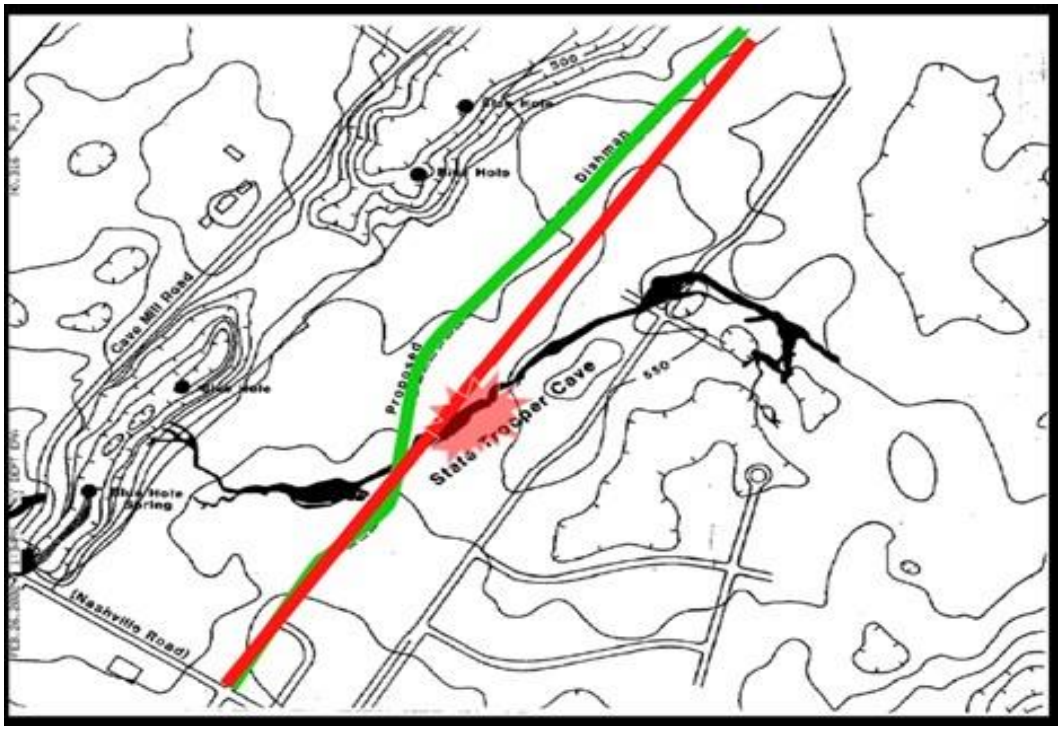


Lo único predecible de las cavernas es que son impredecibles, y la única manera de asegurar una roca sólida debajo de una estructura sobre terreno kárstíco es a través de la perforación exploratoria de pozos.

Una guía sobre la profundidad que deben alcanzar dichos pozos es que sea por lo menos igual al ancho de las posibles cavernas, cuya dimensión se puede estimar con base en la experiencia local de la estructura kárstica (e.g. la inspección de cuevas conocidas en el entorno, y el grado de 'madurez' del sistema kárstico). Una vez revelada, una caverna se podrá interpretar, pero no se podrá predecir antes de una inspección.

Es de notar que para una oquedad que es interceptada por dos pozos adyacentes, no se puede interpretar como una sola cueva en la extensión de una línea recta (Figura VI.21). Se requieren múltiples pozos para delimitar la topografía y alcance de una cueva.

***Figura VI.21 Prospección para la identificación de cavernas (cuya línea puede o no pasar por el área inestable).***

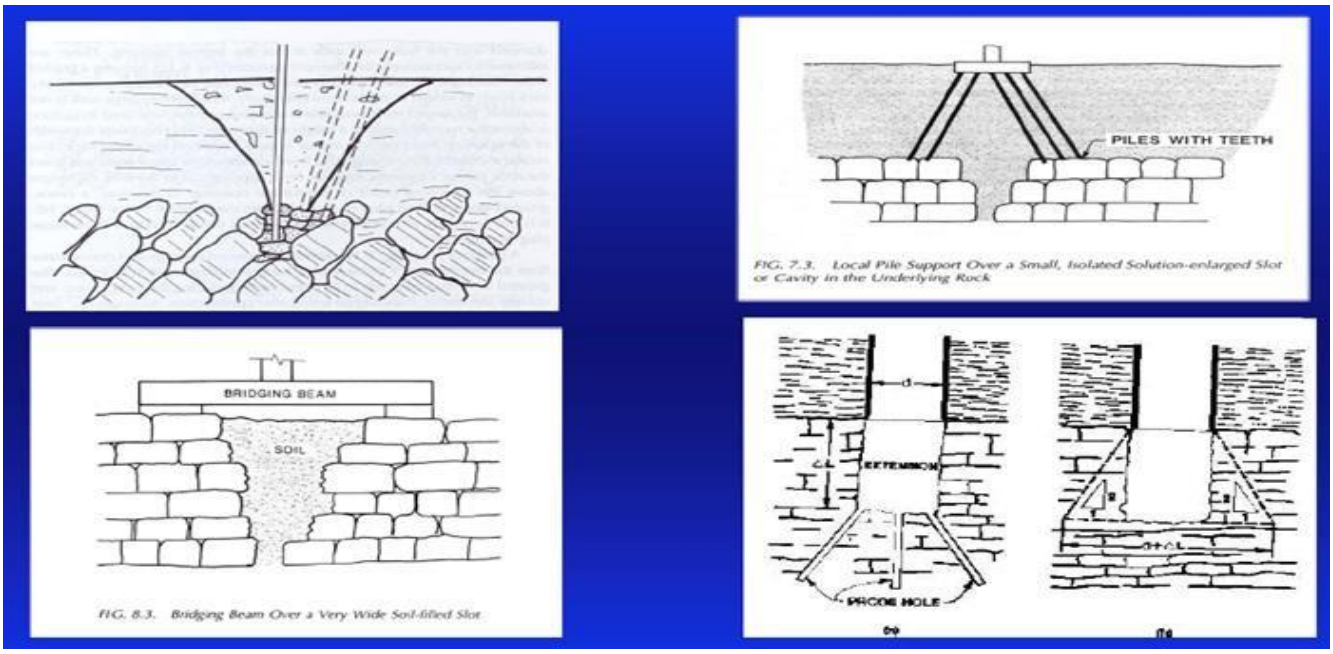



Desafortunadamente, son pocos los desarrolladores de infraestructura que están dispuestos a invertir tanto el tiempo como el dinero para la obtención de datos que cuantifiquen el riesgo geotécnico en terreno kárstico. Generalmente, asumen que el problema de dolinas se podrá 'controlar' sin afectar el costo y programa del proyecto. Pero ciertamente, los costos de remediación (que pueden llegar a un tercio del costo total del proyecto) se subestiman, y la recomendación del ingeniero geólogo de no construir o reubicar debe tomarse en serio para evitar compromisos irrevocables.

***Métodos ingenieriles para construir en suelos kársticos.***

Existen técnicas ingenieriles de construcción que permiten el desarrollo de infraestructura en suelos kársticos. Algunas de ellas se ilustran esquemáticamente en la Figura VI.22.

***Figura VI.22 Técnicas ingenieriles para construcción en suelos kársticos.***




***Fuente: American Society of Civil Engineers. After Sowers, G.F. 1996***

La carretera costera que se ha construido en la Península de Yucatán, la cual atraviesa el trazo de numerosas cuevas en su trayecto, es evidencia del éxito de la técnica de pilotaje anclado en la estructura sólida de la roca caliza, donde se presentan altas cargas y espesores de techo someros. Después de varias décadas de operación, es claro que ahora se dispone de un 'historial' de datos del efecto que han tenido dichos pilotes tanto sobre los flujos subterráneos (ii.e. calidad del agua y supervivencia de fauna natural de las cavernas), como en el desarrollo gradual de dolinas. Esto último refleja la efectividad que han tenido los sistemas de drenaje que se habrán implementado en dicha carretera.

El mayor riesgo geotécnico en suelo kárstico se genera por el desarrollo de nuevas dolinas, en particular, cuando se altera el dren natural de agua hacia el subsuelo. Ello está relacionado con la existencia de cuevas, que por sí mismas generan un riesgo menor. No puede haber guías generales sobre la escala, métodos y detalle sobre las investigaciones subterráneas del karst. Cada sitio es diferente y requiere una evaluación ad-hoc que arroje la confianza necesaria para mantener la integridad estructural. Los proyectos de construcción sobre suelo kárstico sólo deben proceder, cuando la variabilidad extrema de las condiciones del subsuelo se ha investigado.

***Riesgo sísmico.***

Ante un poco probable, pero posible riesgo sísmico al que está expuesta el área de estudio, y posibles áreas de importantes espesores de sedimentos costeros y lacustres no consolidados, no se deben escatimar las debidas acciones preventivas aún con una muy baja probabilidad de ocurrir un movimiento telúrico potencialmente capaz de alterar la estabilidad de los materiales de los taludes generados por las condiciones del marco tectónico regional.

En el mapa de Regionalización Sísmica de la República Mexicana indicada en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2015, (Figura VI.23), están catalogadas las características y frecuencia de la localidad del sitio del talud. En estos términos de sismicidad, el área de estudio se localiza dentro del área de la zona A.

***Figura VI.23 Ubicación del área de estudio de acuerdo de acuerdo con la Regionalización Sísmica de la República Mexicana.***

***Fuente: Manual de Diseño de Obras Civiles (CFE, 2015).***

La Zona A es de baja intensidad sísmica y con baja frecuencia. Aunque sí se han generado, sus registros históricos han sido muy pocos focos sísmicos, se caracteriza por una baja probabilidad de ocurrencia de focos sísmicos, donde las aceleraciones horizontales del terreno en general no sobrepasan el 10% de la aceleración gravitatoria.

***Huracanes.***

Los huracanes son fenómenos o factores climatológicos que se forman generalmente a mediados de mayo y finalizan a principios de noviembre, aunque en el Caribe y Golfo de México son más frecuentes en el lapso de agosto a octubre, provocando perjuicios a la población, debido a la gran cantidad de agua que traen consigo inundan viviendas ubicadas en las planicies. Asimismo, producen fuertes vientos, el oleaje y la marea de tormenta causa afectaciones en el suministro de energía eléctrica y la navegación aérea y marítima.

Las inestabilidades de baja presión que dan lugar a las tormentas tropicales, dependiendo de la energía acumulada, pueden originar ciclones o huracanes que se desplazan frecuentemente con trayectoria de este a oeste y, posteriormente, se dirigen hacia el norte. Para medir la intensidad de los vientos que produce un huracán se utiliza la escala de Saffir-Simpson, que se muestra en la Tabla VI.2.

***Tabla VI.2 Magnitud de los ciclones tropicales medidos en la escala de Saffir Simpson.***

| Fenómeno meteorológico | Efectos provocados | Velocidad | Presión |
|---|---|---|---|
| Onda tropical | Daños mínimos una vaguada o máxima curvatura ciclónica, circulación de baja presión. | < 62 km/h | |
| Perturbación tropical | Daños moderados la intensidad por lo menos 24 h. | | |
| Depresión tropical | Localmente destructiva con circulación del viento en sentido contrario a las manecillas del reloj. | | |
| Tormenta tropical | Destructivo. | 63-117 km/h | |
| Huracán | Destructivo. | 117 km/h | |
| Huracán categoría I | Altamente destructivo daños árboles, arbustos y casas móviles. | 118-153 km/h | Presión barométrica mínima o igual o superior a 980 mbar |
| Huracán categoría II | Altamente destructivo. | 154-177 km/h | Presión barométrica mínima de 965 a 979 mbar |
| Huracán categoría III | Extremadamente destructivo. | 178-209 km/h | Presión barométrica mínima de 945 a 964 mbar |
| Huracán categoría IV | Extremadamente destructivo. | 210-249 km/h | Presión barométrica mínima de 920 a 944 mbar |
| Huracán categoría V | Exageradamente destructivo. | Mayor a 249 km/h | Presión barométrica mínima por debajo de 920 mbar |

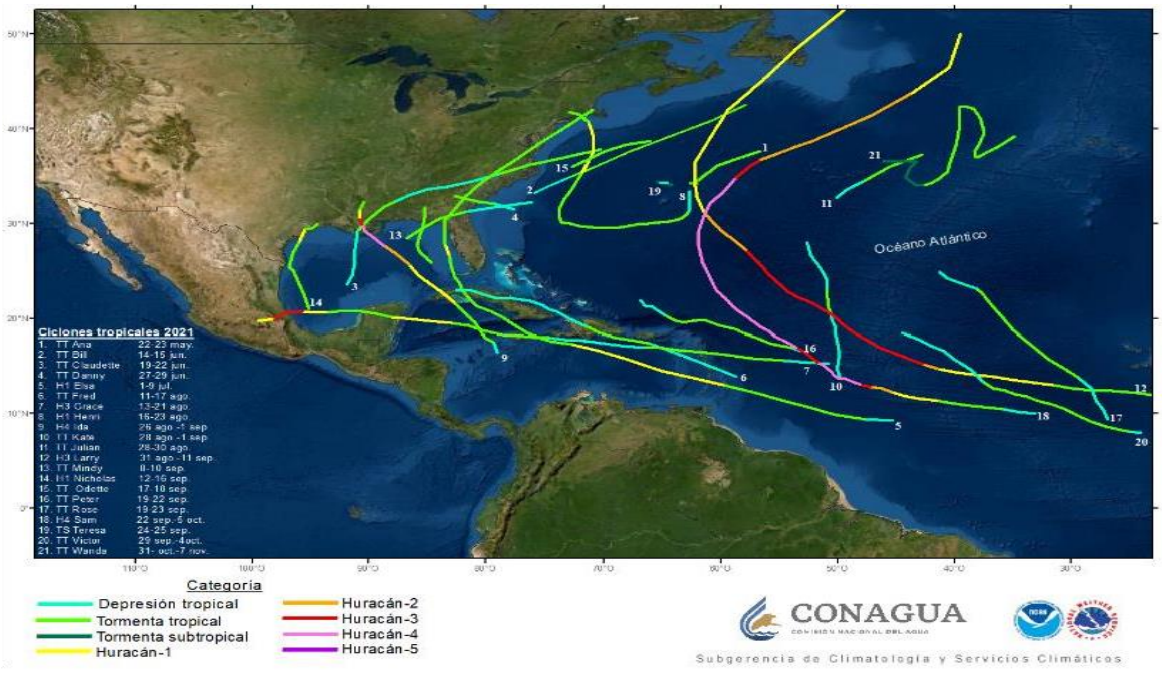
En la Tabla VI.3 se listan las características de los diversos ciclones tropicales que han impactado al área del proyecto.

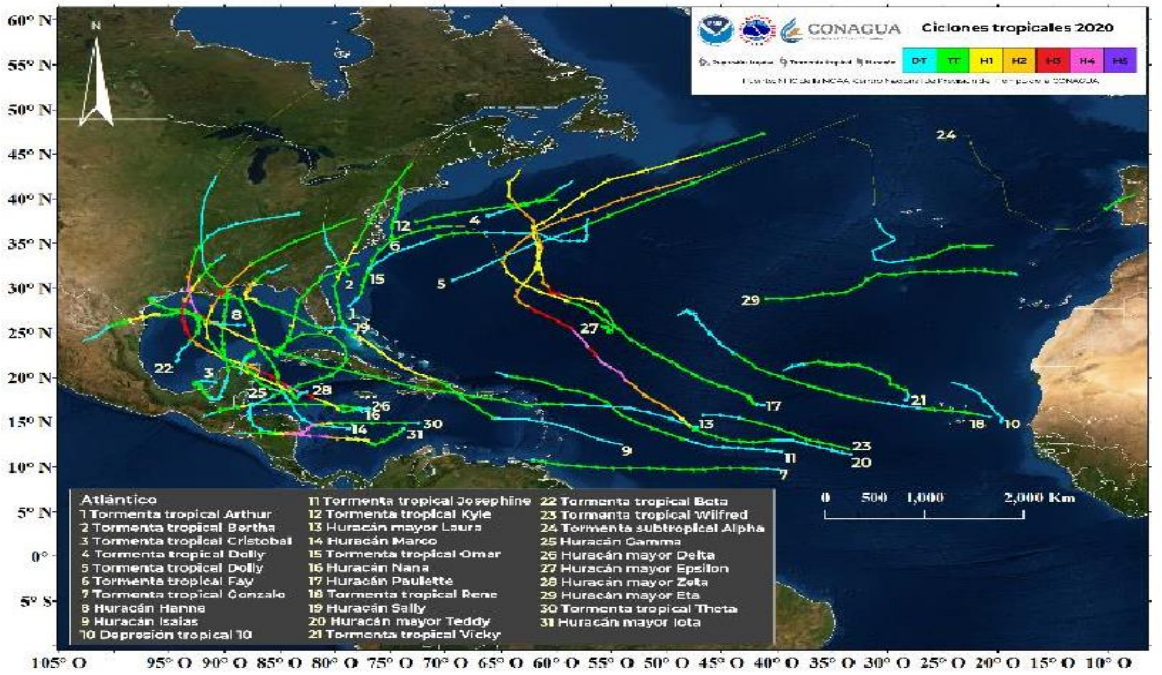
***Tabla VI.3 Ciclones tropicales registrados en el periodo de 1951 a 2020***

| Año | Nombre | Categoría Máxima | Categoría de impacto | Lugar de impacto | Fecha de impacto/ aproximación | Vientos máximos al impactar (km/h) | Presión mínima al impactar (mb) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1951 | Charlie | H4 | H4 | Akumal | 20/08 | 215 | |
| 2020 | Gamma | H1 | | A 5 km al S de Tulum | 03/10 | 120 | |
| 2020 | Zeta | H2 | H1 | NNE Tulum | 26/10 | 130 | 977 |
| 2005 | Cindy | H1 | DT | SE de Felipe Carrillo Puerto | 04/07 | 55 | |
| 2005 | Emily | H5 | H4 | Inmediaciones de Tulum | 18/07 | 210-249 | |
| 2005 | Stan | H1 | TT | ENE de Felipe Carrillo Puerto | 02/10 | 75-130 | |
| 2000 | Gordon | H1 | DT | 25 km SSE de Tulum | 14/09 | 55 | |
| 1996 | Dolly | H1 | DT | Entró por Felipe Carrillo Puerto | 20-23/08 | 110-130 | |
| 1995 | Roxanne | H3 | H3 | Afectó a Tulum | 08-20/10 | 185 | 958 |
| 1988 | Gilberto | H5 | H5 | Afectó a Felipe Carrillo Puerto | 08/09 | 278-324 | |
| 1967 | Beulah | H5 | H2 | Cercanía del Playa del Carmen | 17/09 | 175-165 | |
| 1965 | Debbie | TT | DT | Playa del Carmen | | | |
| 1955 | Hilda | H5 | | Afectó a Felipe Carrillo Puerto | 19/09 | | |
| 1952 | Numero 1 | TT | DT | | 02-feb | | |

***Fuente: CONAGUA***

***Figura VI.24 Trayectoria de los huracanes que se han presentado en el área***




***Fuente: CONAGUA, 2022.***

### *VI.2 Análisis de cercanía con polígonos urbanos*

Derivado de una consulta en el Sistema de Información Geográfica para la Evaluación del Impacto Ambiental (SIGEIA), así como imágenes satelitales de Google Earth, se realizó un análisis de cercanía con polígonos urbanos en un radio de 500 m alrededor de la periferia del proyecto, tal como se aprecia en la Figura VI.25, en la actualidad no hay asentamientos humanos o polígonos urbanos en un radio de 500 m alrededor del polígono.

***Figura IV.25 Cercanía con polígonos con respecto al SA***

***Fuente: SIGEIA***

El predio del proyecto no tiene proximidad con algún componente ambiental relevante en un radio de 500 m.

### *VI.3 Áreas naturales protegidas.*

Se procedió a identificar las áreas naturales protegidas cercanas al proyecto las cuales se incluyen en la Figura VI.26 y son las siguientes:

i. Reserva de la Biosfera Sian Ka'an, 8 km al SE del predio.
ii. Parque Nacional Tulum, 20 km al ENE del predio.

***Figura VI.26 Áreas naturales protegidas cercanas al proyecto***

***Fuente: SEDENA***

# VII. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS.

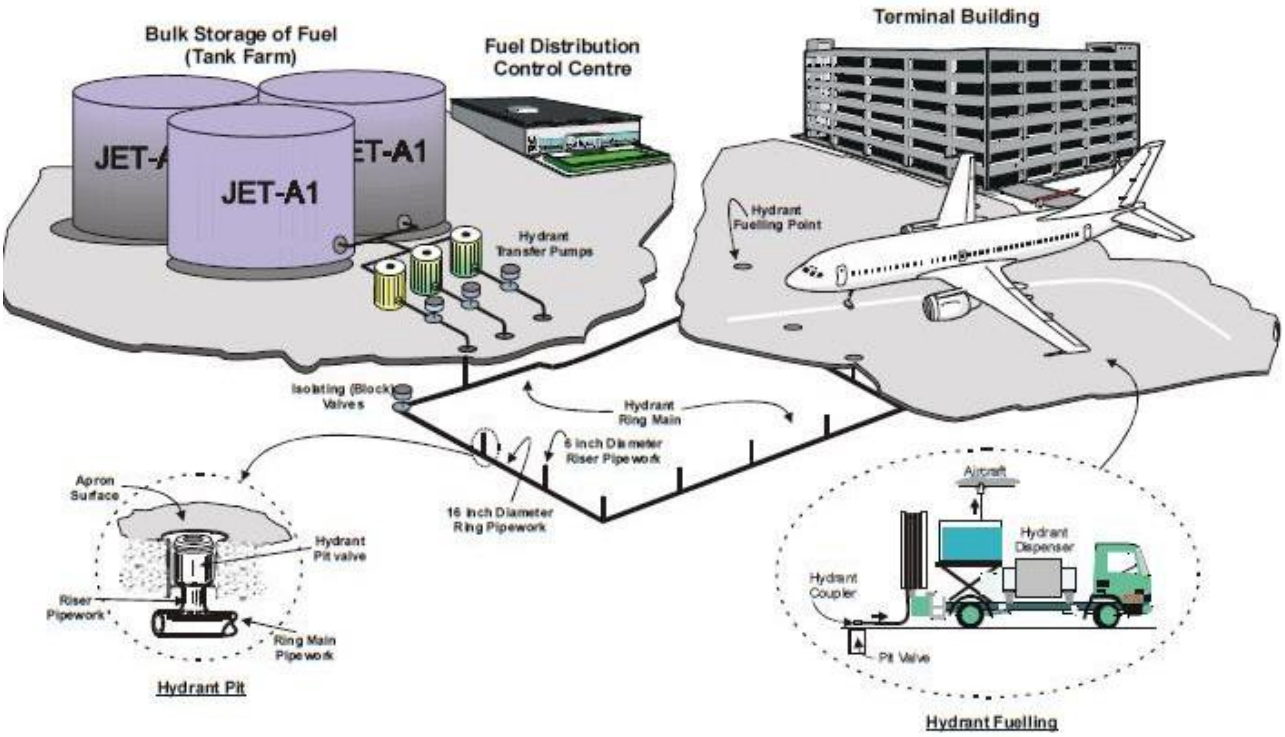
En esta sección se presenta la identificación y evaluación de riesgos en el proyecto, con base en la información proporcionada al Instituto de Ingeniería por el personal de SEDENA, presentada en las secciones anteriores y relacionada con los procesos que se mencionan en la misma, con énfasis particular en el almacenamiento, transporte y manejo de turbosina.

## *VII.1 Identificación de peligros y jerarquización de escenarios de riesgo.*

### *VII.1.1 Análisis preliminar de peligros.*

El Análisis Preliminar de Peligros del proyecto, se realiza a partir de un sistema típico de suministro, almacenamiento y distribución de combustible en aeropuertos, el cual se puede apreciar en la Figura VII.1.

***Figura VII.1 Sistema típico de suministro de combustible en aeropuertos.***



Para el análisis preliminar de peligros, se procedió a compilar, revisar y analizar el proceso relacionado con el manejo de turbosina, así como los puntos en los que se puede presentar potencialmente un riesgo mayor.

Con base en ello, se procedió a identificar de manera general aquellos riesgos principales asociados al manejo de turbosina, así como las medidas preventivas y/o correctivas establecidas en las mejores prácticas a nivel internacional en la materia. Resulta importante destacar que la identificación de peligros se centra en el sistema de manejo de turbosina en tierra, por lo que se omite el análisis de los riesgos asociados con la operación y/o mantenimiento de aeronaves, los cuales no forman parte del presente análisis de riesgos.

El resultado del análisis preliminar de peligros se muestra en la Tabla VII.1.

***Tabla VII.1 Análisis preliminar de peligros relacionados con el manejo de turbosina en una planta de combustibles.***

| Peligro | Causa | Consecuencia | Medidas preventivas o correctivas |
|---|---|---|---|
| Derrame de turbosina en la zona de suministro (descargaderas). | Fuga de turbosina en tubería de suministro y/o conexiones. | Incendio potencial. | Sistema de paro de emergencia.<br>Sistema de drenaje.<br>Sistema contra incendio.<br>Detectores de flama.<br>Plan de respuesta a emergencias. |
| Derrame de turbosina en área de hidrantes / cargade turbosina a aeronaves. | Fuga de turbosina por falla en hidrante o en manguera flexible.<br>Falla por error humano en la conexión.<br>Falla por desgaste en válvulaso accesorios. | Incendio potencialen área de plataforma. | Sistema de paro de emergencia.<br>Instalación de control tipo hombre muerto (Deadman's control) en hidrantes.<br>Cable de seguridad (lanyard) en hidrantes.<br>Sistema de drenaje.<br>Sistema contra incendio.<br>Plan de respuesta a emergencias. |

### *VII.1.2 Antecedentes de accidentes e incidentes en proyectos similares.*

Cualquier instalación de manejo de combustibles a gran escala asociada al manejo y almacenamiento de petrolíferos, tiene la imagen intrínseca en la sociedad de eventos potenciales de explosiones y/o incendios; casos catastróficos suscitados a nivel mundial con el manejo de combustibles están todavía presentes en la memoria de la población y la opinión pública en general. Por ello, las autoridades han establecido que las empresas que desarrollan actividades consideradas como altamente riesgosas, cuenten con elementos de seguridad tales que reduzcan a su mínima expresión el riesgo que implica el manejo de todo tipo de combustibles derivados del petróleo.

De la información recabada por la entidad, se tiene que el 73% de los derrames ocurren en vialidades (área de carga y descarga), y el restante 27% ocurre dentro de los diques de contención de los tanques de almacenamiento, debido a fallas en bridas, purgas, etc.

Se tiene una relación de las emergencias ambientales ocurridas de 2007 al 2014, para tener una idea de porcentaje de ocurrencia de estos:

- Derrame por sobrellenado en el tanque TV-1 ocurrido el 10 de julio de 2007 en la Estación de Combustibles de Colima, con una cantidad de 4 462 litros de turbosina (falla por llenado incorrecto de formato de campo y supervisión de descarga; asimismo, no existía dique impermeable).

- Derrame por sobrellenado en el tanque TV-3 ocurrido el 29 de agosto de 2007 en la Estación de Combustibles de México, con una cantidad de 342 444 litros de turbosina (falta de aviso a personal de Pemex para parar el bombeo del ducto y falla del dique de contención de derrames contaminando el subsuelo y suelo adyacente).

- Derrame por sobrellenado en el tanque TV-4 ocurrido el 18 de diciembre de 2007 en la Estación de Combustibles de Cozumel, con una cantidad de 9 685 litros de turbosina (falla por llenado incorrecto de formato de campo y supervisión de descarga; asimismo, falla del dique de contención de derrames contaminando el subsuelo adyacente y toda la trayectoria del drenaje industrial).

- Derrame de turbosina en un hidrante fuera de servicio contiguo al hidrante de la posición 10 de la plataforma, debido a la ruptura de un empaque de la brida ciega. Ocurrido el 10 de mayo de 2011 en la plataforma del Aeropuerto de Mazatlán, con una cantidad de 49 036 litros de turbosina.

- Derrame al estar prestando un servicio de suministro con un dispensador remolcable a una aeronave, detectando una baja de presión, lo que activa el paro de emergencia. Se localiza derrame de producto en la posición 7, debido a desprendimiento de junta de expansión. Ocurrido el 1 de diciembre de 2011 en la plataforma del Aeropuerto de Chihuahua con una cantidad de 3 150 litros de turbosina.

- El 6 de diciembre del 2011 se identificó en la cisterna que se localiza entre el Edificio Terminal y la Torre de Control del Aeropuerto de La Paz, una "nata" de hidrocarburo sobre la superficie del agua, derivándose lo anterior de fuga en el tramo de la posición 5 de 4" de diámetro por falla geológica. La cantidad estimada derramada es de aproximadamente 200 000 litros de turbosina.

- Derrame por volcadura de auto tanque dentro de las instalaciones de la Estación de Combustibles México, ocurrido el 26 de mayo de 2012 con una cantidad de 5 100 litros de turbosina, debido a exceso de velocidad en curva.

- Derrame por sobrellenado en el tanque TV-4 ocurrido el 4 de agosto de 2012 en la Estación de Combustibles de Guadalajara, con una cantidad de 18 205 litros de turbosina (falla en las operaciones del dique de contención de derrames contaminando el subsuelo adyacente y arroyo en el aeropuerto).

- Derrame por volcadura de auto tanque dentro de las instalaciones de la Estación de Combustibles Torreón, ocurrido el 25 de febrero de 2013 con una cantidad de 17 200 litros de turbosina, debido a vencimiento por corrosión de patín de tanque con combustible a su máxima capacidad por reparación del motor desacoplado para su mantenimiento.

- Derrame por sobrellenado de tanque de producto no conforme de Pemex dentro de las instalaciones de la Estación de Combustibles México, ocurrido el 22 de noviembre de 2013 con

una cantidad de 2 000 litros de turbosina (falla en válvula de Pemex provocando el sobrellenado del tanque, asimismo el dique no era hermético).

De manera similar, se tiene el reporte de derrames de combustible ocurridos en 2013 en el área de plataformas del actual Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), los cuales se describen a continuación:

- 13 de enero, 09:20 horas. Posición 35. Volaris. Durante la descarga de combustible, el dispensador de ASA Combustibles presentó falla ocasionando que se derramara por la válvula por aproximadamente 2 min.

- 06 de febrero, 07:17 horas. Posición 36. Alaska Airlines. Durante la recarga de combustible, se presentó una operación errónea.

- 06 de febrero, 07:35 horas. Posición 63. Aeroméxico. Derrame aproximado de 8 m2 por falla del hidrante.

- 06 de febrero, 08:01 horas. Posición 68. Aeroméxico Connect. Derrame de líquido hidráulico.

- 09 de febrero, 09:40 horas. Posición 22. Iberia. Derrame de 130 m2.

- 11 de marzo, 19:35 horas. Posición 62. ASA Combustibles. Falla en empaque del dispensador durante el abastecimiento de la aeronave de Aeroméxico Connect, ocasionando un derrame de 20 m2.

- 20 de marzo, 10:10 horas. Posición 20. United Airlines. Derrame ocasionado por falla de válvula de la aeronave.

- 07 de abril, 19:43 horas. Posición S7. United Airlines. Personal de la aerolínea reporta plataforma contaminada por combustible de aproximadamente 60 m2.

- 29 de abril, 13:21 horas. Posición 31. American Airlines. Falla en la indicación de carga.

- 31 de mayo, 07:15 horas. Posición 18. Volaris. Durante el abastecimiento de combustible, se genera derrame de 1 m2.

- 16 de junio, 16:00 horas. Posición 25. Interjet. Durante el abastecimiento de combustible, la manguera del dispensador se zafó del equipo, contaminando la plataforma por aproximadamente 25 m2.

- 14 de julio, 06:25 horas. Posición 33. Air Canada. Durante el abastecimiento de combustible, la manguera del dispensador no se desconectó de la aeronave y al mover se daña el cople de la aeronave, ocasionando un derrame de 15 m2.

- 02 de agosto, 15:20 horas. Posición 4. Dispensador de combustible con fuga. CREI realiza trabajos de protección.

- 27 de agosto, 13:37 horas. Posición 63. Aeroméxico. Falla en válvula de la aeronave.

- 22 de septiembre, 09:35 horas. Posición 44. Aero Unión. Falla de equipo, afectando un área de 50 m2.

- 09 de octubre, 00:10 horas. Posición 18. Volaris. Problema con el hidrante de la posición, por lo que se derrama combustible por aproximadamente 4 m2.

- 25 de octubre, 03:05 horas. Posición 12. Interjet. Se reporta derrame de líquido hidráulico en la rueda 4 del tren principal.

- 01 de noviembre, 06:57 horas. Posición 2. Interjet. Fuga de combustible en la toma de la aeronave al abrir la válvula de la presión del combustible.

- 05 de noviembre, 17:20 horas. Posición 54. Aeroméxico. Falla en la válvula de la semi- ala.

En la tabla VII.2 se incluyen los eventos registrados, relacionados con el uso y manejo de turbosina en aeropuertos nacionales.

***Tabla VII.2 Antecedentes de accidentes e incidentes relacionados con el manejo de turbosina en aeropuertos nacionales.***

| No. | Año | Ciudad o País | Instalación | Sustancia involucrada | Evento | Causa(s) del accidente o incidente | Nivel de afectación (personal, población, medio ambiente, entre otros) | Acciones realizadas para su atención | Fuente consultada |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2007 | Colima | Aeropuerto | Turbosina | Derrame por sobrellenado | Falla por llenado incorrecto de formato de campo y supervisión de descarga. No existía dique impermeable. | Contaminación de suelo y subsuelo en área de tanques de turbosina | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 2 | 2007 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame por sobrellenado | Falta de aviso al personal de Pemex para parar bombeo de ducto y falla de dique de contención de derrames. | Contaminación de suelo y subsuelo en área de tanques de turbosina | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 3 | 2007 | Cozumel | Aeropuerto | Turbosina | Derrame por sobrellenado | Falla por llenado incorrecto de formato de campo y supervisión de descarga. Falla de dique de contención. | Contaminación de suelo y subsuelo en área de tanques de turbosina y la trayectoria de drenaje industrial | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 4 | 2011 | Mazatlán | Aeropuerto | Turbosina | Derrame en hidrante fuera de servicio | Ruptura de un empaque de la brida ciega | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 5 | 2011 | Chihuahua | Aeropuerto | Turbosina | Derrame en dispensador remolcable | Desprendimiento de junta de expansión | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 6 | 2011 | La Paz | Aeropuerto | Turbosina | Derrame en posición 5 | Ruptura de tubería por falla geológica | Contaminación de agua, suelo y subsuelo en área adyacente | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 7 | 2012 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame en autotanque | Derrame por volcadura de autotanque debido a exceso de velocidad en curva | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 8 | 2012 | Guadalajara | Aeropuerto | Turbosina | Derrame por sobrellenado | Falla de dique de contención | Contaminación de agua, suelo y subsuelo en área adyacente | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 9 | 2013 | Torreón | Aeropuerto | Turbosina | Derrame en autotanque | Derrame por corrosión de patín | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 10 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame por sobrellenado | Falla en válvula de Pemex y dique no hermético | Contaminación de suelo y subsuelo en área de tanques de turbosina | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 11 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame en válvula | Falla en dispensador de ASA | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 35 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 12 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | Derrame por operación errónea (error humano) | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 36 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 13 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | Derrame por falla en hidrante | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 63 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 14 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Líquido hidráulico | Derrame | | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 68 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 15 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 22 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | Derrame por falla en empaque del dispensador | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 62 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 17 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | Derrame por falla en válvula de aeronave | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 20 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 18 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | Derrame por falla en indicación de carga | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 31 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 19 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 18 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 20 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | Derrame por falla en manguera del dispensador | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 25 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 21 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | Derrame por falla en manguera del dispensador y daño en cople de aeronave | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 33 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 22 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | Derrame por falla en dispensador | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 4 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 23 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | Derrame por falla en válvula de aeronave | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 63 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 24 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | Derrame por falla en equipo (no especificado) | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 44 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 25 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame durante carga | Derrame por falla en hidrante | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 18 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 26 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Líquido hidráulico | Derrame | Derrame en rueda 4 del tren principal de aeronave | Contaminación de suelo en área adyacente a Posición 12 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 27 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame | Derrame de combustible en la toma de la aeronave al abrir la válvula de presión. | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 2 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |
| 28 | 2013 | Ciudad de México | Aeropuerto | Turbosina | Derrame | Derrame por falla en válvula de semi-ala de aeronave. | Contaminación de suelo y subsuelo en área adyacente a Posición 54 | | Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA) |

Aun cuando no hay reportes específicos de fugas o derrames en ductos de turbosina, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) posee registros de las emergencias ambientales reportadas a la dependencia en el período del 2000 al 2012. Del total de eventos relacionados con los medios de transporte de sustancias peligrosas (5 899), el 51.2% (1 974 eventos) ocurrieron en ductos a nivel nacional.

### *VII.1.3 Identificación de peligros y de escenarios de riesgo.*

Métodos de análisis.

Riesgo se define como la combinación de la frecuencia esperada y de las consecuencias de los accidentes que pueden ocurrir como resultado de una actividad determinada. La evaluación de riesgos es un proceso formal para mejorar la comprensión que se tiene del riesgo asociado a una actividad. Para evaluar los riesgos se deben contestar las siguientes preguntas básicas:

- ¿Qué puede ocurrir?
- ¿Cuál es la probabilidad de que ocurra?
- ¿Qué impacto tendría?

Por lo tanto, la evaluación de riesgos consiste en identificar los accidentes de interés que puedan ocurrir, estimar la frecuencia de que ocurran y evaluar sus posibles consecuencias.

La evaluación cualitativa de riesgo consiste en identificar los accidentes de interés. Con este fin, se ha utilizado el método HazOp, que se describe más adelante.

La evaluación cuantitativa de riesgo consiste en evaluar los otros dos aspectos del riesgo, la frecuencia de ocurrencia y la consecuencia. Para efectuar una evaluación cuantitativa de riesgo se pueden usar diferentes técnicas de análisis dependiendo de cuáles sean los objetivos del estudio. El enfoque técnico utilizado en este estudio ha sido adaptado para satisfacer las necesidades actuales del proyecto, para lo cual se utilizaron las siguientes técnicas:

- Revisión de Riesgos de Instalaciones (FRR, del inglés Facility Risk Review). Esta técnica enfoca los recursos de prevención de pérdidas sobre las amenazas más importantes para la producción y seguridad del personal en una instalación.

- Análisis de Capas (o barreras) de Protección, LOPA, del inglés Layer of Protection Analysis. Esta técnica constituye una poderosa herramienta analítica para evaluar la efectividad de las capas de protección empleadas para mitigar el riesgo de los procesos. El análisis LOPA se incluye en la sección XIV de este documento.

En el estudio de identificación de riesgos, uno de los objetivos es identificar los peligros en los procesos y examinar de qué manera se pueden reducir o eliminar los riesgos que presentan estos peligros a los trabajadores, a la instalación o al medio ambiente. En esta sección se describen las técnicas de análisis que se utilizaron y los temas que se trataron en el curso del análisis.

Cada escenario de accidente potencial identificado en el HazOp fue sometido a la técnica FRR y de matriz de jerarquización, con el fin de determinar su categoría de consecuencias, frecuencia

y riesgo. Esto permitió jerarquizar los escenarios y priorizar las recomendaciones emitidas con el fin de prevenir, minimizar y/o atender los posibles accidentes inherentes a la operación del proyecto.

Con base en los resultados de jerarquización obtenidos, se calcularon los índices de riesgo correspondientes a cada uno de los escenarios de accidente previamente identificados.

El estándar reconocido internacionalmente en el cual se basa la metodología que se ha implementado en el Análisis de Riesgo (i.e. HazOp) está descrito en OSHA 1910.119 Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals, cf. 29 CFR 1910.119; y en EPA Risk Management Program (RMP), que está prescrito en la sección 112 del 40 CFR 68 (Code of Federal Regulations).

***Análisis de riesgo y operatividad (HazOp).***

La metodología de análisis de riesgos y operatividad (del inglés Hazard and Operability Analysis, HazOp) involucra un examen metódico de los documentos de diseño que describen las instalaciones, cuyo objetivo es identificar los problemas de riesgo asociados a los procesos de operación de dichas instalaciones que puedan causar un accidente.

Se aplica un procedimiento sistematizado y analítico para la identificación de problemas de operatividad o situaciones de riesgo (Escenarios de Accidentes Potenciales), resultantes de desviaciones respecto a la intención original de diseño y que pueden llevar a consecuencias indeseables. Las secciones o nodos del proceso se analizan con el uso de un conjunto de palabras clave (Tabla VII.3) que son aplicadas en cada sección o nodo específico y son combinadas con los respectivos parámetros de proceso (también llamados parámetros clave) que permiten identificar desviaciones potenciales de las intenciones de operación y diseño de la instalación.

***Tabla VII.3 Palabras clave del análisis HazOp.***

| Palabras clave | Significado |
|---|---|
| No (nulo) | Negación de la intención del diseño |
| Menos (bajo) | Decremento cuantitativo |
| Más (alto) | Incremento cuantitativo |
| Además de | Incremento cualitativo |
| Parte de | Decremento cualitativo |
| Inverso | Oposición lógica de la intención |
| Distinto | Sustitución completa |

Aunque el método está enfocado básicamente a identificar sucesos iniciadores relativos a la operación de la instalación, por su propia esencia también puede ser utilizado para sucesos iniciadores externos a la misma. Los parámetros clave de proceso normalmente usados son flujo, presión, temperatura, nivel y concentración; sin embargo, pueden utilizarse otros parámetros de proceso, según convenga al análisis y al equipo de análisis de riesgos.

La aplicación de las palabras y los parámetros clave en el análisis HazOp tiene como objetivo identificar todas las desviaciones significativas que en cada una de las secciones del proceso se apartan de las intenciones del diseño. Para cada sección del proceso se evalúa un grupo estándar de desviaciones potenciales, tales como las que se mencionan en la Tabla VII.4.

***Tabla VII.4 Desviaciones típicas para cada sección de proceso.***

| Desviación* | Tipo de sección de proceso | |
|---|---|---|
| | Tanques / recipientes | Línea con bomba |
| Flujo alto | | X |
| Flujo bajo o cero flujos | | X |
| Flujo inverso o flujo mal dirigido | | X |
| Nivel alto | X | |
| Nivel bajo | X | |
| Alta temperatura | X | X |
| Baja temperatura | X | X |
| Alta presión | X | X |
| Baja presión | X | X |
| Alta concentración de contaminantes | X | X |
| Desviaciones durante la puesta en operación | X | X |
| Desviaciones durante el paro | X | X |
| Desviaciones durante el mantenimiento | X | X |
| Desviaciones durante el muestreo | X | X |

*Estas son desviaciones típicas consideradas en la revisión HazOp. Algunas desviaciones se pueden eliminar, modificar y/o añadir en cada nodo según convenga al análisis.

Para cada palabra clave deben considerarse las causas que pueden originar la desviación, las consecuencias, salvaguardas y recomendaciones o acciones a seguir para atender dicha desviación, o en su defecto, indicar la necesidad de realizar estudios más completos o establecer que se requiere contar con más información para evaluar la desviación.

Los elementos fundamentales del análisis HazOp se definen de la siguiente manera:

- *Intención de diseño:* Estados de operación en que los sistemas funcionan como se espera de ellos.
- *Desviaciones:* Estados de operación que se apartan de la intención de diseño (alto /bajo / nulo – flujo / nivel / temperatura / presión).
- *Causas:* Razones que explican por qué ocurren las desviaciones.
- *Consecuencias:* Efectos potenciales de las desviaciones.
- *Salvaguardas:* Medidas diseñadas para prevenir las causas o mitigar las consecuencias de las desviaciones.
- *Recomendaciones:* Sugerencias para efectuar cambios en el diseño, en los procedimientos, o para realizar estudios complementarios.

Existen causas típicas de fuga o ruptura de varios tipos de equipos de proceso que se consideran en un análisis de riesgo en procesos. En general, no se toman en cuenta otras causas genéricas de riesgo de proceso (sabotaje, errores de programación de software, etc.), ni tampoco se mencionan como causas de desviaciones del proceso la mayoría de los eventos externos, como pueden ser los desastres naturales o los accidentes de aviación, los cuales es factible considerarse como "factores externos". Sin embargo, se consideran los efectos de daños en los equipos y de fugas producidas por los impactos externos más comunes (choque de vehículos, choque de cargas de grúas, etc.).

***Tabla VII.5 Causas típicas de fuga o ruptura para ciertos tipos de secciones de proceso.***

| Sección del proceso | Causas |
|---|---|
| Líneas y bombas | Cavitación de una bomba |
| | Corrosión / erosión |
| | "Carga muerta" por descarga cerrada |
| | Fuego exterior |
| | Impacto exterior |
| | Falla de empaquetaduras de bridas y sellos |
| | Golpe de ariete |
| | Mantenimiento inadecuado |
| | Falla de líneas de instrumentos |
| | Defectos de materiales |
| | Falla por no apertura de dispositivos de seguridad bajo demanda |
| | Expansión térmica cuando el equipo o las tuberías están bloqueados |
| | Válvula con fuga o mal alineada que descarga en la atmósfera |
| | Vibración |
| Tanques y recipientes | Corrosión |
| | Fuego externo |
| | Impacto externo |
| | Falla de empaquetaduras de bridas y sellos |
| | Mantenimiento inadecuado |
| | Falla de línea en un instrumento |
| | Defecto de material |
| | Falla por no apertura de dispositivos de seguridad bajo demanda |
| | Vacío |
| | Válvula con fuga o mal alineada que descarga en la atmósfera |

Con base en lo previamente descrito, resulta que el propósito de un análisis HazOp es determinar desviaciones potenciales a la intención de diseño original y que puedan desencadenar impactos a la población, al personal, al medio ambiente y/o a las instalaciones (Escenarios de Accidentes Potenciales). Esta técnica de análisis puede utilizarse tanto en procesos continuos como en procesos por lotes, y puede incluso ser adaptada para evaluar procedimientos escritos.

Los resultados del análisis HazOp incluyen aspectos como identificación de situaciones potenciales de peligro, detección de problemas de operación, mejoras para incrementar el nivel de seguridad de las instalaciones y recomendaciones que conduzcan hacia áreas de estudio en donde no sea posible tener alguna conclusión al respecto por falta de información. Los resultados del análisis sobre las causas, efectos y salvaguardas definidas para cada desviación de cada nodo o sección del proceso analizada son registrados en un formato que permite dar seguimiento de manera sencilla al proceso seguido en el análisis.

Para cada desviación puede haber múltiples factores humanos que contribuyan a esa desviación, dependiendo del personal involucrado, de la hora del día en que la desviación ocurre, del tiempo que hace, etc. En consecuencia, en el presente estudio no se ha intentado identificar los diversos factores humanos que pueden contribuir de manera dominante a causar alguna desviación considerada.

En vez de eso, se ha procedido a evaluar cada desviación con ayuda de una lista comprensiva de

"factores humanos" por errores de procedimientos, que típicamente contribuyen a esa desviación, las cuales consisten en las siguientes:

- Proceso nuevo (o experiencia insuficiente con el proceso).
- Equipo fuera de servicio o que funciona mal (la válvula se queda abierta, el arranque del motor funciona mal).
- Falta de comunicación entre los operadores.
- Al operador no le llega ninguna información retroactiva del proceso.
- Instrumentos mal calibrados.
- Por demanda de producción, no hay tiempo suficiente para efectuar todos los pasos.
- Confusión en el cambio de turnos.
- Confusión ocasionada por formato pobre, distracciones, o comunicación pobre.
- El operador se salta un paso del procedimiento (o toma un atajo).
- La organización física del equipo hace más conveniente realizar un paso antes/después o realizar varios pasos al mismo tiempo/en el mismo sitio.
- Intento de realizar el procedimiento a toda velocidad o de ganar tiempo perdido.
- Distracción o falta de atención del operador.

Las salvaguardas son características del proceso y/o pasos de los procedimientos cuya intención es reducir la probabilidad de una o más de las causas que producen una consecuencia dada, o reducir la gravedad de la consecuencia en cuestión. Las salvaguardas consisten en los controles específicos o protecciones que se pueden aplicar a una causa posible o a la consecuencia potencial de una desviación. Típicamente, las salvaguardas de una desviación particular, o están colocadas físicamente en la sección del proceso revisada, o se aplican de alguna otra manera a la sección de proceso correspondiente.

Por lo general, en todas las instalaciones industriales de proceso, y más aún en la industria del petróleo y del gas, se incluye desde las bases de diseño, la definición de cierto número de medidas generales de defensa contra trastornos peligrosos en los diversos procesos. Muchas de estas "salvaguardas genéricas" reducen la probabilidad o la gravedad de las descargas de materiales peligrosos de los equipos de proceso. Otras contribuyen a que los operadores respondan más rápida y eficientemente para limitar los efectos de estas descargas.

Las salvaguardas que generalmente se aplican en todas las secciones del proceso o en todos los procedimientos operativos de los procesos, para proteger, controlar o mitigar las consecuencias de descargas de material, son las siguientes:

- Tuberías:
  - Especificaciones de tuberías
  - Consideraciones de códigos de diseño
  - Tolerancias adicionales de corrosión en tubería y equipo
  - Guías de soldadura
  - Especificaciones de empaques
  - Relevado de esfuerzos

- Bombas y compresores:
  - Sellos mecánicos especiales en bombas de aceite crudo
  - Sellos de vástagos en compresoras
  - Drenes en líneas y carcasas de bombas y compresoras

- Válvulas:
  - Especificación de válvulas
  - Consideraciones de código de diseño
  - Especificación de sellos y empaquetaduras
  - Válvulas diseñadas para posicionar de una forma segura a fallas de aire o deenergía eléctrica

- Prevención de corrosión:
  - Pruebas periódicas no destructivas e inspección de tuberías, equipos yestructuras
  - Pintura y recubrimientos en tuberías, equipos y estructuras
  - Inyección de inhibidores de corrosión
  - Sistemas de protección catódica

- Sistemas de mantenimiento preventivo de equipo:

Medición de vibraciones del equipo giratorio

  - Programas de lubricación
  - Programas de inspección de sellos
  - Base de datos para fallas de equipo

- Órdenes del trabajo de mantenimiento y permisos para trabajos con riesgo:
  - Trabajos calientes
  - Trabajos peligrosos

- Protección de controles. Salas de control remoto con:
  - Suministro de electricidad de emergencia
  - Sistema de comunicaciones de emergencia
  - Protección en entradas y salidas de tuberías y cables

- Sistemas de control:
  - Sistemas de control distribuido en la planta eléctrica
  - Controladores lógicos programables (PLC) para la protección de equiposrotativos en bombas y compresores

- Pruebas de instrumentación:
  - Alarmas por desviación respecto al punto de control de las variables de proceso
  - Pruebas y calibración periódica de la instrumentación de proceso
  - Registro de las calibraciones de los instrumentos
  - Registro de las modificaciones en los sistemas y equipo (software y hardware)
  - Pruebas de los dispositivos de alarma
  - Registros de cambios y pruebas de los dispositivos de alarma

- Registro de todos los puntos de calibración de interruptores y alarmas deemergencia para posibilitar auditorias

- Válvulas de seguridad:
- Desmontado, desensamblado y pruebas periódicas

- Manejo de vapores peligrosos:
- Sistemas de relevo de hidrocarburos descargando a un quemador

- Aislamiento del proceso:
- Válvulas de bloqueo manual para la mayor parte de los componentes
- Válvulas de bloqueo de operación remota en paquetes de medición einterruptores de paro de bombas y compresores
- Válvulas de cierre hermético en sistemas de paro de equipos importantes

- Equipo de relevo, redundancia y diversidad:
- Redundancia en bombas, compresores, turbogeneradores, sistema de distribución de fuerza, bombas contra incendio, compresores de aire de instrumentos y servicios
- Redundancia en instrumentos, cuando se requiera, en válvulas de control,válvulas de relevo y válvulas de seguridad
- Sistemas de arranque automático para bombas contra incendio, en turbogeneradores y en generador de emergencia para instrumentación de control
- Prueba e inspección de componentes de sistemas redundantes
- Sistemas "no interrumpibles" de fuerza eléctrica para instrumentación crítica, señalización y comunicación
- Generadores de fuerza de emergencia para iluminación y comunicación

- Sistemas de contención:
- Diques de contención en áreas grandes de almacenamiento
- Sistemas de contención en bases de bombas
- Sistemas de contención de escurrimientos pluviales (drenaje pluvial)
- Políticas para el control de derrames

- Sistemas de supresión y extinción de fuego:
- Cortinas de diluvio para protección de equipos críticos
- Sistemas de extinción de fuego con:
  - Espuma
  - $CO_2$
  - Polvo químico seco
  - Agua
- Bombas de agua contra incendio operadas automáticamente
- Bombas de relevo para agua de contra incendio operadas con motor diésel
- Monitores con boquillas fijas y móviles
- Extintores de fuego en cuartos de control recomendados para equipo eléctrico.

- Protección personal:
  - Equipo de protección personal incluyendo:
    - Aparato autónomo para respiración
      - Aire de respiración
      - Paquetes de escape
      - Respiradores
      - Ropa de protección
  - Inspección y prueba periódica de los sistemas de protección personal y deseguridad, incluyendo:
    - Suministro de aire al sistema autónomo de respiración
    - Regaderas de seguridad
    - Suministro de aire de respiración
  - Disponibilidad de:
    - Paquete para primeros auxilios
    - Clínica local para el tratamiento de primeros auxilios
    - Paquetes para la atención de casos de exposición personal
  - Programa específico de salud y de higiene del área y de la unidad, incluyendo revisiones periódicas por ruido y solventes

- Respuesta a las emergencias:
  - Sistemas de emergencia de comunicación remota incluyendo radios portátiles personales de dos vías, trabajo en pareja para ejecución de operaciones críticas o riesgosas, procedimientos de comunicaciones de emergencia y teléfonos
  - Brigadas contra incendio dedicadas específicamente a esta actividad
  - Brigadas contra incendio de apoyo
  - Simulacros contra incendio
  - Planes de contingencia
  - Simulacros de respuesta a emergencia y desastre
  - Procedimientos de emergencia para incidentes especiales

- Documentación general:
  - Documentación estableciendo normatividad y procedimientos de operación
  - Programas de seguridad documentados
  - Sistema de comunicación sobre el estado de la instalación al cambio de turnos, incluyendo bitácoras, hojas de datos del turno anterior y reportes del estado queguarda la unidad
  - Programa de seguridad específico de la instalación y documentación de incidentes mayores

- Capacitación:
  - Capacitación y actualización formal del personal de operación y mantenimiento
  - Programa de calificación y certificación del personal

Normalmente, la integridad de los equipos de proceso y la contención de los materiales no son un problema si se diseña, construye y se operan las instalaciones de acuerdo a los estándares y se cuenta con un programa de adiestramiento y de mantenimiento adecuado. Sin embargo, en ocasiones, los fluidos del proceso fugan como consecuencia del desgaste o deterioro de algunas partes de las tuberías o equipo, en cuyo caso el personal de operación y mantenimiento de la

planta interviene eliminando estas pequeñas fugas, ya sea mediante ajustes o reparaciones. Los incidentes más serios suceden en forma inesperada; en estos casos se requiere una respuesta inmediata tomando las acciones que correspondan a fin de prevenir la exposición del personal y de la población.

El diseño civil y mecánico considera las áreas identificadas como vulnerables (susceptibles a terremotos o sismicidad, corrimientos de tierra, derrumbes o hundimientos, inundaciones, vulcanología, fallas geológicas, fracturas geológicas, deslizamientos, entre otros) que podrían interactuar con el proyecto. Considerando los aspectos mencionados, el análisis HazOp del Proyecto se realizó a partir de los diversos sistemas que lo componen, con énfasis en el sistema de abastecimiento, almacenamiento, transporte y manejo de turbosina.

La división de los nodos o secciones de estudio para el análisis HazOp del proceso de manejo de turbosina en el Proyecto, se realizó con base en el diagrama de flujo de proceso (DFP), el diagrama de tubería e instrumentación (DTI) y la descripción del proceso, proporcionados por SEDENA. La selección de cada nodo se realizó considerando la intención de diseño de cada sección del proceso (ya sea sistema o subsistema) asociada al manejo de la turbosina, así como a la posibilidad de ocurrencia de algún evento riesgoso debido a cambios en las condiciones de operación. Así, los nodos de estudio considerados por el equipo de análisis de riesgo son los siguientes ():

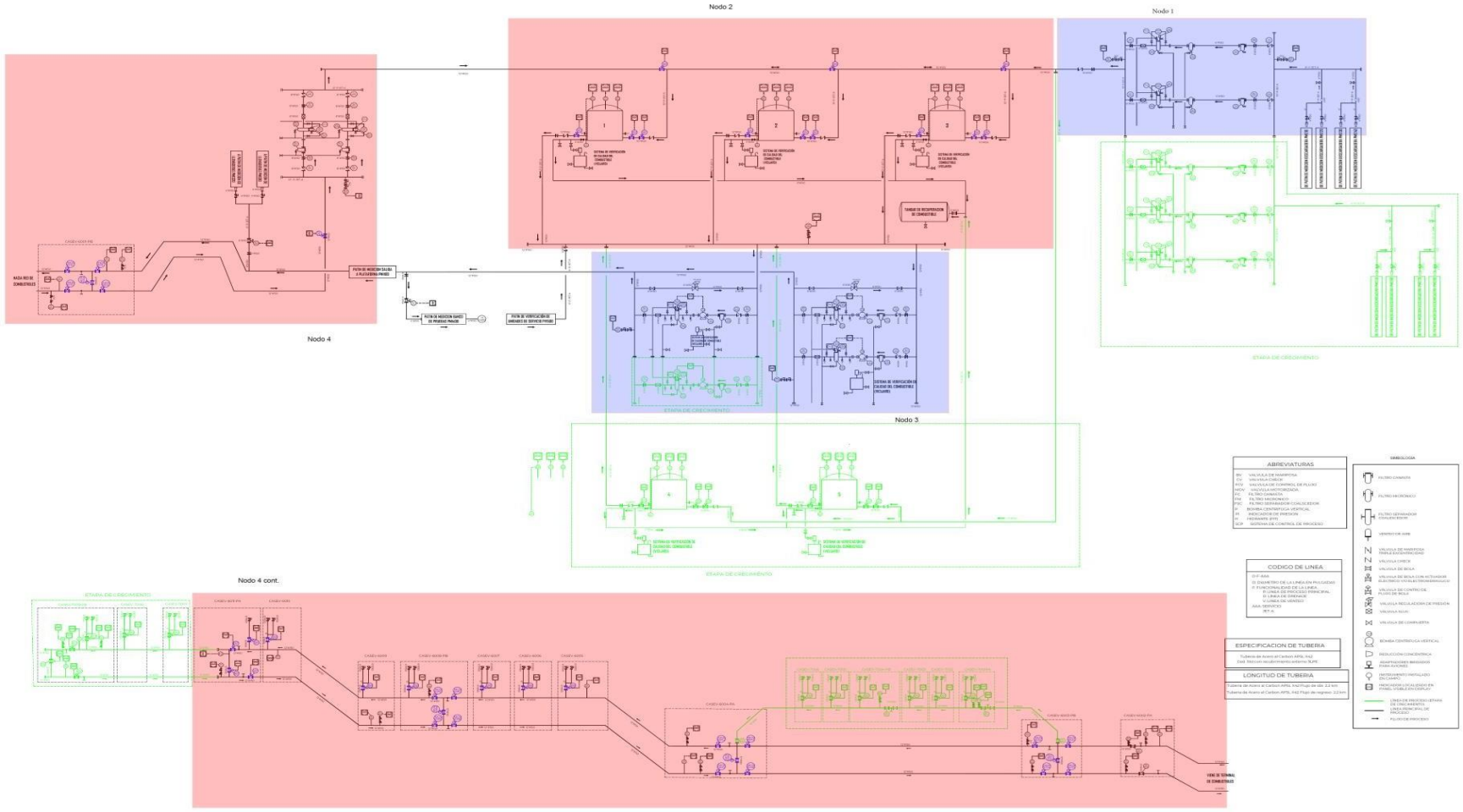
1) Nodo 1: Patín de filtrado A y sistema de bombeo a tanques de almacenamiento.
Intención de diseño: Retención de impurezas en la turbosina y llenado de tanques.
Condiciones de operación: P = 7 bar g; T = 30°C; d = 6"; Q = 72 $m^3$/h (300 GPM).

2) Nodo 2: Tanques de almacenamiento de turbosina.
Intención de diseño: Almacenamiento temporal de combustible para inventario de distribución a aeronaves.
Condiciones de operación: P = 2.5" C.A.; T ambiente; C = 2,000 $m^3$ (12,579 barriles).

3) Nodo 3: Patín de filtrado B y sistema de bombeo a red de distribución.
Intención de diseño: Retención de impurezas en la turbosina y alimentación a plataforma / red de distribución.
Condiciones de operación: P = 7 bar g; T = 30°C; d = 12"; Q = 613 $m^3$/h (2,700 GPM).

4) Nodo 4: Salida a plataforma / Red de distribución de turbosina a hidrantes.
Intención de diseño: Suministro de turbosina a plataforma y red de distribución para abastecimiento a aeronaves.
Condiciones de operación: P = 7 bar g; T = 30°C; d = 12"; Q = 613 $m^3$/h (2,700 GPM).

***Figura VII.2 Nodos del análisis HazOp del proyecto***




***Fuente: SEDENA***

*Revisión de Riesgos de Instalaciones FRR (Facility Risk Review).*

La Revisión de Riesgos de Instalaciones es una técnica simplificada – semi cuantitativa – de análisis de riesgos en los procesos, que utiliza los Escenarios de Accidentes Potenciales (EAP) previamente identificados y evaluados con las técnicas de identificación de peligros (HazOp), para luego clasificarlos y jerarquizarlos. Se ha comprobado que esta técnica es una herramienta efectiva para el análisis cuantitativo de riesgos en muchas instalaciones de la industria del petróleo y del gas. El uso apropiado de esta técnica les permitirá a las instancias involucradas en un nuevo proyecto, disponer de sus recursos de manera efectiva en la prevención de los riesgos más importantes que amenazan la seguridad del personal, la población, el medio ambiente, la producción y los equipos de la instalación. Esta técnica se utiliza para enfocar la atención en aquellos accidentes potenciales que deben ser tratados con prioridad durante las actividades de prevención de accidentes.

Este enfoque requiere solamente la estimación del orden de magnitud de la frecuencia y de la consecuencia del evento identificado. Los propósitos de la revisión de riesgos en una instalación son:

- Jerarquizar las desviaciones o EAPs derivadas del uso de una técnica de identificación de peligros y destacar aquellos que tengan el mayor potencial de ocasionar daños al personal de la planta, a la población, al medio ambiente, a la producción y al equipo e instalación.
- Desarrollar recomendaciones para reducir los riesgos identificados.
- Identificar los procesos y las áreas más importantes que requieren de una evaluación más detallada para determinar las medidas más efectivas destinadas a reducir el riesgo.

A partir del análisis HazOp se identificaron los escenarios de accidente potencial más relevantes con base en su efecto y posibilidad de ocurrencia. Cada escenario de accidente potencial identificado en el análisis fue sometido a la técnica FRR con el fin de determinar su categoría de consecuencia, frecuencia y riesgo. Esto permitió jerarquizar los escenarios y priorizar las recomendaciones emitidas por el grupo multidisciplinario con el fin de prevenir, minimizar y/o atender los posibles accidentes inherentes a la operación del proyecto.

### *VII.1.4 Jerarquización de escenarios de riesgo.*

Para la jerarquización de los escenarios de riesgo, resulta adecuado el empleo de matrices de frecuencias y consecuencias.

La matriz de jerarquización de riesgos relaciona la severidad de los escenarios mediante el uso de índices ponderados de las consecuencias (o afectaciones) y de la probabilidad de ocurrencia del incidente. Las categorías de evaluación de consecuencias permiten identificar la magnitud de las afectaciones en relación con los daños probables tanto a la salud como a la economía de la instalación. Por otro lado, la probabilidad de ocurrencia de un incidente depende directamente del nivel de protección del equipo, así como de la frecuencia de fallas que se presentan como eventos iniciantes en el desarrollo de los escenarios evaluados.

En el estudio de identificación de riesgos del Proyecto, uno de los objetivos es identificar los peligros en los procesos y examinar de qué manera se pueden reducir o eliminar los riesgos que presentan estos peligros a los trabajadores, a la instalación o al medio ambiente. Para lograr

dicho objetivo, se organizó un equipo multidisciplinario para realizar la identificación de riesgos en los procesos y evaluar cualitativamente los peligros potenciales asociados a los procesos durante la operación de la instalación.

El grupo multidisciplinario participante en la identificación de riesgos se conformó únicamente con personal del Instituto de Ingeniería de la UNAM, debido a que, en el momento de realización de este estudio, no se contaba con personal operativo por parte de la promovente (SEDENA) haciendo imposible su participación en el análisis. Las reuniones se llevaron a cabo en la Torre de Ingeniería del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en donde no se levantaron minutas, sino simplemente se dio continuidad al análisis técnico.

Con base en los resultados de jerarquización obtenidos y en el método de evaluación de riesgos descrito en la Norma Inglesa BS EN 1473:2016 (British Standard), se determinaron los rangos de frecuencia (Tabla VII.6), las categorías de consecuencia (Tabla VII.7) y la tolerancia al riesgo. Se ha procedido a invertir las categorías de frecuencia y consecuencias establecidas en la Norma referida (fuente original), para fines del cálculo del índice de riesgo (IR) como un criterio adicional para la jerarquización de riesgos, definido éste como el producto de la categoría de frecuencia (Fr) por la suma de las categorías de consecuencias [Fatalidades (F)
+ Lesionados (L) + Pérdida de Material (PM)] de cada evento identificado. En este caso, los valores del índice de riesgo están en el rango de 3 (riesgo mínimo) hasta 105 (riesgo máximo), lo cual implica que mientras mayor es el índice resultante, más énfasis se debe poner en la mitigación de dicho evento.

Una vez determinada la frecuencia y las consecuencias potenciales de cada evento identificado en el análisis HazOp, se procede a caracterizar y jerarquizar el riesgo de este mediante el cruce de frecuencia y consecuencia en una matriz de riesgo; de esta manera se obtiene el índice ponderado de riesgo de cada evento. Las matrices de riesgo utilizadas para caracterizar y jerarquizar los riesgos en el Proyecto se presentan en la Tabla VII.8 (afectación al personal e instalaciones) y la Tabla VII.9 (afectación a la población y medio ambiente).

***Tabla VII.6 Rangos de frecuencia para la evaluación de riesgos.***

| Rango | Descripción |
|---|---|
| 1 | Ocurrencia de menos de una vez en 1 000 000 años (caída de meteorito) |
| 2 | Ocurrencia en el rango entre una vez cada 100 000 años y una vez cada 1 000 000 años |
| 3 | Ocurrencia en el rango entre una vez cada 10 000 años y una vez cada 100 000 años |
| 4 | Ocurrencia en el rango entre una vez cada 1 000 años y una vez cada 10 000 años |
| 5 | Ocurrencia en el rango entre una vez cada 100 años y una vez cada 1 000 años |
| 6 | Ocurrencia en el rango entre una vez cada 10 años y una vez cada 100 años |
| 7 | Ocurrencia de más de una vez en 10 años |

Nota: Se ha invertido la categoría de frecuencia de la fuente original para fines de cálculo del índice de riesgo. Los criterios de cada categoría son los mismos.
Fuente: BS EN 1473:2016. *British Standard. Installation and equipment for liquefied natural gas. Design of onshore installations.*

***Tabla VII.7 Categorías de consecuencia para la evaluación de riesgos.***

| Categoría | Criterios | | |
|---|---|---|---|
| | Fatalidades (muertes) | Accidentes (lesionados) | Pérdida de material (toneladas) |
| 1 | 0 | 0 | Menor a 0.1 |
| 2 | 0 | 1 | De 0.1 a 1 |
| 3 | 0 | De 2 a 10 | De 1.01 a 10 |
| 4 (a) | De 1 a 10 | De 11 a 100 | De 10.01 a 100 |
| 5 | Más de 10 | Más de 100 | Más de 100 |

Nota: Se ha invertido la categoría de consecuencia de la fuente original para fines de cálculo del índice de riesgo. Los criterios de cada categoría son los mismos.
Fuente: BS EN 1473:2016. *British Standard. Installation and equipment for liquefied natural gas. Design of onshore installations.*
(a) Esta clase es cercana a los criterios de la Directiva Seveso (Directiva del Consejo 96/82/EC, 9 de diciembre de 1996, sobre el control de los riesgos de accidentes graves que involucran sustancias peligrosas).

***Tabla VII.8 Determinación del nivel de riesgo dentro del límite de batería de la instalación.***

| Frecuencia | Acumulativa (anual) | Consecuencia | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| **7** | $> 10^{-1}$ | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| **6** | De $10^{-1}$ a $10^{-2}$ | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| **5** | De $10^{-2}$ a $10^{-3}$ | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| **4** | De $10^{-3}$ a $10^{-4}$ | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| **3** | De $10^{-4}$ a $10^{-5}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| **2** | De $10^{-5}$ a $10^{-6}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| **1** | $< 10^{-6}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Fuente: BS EN 1473:2016. *British Standard. Installation and equipment for liquefied natural gas. Design of onshore installations.*
Niveles de tolerancia al riesgo:
Nivel 1 (verde): Situación normal, se refiere a un nivel de riesgo aceptable.
Nivel 2 (amarillo): Corresponde a aquella situación que podría ser mejorada; es decir, un nivel al cual se demuestra que el riesgo debe ser tan bajo como sea razonablemente práctico (*As Low As Reasonably Practical*, ALARP).
Nivel 3 (rojo): Situación que es indeseable y no puede ser tolerada. Se requiere una acción de remediación inmediata. Por lo tanto, el nivel es No aceptable.

***Tabla VII.9 Determinación del nivel de riesgo fuera del límite de batería de la instalación.***

| Frecuencia | Acumulativa (anual) | Consecuencia | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 7 | $> 10^{-1}$ | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 6 | De $10^{-1}$ a $10^{-2}$ | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 5 | De $10^{-2}$ a $10^{-3}$ | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 4 | De $10^{-3}$ a $10^{-4}$ | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 3 | De $10^{-4}$ a $10^{-5}$ | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 2 | De $10^{-5}$ a $10^{-6}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 1 | $< 10^{-6}$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Fuente: BS EN 1473:2016. *British Standard. Installation and equipment for liquefied natural gas. Design of onshore installations.*
Niveles de tolerancia al riesgo:
Nivel 1 (verde): Situación normal, se refiere a un nivel de riesgo aceptable.
Nivel 2 (amarillo): Corresponde a aquella situación que podría ser mejorada; es decir, un nivel al cual se demuestra que el riesgo debe ser tan bajo como sea razonablemente práctico (*As Low As Reasonably Practical*, ALARP).
Nivel 3 (rojo): Situación que es indeseable y no puede ser tolerada. Se requiere una acción de remediación inmediata. Por lo tanto el nivel es No aceptable.

El concepto ALARP (tan bajo como sea razonablemente práctico) fue desarrollado en el Reino Unido, en el Acta de Seguridad e Higiene en el Trabajo de 1974 (Health and Safety at Work etc. Act 1974), el cual requiere que se mantengan las instalaciones y sus sistemas "seguros y sin riesgo a la salud" hasta donde fuera razonablemente práctico. Esta última frase se interpreta como una obligación de los propietarios de las instalaciones para reducir el riesgo a ese nivel.

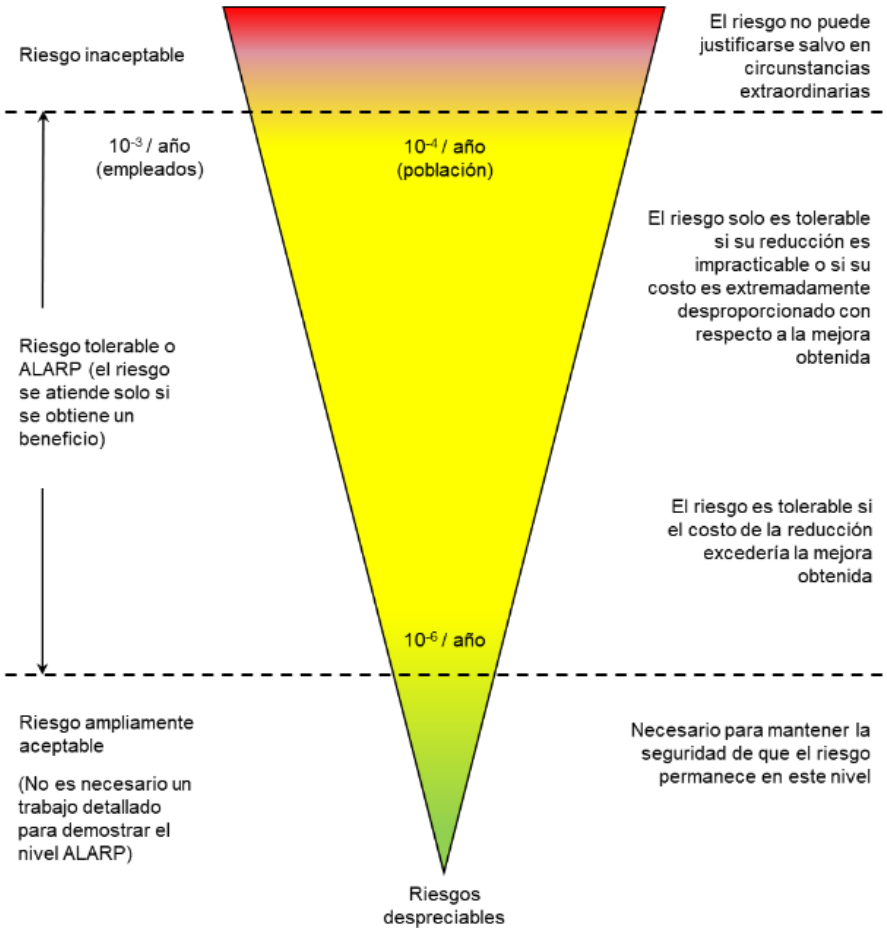
En toda instalación existen riesgos que son tolerables y otros riesgos que no son tolerables. El principio ALARP se encuentra precisamente entre los riesgos que se toleran y los que no. Esta idea se explica con un diagrama que ilustra el principio, en donde se explica que para que un riesgo se considere dentro de la región ALARP, debe demostrarse que el costo relacionado con la reducción del riesgo (su frecuencia y/o consecuencias) es desproporcionado con respecto al beneficio que se obtiene.

En la Figura VII.3 se establecen los criterios de categorización del riesgo del nivel 2 (ALARP), tanto para el personal de trabajo como para la población.

El principio ALARP surge del hecho de que sería posible emplear una gran cantidad de tiempo, dinero y esfuerzo al tratar de reducir los niveles de riesgo a un valor de cero, lo cual en la práctica no es costeable ni posible. Adicionalmente, este principio no debe entenderse como simplemente una medida cuantitativa de los beneficios contra los daños. Se debe entender como una buena práctica de juicio del balance entre riesgo y el beneficio a la sociedad y a la instalación.

Los riesgos que se ubiquen en esta región deben estudiarse a detalle mediante un análisis de costo-beneficio, para que pueda tomarse una decisión en cuanto a que se tolere el riesgo o se implanten recomendaciones que permitan reducirlos a la región de riesgo tolerable.

***Figura VII.3 Criterios de categorización del nivel de riesgo ALARP.***




Durante la aplicación de la metodología de identificación de riesgos (HazOp) del Proyecto, se elaboró de forma simultánea el proceso de jerarquización de los eventos identificados, con objeto de seleccionar los Escenarios de Accidentes Potenciales sobre los que se realizará el análisis de consecuencias, así como para definir aquellos que, estando en una situación de riesgo intermedia, deben ser cuestionados sobre la justificación o no de la implantación de las recomendaciones que a ellos aplican.

Una vez evaluados los eventos o desviaciones encontradas en el análisis HazOp, se procedió a realizar la jerarquización de estos, ordenándolos de mayor a menor tanto en el índice ponderado de riesgo (de los riesgos indeseables nivel 3 a riesgos aceptables nivel 1) como del cálculo del índice de riesgo (IR).

Los resultados obtenidos del análisis HazOp y la jerarquización de riesgos aplicados al proceso del manejo de la turbosina en el Proyecto son los siguientes:

- Se identificaron 39 eventos potenciales de riesgo mediante la técnica HazOp en los 4nodos analizados en el sistema asociado al manejo de turbosina en el Proyecto.

- De la evaluación semi cuantitativa de los eventos identificados en el análisis HazOp y su correspondiente valoración en las matrices de ponderación de riesgos, se tiene lo siguiente:
- 0 eventos en la categoría nivel 3 (indeseable).
- 5 eventos en la categoría nivel 2 (ALARP).
- 7 eventos en la categoría nivel 1 (aceptable).
- 27 eventos sin consecuencias de riesgo.

A partir de los riesgos identificados, el equipo de análisis de riesgos determinó realizar el análisis de consecuencias de aquellos eventos de categoría nivel 2. Estos eventos identificados en el análisis HazOp se describen con mayor detalle en la sección referente al análisis de consecuencias.

# VIII. ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGO.

## *VIII.1 Análisis de frecuencias.*

En esta sección se realiza el análisis de frecuencias de los eventos iniciadores que se han descrito en la sección previa. Con base en dicho análisis derivado de las simulaciones que se presentan, se estima la clase de consecuencia de acuerdo con la clase de gravedad clasificada por la EN 1473.

En este caso el análisis de "Árbol de Fallas" no resulta necesario, ya que se cuenta con la frecuencia de falla, la cual se basa en la estadística de accidentes descrita en la literatura científica, para cada evento particular que se considera en el análisis de riesgo.

Históricamente, los accidentes graves en depósitos o tanques de suministro han sido dominados por la presencia de almacenamiento de combustibles (principalmente gasolina), donde se pueden formar mezclas explosivas en un tanque y donde las nubes inflamables pueden evaporarse en caso de derrames y prenderse causando incendios.

Combustibles como la gasolina emiten un vapor que desprende un olor cuando es manipulado en cualquier circunstancia. Si la concentración del vapor en el aire es muy baja, entonces puede ser olido, pero no se encenderá. Si la concentración es suficientemente alta (pero no demasiado), puede encenderse (tal vez por una llama, o el motor de un vehículo que transita). Si se enciende, entonces el vapor puede quemarse hasta alcanzar su fuente de ignición y encender el combustible líquido. Por esta razón las estaciones de llenado y las bombas se diseñan cuidadosamente para que la operación sea segura.

En condiciones normales, combustibles como el diésel y la turbosina pueden oler un poco, pero no emiten vapores inflamables. Esto es porque el diésel y la turbosina son menos volátiles que

la gasolina y emiten menos vapores. A temperatura ambiente, el vapor sobre un charco de gasolina será inflamable, mientras que el vapor por encima de un charco para el caso de la turbosina no será inflamable.

Hidrocarburos (incluyendo turbosina) en estado líquido no suelen encenderse o quemarse de manera espontánea por sí solos. En un incendio de líquido, el calor del fuego eleva la temperatura de la superficie del charco, el vapor se desprende, y es la mezcla de esos vapores con el aire que se quema. Por esta razón un derrame de turbosina es muy difícil de encender, mientras que un derrame de gasolina es relativamente fácil de encender, aunque en cualquier caso tiene que estar presente una fuente de ignición para encenderse. Esta distinción, basada en el punto de inflamación (flash point), está incorporada en los códigos internacionales para almacenamiento de combustible.

La turbosina es ampliamente utilizada en todo el mundo y es almacenada en tanques del mismo diseño a los propuestos para el proyecto; incluso se llega a utilizar en lugares donde la temperatura ambiente es tal que el vapor sobre la superficie del combustible puede ser inflamable (por ejemplo, Kuwait, Kuala Lumpur).
Es común que las plantas de combustible coexistan cerca de zonas residenciales y otras industrias que implican grandes poblaciones y posibles fuentes de ignición fuera del sitio, ya que generalmente no son vistos como un alto riesgo. La turbosina rutinariamente se maneja con seguridad en grandes cantidades en los aeropuertos para propósitos de recarga de combustible, y se encuentra directamente adyacente a posibles fuentes de ignición tales como aeromotores y en la cercanía de grandes cantidades de pasajeros. Por ejemplo, un avión 747 tiene 4 grandes motores de jet y típicamente pueden llevar aproximadamente 200 m3 de turbosina y 400 pasajeros.
Dentro de los posibles escenarios, se ha hecho una selección basada en eventos que tienen el potencial de consecuencias significativamente diferentes. Por ejemplo, una explosión de nube de vapor produce un riesgo de sobrepresión; un incendio en los diques produce un peligro de radiación térmica; un derrame por ebullición y expansión abrupta produciría un peligro debido a la expulsión del líquido ardiente desde la parte superior del tanque en llamas; y una liberación instantánea de un tanque puede llegar a producir un impulso que alcance a sobrepasar la pared del dique, resultando en un área de riesgo potencialmente mayor que un incendio en el propio dique.
Incendios en un dique contenedor de un tanque de almacenamiento, pueden ocurrir como consecuencia de una liberación catastrófica de turbosina del tanque, por sobrellenado, por falla de una tubería o una válvula. Lo anterior incluye fallas de los materiales, errores del operador, errores de mantenimiento y riesgos naturales.

Davies y col (Dique effectiveness in preventing escalation of tank farm fires, T Davies, A B Harding, I P McKay, R G J Robinson, A Wilkinson, Process Safety and Environmental protection, 74, Part B, 88-93, May 1996), sugieren una frecuencia de incendio en diques de 1.2 x 10-5/año para un líquido inflamable. Este valor resulta conservador al ser comparado con los valores típicos de frecuencia obtenidos de combinar las frecuencias de falla de los componentes individuales de los tanques (válvulas automáticas, válvulas manuales, bridas, recipiente, bombas, tubería), con la probabilidad de aislar la fuga, y con una probabilidad de ignición de 0.004). Sin embargo, los tanques diseñados para almacenamiento de combustible han logrado mejoras técnicas de diseño no contempladas en el valor sugerido por Davies, mismo que se reduce hasta 3 x 10-8/año o menor para tanques como los que se emplearán en el AIT.
Uno de los peligros de almacenamiento de combustible a presión atmosférica en los tanques, es la falla o colapso del techo, y la ignición de la superficie del combustible conduciendo a un

incendio en la parte superior del tanque. El tanque puede debilitarse por encima del nivel del líquido debido a la exposición a la flama, pero el líquido proporciona enfriamiento de la estructura del tanque por debajo del nivel superficial del líquido, de tal forma que la distorsión en esa parte sería mínima y por tanto una falla por debajo del nivel del líquido no se considera un problema de interés. Incendios en la parte superior del tanque pueden iniciarse por la presencia de una fuente de ignición con un vapor inflamable presente en el espacio libre del tanque. Esto podría dañar y hacer fallar el techo del tanque con el sello de la pared, exponiendo la superficie del combustible. Posibles fuentes de ignición de preocupación incluyen un rayo, generación de electricidad estática, trabajos en caliente y averías eléctricas de instrumentos.

Bajo condiciones normales de operación no habrá ninguna fuente de ignición presente a nivel de la parte superior del tanque; todas las instalaciones mecánicas y eléctricas dentro de los tanques se clasifican para ser llevadas a cabo en atmósferas inflamables y la mayor parte del vapor en el tanque no se encontraría dentro del rango inflamable. Es posible que áreas muy localizadas puedan llegar a exceder el límite inferior de inflamabilidad dentro del espacio superior del tanque, incluso para turbosina, bajo condiciones ambientales extremas en México, porque el techo del tanque puede ser calentado por la radiación solar y superar el punto de inflamación de la turbosina (38 °C). Esto es, sin embargo, solamente un efecto localizado y el espacio conteniendo la mayor parte del vapor en el tanque no estaría en el rango inflamable y por ende no podría generar una sobrepresión significativa incluso si se encendiera. Del mismo modo, la energía generada sería muy poco probable que encendiera la masa principal del líquido.

Lees (Loss prevention in the process industries, Second Edition, F P Lees, 1996) proporciona una estimación de la frecuencia de un incendio o una explosión en un tanque de almacenamiento de hidrocarburos de techo fijo de 1.2 × 10-3 /año, basado en la revisión de más de 500 tanques de hidrocarburos de techo fijo durante un período de 20 años. Se suele estimar un factor de reducción de 10 cuando se utiliza inertización (Lees), y aun cuando los tanques de almacenamiento en cuestión no serán específicamente inertizados, la turbosina almacenada estará normalmente por debajo de su punto de inflamación, lo cual se considera que tiene un efecto similar en la reducción de las posibilidades de ignición. Esta reducción en la probabilidad de ignición considerada para turbosina da una frecuencia de incendio en la parte superior del tanque de almacenamiento de 1.2 x 10-4 /año por tanque.

No es de esperarse tener consecuencias directas fuera del sitio debido a una explosión en el espacio de la parte superior del tanque, además de las causadas por el incendio en esa zona del tanque. Existe la posibilidad de que, si la débil unión techo-estructura no falla, el tanque pueda fallar en la costura inferior del fondo en lugar de conducir a que salga disparado el tanque. Esto es muy poco probable de ocurrir en un tanque que contenga turbosina.

La flama del fuego en el tope del tanque quedaría expuesta por encima del borde del tanque y la radiación térmica proporcionaría sólo un riesgo local a pocos metros de la orilla de la flama. Los niveles de flujo térmico y efectos que esto podría generar se cuantifican en la sección referente al análisis de consecuencias. No se espera en general que un incendio en la parte superior del tanque pueda causar algún riesgo significativo fuera del sitio, aunque la evacuación preventiva de los alrededores es recomendable para reducir la exposición de las poblaciones fuera del sitio ante cualquier aumento subsecuente del incidente. Por lo tanto, el número de muertes fuera del sitio de este escenario sería cero.

El sobrellenado de los tanques de almacenaje a presión atmosférica ha ocurrido en muchas

ocasiones en el pasado, incluyendo el reciente incidente mayor iniciado por exceso de un tanque de gasolina en Buncefield en el Reino Unido. A diferencia de Buncefield, el proyecto almacenará turbosina, que es menos volátil que la gasolina.
Los tanques del proyecto deberán tener instrumentación similar a muchos otros tanques. En caso de que el sobrellenado se produzca, el exceso de turbosina se descarga a través de los orificios de ventilación del tanque o a través de la costura del techo que se une con la estructura. El combustible bajaría por las paredes del tanque, posiblemente generando un aerosol de combustible local, pero no se espera generar alguna nube de vapor inflamable significativa. El resultado más probable es un derrame que se mantendría dentro de la zona del dique de contención, y esto se cubre adecuadamente dentro de la cuantificación de la situación de fuego en el dique.

Aunque para este tipo de derrame puede ocurrir una fragmentación y algunas salpicaduras de líquido impactando en el piso del dique, pueden ser arrastradas por el viento más allá de la pared del dique, y es de esperarse que se mantengan dentro del sitio interno. Es poco probable que cualquier cantidad importante de líquido pueda salpicar sobre el muro de seguridad, así como es de esperar que se mantenga dentro de los drenajes de agua.

Fuera de la zona de los diques contenedores de tanques, existe una plataforma de bombeo que incluye tubería y accesorios para interconectar el sistema de suministro de turbosina a plataformas. La falla de alguno de estos componentes puede conducir a un derrame de turbosina que subsecuentemente podría encenderse.

La plataforma de bombeo se deberá situar entre el dique contenedor del tanque y una calle de rodamiento. La ocurrencia de pequeñas fugas en los sellos de las bombas, bridas, etc., del lado de alta presión de la bomba pueden formar un spray (chorro atomizado) inflamable; sin embargo, dichos sprays no alcanzan más de unos cuantos metros desde la fuente y no representan un riesgo fuera del sitio. Un gran derrame en el área de la plataforma sí puede formar un incendio tipo charco si se enciende la turbosina.

La mayor consecuencia estaría entonces definida por la ruptura del ducto de suministro de turbosina hacia plataformas, es decir, hacia la red de hidrantes.
Un incendio derivado de tal derrame se esperaría que condujera a daños mayores del equipo contenido en la plataforma de bombeo, aunque el suministro de combustible podría ser cortado de manera remota en los tanques que abastecen las bombas, aun cuando el equipo local se dañara.

## *VIII.2 Análisis de consecuencias.*

A continuación, se presenta el análisis de consecuencias de los eventos considerados de mayor riesgo de acuerdo con el análisis HazOp realizado en la sección anterior.

### *VIII.2.1 Criterios para la determinación de las zonas de alto riesgo y amortiguamiento.*

Cada tipo de escenario determinado se evalúa con respecto a un nivel de consecuencia base que se toma como referencia. Los puntos finales de valores prescritos (PFVP) son valores límites reconocidos por diversas instancias que define los límites de inflamabilidad (UFL y LFL) de una concentración de vapores, a la intensidad de radiación, o bien a la sobrepresión.

Para el análisis de riesgo del sector hidrocarburos, se establecen los criterios para la definición de las zonas de alto riesgo y amortiguamiento establecidas en la Guía de ASEA:

- Zona de daño a equipos:
  - Radiación térmica de 12.5 kW/m$^2$ a 37.5 kW/m$^2$ para inflamabilidad
  - Sobrepresión de 3 lb/plg$^2$ a 10 lb/plg$^2$ para explosividad

- Zona de alto riesgo:
  - Concentración IDLH para toxicidad
  - Radiación térmica de 5 kW/m$^2$ para inflamabilidad
  - Sobrepresión de 1.0 lb/plg$^2$ (0.070 kg/cm$^2$) para explosividad

- Zona de amortiguamiento:
  - Concentración TLV8 o TLV15 para toxicidad
  - Radiación térmica de 1.4 kW/m$^2$ para inflamabilidad
  - Sobrepresión de 0.5 lb/plg$^2$ (0.035 kg/cm$^2$) para explosividad

Dadas las características del proceso, considerando el manejo y almacenamiento de turbosina y manejo a condiciones de presión y temperatura ambientales, así como a las propiedades fisicoquímicas del combustible, las simulaciones se realizan solamente para daños por radiación térmica. Al respecto, se tiene que los daños potenciales ocasionados por radiación térmica son los siguientes:

- 1.4 kW/m$^2$ (seguridad / amortiguamiento): Es la zona representada por la distancia radial desde el centro del incendio hasta el punto en el que se tenga dicho flujo de calor máximo y en la cual no se puede esperar daño al personal expuesto.

- 5 kW/m$^2$ (alto riesgo): La zona de daños representa la distancia radial desde el centro de un incendio al punto donde la intensidad de radiación es menor. Este nivel de radiación térmica es suficiente para provocar quemaduras de segundo grado en la piel expuesta durante 30 s.

- 12.5 kW/m$^2$ (daño a materiales): Energía mínima para encender madera después de una larga

exposición, ignición de tubos y recubrimientos de plástico en cables eléctricos, daños severos a equipos de instrumentación. Máxima radiación soportable protegido con trajes especiales, por tiempo limitado (bomberos). Sin trajes especiales, 1% de mortalidad en 1 minuto, quemaduras de 1er grado en 10 s.

- 37.5 kW/$m^2$ (daño a equipos): Suficiente para causar daños a equipos de proceso; colapso de estructuras. 100% de mortalidad en 1 min.

### *VIII.2.2 Clases atmosféricas de la estabilidad de Pasquill.*

La estabilidad atmosférica es una variable que se establece para caracterizar la capacidad que la atmósfera tiene para dispersar un contaminante; en realidad, lo que representa es el grado de turbulencia atmosférica existente en un momento determinado.

La cantidad de turbulencia en la atmósfera ambiente tiene un efecto principal en la dispersión de las plumas (contaminantes en fase gaseosa) del gas, porque la turbulencia incrementa el arrastre y la mezcla con aire no contaminado en la pluma, de tal modo que actúa para reducir la concentración de los componentes tóxicos o inflamables en la pluma. Es por lo tanto importante categorizar la cantidad de turbulencia atmosférica presente en cualquier hora dada.

El método de categorizar la cantidad de turbulencia presente en la atmósfera es el método desarrollado por Pasquill en 1961, que categorizó la turbulencia atmosférica en seis clases de estabilidad, nombradas A, B, C, D, E y F. La clase A es la más inestable o la más turbulenta, y la clase F es la más estable o menos turbulenta. La Tabla VIII.1 describe las seis clases y la Tabla VIII.2 define las condiciones meteorológicas que definen cada clase.

***Tabla VIII.1 Clases de estabilidad atmosférica de Pasquill.***

| Tipo de estabilidad | Definición |
|---|---|
| A | Muy inestable |
| B | Inestable |
| C | Levemente inestable |
| D | Neutral |
| E | Levemente estable |
| F | Estable |

***Tabla VIII.2 Condiciones meteorológicas que definen la clase de estabilidad atmosférica.***

| Velocidad del viento (m/s) | Día e Insolación fuerte | Día e Insolación moderada | Día e Insolación débil | Noche y nubosidad Más de 50% | Noche y nubosidad Menos del 50% |
|---|---|---|---|---|---|
| < 2 | A | A - B | B | E | F |
| 2 – 3 | A - B | B | C | E | F |
| 3 – 5 | B | B - C | C | D | E |
| 5 – 6 | C | C - D | D | D | D |
| > 6 | C | D | D | D | D |

Una condición estable se caracteriza por un flujo casi laminar de las capas del aire con mínima capacidad de mezclado, un gradiente vertical de temperatura, fluctuaciones mínimas de la dirección del viento y un bajo nivel de insolación (condiciones más adversas para la dispersión de contaminantes). La relación entre las clases de estabilidad y las condiciones meteorológicas (radiación solar y cobertura del cielo) se muestra en la Tabla VIII-2.

En las modelaciones deben considerarse las condiciones meteorológicas más críticas del sitio con base en la información de los últimos 10 años. Cuando por diversas circunstancias no es posible contar con tal información, la dependencia sugiere considerar como condiciones meteorológicas una estabilidad clase F y una velocidad del viento de 1.5 m/s.

### *VIII.2.3 Simulación de escenarios riesgosos en el proyecto.*

Las consecuencias que se evaluarán, a partir del análisis HazOp realizado al sistema de manejo y almacenamiento de turbosina en el AIT, son las siguientes:

a) Incendio en dique de contención por colapso de un tanque de almacenamiento de turbosina.

b) Incendio en el techo de un tanque de almacenamiento de turbosina.

c) Incendio en dique de contención por sobrellenado en un tanque de almacenamiento de turbosina.

d) Incendio en un hidrante de suministro de turbosina en el ala de una aeronave.

e) Incendio debido a derrame en la tubería de distribución de turbosina por ruptura total de la tubería.

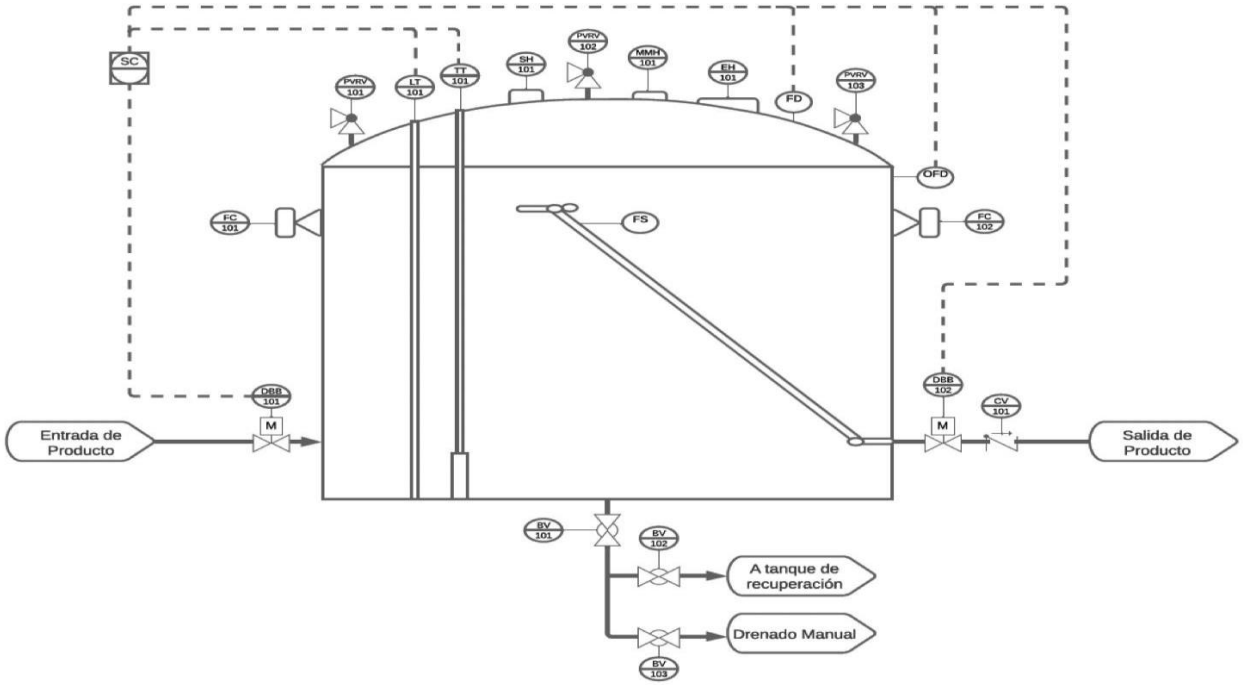
Con el propósito de obtener los radios de afectación de los incidentes que generan el mayor peligro, de acuerdo con la identificación de los mismos con la técnica previamente descrita, se implementaron los escenarios en el programa de cálculo denominado Breeze Incident Analyst, el cual está avalado por el propietario Trinity Consultants ante las autoridades de la Environmental Protection Agency de USA y que arroja resultados de acuerdo con lo prescrito por el CFR correspondiente (Code of Federal Regulations) para estudios de riesgo.

- ***Escenarios de incendio en los Tanques de Almacenamiento.***

Los tanques que contienen combustible inflamable con clasificación 2 de la NFPA generalmente son de techo fijo externo, y el indicador de nivel está diseñado de acuerdo con la normatividad correspondiente.

El techo fijo dispone de ventilas hacia la atmósfera, puesto que se considera que la concentración de vapor en el espacio exterior está por debajo del límite inferior de inflamabilidad (LFL) por la dispersión que se genera por el viento a la altura del techo (Figura VIII.1).

***Figura VIII.1 Tanque de almacenamiento de combustible con techo interno flotante.***




Fuente: SEDENA, 2020.

a) Incendio en el Dique.

En el caso de falla catastrófica de las paredes del tanque, o bien por falla en las válvulas de los tubos en la pared, se tendrá un derrame de todo el volumen contenido en el tanque. Se considera entonces que el dique de contención limita la extensión del líquido al área del dique, alcanzando una profundidad máxima equivalente al volumen total. La altura del dique debe considerar un volumen adicional equivalente al agua de contra-incendio que se aplique.

En el diseño que se tiene disponible, el área del dique que contiene los tres tanques de 1,800 m3 es de 52 x 52 m, esto es un área de 2,704 m2. En el caso de derrame total del volumen de uno de los tanques, la profundidad del combustible es poco más de 0.66 m en el dique.

Los resultados obtenidos de la simulación correspondiente son los siguientes:

CONFINED POOL FIRE MODEL (Modelo de incendio de charco confinado)RECTANGULAR

DIKE FIRE

INPUT DATA

Fuel
Name KEROSENE
Pool temperature(K) 298.18

Constant properties
| | |
|---|---|
| Molecular weight (g/g-mole) | 170 |
| Boiling point (C) | 98.45 |
| Critical temperature(K) | 617.5 |
| Critical pressure(bar) | 21.25 |
| Heat of combustion(J/kg) | 44590000 |
| Flame temperature(K) | 1300 |

Calculated properties
Calculated liquid compressibility factor 0.966
Calculated Liquid density(kg/m**3) 806.5

Dimensions
| | |
|---|---|
| Pool width(meters) | 50.43 |
| Pool liquid height(meters) | 1 |
| Height of flame base(meters) | 1 |
| Height for Radiation Calculations(meters) | 1.5 |

LOCAL AMBIENT CONDITIONS
| | |
|---|---|
| Air temperature(K) | 298.18 |
| Ambient pressure(bar) | 1.013 |
| Wind speed(m/s) | 3 |
| Relative humidity (%) | 50 |

Results data
| | |
|---|---|
| Mass burning rate(kg/m**2s) | 0.141 |
| Flame length(m) | 87.11 |
| Flame tilt from vertical (front view) | 32.57 |
| Flame tilt from vertical (side view) | 32.57 |
| Flame drag ratio (front view) | 1.14 |
| Flame drag ratio (side view) | 1 |
| Maximum emissive power(kW/m**2) | 135 |
| Effective emissive power (front view)(kW/m**2) | 135 |
| Effective emissive power (side view)(kW/m**2) | 135 |

Front view (view along dike/trench width)

| Thermal flux kW/m**2 | Distance from center of Pool m |
|---|---|
| 31.5 | 79.06 |
| 5.0 | 180.27 |
| 1.4 | 301.68 |

Side view (view along dike/trench length)

| Thermal flux kW/m**2 | Distance from center of Pool m |
|---|---|
| 31.5 | 79.06 |
| 5.0 | 180.27 |
| 1.4 | 301.68 |

Radiation results at specified distances at height 1.5 meters

Maximum emissive power (kW/m**2) 135

Las distancias de afectación de alto riesgo y amortiguamiento para este escenario sepresentan en la siguiente figura.

***Figura VIII.2 Distancias de afectación por incendio en el dique.***

***Fuente: SEDENA***

b) Incendio en el techo del tanque.

En este escenario, se considera que por falla en el sello del techo interno del tanque se tiene un incendio que abarca el diámetro de 30 m del tanque, por lo que permanece confinado a dicha área.

Los resultados obtenidos de la simulación correspondiente son los siguientes:

CONFINED POOL FIRE MODEL (Modelo de incendio de charco confinado)

CIRCULAR DIKE OR TANK FIRE

INPUT DATA

Fuel properties

| | |
|---|---|
| Name | KEROSENE |
| Pool temperature(K) | 298.18 |
| Molecular weight (g/g-mole) | 170 |
| Boiling point (C) | 98.45 |
| Critical temperature(K) | 617.5 |
| Critical pressure(bar) | 20.974 |
| Heat of combustion(J/kg) | 44590000 |
| Flame temperature(K) | 1300 |
| Calculated liquid compressibility factor | 0.958 |
| Calculated Liquid density(kg/m**3) | 806.5 |

Dimensions

| | |
|---|---|
| Pool diameter(meters) | 26 |
| Pool liquid height(meters) | 12 |
| Height of flame base(meters) | 12 |
| Height for Radiation Calculations(meters) | 1.5 |

LOCAL AMBIENT CONDITIONS

| | |
|---|---|
| Air temperature(K) | 298.18 |
| Ambient pressure(bar) | 1.013 |
| Wind speed(m/s) | 3 |
| Relative humidity (%) | 50 |

Results data

| | |
|---|---|
| Mass burning rate(kg/m**2s) | 0.093 |
| Flame length(m) | 42.701 |
| Flame tilt from vertical | 45.309 |
| Flame drag ratio | 1 |
| Maximum emissive power(kW/m**2) | 135 |
| Effective emissive power(kW/m**2) | 134.945 |

| Thermal flux (kW/m**2) | Distance from center of Pool (m) |
|---|---|
| 31.5 | Unable to calculate distance to this flux |
| 13.9 | 31.40 |
| 5.0 | 83.71 |
| 1.4 | 163.22 |

Radiation results at specified distances at height 1.5 meters

| Distance from center of Pool m | Thermal Flux To horizontal target kW/m**2 | Thermal Flux To vertical target kW/m**2 | Maximum flux to target kW/m**2 |
|---|---|---|---|
| 49.00 | 6.280 | 8.824 | 10.831 |

Las distancias de afectación de alto riesgo y amortiguamiento para este escenario sepresentan en la siguiente figura.

***Figura VIII.3 Distancias de afectación por incendio en el techo de un tanque***

***Fuente: SEDENA***

c) Sobrellenado que vierte en el interior del dique.

El escenario de sobrellenado por falla en el indicador de nivel, aunado a la falla de las alarmas de sobrellenado, conlleva a un derrame por un tubo de 6 in con una carga hidráulica equivalente de 10 m. Considerando un coeficiente de descarga Cd=0.62, esto arroja un gasto de 127.7 l/s, esto es 103 kg/s.

Considerando una ignición inmediata del charco que se forma, se alcanza un diámetro máximo de 22.3 m de diámetro equivalente, dentro del dique.

Los resultados obtenidos de la simulación correspondiente son los siguientes:

UNCONFINED POOL FIRE MODEL

UNCONFINED POOL FIRE MODEL

STORAGE TANK LEAK WITH IMMEDIATE IGNITION OF SPILLED CONTENTS

INPUT DATA

Fuel properties

| | |
|---|---|
| Name | KEROSENE |
| Molecular weight (g/g-mole) | 170 |
| Boiling point (C) | 98.45 |
| Critical temperature(K) | 617.5 |
| Critical pressure(bar) | 20.974 |
| Heat of combustion(J/kg) | 44590000 |
| Flame temperature(K) | 1300 |
| Calculated liquid compressibility factor | 0.968 |
| Calculated Liquid density(kg/m**3) | 806.5 |

STORAGE CONDITION

| | |
|---|---|
| Storage temperature(K) | 298 |
| Storage pressure(absolute)(bar) | 0.78 |
| Physical state | Liquid phase only |

Release data

| | |
|---|---|
| Type of spill | Continuous |
| Substance release rate(kg/s) | 103 |
| Surface type | Concrete |

LOCAL AMBIENT CONDITIONS

| | |
|---|---|
| Air temperature(K) | 298.18 |
| Ambient pressure(bar) | 1 |
| Wind speed(m/s) | 3 |
| Relative humidity (%) | 50 |

Output data:

| | |
|---|---|
| Radiation level 1(kW/m**2) | 1.4 |
| Radiation level 2(kW/m**2) | 5 |
| Radiation level 3(kW/m**2) | 31.5 |

Height of interest(meters) 1.5

Results data

Maximum emissive power(kW/m**2) 135

| Time Interval s | Burning Rate kg/m**2s | Flame Length m | Flame tilt from vertical deg | Flame drag ratio | Effective emmissive power kW/m**2 | Pool Radius m |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 60 | 0.093 | 38.375 | 44.178 | 1.204 | 134.957 | 11.156 |
| 120 | 0.093 | 37.872 | 44.364 | 1.205 | 134.951 | 10.948 |
| 180 | 0.093 | 37.872 | 44.364 | 1.205 | 134.951 | 10.948 |
| 240 | 0.093 | 37.872 | 44.364 | 1.205 | 134.951 | 10.948 |
| 300 | 0.093 | 37.872 | 44.364 | 1.205 | 134.951 | 10.948 |
| 360 | 0.093 | 37.872 | 44.364 | 1.205 | 134.951 | 10.948 |
| 420 | 0.093 | 37.872 | 44.364 | 1.205 | 134.951 | 10.948 |
| 480 | 0.093 | 37.872 | 44.364 | 1.205 | 134.951 | 10.948 |
| 540 | 0.093 | 37.872 | 44.364 | 1.205 | 134.951 | 10.948 |
| 600 | 0.093 | 37.872 | 44.364 | 1.205 | 134.951 | 10.948 |

Distance to Radiation Levels at Maximum Pool Size

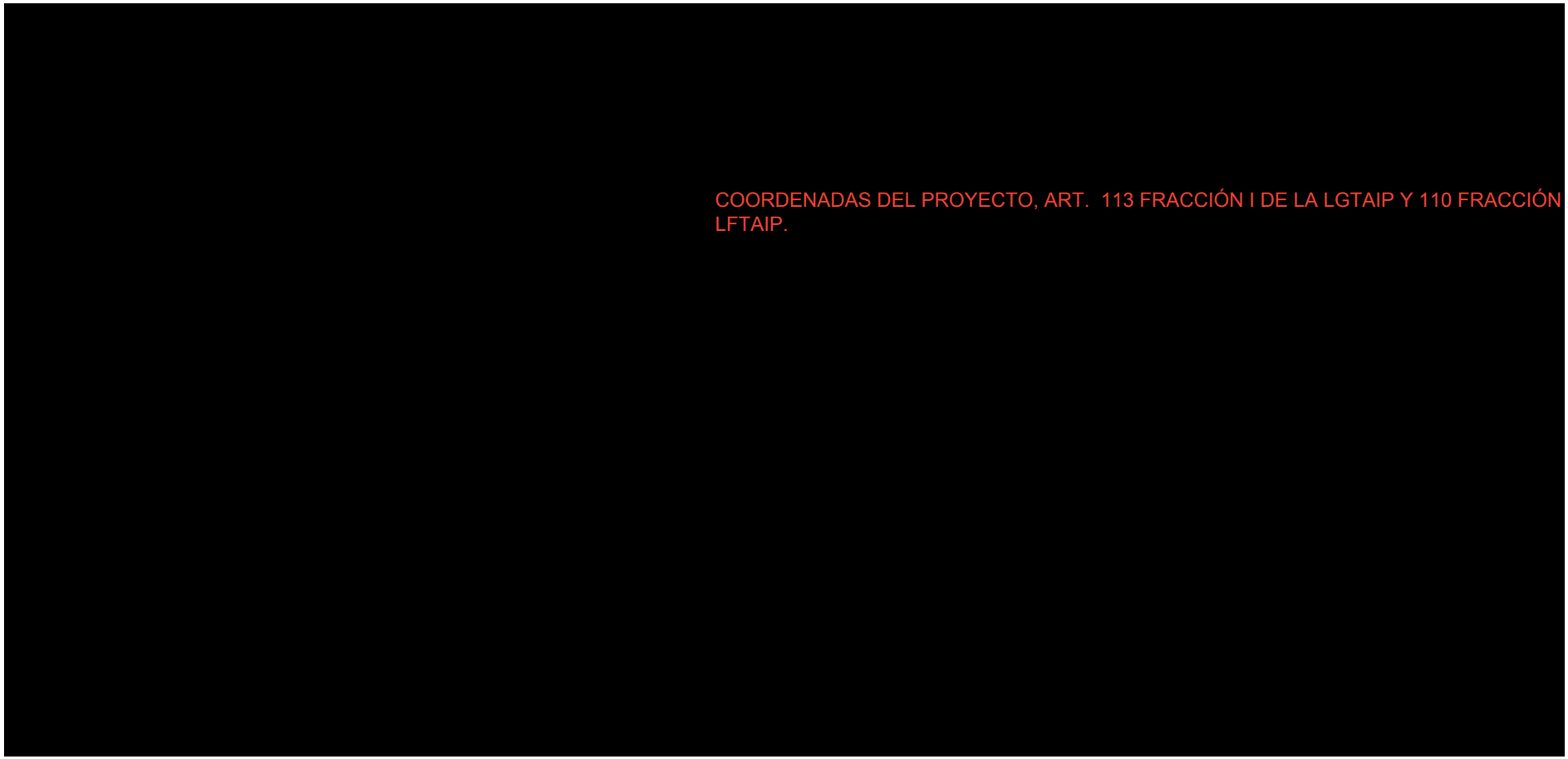
| | |
|---|---|
| Maximum pool radius(meters) | 11.156 |
| Mass burning rate(kg/m**2s) | 0.093 |
| Flame length(m) | 38.375 |
| Flame tilt from vertical | 44.178 |
| Flame drag ratio | 1.204 |
| Maximum emissive power(kW/m**2) | 135 |
| Effective emissive power(kW/m**2) | 134.957 |

| Thermal flux (kW/m**2) | Distance from center of Pool (m) |
|---|---|
| 31.5 | 42.86 |
| 5.0 | 85.80 |
| 1.4 | 135.61 |

| Receptor Index | TargetX | TargetY | Thermal Flux To Time | Thermal Flux To horizontal target | Maximum flux vertical target | to target |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 155.000 | -8.000 | 60.000 | 3.116 | 8.477 | 9.032 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 120.000 | 2.975 | 8.302 | 8.820 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 180.000 | 2.975 | 8.302 | 8.820 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 240.000 | 2.975 | 8.302 | 8.820 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 300.000 | 2.975 | 8.302 | 8.820 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 360.000 | 2.975 | 8.302 | 8.820 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 420.000 | 2.975 | 8.302 | 8.820 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 480.000 | 2.975 | 8.302 | 8.820 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 540.000 | 2.975 | 8.302 | 8.820 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 600.000 | 2.975 | 8.302 | 8.820 |

Las distancias de afectación de alto riesgo y amortiguamiento para este escenario sepresentan en la siguiente figura.

***Figura VIII.4 Distancias de afectación por sobrellenado del tanque.***




Fuente: SEDENA

d) Escenario de incendio durante el llenado por hidrantes del tanque en el ala de avión.

Debido al número considerable de operaciones diarias que se llevan a cabo en zonas donde se tienen pasajeros en proximidad relativa, este escenario es el de mayor peligro.

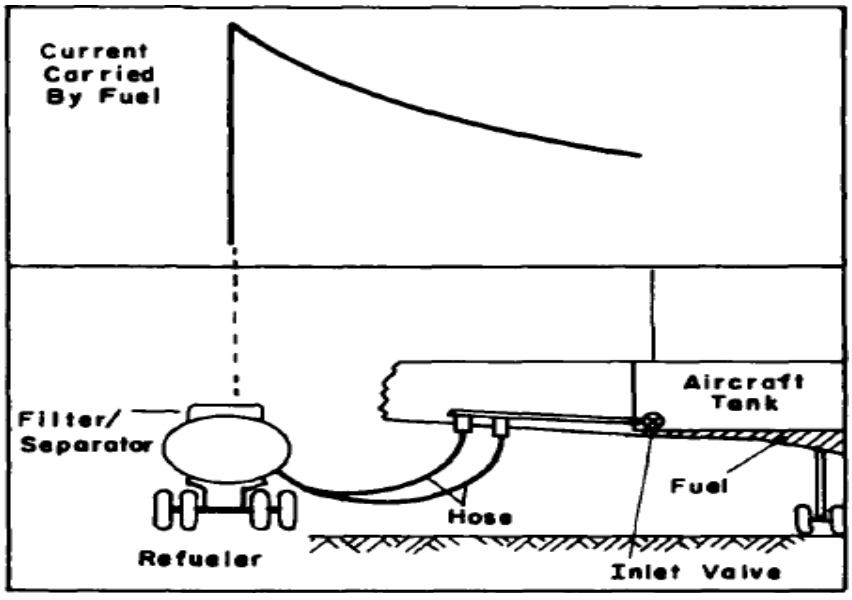
Las mangueras flexibles están diseñadas para operar a 20 bar, y soportan hasta 80 bar como presión máxima. Sin embargo, las conexiones y bridas están sujetas a fallas por falta de mantenimiento o por error humano durante el procedimiento de carga.

Debido a la alta presión, es factible la generación de una 'neblina' de combustible, que, al llegar en contacto con una superficie caliente, e.g. partes adyacentes a la turbina o el motor de un vehículo, se puede generar un flamazo, provocando un derrame por un ducto de 6 in.

También existe el potencial de una descarga electrostática por falla en la conexión entre las partes de equipo para eliminar la diferencia de potencial eléctrico que se genera durante el flujo de combustible.

En las siguientes figuras se ilustra la intensidad de corriente que se genera durante la descarga del vehículo de despacho a los tanques en el ala del avión, así como la energía mínima de ignición en función de la temperatura del combustible.

***Figura VIII.5 Energías mínimas de ignición de chispa, para mezclas de spray combustible/aire.***



Si bien el diámetro de 9 m del incendio de charco que se genera es relativamente pequeño (como se muestra en los resultados del listado de abajo, es decir, radio = 4.468 m), el mayor riesgo es que si perdura debajo del ala, la estructura de aluminio de ésta puede fallar, provocando un derrame mayor del combustible ya almacenado en el tanque del ala.

Los resultados obtenidos de la simulación correspondiente son los siguientes:

UNCONFINED POOL FIRE MODEL

STORAGE TANK LEAK WITH IMMEDIATE IGNITION OF SPILLED CONTENTS

INPUT DATA

Fuel properties

| | |
|---|---|
| Name | KEROSENE |
| Molecular weight (g/g-mole) | 170. |
| Boiling point (C) | 98.45 |
| Critical temperature(K) | 617.5 |
| Critical pressure(bar) | 20.974 |
| Heat of combustion(J/kg) | 44590000 |
| Flame temperature(K) | 1300 |
| Calculated liquid compressibility factor | 0.008 |
| Calculated Liquid density(kg/m**3) | 806.5 |
| Ambient pressure(bar) | 1 |
| Wind speed(m/s) | 3 |
| Relative humidity (%) | 50 |

Output data:

| | |
|---|---|
| Radiation level 1(kW/m**2) | 1.4 |
| Radiation level 2(kW/m**2) | 5 |
| Radiation level 3(kW/m**2) | 31.5 |
| Height of interest(meters) | 1.5 |

Results data

Maximum emissive power(kW/m**2) 135

| Time Intervals | Burning Rate kg/m**2s | Flame Length m | Flame tilt from vertical deg | Flame drag ratio | Effective emmissive power kW/m**2 | Pool Radius m |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 60 | 0.087 | 19.471 | 48.746 | 1.282 | 130.658 | 4.468 |
| 120 | 0.086 | 19.179 | 48.932 | 1.284 | 130.395 | 4.386 |
| 180 | 0.086 | 19.179 | 48.932 | 1.284 | 130.395 | 4.386 |
| 240 | 0.086 | 19.179 | 48.932 | 1.284 | 130.395 | 4.386 |
| 300 | 0.086 | 19.179 | 48.932 | 1.284 | 130.395 | 4.386 |
| 360 | 0.086 | 19.179 | 48.932 | 1.284 | 130.395 | 4.386 |
| 420 | 0.086 | 19.179 | 48.932 | 1.284 | 130.395 | 4.386 |
| 480 | 0.086 | 19.179 | 48.932 | 1.284 | 130.395 | 4.386 |
| 540 | 0.086 | 19.179 | 48.932 | 1.284 | 130.395 | 4.386 |
| 600 | 0.086 | 19.179 | 48.932 | 1.284 | 130.395 | 4.386 |

Distance to Radiation Levels at Maximum Pool Size

| | |
|---|---|
| Maximum pool radius(meters) | 4.468 |
| Mass burning rate(kg/m**2s) | 0.087 |
| Flame length(m) | 19.471 |
| Flame tilt from vertical | 48.746 |
| Flame drag ratio | 1.282 |
| Maximum emissive power(kW/m**2) | 135 |
| Effective emissive power(kW/m**2) | 130.658 |

| Thermal flux (kW/m**2) | Distance from center of Pool (m) |
|---|---|
| 31.5 | 21.35 |
| 5.0 | 40.25 |

1 STORAGE_CONDITION

| | |
|---|---|
| Storage temperature(K) | 298 |
| Storage pressure(absolute)(bar) | 0.79 |
| Physical state | Liquid phase only |

Release data

| | |
|---|---|
| Type of spill | Continuous |
| Substance release rate(kg/s) | 15.26 |
| Surface type | Concrete |

LOCAL AMBIENT CONDITIONS

| | |
|---|---|
| Air temperature(K) | 298.18 |

| | Thermal Flux To | Thermal Flux To | Maximum flux |
|---|---|---|---|
| .4 | 63.23 | | |

| Receptor Index | TargetX | TargetY | Time | horizontal target | vertical target | to target |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 155.000 | -8.000 | 60.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 120.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 180.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 240.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 300.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 360.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 420.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 480.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 540.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 600.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |

Las distancias de afectación de alto riesgo y amortiguamiento para este escenario sepresentan en la siguiente figura.

***Figura VIII.6 Distancias de afectación durante falla en el llenado por hidrantes***

***Fuente: SEDENA***

e) Escenario de fuga e incendio de la tubería de distribución de la granja de tanques al sistema de hidrantes por ruptura total de la tubería (peor caso).

Para este caso se considera que la demanda de combustible durante la hora pico para el despegue de aeronaves, que se ha proyectado en 2,500 pasajeros para el año 2032. Considerando las capacidades del tipo de aviones C y D, se estima entonces que durante dicha hora pico, el número de aeronaves conectadas simultáneamente a los hidrantes es de 9. Para el flujo de diseño de los hidrantes del orden de 400 gpm, esto implica un gasto de 3,600 gpm (0.227 m3/s). Se considera entonces el diseño de un solo tubo de 18 in (450 mm) de diámetro, que es el que estaría expuesto a un accidente mayor de cizalla, con la velocidad correspondiente de 4.68 ft/s (1.427 m/s).

El gasto másico es entonces de 183.1 kg/s, y el escenario considera que la ruptura es de tipo cizalla, esto es de la sección total del tubo, que ocurre en zona previa a la trinchera subterránea de distribución a hidrantes.

Los resultados obtenidos de la simulación correspondiente son los siguientes:

UNCONFINED POOL FIRE MODEL (Modelo de incendio de charco no confinado)STORAGE TANK LEAK WITH IMMEDIATE

IGNITION OF SPILLED CONTENTS INPUT DATA

Fuel properties

| | |
|---|---|
| Name | KEROSENE |
| Molecular weight (g/g-mole) | 170 |
| Boiling point (C) | 98.45 |
| Critical temperature(K) | 617.5 |
| Critical pressure(bar) | 20.974 |
| Heat of combustion(J/kg) | 44590000 |
| Flame temperature(K) | 1300 |
| Calculated liquid compressibility factor | 0.967 |
| Calculated Liquid density(kg/m**3) | 806.5 |

STORAGE CONDITION

| | |
|---|---|
| Storage temperature(K) | 298 |
| Storage pressure(absolute)(bar) | 0.79 |
| Physical state | Liquid phase only |

Release data

| | |
|---|---|
| Type of spill | Continuous |
| Substance release rate(kg/s) | 183.1 |

Surface type Concrete

LOCAL AMBIENT CONDITIONS
Air temperature(K) 298.18
Ambient pressure(bar) 1
Wind speed(m/s) 3
Relative humidity (%) 50

Output data:
Radiation level 1(kW/m**2) 1.4

Radiation level 2(kW/m**2) 5
Radiation level 3(kW/m**2) 31.5
Height of interest(meters) 1.5

Results data
Maximum emissive power(kW/m**2) 135

| Time Interval s | Burning Rate kg/m**2s | Flame Length m | Flame tilt from vertical deg | Flame drag ratio | Effective emmissive power kW/m**2 | Pool Radius m |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 60 | 0.093 | 46.928 | 0.000 | 1.170 | 134.999 | 14.887 |
| 120 | 0.093 | 46.272 | 0.000 | 1.171 | 134.999 | 14.589 |
| 180 | 0.093 | 46.272 | 0.000 | 1.171 | 134.999 | 14.589 |
| 240 | 0.093 | 46.272 | 0.000 | 1.171 | 134.999 | 14.589 |
| 300 | 0.093 | 46.272 | 0.000 | 1.171 | 134.999 | 14.589 |
| 360 | 0.093 | 46.272 | 0.000 | 1.171 | 134.999 | 14.589 |
| 420 | 0.093 | 46.272 | 0.000 | 1.171 | 134.999 | 14.589 |
| 480 | 0.093 | 46.272 | 0.000 | 1.171 | 134.999 | 14.589 |
| 540 | 0.093 | 46.272 | 0.000 | 1.171 | 134.999 | 14.589 |
| 600 | 0.093 | 46.272 | 0.000 | 1.171 | 134.999 | 14.589 |

Distance to Radiation Levels at Maximum Pool Size

Maximum pool radius(meters) 14.589
Mass burning rate(kg/m**2s) 0.093
Flame length(m) 46.928
Flame tilt from vertical 0
Flame drag ratio 1.072

Maximum emissive power(kW/m**2) 135
Effective emissive power(kW/m**2) 134.999

| Thermal flux (kW/m**2) | Distance from center of Pool (m) |
|---|---|
| 31.5 | 31.38 |
| 5.0 | 91.05 |
| 1.4 | 166.67 |

| Receptor Index | TargetX | TargetY | Thermal Flux To Time | Thermal Flux To horizontal target | Thermal Flux To vertical target | Maximum flux to target |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 155.000 | -8.000 | 60.000 | 0.126 | 1.089 | 1.096 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 120.000 | 0.118 | 1.047 | 1.054 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 180.000 | 0.118 | 1.047 | 1.054 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 240.000 | 0.118 | 1.047 | 1.054 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 300.000 | 0.118 | 1.047 | 1.054 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 360.000 | 0.118 | 1.047 | 1.054 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 420.000 | 0.118 | 1.047 | 1.054 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 480.000 | 0.118 | 1.047 | 1.054 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 540.000 | 0.118 | 1.047 | 1.054 |
| 1 | 155.000 | -8.000 | 600.000 | 0.118 | 1.047 | 1.054 |

Las distancias de afectación de alto riesgo y amortiguamiento para este escenario sepresentan en la siguiente figura.

***Figura VIII-7 Distancias de afectación por incendio causado en tubería de distribución***

***Fuente: SEDENA***

# IX. REPRESENTACIÓN EN PLANOS DE LOS RADIOS POTENCIALES DE AFECTACIÓN.

En el Anexo 3 se incluyen los planos donde se encuentran plasmadas las distancias de afectación de los eventos simulados en el análisis de consecuencias del Aeropuerto Internacional de Tulum.

En la Tabla IX.1 se muestra un resumen de las distancias de afectación de los escenarios simulados.

***Tabla IX-1 Resultados del análisis de consecuencias (simulaciones) de los eventos riesgosos identificados en el análisis HazOp del Proyecto.***

| Clave | Evento | Radiación ($kW/m^2$)* | Distancia (m) |
|---|---|---|---|
| E-1 | Incendio en dique de contención por colapso de un tanque de almacenamiento de turbosina | 31.5 | 79.06 |
| | | 5.0 | 180.27 |
| | | 1.4 | 301.68 |
| E-2 | Incendio en el techo de un tanque de almacenamiento de turbosina | 13.9 | 31.40 |
| | | 5.0 | 83.71 |
| | | 1.4 | 163.22 |
| E-3 | Incendio en dique de contención por sobrellenado en un tanque de almacenamiento de turbosina | 31.5 | 42.86 |
| | | 5.0 | 85.80 |
| | | 1.4 | 135.61 |
| E-4 | Incendio en un hidrante de suministro de turbosina en el ala de un aeronave | 31.5 | 21.35 |
| | | 5.0 | 40.25 |
| | | 1.4 | 63.23 |
| E-5 | Incendio debido a derrame en la tubería de distribución de turbosina por ruptura total de la tubería | 31.5 | 31.38 |
| | | 5.0 | 91.05 |
| | | 1.4 | 166.67 |

* La radiación térmica implica los siguientes criterios:
31.5 $kW/m^2$: distancia de fatalidades (100% mortalidad en 1 minuto).
13.9 $kW/m^2$: distancia de quemaduras de primer grado en 10 segundos.
5.0 $kW/m^2$: distancia de alto riesgo.
1.4 $kW/m^2$: distancia de amortiguamiento.

# X. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD E INTERACCIONES DE RIESGO.

## *X.1 Análisis de vulnerabilidad.*

Con base en los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas, en la Tabla X-1 se muestran las posibles afectaciones alos receptores potenciales de los eventos riesgosos.

***Tabla X.1 Análisis de vulnerabilidad de los eventos riesgosos simulados para el Aeropuerto Internacional de Tulum.***

| Clave | Evento | Receptor | Zona | Afectación | Salvaguardas | Recomendaciones |
|---|---|---|---|---|---|---|
| E-1<br>Incendio en dique por colapso de tanque | Radiación térmica | Población | Alto riesgo | No hay receptores potenciales. | | |
| | | | Amortiguamiento | No hay receptores potenciales. | | |
| | | Medio ambiente | Alto riesgo | Contaminación temporal del aire.<br>Afectación al suelo y áreas verdes aledañas. | Suelo de concreto.<br>Sistema de drenaje.<br>Diques de contención. | Restitución de suelo y vegetación en áreas afectadas. |
| | | | Amortiguamiento | Contaminación temporal del aire.<br>Afectación al suelo y áreas verdes aledañas. | Suelo de concreto.<br>Sistema de drenaje.<br>Diques de contención. | Restitución de suelo y vegetación en áreas afectadas. |
| | | Personal | Alto riesgo | Quemaduras potenciales al personal en área de descargaderas. | Sistema contra incendio. | Pruebas de integridad mecánica a tanques.<br>Plan de Respuesta a Emergencias. |
| | | | Amortiguamiento | Quemaduras potenciales al personal en la Terminal de Combustibles. | Sistema contra incendio. | Pruebas de integridad mecánica a tanques.<br>Plan de Respuesta a Emergencias. |
| | | Instalaciones / Producción | Alto riesgo | Daños potenciales a tanques y equipos en área de descargaderas.<br>Suspensión de suministro de turbosina a aeronaves.<br>Pérdida de producto. | Sistema contra incendio.<br>Diques de contención. | Pruebas de integridad mecánica a tanques.<br>Plan de Respuesta a Emergencias. |
| | | | Amortiguamiento | No se prevén daños a las instalaciones o a la operación del AIT. | | |
| E-2<br>Incendio en techo de tanque | Radiación térmica | Población | Alto riesgo | No hay receptores potenciales. | | |
| | | | Amortiguamiento | No hay receptores potenciales. | | |
| | | Medio ambiente | Alto riesgo | Contaminación temporal del aire. | | |
| | | | Amortiguamiento | Contaminación temporal del aire. | | |
| | | Personal | Alto riesgo | Quemaduras potenciales al personal en área de descargaderas. | Sistema contra incendio. | Plan de Respuesta a Emergencias. |
| | | | Amortiguamiento | Radiaciónal personal en la Terminal de Combustibles. | Sistema contra incendio. | Plan de Respuesta a Emergencias. |
| | | | Alto riesgo | Daños potenciales a tanques.<br>Pérdida de producto. | Sistema contra incendio. | Plan de Respuesta a Emergencias. |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Instalaciones / Producción | Amortiguamiento | No se prevén daños a las instalaciones o a la operación del AIT. | | |

| Clave | Evento | Receptor | Zona | Afectación | Salvaguardas | Recomendaciones |
|---|---|---|---|---|---|---|
| E-3<br>Incendio en dique por sobrellenado en tanque | Radiación térmica | Población | Alto riesgo | No hay receptores potenciales. | | |
| | | | Amortiguamiento | No hay receptores potenciales. | | |
| | | Medio ambiente | Alto riesgo | Contaminación temporal del aire.<br>Afectación al suelo. | Suelo de concreto.<br>Sistema de drenaje. | |
| | | | Amortiguamiento | Contaminación temporal del aire.<br>Afectación al suelo. | Suelo de concreto.<br>Sistema de drenaje. | |
| | | Personal | Alto riesgo | Quemaduras potenciales al personal en área de descargaderas. | Alarma y paro de emergencia.<br>Sistema contra incendio. | Plan de Respuesta a Emergencias. |
| | | | Amortiguamiento | Radiación al personal en la Terminal de Combustibles. | Alarma y paro de emergencia.<br>Sistema contra incendio. | Plan de Respuesta a Emergencias. |
| | | Instalaciones / Producción | Alto riesgo | Daños potenciales a tanques.<br>Pérdida de producto. | Alarma y paro de emergencia.<br>Sistema contra incendio. | Plan de Respuesta a Emergencias. |
| | | | Amortiguamiento | No se prevén daños a las instalaciones o a la operación del AIT. | | |
| E-4<br>Incendio en hidrante de suministro de turbosina en ala de aeronave | Radiación térmica | Población | Alto riesgo | Quemaduras potenciales a pasajeros y tripulación de la aeronave. | Alarma y paro de emergencia.<br>Sistema contra incendio. | Procedimientos operativos.<br>Plan de Respuesta a Emergencias.<br>Instalación de control tipo hombre muerto (Deadman's control) en hidrantes.<br>Cable de seguridad (lanyard) en hidrantes. |
| | | | Amortiguamiento | Radiación potencial a pasajeros y tripulación de la aeronave. | Alarma y paro de emergencia.<br>Sistema contra incendio. | Procedimientos operativos.<br>Plan de Respuesta a Emergencias.<br>Instalación de control tipo hombre muerto (Deadman's control) en hidrantes.<br>Cable de seguridad (lanyard) en hidrantes. |
| | | Medio ambiente | Alto riesgo | Contaminación temporal del aire.<br>Afectación al suelo. | Suelo de concreto.<br>Sistema de drenaje. | |
| | | | Amortiguamiento | Contaminación temporal del aire.<br>Afectación al suelo. | Suelo de concreto.<br>Sistema de drenaje. | |
| | | Personal | Alto riesgo | Quemaduras potenciales a empleados y trabajadores en plataforma. | Alarma y paro de emergencia.<br>Sistema contra incendio. | Procedimientos operativos.<br>Plan de Respuesta a Emergencias.<br>Instalación de control tipo hombre muerto (Deadman's control) en hidrantes.<br>Cable de seguridad (lanyard) en hidrantes. |
| | | | Amortiguamiento | Radiación potencial a empleados y trabajadores | Alarma y paro de emergencia.<br>Sistema contra incendio. | Procedimientos operativos.<br>Plan de Respuesta a Emergencias.<br>Instalación de control tipo hombre muerto (Deadman's control) en hidrantes.<br>Cable de seguridad (lanyard) en hidrantes. |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | |
| | | Instalaciones / Producción | Alto riesgo | Daños potenciales a la aeronave, al sistema de hidrantes e infraestructura aeroportuaria.<br>Suspensión temporal de operación de aeronaves.<br>Pérdida de producto. | Alarma y paro de emergencia.<br>Sistema contra incendio. | Procedimientos operativos.<br>Plan de Respuesta a Emergencias.<br>Instalación de control tipo hombre muerto (Deadman's control) en hidrantes.<br>Cable de seguridad (lanyard) en hidrantes. |
| | | | Amortiguamiento | Suspensión temporal de operación de aeronaves. | Alarma y paro de emergencia.<br>Sistema contra incendio. | Procedimientos operativos.<br>Plan de Respuesta a Emergencias. |

| Clave | Evento | Receptor | Zona | Afectación | Salvaguardas | Recomendaciones |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Instalación de control tipo hombre muerto (Deadman's control) en hidrantes.<br>Cable de seguridad (lanyard) en hidrantes. |
| E-5<br><br>Incendio por derrame en tubería de distribución de turbosina por ruptura total de la tubería | Radiación térmica | Población | Alto riesgo | No hay receptores potenciales. | | |
| | | | Amortiguamiento | No hay receptores potenciales. | | |
| | | Medio ambiente | Alto riesgo | Contaminación temporal del aire.<br>Afectación al suelo. | Suelo de concreto.<br>Sistema de drenaje. | |
| | | | Amortiguamiento | Contaminación temporal del aire.<br>Afectación al suelo. | Suelo de concreto.<br>Sistema de drenaje. | |
| | | Personal | Alto riesgo | Quemaduras potenciales al personal en áreas cercanas. | Alarma y paro de emergencia.<br>Sistema contra incendio. | Plan de Respuesta a Emergencias. |
| | | | Amortiguamiento | Radiación al personal en áreas cercanas al sitio del suceso. | Alarma y paro de emergencia.<br>Sistema contra incendio. | Plan de Respuesta a Emergencias. |
| | | Instalaciones / Producción | Alto riesgo | Daños potenciales a sistema de bombeo o red de distribución a plataforma.<br>Pérdida de producto. | Alarma y paro de emergencia.<br>Sistema contra incendio. | Plan de Respuesta a Emergencias. |
| | | | Amortiguamiento | No se prevén daños a las instalaciones o a la operación del AIT. | | |

### *X.2 Interacciones de riesgo.*

A partir de los resultados obtenidos de los radios potenciales de afectación de las simulaciones, se realizó un análisis y evaluación de posibles interacciones de riesgo con otras áreas, equipos o instalaciones que se encuentren dentro de la Zona de Alto Riesgo del proyecto, considerando la posibilidad de un efecto dominó, de acuerdo con los radios potenciales de afectación.

## XI. REPOSICIONAMIENTO DE ESCENARIOS DE RIESGO.

El reposicionamiento de los escenarios de riesgo está en función de la disminución de la probabilidad de ocurrencia (frecuencia) y las consecuencias de los escenarios simulados.

Dado que el Proyecto aún se encuentra en etapa de anteproyecto al momento de elaborar el presente documento, faltan aún por definir las especificaciones de las Unidades de Control Local (UCL). En la información proporcionada por SEDENA, se establece que las Unidades de Control Local (UCL) son equipos electrónicos de control que se encargarán de concentrar información de instrumentos de medición, válvulas de operación con motor eléctrico y recibir órdenes del Sistema de Monitoreo y Control Básico (SMCB) y/o TMS para poder ejecutar acciones que ayuden en la automatización de operaciones.

Actualmente, SEDENA ha establecido una especificación para determinar los requerimientos mínimos que deben cumplirse para el diseño, instalación, integración y configuración de las Unidades de Control Local (UCL´s), para el proyecto.

Adicionalmente, SEDENA ha establecido una descripción del sistema SCADA que se implementará en el Proyecto.

Para este Proyecto, se implementará una Plataforma de Sistemas Industriales e Integración a SCADA, la cual estará provista de diferentes capas de protección conforme a la IEC-61511 para mantener a la planta en un nivel de riesgo tolerable, proteger al personal, equipos y medio ambiente.

El sistema SCADA se conforma por un Sistema de Gestión de Terminal (TMS), un Sistema de Control de Proceso (SCP), un Sistema de Paro de Emergencia (SPE) y un Sistema de Detección de Fugas (SDF).

La función SCADA podrá ser realizada ya sea por el SCP o bien por un sistema adicional, dichas funciones de supervisión, adquisición y comunicación de datos con los siguientes sistemas:

- Sistema de Control de Proceso
- Sistema de Paro por Emergencia
- Sistema de Fuego y Gas (Fuera de este alcance)
- Sistema de Gestión de Terminal

Las principales funciones del SCADA son:

- Adquisición de datos (monitoreo)
- Transferencia de datos (comunicación)
- Procesamiento de datos
- Envío de instrucciones de control
- Integración de aplicaciones conforme al estándar ANSI/ISA-95-00-01-2010 (IEC 62264-1 Mod) para definir los niveles jerárquicos de control y automatización.

Las principales funciones del sistema de control de procesos (SCP) son:

- Funciones de control para abrir y cerrar las válvulas MOV para controlar el paso a la Turbosina (Jet A) desde la descarga de carrotanques hasta su entrega en tanques, llenaderas y/o red de distribución.
- Funciones de control para encender y apagar las bombas conforme a los requerimientos de envió de Turbosina (Jet A) a los tanques de almacenamiento.
- Funciones de control para encender y apagar las bombas conforme a los requerimientos de envió de Turbosina (Jet A) desde los tanques de almacenamiento a las llenaderas.
- Monitoreo de los patines de medición en la recepción de Turbosina (Jet A) y en el envío de estos hacia los diferentes circuitos de la planta, a través de un protocolo de comunicación.
- Monitoreo y diagnósticos del Sistema de Gestión de Medición de Nivel a través de un protocolo de comunicación.
- Monitoreo y diagnósticos de la Unidad de Control Local (UCL) en llenaderas, a través de un protocolo de comunicación.
- Monitorear las variables de proceso (presión, temperatura, caudal, nivel) y las alarmas de los equipos paquetes, a través de protocolos de comunicación.
- Recibir y enviar los datos al Sistema de Gestión de Terminal (TMS).
- Compartir datos con el Sistema de Control Supervisorio y Adquisición de Datos (SCADA)

Entre las acciones que deberá realizar el Sistema de paro de Emergencia (SPE) seencuentran:

- Procesamiento de información proveniente de Sensores de Campo.
- Conexión de estaciones manuales (estaciones de paro manual).
- Activación de secuencias lógicas en válvulas y bombas.
- Recepción de Señales críticas del SGF
- Alarma audible y visible en consola de operación.
- Confirmación de abandono de terminal.

En el área de almacenamiento se tendrá un solucionador lógico principal para las siguientes funciones:

- Sensores y actuadores que serán cableadas punto a punto al SPE del sistema de sobrellenado
- Activación de estrobo y bocina en tanques de almacenamiento.
- Señales cableadas de alarma al SPE.

El sistema TMS debe garantizar la seguridad, confiabilidad de registros, cálculos y permisivos necesarios para el manejo correcto del producto en la planta.

El TMS debe realizar lo siguiente:

Obtener la información de los valores, cálculos de los patines de medición
Obtener la información de los valores, cálculos del sistema de medición de tanques Obtener la información de los valores, cálculos de llenaderas/descargaderas
Realizar los permisivos y autorización del control de acceso a las llenaderas/descargaderas
Realizar la logística de carga/descarga
Realizar los reportes de balance Generar históricos de información Mostrar las alarmas
Registrar datos de verificación en la entrega del producto Registra los códigos de los sellos

El TMS también generará informes diarios y mensuales para la administración superior. Los informes mensuales también mostrarán los KPI mensuales de la terminal.

A través del Sistema de Control de Proceso se obtendrán los datos del Sistema de Gestión de Medición de Nivel, Controlador/Computadores de Flujo, Unidad de Control Local, Detección de Fugas en Tanques, Detección de Fugas en Red de Distribución y de los diferentes equipos paquete.

El Sistema de Detección de Fugas en Red de Distribución tiene como objetivo brindar un monitoreo efectivo del ducto, así como asistencia a la toma de decisiones operativas.

El ducto, en el cual se llevará a cabo la instalación del sistema de monitoreo, asistencia a la toma de decisiones operativas, así como de detección, localización y cuantificación de fugas, cuenta con las siguientes características:

- Longitud de aproximadamente 20 kilómetros de ducto, cuya trayectoria nace en la salida de la planta de combustibles hacia el área de plataformas en la terminal de pasajeros del aeropuerto, el diseño del circuito es en anillo lo cual permitirá el regreso de producto a la planta de

combustibles en caso de ser necesario.

- El ducto tiene su recorrido en forma de anillo con un diámetro de 12 pulgadas.
- El Fluido transportado será Turbosina (Jet A).

De acuerdo a la IEC-61511, el SPE se diseñará como una capa de protección de prevención para disminuir o eliminar las consecuencias; por tanto, se debe cumplir con la confiabilidad, integridad, independencia y aspectos de validación indicadas en este documento.

La función principal del sistema de paro por emergencia es llevar la planta a un estado seguro cuando una situación anormal se presente.

El SPE estará diseñado con tecnología electrónica/programable para el solucionador lógico. Sus acciones principales son:

- El cierre de válvulas ESDV.
- Llevar a modo seguro las instalaciones
- Envió de señales de alarma al SCP.
- Recibir las señales de los transmisores de presión y temperatura del sistema dedetección de fugas de la red de distribución y trasmitirla a los servidores del SDF

Por lo anterior, una vez que sean definidos e instalados los sistemas y la configuración de las Unidades de Control Local y el Sistema de Monitoreo y Control Básico, se estará en posibilidad de realizar el reposicionamiento adecuado de los escenarios de riesgo identificados en el análisis HazOp realizado.

# XII. SISTEMAS DE SEGURIDAD Y MEDIDAS PARA ADMINISTRAR LOS ESCENARIOS DE RIESGO.

## *XII.1 Sistemas de seguridad.*

Tal como se menciona en la sección anterior, el Proyecto está en la fase, final de la etapa de anteproyecto al momento de realizar el presente documento, y faltan por definir las especificaciones de los sistemas y la configuración de las Unidades de Control Local y el Sistema de Monitoreo y Control Básico tanto del proyecto como de la red de distribución de turbosina a plataforma.

No obstante, a continuación, se incluyen algunos aspectos básicos que se deberán considerar en los sistemas de seguridad inherentes al proceso de manejo y almacenamiento de turbosina en el Proyecto.

El programa general de seguridad del Proyecto se basa en el cumplimiento de los códigos internacionales de construcción y códigos relacionados que se mencionan en la sección I. Se recomienda usar los diseños de sistema propuestos en casos en donde estos esfuerzos puedan beneficiar a la instalación al proporcionarle flexibilidad para:
1) cumplir con las metas arquitectónicas del propietario
2) solucionar los problemas prácticos como la desconexión inherente entre el acceso y la seguridad
3) proporcionar soluciones más rentables.

Los objetivos del diseño de seguridad deben dar como resultado una planta de combustibles que opere de manera segura y protegida para los Usuarios, los empleados y la comunidad local.

La implementación de estos objetivos debe incluir lo siguiente:

i. Seguridad física: Esto incluirá cercas perimetrales, barreras y puntos de control para vehículos y peatones.
ii. Seguridad electrónica: Esto incluirá un monitoreo de las alarmas de control de acceso, sistemas de video-vigilancia y de detección de intrusos en el perímetro.
iii. Revisión de seguridad: Esto incluirá la revisión a los pasajeros, a los bienes y al cargamento antes de ingresar a la zona estéril.
iv. Monitoreo de seguridad: Esto incluirá un centro de operaciones de seguridad primarias y secundarias, el cual fungirá como el punto central de monitoreo y de gestión de los sistemas de seguridad.

- Programa del sistema de seguridad

A continuación, se describen conceptos clave de seguridad del sitio para el Proyecto.

1) Sistema de monitoreo de alarmas de control de acceso

El sistema de monitoreo de alarmas de control de acceso se usará para monitorear y controlar el acceso entre las zonas de seguridad del Proyecto. El sistema permitirá un monitoreo centralizado e integración con los diversos sistemas de control de seguridad del Proyecto.

El sistema se configurará para que pueda expandirse de acuerdo con el plan maestro general para la ampliación del polígono.

El uso de sistemas electrónicos para el control del acceso es reconocido por la Administración de Seguridad de Transportes (TSA, por sus siglas en ingles) y por la Organización Internacional de Aviación Civil (OACI) como el método de preferencia para controlar y restringir el acceso a las zonas estériles y al área de operaciones.

2) Sistema de video-vigilancia

El sistema de video-vigilancia se usará para apoyar al sistema de monitoreo de alarmas de control de acceso para vigilar visualmente los puntos críticos de control en la instalación. Además, este sistema se usará para complementar las operaciones del Proyecto al proporcionar vigilancia del área de operaciones.

El uso del sistema de video-vigilancia es reconocido por la TSA y por la OACI como un método para proporcionar una vigilancia de seguridad y realizar un análisis de respuesta a las alarmas. El sistema de video-vigilancia está respaldado por el personal de seguridad en las respuestas de alarmas.

3) Sistema de detección de intrusos en el perímetro

El sistema de detección de intrusos en el perímetro se usará para detectar el ingreso no autorizado de individuos al área segura. Este sistema interactuará con el sistema de monitoreo de alarmas del control de acceso y con el sistema de video-vigilancia para la respuesta a alarmas. Se elegirá un sistema de detección de intrusos en el perímetro según la configuración final del perímetro.

4) Revisión de seguridad

El objetivo del operador es realizar una revisión al 100% de todos los individuos que pidan acceso a las zonas estériles y seguras.

La revisión de visitantes, contratistas, transportistas, para encontrar objetos prohibidos se llevará a cabo en los puntos de inspección. Los individuos que soliciten acceso a la zona estéril tendrán que pasar un escáner de inspección de objetos. Se inspeccionará a los individuos con el uso de un escáner de tecnología de imagen avanzada de cuerpo completo. Esta medida es reconocida por la TSA y por la OACI como un método aprobado para la inspección de pasajeros.

La inspección de cargamento/bienes se realizará en una ubicación de procesamiento en donde un equipo de inspección de tamaño tarima revisará cargamento/bienes en búsqueda de objetos

prohibidos. La TSA y la OACI no proporcionan una guía específica sobre cómo completar el proceso de inspección de cargamento/bienes hacia la zona de operaciones. Debido a que este aeropuerto es nuevo, es recomendable el uso de la tecnología como el método recomendado de inspección para buscar objetos prohibidos.

5) Sistema de bardas perimetrales

El sistema de barreras perimetrales definirá el perímetro entre las áreas públicas y las áreas seguras. Este sistema puede estar formado por diferentes barreras, incluyendo cercas, paredes de mampostería y barreras para el control de vehículos. En donde el índice de colisiones sea un asunto de preocupación, se elegirá un tipo de sistema de barreras que cumpla con el perfil de amenazas del área del perímetro.

## *XII.2 Medidas preventivas*

A continuación, se indican las medidas preventivas orientadas a la reducción de la probabilidad de ocurrencia de los eventos riesgosos identificados en el Proyecto.

**a) Dispositivos para determinar la dirección del viento.**

El centro de trabajo contará con dispositivos para determinar la dirección del viento y estará instalado en puntos estratégicos visibles.

**b) Extintores.**

La instalación de los extintores portátiles y carretilla de polvo químico seco (PQS) y portátiles de bióxido de carbono ($CO_2$), deberán colocarse distribuidos estratégicamente en el Proyecto, de acuerdo con las especificaciones indicadas en la norma NOM-002-STPS-2000.

Los equipos deberán presentar identificación, fechas de última inspección y recarga, estar en buenas condiciones físicas exteriores, tanto en el cuerpo como en sus accesorios, altura máxima de instalación, distancias entre ellos, señalización y libres de obstáculos para su acceso.

**c) Equipo de detección de fuego y mezclas explosivas.**

De acuerdo al punto 5.12 de la norma NOM-002-STPS-2000, Condiciones de seguridad, prevención, protección y combate de incendios en los centros de trabajo, el Proyecto debe contar con detectores de incendio acordes al grado de riesgo de incendio en las distintas áreas del centro de trabajo, para advertir al personal que se produjo un incendio o que se presentó alguna otra emergencia.

El sistema de detección de incendio incluye tableros de control de fuego principal y local, detector de calor, detectores de humo estaciones manuales y alarmas.

Además, el personal estará capacitado en el manejo de explosímetros manuales y se realizarán verificaciones en el área de manejo de turbosina.

**d) Sistema contra incendio.**

De acuerdo al punto 5.4 de la norma NOM-002-STPS-2000, Condiciones de seguridad, prevención, protección y combate de incendios en los centros de trabajo, el Proyecto debe contar con equipos contra incendio, de acuerdo al grado de riesgo de incendio, a la clase de fuego que se pueda presentar en el centro de trabajo y a las cantidades de materiales en almacén y en proceso.

El sistema contra incendio incluye sistemas de distribución sobre suelo o en trincheras alimentando hidrantes, sistemas de supresión basada en gas $CO_2$, bombas contra incendio y extintores contra incendio portátiles.

- Servicios de rescate y extinción de incendios (SREI)

La ubicación de las instalaciones SREI debe cumplir con los tiempos de respuesta mínimos en cualquier parte de las áreas de movimiento. La recomendación de la OACI es de 2 minutos para el primer vehículo con capacidad de entregar el 50% de la descarga requerida y 3 minutos para los demás vehículos. Suponiendo que la velocidad del vehículo sea de 60 km/h, la distancia máxima del recorrido es de 2,000 m para un tiempo de respuesta de 2 minutos y 3,000 m para 3 minutos.

El número y capacidad de los vehículos de extinción de incendios también se definen por la OACI. El tamaño de las estaciones de bomberos se determina por el número de vehículos que serán alojados en cada una. Debido a la distribución de los vehículos en el aeródromo y para lograr los tiempos de respuesta requeridos, serán necesarias instalaciones de diferentes tamaños. El uso de estacionamientos para vehículos de bomberos y de bahías de servicio simplificará las operaciones y el acceso para los vehículos y esta se debe considerar como una buena práctica.

Además de la cantidad necesaria de vehículos de bomberos, se pueden necesitar otros carros como vehículos de mando de emergencia, vehículos de apoyo, vehículos de acceso al interior de aviones, unidades de ventilación móviles, vehículos de intervención rápida y ambulancias.

Para poder proporcionar los volúmenes de agua y espuma requeridas y dentro de los tiempos de respuesta, el tamaño de las estaciones SREI y el número de vehículos necesarios para cada estación, será algo muy importante que es necesario definir. Se debe realizar un estudio completo antes del diseño final y de la decisión de las dimensiones de las estaciones, que investigue los tiempos de respuesta de cada estación SREI a los límites del área del Proyecto; también se debe tomar en cuenta el desempeño y confiabilidad de los vehículos de SREI en el aeropuerto.

**e) Equipo de protección personal de emergencia.**

El centro de trabajo deberá cumplir con la norma NOM-005-STPS-1998, relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo para el manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas, donde en el punto 5.9 indica proporcionar el equipo de protección personal, conforme al estudio para analizar el riesgo potencial y a lo establecido en la NOM-017-STPS-2008, Equipo de protección personal, selección, uso y manejo en los centros de trabajo.

El centro de trabajo deberá contar para la atención de emergencias con el equipo básico y especial que requiere el personal de bomberos; asimismo la empresa deberá proporcionar ropa

de trabajo y lentes de seguridad a los trabajadores, con base al trabajo que realizan. El Proyecto contará con trajes de bombero completos y equipos de respiración autónoma cada uno con su tanque de aire comprimido.

**f) Instalaciones de atención médica y equipo de primeros auxilios.**

El Proyecto deberá cumplir con la norma NOM-005-STPS-1998, Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo para el manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas, donde en el punto 5.6 indica que con base en los resultados del estudio para analizar el riesgo potencial, debe contar con un manual de primeros auxilios en el cual se deben definir los medicamentos y materiales de curación que requiere el centro de trabajo y los procedimientos para la atención de emergencias médicas; se puede tomar como referencia la guía de referencia que se incluye al final de la norma mencionada.

El Proyecto deberá contar con botiquines de primeros auxilios distribuidos estratégicamente. Durante una emergencia o en caso de un accidente, los médicos adscritos y/o los integrantes de brigada están designados para dar los primeros auxilios al personal afectado.

**g) Sistema de tierras físicas.**

Las instalaciones deberán cumplir con la norma NOM-022-STPS-1999, Electricidad estática en los centros de trabajo - Condiciones de seguridad e higiene, donde en el apartado 5.5 indica que deben instalar en su caso, elementos de captura, sistemas de tierras, sistemas de pararrayos, equipos y dispositivos para proteger al centro de trabajo de la acumulación de cargas eléctricas estáticas y descargas eléctricas atmosféricas, principalmente en la Planta Central de Servicios.

En el punto 5.6 de la norma indica medir y registrar, al menos cada doce meses, los valores de resistencia de la red de tierras y la continuidad en los puntos de conexión a tierra en el equipo que pueda generar o almacenar electricidad estática, por lo que se recomienda se dé seguimiento a dicha evaluación.

**h) Medición de espesores en tubería y equipos.**

El Proyecto deberá cumplir con el punto 5.3 de la norma NOM-028-STPS-2004 Organización del Trabajo - Seguridad en los procesos de sustancias químicas, referente a la integridad mecánica de las instalaciones relacionadas con el manejo y almacenamiento de turbosina.

El centro de trabajo verificará la condición física de las tuberías y equipos para detectar la integridad mecánica, determinar la vida útil y cuándo es necesaria la sustitución parcial o total de los mismos; con el fin de prevenir riesgos y de programar con oportunidad los cambios necesarios, para así acortar los períodos de reparación y prolongar las corridas operacionales.

**i) Sistemas y equipos de comunicación.**

El Proyecto deberá contar con radios portátiles con un alcance de 50 km, con frecuencias privadas, para uso del personal de las áreas de seguridad, operación y mantenimiento con cobertura a la red telefónica comercial e interna, interfonos, así como de fax y correo electrónico.

Para la comunicación de cualquier contingencia que pudiese ocurrir en tránsito, la comunicación puede establecerse por vía telefónica o radial hacia el exterior. Para informar o solicitar apoyo se dispone del directorio de los cuerpos de auxilio institucional y privado, como son Policía Municipal, Cuerpo de Bomberos, Protección Civil y Cruz Roja, entre otros.

**j) Programa de Prevención de Accidentes (PPA).**

El Proyecto deberá cumplir con el Título Cuarto, Capítulo V, Artículo 147 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, donde indica el cumplimiento del Programa de Prevención de Accidentes.

Los objetivos del Programa de Prevención de Accidentes son los siguientes:

i. Evitar que los accidentes provocados por la realización de actividades altamente riesgosas (AAR), alcance el nivel de desastre.
ii. Propiciar que quienes realicen actividades de riesgo, comunidad y empresas aledañas,así como autoridades locales, desarrollen una conciencia de alerta continua ante cualquier contingencia ocasionada por la liberación de sustancias inflamables.
iii. Propiciar un ambiente de seguridad para los usuarios y el personal que labore en el Proyecto.
iv. Contar con planes, procedimientos, recursos y programas para dar respuesta a cualquier contingencia ocasionada por el manejo de las sustancias inflamables.
v. Contar con planes procedimientos, recursos y programas para dar atención a cualquiersituación de desastres ocasionados por la liberación de sustancias inflamables.
vi. Establecer los mecanismos de comunicación, coordinación y concentración de accionespara incrementar adecuadamente el PPA en las cercanías del Proyecto.

**k) Programa de Seguridad.**

El área de seguridad de la organización realizará inspecciones periódicas (diarias, semanales, quincenales, mensuales y anuales) de los equipos y sistemas de seguridad y prevención con la finalidad de detectar oportunamente desviaciones para su atención.

**l) Capacitación y pláticas de seguridad al personal.**

El Proyecto deberá cumplir con la norma NOM-002-STPS-2000, referente a las condiciones de seguridad, prevención, protección y combate de incendios en los centros de trabajo, donde en su apartado 5.8 indica que deben proporcionar a todos los trabajadores capacitación y adiestramiento para la prevención y protección de incendios, y combate de conatos de incendio; así como con la norma NOM-005-STPS-1998, Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo para el manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas, donde en su apartado 5.13 indica capacitar y adiestrar a los trabajadores en el Programa Específico de Seguridad e Higiene para el Manejo, Transporte y Almacenamiento de Sustancias Químicas Peligrosas, y el apartado 5.16 indica comunicar a los trabajadores los riesgos a los que estén expuestos.

Es importante capacitar y adiestrar a los trabajadores para que comprendan la complejidad de los diversos equipos de protección personal, emergencias, así como las rutas de evacuación, que hacer y cómo actuar en caso de un siniestro.

Los cursos de capacitación se planean y programan anualmente de acuerdo a las necesidades y a partir de sus evaluaciones de desempeño. Es importante señalar que todos los cursos de capacitación que serán impartidos, ya sea por personal externo o interno, deberán quedar registrados en documentos con las firmas de los participantes y expositores. Asimismo, se

contará con un programa de capacitación del personal en la aplicación de los procedimientos específicos de cada área (operación, seguridad y mantenimiento) con los que cuenta la instalación para el desarrollo de las actividades.

También darán difusión a la información de seguridad como son normas, procedimientos y reglamentaciones, así como las formas correctas del uso del equipo de protección personal, con el objeto de evitar que se produzcan accidentes por el desconocimiento de dicha información.

Además, deberán entrenar al personal en los conocimientos teórico-prácticos básicos de la utilización oportuna y eficiente de los sistemas contra incendio, así como las formas correctas del uso de equipo de protección personal, con la finalidad de prevenir la iniciación de un fuego o controlar, apagar un incendio y controlar un derrame de turbosina.

**m) Simulacros operacionales.**

Con el objeto de entrenar al personal operativo se llevarán a cabo simulacros operacionales para que su respuesta sea oportuna y segura en situaciones de emergencia.

**n) Simulacros de emergencia.**

El Proyecto deberá entrenar al personal mediante su participación directa en simulacros de emergencias, para detectar y evaluar las fallas que pueden presentarse durante los simulacros contra incendio; asegurar que los equipos, materiales y sistemas que sean esenciales para el combate de un incendio, se encuentren en las mejores condiciones de conservación y operación que aseguren su uso inmediato; mantenga familiarizado con la ubicación de puntosde reunión, de instalaciones y equipos del centro de trabajo, ponga en práctica en forma simulada las acciones que debe llevar a cabo en un hecho real, de tal manera que las conozca completamente.

**o) Brigadas de emergencia.**

El Proyecto deberá cumplir con la norma NOM-002-STPS-2000, referente a las condiciones de seguridad, prevención, protección y combate de incendios en los centros de trabajo, donde en su apartado 5.10 indica que se deben organizar y capacitar brigadas de evacuación del personal y de atención de primeros auxilios. En los centros de trabajo donde se cuente con más de una brigada, debe haber una persona responsable de coordinar las actividades de las brigadas.

En el Proyecto se deberán establecer procedimientos e instrucciones para atender emergencias entérminos generales, sin especificar quienes intervienen en la misma. La empresa contará con niveles dentro de su organización y formará brigadas contra incendios, evacuación, búsqueda y rescate y primeros auxilios.

**p) Programa de mantenimiento.**

El Proyecto deberá cumplir con el punto 12.2 de la norma NOM-028-STPS-2004 Organización del Trabajo-Seguridad en los procesos de sustancias químicas, referente a que debe contar con un programa de mantenimiento preventivo que incluya todo el equipo crítico relacionado con el proceso usando los procedimientos correspondientes.

El mantenimiento preventivo que se implantará considerará la totalidad de las instalaciones y equipos mecánicos, eléctricos, electrónicos y neumáticos estáticos y dinámicos, líneas, instrumentación, obras civiles y de servicios, parque vehicular, sistema contra incendio y de

seguridad física de la instalación. Basará su funcionamiento en el llamado catálogo de planes, mediante la emisión programada de órdenes de trabajo, en las que se detallan las actividades a realizar en cada tipo de servicio, ya sea mensual, bimestral, trimestral, semestral o anual. Las órdenes de trabajo emitidas incluyen espacios para el reporte de los trabajos realizados, materiales utilizados y tiempos empleados en su ejecución, así como los nombres y firmas de las personas que intervienen en dichas actividades. Esta información se alimentará a la base de datos del sistema, de tal manera que se vaya creando el historial de cada una las instalaciones y equipos, lo que finalmente llevará a la implantación de un sistema de mantenimiento predictivo, que evitará en el futuro los paros no programados por fallas imprevistas de los sistemas.

El sistema de control computarizado del mantenimiento permitirá un rápido acceso a la información requerida; asimismo puede verificarse la actualización de los archivos consultados. Para la realización de los trabajos, es requisito de seguridad elaborar y obtener la autorización de un "permiso de trabajo", en el que se hace un análisis de la tarea para determinar los riesgos en su ejecución. Durante la ejecución de los trabajos se realizarán inspecciones para verificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad solicitados.

El mantenimiento preventivo mayor a obras civiles e instalaciones fijas podrá ser realizado por empresas contratadas para tal fin; estas tareas incluyen pintura y señalización de vialidades, calafateo de juntas de expansión en los pisos de tránsito pesado, limpieza de áreas, mantenimiento de áreas verdes, entre otras.

La aplicación y ejecución sistemática de los programas de mantenimiento preventivo permitirá una óptima conservación de las instalaciones. Las líneas de conducción de productos estarán protegidas con pinturas anticorrosivas, soportadas y sujetas de acuerdo a normas y códigos, con la señalización respectiva en materia de identificación, dirección de flujo, código de colores y en su instalación reflejan lo indicado en planos.

La aplicación y ejecución sistemática del programa de mantenimiento preventivo permitirá una óptima conservación de las instalaciones.

**q) Clasificación de áreas de riesgo eléctrico.**

El diseño de las instalaciones eléctricas en el Proyecto deberá cumplir con la norma NOM-001-SEDE-2005 Instalaciones eléctricas (utilización) Capítulo 5 apartado 4.5 ambientes especiales.

En las líneas de conducción de turbosina, del Proyecto contará con el sistema EFSO, con válvulas de corte y control que operan remotamente, por lo que con los sistemas de control que se instaurarán en caso de que se diera un posible evento no deseado, los radios de afectación (zona de riesgo) quedarán contenidos dentro del predio del Proyecto.

**r) Sistema de protección contra incendios.**

El sistema de protección contra incendios protege al personal y a los equipos contra incendios, proporciona una fuente inmediata de agua contra incendios en todas las áreas del Proyecto y un medio para la detección y extinción de incendios en áreas críticas. El sistema de protección contra incendios se ha diseñado para proporcionar capacidad integral de lucha contra incendios a todas las áreas de la instalación, para los riesgos de incendio en cada área. El sistema de protección contra incendios utiliza los siguientes métodos de protección:

i. Rociadores de tubería húmeda para el edificio de depósito y mantenimiento, las oficinasde la administración y la caseta de las bombas contra incendio.
ii. Puestos de mangueras / conexiones siamesas localizadas en los edificios y alrededor de ellos, con largos de manguera suficientes para llegar a las áreas cercanas. Puestos de monitoreo montados sobre hidrantes.
iii. Sistemas de rociadores de diluvio que se localizarán en los transformadores elevador de tensión, auxiliar y de aislamiento de los turbogeneradores.
iv. Hidrantes localizados alrededor del circuito de agua contra incendio que abarca el perímetro y el interior de la instalación.
v. Extintores contra incendio portátiles localizados en toda la instalación para combatir pequeños focos de incendio.
vi. Tablero de protección contra incendios, que opera juntamente con los detectores dehumo y calor.

**s) Cuarto de control (instrumentación).**

El diseño del cuarto de control del Proyecto deberá considerar conceptos ergonómicos con el fin dedisminuir la incidencia de fallas humanas.

El sistema de control contempla un alto grado de disponibilidad, ya que considera conceptos de redundancia, partición o distribución de funciones, autodiagnóstico, así como la posibilidad de sustituir o reconfigurar componentes en línea. Serán redundantes aquellos componentes críticos del sistema, tales como controladores, bases de datos, interfases de comunicación, fuentes de alimentación, mediciones de variables críticas y estaciones de operación.

La instalación contempla todos los sistemas de instrumentación y control necesarios para la operación segura y automática de toda la instalación, incluyendo ingeniería, equipo, accesorios, instalación, software y programación, licencias de uso de software, pruebas, documentación y capacitación de sistema de control distribuido, control maestro y sistema de transmisión de datos.

El sistema de control distribuido deberá incluir:

i. Estaciones de operación, estaciones de pantalla simple (o de doble pantalla) en el cuarto de control central.
ii. Estación de programación (pantalla, teclado, ratón, procesador, memorias, impresora).
iii. Insertos con instrumentación de emergencia.

El tablero del sistema de control distribuido deberá ser funcional y visto de cualquier punto y deberá incluir cabina, módulos analógicos y digitales, módulos del procesador, módulos de comunicación, estaciones de operador (que se encuentra en la sala del cuarto de control principal) y conexiones con los módulos del hardware del equipo.

Los elementos finales de control incluyen: actuadores, válvulas de control, posicionadores, reguladores auto-operados, accesorios de instalación, válvulas de seguridad y alivio.

La instrumentación local deberá estar integrada por indicadores de presión, indicadores de presión diferencial, puntos de prueba de presión, indicadores de temperatura, termo pozos de prueba, columnas de nivel, indicadores de nivel tipo regleta, mirillas de flujo, rotámetros (indicadores de flujo), válvulas solenoides y controladores (reguladores) locales.

Los sistemas de control de equipos paquete cuentan con equipo y programación de medición, regulación, secuencias de arranque y paro, interfases con el operador, señalización al sistema de control distribuido.

**t) Equipo e instalaciones contra fugas, derrames y de contención.**

La contención de derrames y otras descargas accidentales de combustible son de vital importancia en el Proyecto. Las regulaciones federales, estatales y locales generalmente dictan el tipo de instalaciones y de materiales necesarios para cumplir con dichas normas. Lo anterior incluye:

i. Pavimento de concreto, bordos de contención (diques) y otras infraestructuras de control de derrames en las estaciones de carga y descarga de combustible;
ii. Depósitos de doble pared, en los que la pared exterior sirve como contención secundaria, o diques de contención alrededor de los tanques de una sola pared;
iii. Sistemas de tuberías subterráneas de doble pared con sistemas de detección de fugas;
iv. Separadores de aceite y agua que se instalan como parte del sistema de drenaje de aguas pluviales del área de almacenamiento de combustible para separar el aceite en escorrentías de aguas pluviales. Todos los flujos necesitarán pasar por estos dispositivos antes de la recolección en el sistema de drenaje pluvial.

Todos los tanques de almacenamiento de combustible en el área deben contar con un sistema de contención de derrames diseñado y construido conforme a la norma NFPA 30 y a los códigos y normas locales.

Los tanques de almacenamiento de turbosina que cumplen con la API 650 deben tener un sistema de contención que consiste en paredes de contención de concreto de aproximadamente 1.83 metros de alto como máximo, y piso de concreto con recubrimiento de membrana elastomérica debajo del piso. El sistema de contención deberá estar diseñado considerando el asentamiento del área de contención y el asentamiento diferencial entre las cimentaciones de tanque con soporte de pilotes y el sistema de contención con piso y membrana. Cada área contenida deberá tener una entrada para válvulas de drenaje pluvial conectadas al sistema de residuos industriales de las instalaciones de combustible a granel.

El sistema de revestimiento elastomérico consistirá de un revestimiento elastomérico, un forro de tela protectora por debajo y por encima de la membrana elastomérica para protegerla del desgaste y de perforaciones causadas por el suelo y la grava. El revestimiento elastomérico deberá sujetarse al muro circular del tanque con sellos elastoméricos, listones de acero inoxidable, pernos epoxi para anclaje, arandelas y tuercas. Si el asentamiento diferencial se vuelve excesivo para la montura del revestimiento al muro, entonces pueden agregarse extensiones de membrana para aliviar la tensión en la membrana existente.

El área de contención constará de diques de concretos intermedios de 0.915 metros, según los requisitos de la norma NFPA 30, para minimizar los derrames causados por trasvase de un tanque a otro (por consideraciones relacionadas con incendios).

**u) Equipo de protección personal de emergencia.**

El personal de las brigadas contará para la atención de emergencias con el siguiente equipo de seguridad:

i. Cascos.
ii. Calzado.
iii. Trajes contra incendio.
iv. Guantes.
v. Cascos de bombero.
vi. Monogafas.
vii. Arnés.
viii. Botas contra incendio.
ix. Equipo de respiración autónomo.
x. Equipo de respiración inducido.
xi. Equipos completos de bomberos.

**v) Sistema de tierras físicas y sistema pararrayos.**

El Proyecto instalará un sistema de tierras integrado por un conjunto de conductores, electrodos, accesorios y otros elementos que, interconectados eficazmente entre sí, tienen por objeto conectar a tierra elementos que pueden generar o acumular electricidad estática.

El Proyecto contará con un sistema de pararrayos, el cual consiste en dispositivos para recibir, colectar o desviar las descargas eléctricas atmosféricas a tierra.

**w) Rutas de evacuación y puntos de reunión**

Los puntos de reunión se establecerán considerando que las rutas de evacuación no deben encontrarse en la dirección de los vientos dominantes. El proyecto contará con letreros de señalización de rutas de evacuación distribuidas estratégicamente en toda la instalación y existirán múltiples puntos de reunión.

## Programa de seguridad e inspección

El área de seguridad industrial del proyecto deberá realizar inspecciones periódicas (diarias, semanales, quincenales, mensuales y anuales) de los equipos y sistemas de seguridad y prevención con la finalidad de detectar oportunamente desviaciones para su atención. El Programa de Actividades de Seguridad contempla las siguientes inspecciones:

- ***Grupo 1.- Actividades dirigidas al hombre (inspecciones preventivas de riesgo).***

a) Condiciones de riesgo. El objetivo es detectar y corregir efectivamente las condiciones de riesgo en todas las áreas o sectores del área, para lograr que los trabajos derivados de las inspecciones sean efectuados oportunamente.

b) Establecer los períodos de la revisión y prueba del equipo de protección personal fijo, con la finalidad de mantenerlo en óptimas condiciones de servicio (incluir revisión y conservación de equipo de protección personal fijo). Inspeccionar regaderas de emergencias y botiquines de primeros auxilios y equipos de aire respirable.

c) Capacitación. Dar difusión a la información de seguridad como normas, procedimientos y reglamentaciones, así como las formas correctas del uso del equipo de protección personal, con el objeto de evitar que se produzcan accidentes por el desconocimiento de dicha información [incluir uso correcto de equipo básico de seguridad (casco, lentes,entre otros) para empleados y contratistas, análisis de seguridad del trabajo para empleados y contratistas].

d) Simulacros operacionales. El objetivo es entrenar al personal operativo para que su respuesta sea oportuna y segura en situaciones de emergencia.

e) Pláticas y prácticas contra incendio. El objetivo es entrenar al personal del SREI en los conocimientos teórico-prácticos básicos de la utilización oportuna y eficiente de los sistemas contra incendio, así como las formas correctas del uso de equipo de protección personal, con la finalidad de prevenir la iniciación de un fuego o controlar y apagar un incendio.

f) Simulacros contra incendio. El objetivo es entrenar al personal del proyecto mediante su participación directa en simulaciones de emergencias, detectar y evaluar las fallas que pueden presentarse durante los simulacros contra incendio, asegurar que los equipos, materiales y sistemas que sean esenciales para el combate de un incendio, se encuentren en las mejores condiciones de conservación y operación que aseguren su uso inmediato, mantenga familiarizado con la ubicación de puntos de reunión, de instalaciones y equipos del centro de trabajo, ponga en práctica en forma simulada lasacciones que debe llevar a cabo en un hecho real, de tal manera que las conozca completamente.

g) Programar y realizar campañas de seguridad, que sirvan para mejorar las condiciones de seguridad en el centro de trabajo (incluir uso de ropa de trabajo y equipo de protección personal, aplicación de reglamentos y procedimientos de seguridad, abatimiento de los índices de accidentabilidad.

- ***Grupo 2.- Actividades dirigidas a las instalaciones.***

a) Revisión de los tanques de almacenamiento, tuberías y equipos: El objetivo es verificar la condición física de los tanques, tuberías y equipos para determinar si es necesaria la

sustitución parcial o total de los mismos; con el fin de prevenir riesgos y de programar con oportunidad los cambios necesarios, para así acortar los periodos de reparación y prolongar las corridas operacionales.

b) Verificar que los sistemas de drenaje no tengan obstrucciones y que posean capacidad para desalojar productos o aportaciones de agua en casos de emergencia, sin presentar zonas de inundación.

- ***Grupo 3.- Actividades dirigidas a los dispositivos o sistemas que deben operar en casos de emergencia.***

El objetivo consiste en que los sistemas de protección estén completos y operables, y que alarmen, disparen e interactúen con los procesos, operando en sus valores de calibración correctos, para proteger equipos e instalaciones en caso de descontroles en los procesos operativos.

Revisión y calibración de válvulas de seguridad - relevo. Lograr que estos dispositivos operen eficientemente cuando ocurran incrementos de presión en los sistemas de tuberías y equipos por descontroles operacionales o emergencias.

- ***Grupo 4.- Actividades dirigidas a los equipos e instalaciones contra incendio. Revisión y conservación de equipo e instalaciones contra incendio estén en condiciones de uso y que su localización sea la apropiada.***

1. Inspección y verificación de los extintores de polvo químico seco y $CO_2$ existentes en las diferentes áreas.

2. Revisión y conservación de equipo y sistemas fijos contra incendio. Que los sistemas fijos contra incendio empleados como protección en las instalaciones operativas,almacenamiento, estén en condiciones de uso y sin limitaciones, para que funcionen correctamente en caso de emergencia. Incluir las siguientes actividades:

a. Sistema de detección de humo y fuego.
b. Inspecciones de válvulas de corte verificando si no están pegadas, su estado físico, si el vástago está limpio y debidamente lubricado, y si se encontró en la posición requerida que generalmente es la posición abierta de las válvulas de corte.
c. Inspección y revisión de los hidrantes.
d. Inspección y revisión de los monitores.
e. Llevar a cabo pruebas semanales de las bombas contra incendio.
f. Llevar a cabo pruebas de comportamiento de las bombas contra incendio.
g. Inspección a sistema de aspersión.
h. Pruebas de funcionamiento, mantenimiento a sistema de aspersión.

- **Administración de la integridad de los ductos**

Para la administración de la integridad de los ductos de turbosina del proyecto, conforme lo establece la Norma Oficial Mexicana NOM-027-SESH-2010, se deberán identificar los peligros potenciales que les sean aplicables, con base en los tipos previstos de defectos y modos de falla, así como otros peligros potenciales que se hayan observado durante esta etapa. Los peligros potenciales se pueden agrupar en nueve categorías, de acuerdo a su naturaleza y características de crecimiento, los cuales se incluyen en la Tabla XII.1.

***Tabla XII.1 Categorías y peligros potenciales a considerar en la administración de la integridad de los ductos***

| No. | Categoría | Peligro potencial |
|---|---|---|
| 1 | Corrosión externa | Corrosión exterior |
| 2 | Corrosión interna | Corrosión interior |
| 3 | Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC) | Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC) |
| 4 | Defectos de fabricación | Costura defectuosa<br>Metal base defectuoso |
| 5 | Construcción | Soldadura circunferencial defectuosa<br>Falla por alineamiento<br>Doblez por flexión o pandeo |
| 6 | Equipo | Falla de los empaques o anillos tipo O<br>Componente rayado o roto<br>Mal funcionamiento del equipo de control o relevo<br>Falla del sello / bomba |
| 7 | Daño por terceros | Falla instantánea / inmediata<br>Modo de falla retardado<br>Vandalismo<br>Impacto de objetos arrojados sobre el ducto |
| 8 | Operaciones incorrectas | Procedimientos de operación incorrectos o no aplicados |
| 9 | Clima y fuerzas externas | Tormentas eléctricas<br>Viento, tormentas o inundaciones<br>Sismos<br>Deslaves<br>Huracanes<br>Erosión<br>Deslizamiento |

- **Medidas de contingencias.**

**a) Recolección de aguas residuales.**

Para la recolección de aguas residuales, se tendrán diferentes efluentes de aguas residuales:

i. Aguas residuales sanitarias: Se enviarán a una planta de tratamiento de aguas residuales sanitarias; el agua ya tratada será utilizada para el riego de áreas verdes.

ii. Aguas aceitosas: Las aguas aceitosas pasarán por un separador de grasas y aceites, un conjunto de fosas de captación, después por una decantación con un sistema de arrastre de la fase aceitosa que se dispondrá como residuo, cumpliendo con la normatividad ambiental.

Cada zona de diques en el proyecto tendrá una cuenca de drenaje con una válvula de cierre normal en la entrada de la respectiva tubería de drenaje. La tubería de drenaje se debe conectar al sistema de desechos industriales. Se abrirá la válvula de descarga del foso de sumidero sólo si no hay ninguna indicación visible de hidrocarburos en la superficie del agua de lluvia contenida. Si se detectan cantidades importantes de hidrocarburos, esto debe corregirse eliminando la mayor cantidad de líquidos de hidrocarburos como sea posible antes de que se libere el agua contenida hacia el sistema de desechos industriales.
La descarga de los separadores de aceite-agua deberá conectarse con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Para grandes cantidades de turbosina en la contención de derrames, la turbosina se deberá extraer mediante un camión vaciador que se utiliza para sacar turbosina y agua de los pits de hidrantes y de las bóvedas de válvulas.

**b) Programa de Prevención de Accidentes**

El proyecto deberá contar con un Programa de Prevención de Accidentes (PPA). Los objetivos del PPA son:

- Evitar que los accidentes provocados por la realización de actividades altamente riesgosas (AAR), alcancen niveles de desastre.
- Propiciar que quienes realicen actividades de riesgo, comunidad y empresas aledañas, así como autoridades locales, desarrollen una conciencia de alerta continua ante cualquier contingencia ocasionada por la liberación de sustancias peligrosas.
- Propiciar un ambiente de seguridad en la comunidad y empresas aledañas a una actividad de alto riesgo.
- Contar con planes, procedimientos, recursos y programas para dar respuesta acualquier contingencia ocasionada por el manejo de las sustancias peligrosas.
- Contar con planes procedimientos, recursos y programas para dar atención a cualquier situación de emergencia ocasionada por la liberación de sustancias peligrosas.
- Establecer los mecanismos de comunicación, coordinación y concentración de acciones para incrementar adecuadamente el PPA en la localidad.
- Que las industrias de alto riesgo difundan en la localidad la información relacionada con las actividades que desarrollan y los riesgos que estas representan para la población, sus bienes y el ambiente, así como los planes, procedimientos y programas con los que se cuenta, para disminuir y controlar dichos riesgos, enfrentar cualquier contingencia y atender desastres provocados por la liberación accidental de sustancias peligrosas.

El Programa de Prevención de Accidentes estará basado en la guía publicada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Revisión 04), e incluirá los siguientes puntos:

I. Datos generales del establecimiento o instalación, del representante legal de la empresa y del responsable de la elaboración del programa para la prevención de accidentes.
I.1 Establecimiento o instalación.
I.1.1 Nombre o razón social.
I.1.2 Actividad principal productiva del establecimiento.
I.1.3 Clave mexicana de actividades productivas (CMAP) de INEGI.
I.1.4 Código ambiental.
I.1.5 Domicilio del establecimiento o instalación.
I.1.6 Nombre y cargo del representante legal o datos del registro único de personas acreditadas.
I.1.7 Dirección del promovente o de su representante legal para recibir u oír notificaciones.

I.2 Responsable de la información contenida en el programa para la prevención de accidentes.
I.2.1 Puesto o cargo dentro de la organización de la empresa.
II. Descripción del entorno del establecimiento o instalación donde se desarrollan las actividades altamente riesgosas.
II.1 Descripción de las características físicas del entorno.
II.2 Descripción de las características socio-económicas.
II.3 Infraestructura, servicios de apoyo y zonas vulnerables.
III. Materiales peligrosos manejados y zonas potenciales de afectación.
III.1 Listado de materiales peligrosos.
III.2 Descripción de los procesos productivos.
III.3 Eventos detectados en el estudio de riesgo ambiental.
IV. Identificación de medidas preventivas para controlar, mitigar o eliminar las consecuencias y reducir su probabilidad.
IV.1 Sistemas de seguridad.
IV.2 Medidas preventivas.
V. Programa de actividades a realizar derivadas del estudio de riesgo ambiental presentado por el establecimiento o instalación.
VI. Plan de respuesta de emergencias.
VI.1 Procedimientos específicos para la respuesta a los posibles eventos de riesgo identificados dentro de la instalación.
VII. Directorio de la estructura funcional para la respuesta a emergencias.
VII.1 Directorio de la estructura funcional para la instrumentación del plan de respuesta aemergencias al interior y exterior de las instalaciones.
VIII. Plan para revertir los efectos de las liberaciones potenciales de los materiales peligrosos, en las personas y en el ambiente (cuerpos de agua, flora, fauna, suelo).
VIII.1 Métodos de limpieza y/o descontaminación en el interior y exterior de la planta.
IX. Cumplimiento de la normatividad en materia de seguridad, prevención y atención de emergencias emitidas por las dependencias del gobierno federal que conforman la comisión, en términos del artículo 147 de la LGEEPA.
X. Plan de respuesta a emergencias químicas nivel externo.
X.1 Identificación de grupos o instituciones de apoyo.
X.2 Procedimientos específicos para la respuesta a emergencias cuando el nivel de afectación rebasa los límites de propiedad de la instalación.
X.3 Inventario de equipo y servicios con que se cuenta para la atención de emergencias.
X.4 Principales vialidades identificadas para el ingreso de grupo de ayuda externa.
XI. Comunicación de riesgos.
XI.1 Procedimientos específicos para la comunicación de riesgos.
XI.2 Procedimientos para el desarrollo de simulacros con la población aledaña.
XI.3 Programa de simulacros.

**c) Plan para revertir los efectos de las liberaciones potenciales de materiales peligrosos en las personas y en el ambiente (cuerpos de agua, flora, fauna, suelo).**

El Plan deberá reducir o eliminar los riesgos de exposición por contacto con los agentes químicos durante el desarrollo a retorno a condiciones normales. El Plan incluirá los siguientes aspectos:

- Controlar la emergencia, nombrar a un grupo especialista para efectuar la evaluaciónde pérdidas, control y recuperación de daños originados por la emergencia.

- Determinar los alcances de los daños y pérdidas ocasionados e informar a la máxima autoridad del proyecto.

- Recibir y revisar la documentación enviada por las áreas afectadas considerando los aspectos siguientes:
  - Cuantificación estimada de los daños materiales y al ambiente.
  - Dictamen técnico del siniestro, elaborado por un grupo de investigación de incidentes, en el que se indiquen las causas que le dieron origen.
  - Reporte meteorológico.
  - Relación de bienes dañados.
  - Denuncias, demandas o actuaciones ante autoridades.
  - Contar con equipo para la atención a la emergencia, limpieza y remoción de escombros.
  - Contar con mano de obra, materiales, refacciones y equipo.
  - Reclamaciones presentadas por terceros.

En caso de contaminación se deberán realizar las siguientes acciones:

- Cuando exista una contaminación evidente con un material conocido.
- Cuando se sospecha que hay contaminación con un material conocido.
- Exista, aunque sea muy baja probabilidad de exposición, una sustancia en el área bajoriesgo.
- Se deberá evitar la dispersión del contaminante bajo cualquier circunstancia.
- Deberá de proteger el ambiente.
- En un evento destructivo que involucre materiales peligrosos pueden contaminarse las personas, los equipos, las instalaciones y el ambiente.
- El propósito de la descontaminación es minimizar los riesgos de afectación a la salud de los involucrados, el ambiente y la propiedad; con motivo de la exposición a sustancias químicas por efectos de la emergencia o de las acciones para su control.

- Tipos de descontaminación:

a) Específica: Cuando el material está completamente identificado y se tienen procedimientos específicos de descontaminación y se cuenta con los medios para hacerlo.
b) General: Algunas veces es necesario descontaminar al personal sin haber identificado plenamente el material o cuando no se conoce el método de descontaminación específica o no se cuenta con los materiales para realizarla. En este caso deben aplicarse métodos generales debido a los niveles de descontaminación.

- Niveles de contaminación:

a) Nivel 1: Se aplicará cuando es probable que hubiera existido una contaminación, pero no se sabe con certeza.
b) Nivel 2: Se aplicará cuando se sabe que ocurrió una contaminación de campo, pero no hay evidencias de que haya habido contacto con la piel y además no hay irritación aparente, puede ser únicamente la ropa.
c) Nivel 3: Se aplicará cuando se sabe que hubo contaminación y es evidente que hubo contacto con la piel, ya que hay irritación.

- Acciones para la descontaminación en campo:

a) Fase previa: Establecer el área de descontaminación.
b) Localización: Es el límite del área contaminada y con acceso restringido. Mantener una distancia mínima de 10 metros entre el área de descontaminación y el derrame. El área de descontaminación se encuentra en la zona tibia y el corredor de la zona caliente hasta la zona tibia operacional.
c) Señalamiento: Identificar claramente los límites del área de descontaminación. Colocar manga indicadora de viento. Disponer de aires autónomos. Contar con contenedores para el agua. Si antes de que se establezca el área de descontaminación alguna persona requiere descontaminarse inmediatamente.

En caso de una contaminación de suelo, se deberá contar con un Procedimiento Especifico Operativo para la atención de contingencias por derrame y cuyos objetivos son los siguientes:

- Atender oportunamente las contingencias por derrames de productos químicos que se presenten durante las operaciones en instalaciones y equipos que operen en el centro de trabajo.
- Cumplir con los compromisos derivados de las leyes y normas ambientales mexicanas.

## *XII.3 Recomendaciones técnico-operativas.*

A continuación, se presentan las recomendaciones técnico-operativas resultantes de la aplicación del análisis de riesgos realizado para la identificación de los riesgos proyecto.

- Otorgar al personal del proyecto cursos de capacitación y adiestramiento en el uso y manejo de sustancias inflamables y combustibles.
- Elaborar procedimientos específicos para el uso y manejo de sustancias inflamables y combustibles.
- Realizar un programa anual de simulacros para los diferentes eventos considerados en el presente análisis de riesgos.
- Incluir en el programa de mantenimiento el sistema de filtrado de turbosina.
- Actualizar la identificación y evaluación de los riesgos del proyecto con base en la ingeniería básica y de detalle, así como los diagramas de flujo de proceso (DFP's) y diagramas de tubería e instrumentación (DTI's) del proyecto definitivo.
- Actualizar el programa para la prevención de accidentes (PPA) a partir de la actualización del Análisis de Riesgo del Sector Hidrocarburos (ARSH).

a) Recomendaciones generales:

- En el programa de mantenimiento, incluir pruebas de integridad mecánica en el equipo de procesos y tuberías de acuerdo a la norma NOM-028-STPS-2004, Organización del trabajo-Seguridad en los procesos de sustancias químicas.
- Elaborar programa de medición del sistema de tierras físicas y pararrayos de acuerdo a la norma NOM-022-STPS-2008, Electricidad estática en los centros de trabajo. Condiciones de seguridad.
- Tramitar la autorización de los recipientes sujetos a presión de acuerdo a la norma NOM-020-STPS-2002 Recipientes sujetos a presión y calderas – Funcionamiento, Condiciones de seguridad.
- Identificar los depósitos, recipientes y áreas que contengan sustancias químicas peligrosas, con el señalamiento que se establece en la norma NOM-018-STPS-2000, Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo.
- Ubicar las señales de seguridad e higiene de tal manera que puedan ser observadas e interpretadas por los trabajadores a los que están destinadas, evitando que sean obstruidas o que la eficacia de éstas sea disminuida por la saturación de avisos diferentes a la prevención de riesgos de trabajo, de acuerdo a la norma NOM-026- STPS-2008, Colores y señales de seguridad e higiene, e identificación de riesgos por fluidos conducidos en tuberías.
- Elaborar procedimientos de trabajo peligroso para trabajos en altura, espacios confinados, soldadura, condiciones térmicas extremas, que incluya las medidas de seguridad y formatos de análisis del trabajo por parte del personal de operación, mantenimiento y seguridad.
- Elaborar un Plan de Respuesta a Emergencias que incluya los eventos naturales o emergencias posibles por el manejo de sustancias peligrosas (incluir procedimientos de terremotos, sismos, condiciones meteorológicas adversas, terrorismo, explosión, fugas, etc.).

## XIII. CONCLUSIONES.

Por instrucciones del C. Presidente de la República, la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) desarrolla la planeación para la construcción de un Aeropuerto de Talla Internacional en la zona de Tulum, Quintana Roo, con el objetivo de promover el desarrollo económico y turístico de la región central del Estado de Quintana Roo, atendiendo la creciente demanda de servicios turísticos de la zona.

En materia de análisis de riesgo, resulta muy importante el sistema de suministro, almacenamiento y distribución de turbosina en las instalaciones del AIT.

Con base en las disposiciones establecidas por la legislación mexicana en materia del sector hidrocarburos, para la operación de la Planta de Combustibles del Aeropuerto Internacional de Tulum, que involucra el almacenamiento y expendio de petrolíferos (turbosina), se requiere la realización de trámites ante la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos (ASEA).

El presente informe consiste en el Análisis de Riesgo del Sector Hidrocarburos (ARSH) para su presentación ante ASEA para el almacenamiento y expendio de petrolíferos (turbosina), previo al inicio de operaciones en el Aeropuerto Internacional de Tulum (AIT), considerando que la entrada en funcionamiento de las instalaciones está programada para una fecha próxima.

La evaluación de las actividades consideradas como altamente riesgosas se realiza con base en

los listados 1 y 2 de la Secretaría de Gobernación, que determina las cantidades de reporte para clasificar a las empresas que realizan actividades altamente riesgosas. La sustancia riesgosa que se manejará en el AIT en cantidad superior a la de reporte, contenida en los Listados de Actividades Altamente Riesgosas, consiste en la turbosina, por lo que se realizó el análisis de riesgo de dicha sustancia.

Riesgo se define como la combinación de la frecuencia esperada y de las consecuencias de los accidentes que pueden ocurrir como resultado de una actividad determinada. Para evaluarlos riesgos se deben contestar las siguientes preguntas básicas:

- ¿Qué puede ocurrir?
- ¿Cuál es la probabilidad de que ocurra?
- ¿Qué impacto tendría?

La evaluación de riesgos consiste en identificar los accidentes de interés que puedan ocurrir, estimar la frecuencia de que ocurran y evaluar sus posibles consecuencias.

La identificación de los riesgos se realizó utilizando la metodología HazOp, cuyo objetivo es identificar los problemas de riesgo asociados a los procesos asociados al uso, almacenamiento y manejo de turbosina que puedan causar un accidente. El análisis de riesgo se realizó mediante la revisión exhaustiva del proyecto, contenida en el Plan Maestro preliminar del proyecto y el arreglo de planta de las instalaciones, así como del Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) del sistema de turbosina y el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) de las diversas secciones que conforman el sistema de manejo de turbosina en el proyecto.

La evaluación cuantitativa de riesgo consiste en evaluar los otros dos aspectos del riesgo, la frecuencia de ocurrencia y la consecuencia. Para efectuar una evaluación cuantitativa de riesgo se pueden usar diferentes técnicas de análisis dependiendo de cuáles sean los objetivos del estudio.

A los eventos identificados mediante la técnica HazOp se incluyeron los rangos de frecuencia, así como las categorías de consecuencia correspondientes, definidas en una matriz de riesgos. A partir de estos valores se obtuvieron finalmente los niveles de riesgo, así como el índice de riesgo correspondiente a cada evento identificado. A partir de los criterios de evaluación establecidos, se realizó la jerarquización de los riesgos identificados, en donde se establecieron los eventos más riesgosos para la realización del análisis de consecuencias.

La jerarquización obtenida se corroboró con la aplicación de la matriz de riesgos, en donde cada uno de los eventos se sometió a las categorías de frecuencia y consecuencia aplicables,dando como resultado la determinación de la tolerancia del riesgo de cada uno de ellos.

De la evaluación semi cuantitativa de los eventos identificados en el análisis HazOp y su correspondiente valoración en las matrices de ponderación de riesgos, se tiene lo siguiente:

- 0 eventos en la categoría nivel 3 (indeseable).
- 5 eventos en la categoría nivel 2 (ALARP).
- 7 eventos en la categoría nivel 1 (aceptable).
- 27 eventos sin consecuencias de riesgo.

A partir de los riesgos identificados, el equipo de análisis de riesgos determinó realizar el análisis de consecuencias de aquellos eventos de categoría nivel 2. El análisis de consecuencias de los

eventos con mayor índice de riesgo identificados dio como resultado las distancias de afectación que se incluyen en la Tabla XIII.1. Dadas las características del proceso a condiciones ambientales de presión y temperatura, así como las propiedades fisicoquímicas de la sustancia analizada (turbosina), los resultados se obtuvieron solamente para daños por radiación térmica.

***Tabla XIII-1 Resultados del análisis de consecuencias (simulaciones) de los eventos riesgosos identificados en el análisis HazOp***

| Clave | Evento | Radiación ($kW/m^2$)* | Distancia (m) |
|---|---|---|---|
| E-1 | Incendio en dique de contención por colapso de un tanque de almacenamiento de turbosina | 31.5 | 79.06 |
| | | 5.0 | 180.27 |
| | | 1.4 | 301.68 |
| E-2 | Incendio en el techo de un tanque de almacenamiento de turbosina | 13.9 | 31.40 |
| | | 5.0 | 83.71 |
| | | 1.4 | 163.22 |
| E-3 | Incendio en dique de contención por sobrellenado en un tanque de almacenamiento de turbosina | 31.5 | 42.86 |
| | | 5.0 | 85.80 |
| | | 1.4 | 135.61 |
| E-4 | Incendio en un hidrante de suministro de turbosina en el ala de una aeronave. | 31.5 | 21.35 |
| | | 5.0 | 40.25 |
| | | 1.4 | 63.23 |
| E-5 | Incendio debido a derrame en la tubería de distribución de turbosina por ruptura total de la tubería | 31.5 | 31.38 |
| | | 5.0 | 91.05 |
| | | 1.4 | 166.67 |

* La radiación térmica implica los siguientes criterios:
31.5 $kW/m^2$: distancia de fatalidades (100% mortalidad en 1 minuto).
13.9 $kW/m^2$: distancia de quemaduras de primer grado en 10 segundos.
5.0 $kW/m^2$: distancia de alto riesgo.
1.4 $kW/m^2$: distancia de amortiguamiento.

De los resultados obtenidos, se tiene que todos los escenarios simulados obtenidos del análisis de consecuencias indican que las principales afectaciones potenciales ocurrirían en el interior de las instalaciones del AIT, por lo que no se prevén repercusiones importantes a la población o infraestructura ubicada fuera del límite de propiedad del proyecto.

En términos generales, en el caso de ocurrencia potencial de los eventos riesgosos analizados (incendio), las afectaciones al medio son en su mayoría temporales, por lo que el sistema ambiental local, en las condiciones actuales, tiene la capacidad de recuperar los valores normales en sus componentes ambientales.

Por lo anterior, se concluye que el Proyecto con base en la información proporcionada por SEDENA y bajo el contexto presentado en el estudio, es viable en materia de riesgo ambiental, ya que las consecuencias potenciales de los eventos evaluados presentan afectaciones mínimas al entorno ambiental, en su mayoría temporales, por lo que el sistema ambiental local tiene la capacidad de recuperar los valores normales en sus componentes ambientales presentes en la etapa de operación de la instalación.

Asimismo, los eventos simulados aun cuando presentan distancias de afectación potencial relevantes tienen una baja probabilidad de ocurrencia, lo cual los coloca en un nivel ALARP (tan

bajo como sea razonablemente práctico), el cual requiere que se mantengan las instalaciones y sus sistemas "seguros y sin riesgo a la salud" hasta donde sea razonablemente practico.

## XIV. ANÁLISIS DE CAPAS DE PROTECCIÓN (LOPA).

Con la finalidad de dar cumplimiento a la regulación aplicable en materia del sector hidrocarburos, en esta sección se ha procedido a desarrollar un Análisis de Capas de Protección (LOPA) de los escenarios de riesgo identificados en el análisis HazOp del sistema de turbosina del Aeropuerto Internacional de Tulum.

El análisis de capas (o barreras) de protección (LOPA, *Layer of Protection Analysis*), se basa en reconocidas técnicas de análisis de riesgo de proceso, aplicando medidas semi- cuantitativas para la evaluación de la frecuencia de incidentes potenciales y la probabilidad de falla de las capas de protección. A través de esta metodología es posible entonces identificar las salvaguardas que cumplan con los criterios de capas de protección independientes (IPL, del inglés *Independent Protection Layer*) establecidos por la CCPS (CCPS/AIChE, *Guidelinesfor Safe Automation of Chemical Processes*, 1993). Aun cuando los IPL son sistemas extrínsecamente seguros, pueden usarse de manera activa o pasiva siempre y cuando cumplan con lo siguiente:

- Especificidad: La IPL es capaz de detectar y prevenir o mitigar las consecuencias de eventos especificados, potencialmente peligrosos, tales como una reacción fuera de control, pérdida de contención, o una explosión, por ejemplo.

- Independencia: Un IPL es independiente de todas las otras capas de protección asociadas con el evento potencialmente peligroso identificado. La independencia requiere que no se vea afectado el rendimiento de la IPL por el fracaso de otra capa de protección o por las condiciones que causaron la falla de otra capa de protección. Lo más importante de todo, es que la capa de protección es independiente de la causa deiniciación.

- Fiabilidad: La protección proporcionada por la IPL reduce el riesgo identificado por una cantidad determinada y especificada.

- Auditabilidad: La IPL está diseñada para permitir la validación periódica regular de la función protectora.

Ejemplos de IPL incluyen:

- Procedimientos operativos estándar,
- Sistemas básicos de control de proceso,
- Alarmas con respuesta definida por el operador,
- Sistemas instrumentados de seguridad SIF,
- Dispositivos de alivio de presión,
- Diques y muros de contención,
- Sistemas de protección y alarma de fuego y fugas de gas,

- Sistemas de diluvio, entre otros.

LOPA no es sólo otra herramienta de evaluación de riesgo, es una herramienta de ingeniería utilizada para asegurar que el riesgo del proceso en cuestión es mitigado con éxito a un nivel aceptable. LOPA es una metodología racional y defendible que provee un medio rápido y rentable para la identificación de los IPL, que bajen la frecuencia y/o la consecuencia de incidentes peligrosos específicos. LOPA proporciona criterios específicos y restricciones para la evaluación de IPL, eliminando la subjetividad de métodos cualitativos a un costo sustancialmente menor que las técnicas totalmente cuantitativas.

En el estudio de identificación de riesgos del proyecto, uno de los objetivos es identificar los peligros en los procesos y examinar de qué manera se pueden reducir o eliminar los riesgos que presentan estos peligros a los trabajadores, a la instalación o al medio ambiente. Para lograr dicho objetivo, se organizó un equipo multidisciplinario para realizar la identificación de riesgos en los procesos y evaluar cualitativamente los peligros potenciales asociados a los procesos durante la operación de la instalación. El grupo multidisciplinario participante en la identificación de riesgos se conformó exclusivamente con personal del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Con base en el análisis HazOp, se han identificado los escenarios de accidentes potenciales más relevantes de acuerdo con su efecto y con la factibilidad de ocurrencia. Cada escenario de accidente potencial identificado en el análisis fue sometido a la técnica LOPA con el fin dedeterminar su frecuencia. Esto permitió jerarquizar los escenarios y priorizar las recomendaciones emitidas por el grupo multidisciplinario con el fin de prevenir, minimizar y/o atender los posibles accidentes inherentes a la operación del proyecto.

En las siguientes páginas se incluyen las hojas de trabajo del análisis de la técnica LOPA, realizadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

| *L O P A (Análisis de Barreras de Protección) Documentación y Cálculo de ESCENARIO* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **No. Escenario** | 1 | **id. Equipo** | **Título del Escenario:** | Incendio en el Dique por falla catastrófica del tanque | |
| **Fecha:** | Noviembre, 2021 | **Descripción:** | | **Probabilidad** | **Frecuencia (por año)** |
| **Descripción Consecuencia y Categoría** | | Incendio de charco en el dique de contención de los tanques de almacenamiento | | | |
| **Criterio de Tolerancia al Riesgo (Categoría o Frecuencia)** | | Se considera dentro de la zona ALARP el riesgo para los trabajadores, ya que esa zona es de acceso restringido, lo que implica que el público general no estaría afectado | | | 1.00E-03 |
| **Evento Iniciador (Frecuencia)** | | Falla catastrófica de la soldadura de placas inferiores | | | 3.60E-07 |
| **Evento Facilitador o Condición** | | | | | |
| **Modificadores Condicionales** | | | | | |
| | | Probabilidad de ignición | | 0.03 | |
| | | Probabilidad de personal en área afectada | | 0.1 | |
| | | Probabilidad de Fatalidad/daño | | 0.5 | |
| | | Otras | | | |
| **Frecuencia de la Consecuencia no-mitigada** | | | | | 5.40E-10 |
| **Barreras de Protección independientes (BPi)** | | | | | |
| Sistema de Control de Proceso | | | | | |
| intervención humana | | | | | |
| SIF | | | | | |
| PSV | | | | | |
| Otras | | | | | |
| **Salvaguradias (no-Bpi)** | | | | | |
| | a) | | | | |
| | b) | | | | |
| | c) | | | | |
| | d) | | | | |
| **PFD Total para todas las Bpi** | | | | N/D | |
| **Frecuencia de la Consecuencia mitigada** | | | | | 5.40E-10 |
| **Se satisface el criterio de tolerancia al riesgo (Si/No):** | | | | SI | |
| **Acciones que se requieren para cumplir con dicho criterio:** | | | | | |
| **Notas:** | | | | | |
| **Referencias a documentos:** | | | | | |
| **Equipo de LOPA:** | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ***L O P A (Análisis de Barreras de Protección) Documentación y Cálculo de ESCENARIO*** | | | | | |
| **No. Escenario** | 2 | **id. Equipo** | **Título del Escenario:** | Incendio en la parte superior del tanque por impacto de rayo | |
| **Fecha:** | Noviembre, 2021 | **Descripción:** | | **Probabilidad** | **Frecuencia (por año)** |
| **Descripción Consecuencia y Categoría** | | Incendio confinado al techo del tanque de almacenamiento | | | |
| **Criterio de Tolerancia al Riesgo (Categoría o Frecuencia)** | | Se considera dentro de la zona ALARP el riesgo para los trabajadores, ya que esa zona es de acceso restringido, lo que implica que el público general no estaría afectado | | | 1.00E-03 |
| **Evento Iniciador (Frecuencia)** | | Tormenta eléctrica que genera impacto de rayo | | | 1.00E-03 |
| **Evento Facilitador o Condición** | | | | | |
| **Modificadores Condicionales** | | | | | |
| | | Probabilidad de ignición | | 1 | |
| | | Probabilidad de personal en área afectada | | 0.1 | |
| | | Probabilidad de Fatalidad/daño | | 0.1 | |
| | | Otras | | | |
| **Frecuencia de la Consecuencia no-mitigada** | | | | | 1.00E-05 |
| **Barreras de Protección independientes (BPi)** | | | | | |
| Sistema de Control de Proceso | | | | | |
| intervención humana | | | | | |
| SIF | | Sistema sub-superficial de inyección de espuma | | 1.00E-02 | |
| PSV | | | | | |
| Otras | | Sistema de pararrayos | | 1.00E-03 | |
| **Salvaguardias (no-Bpi)** | | | | | |
| | a) | | | | |
| | b) | | | | |
| | c) | | | | |
| | d) | | | | |
| **PFD Total para todas las Bpi** | | | | 1.00E-05 | |
| **Frecuencia de la Consecuencia mitigada** | | | | | 1.00E-10 |
| **Se satisface el criterio de tolerancia al riesgo (Si/No):** | | | | Si | |
| **Acciones que se requieren para cumplir con dicho criterio:** | | | | | |
| **Notas:** | | | | | |
| **Referencias a documentos:** | | | | | |
| **Equipo de LOPA:** | | | | | |

| *L O P A (Análisis de Barreras de Protección) Documentación y Cálculo de ESCENARIO* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **No. Escenario** | 3 | **id. Equipo** | **Título del Escenario:** | Incendio debido a un derrame por sobrellenado del tanque | |
| **Fecha:** | Noviembre, 2021 | **Descripción:** | | **Probabilidad** | **Frecuencia (por año)** |
| **Descripción Consecuencia y Categoría** | | Incendio no confinado que ocurre en el interior del dique de contención | | | |
| **Criterio de Tolerancia al Riesgo (Categoría o Frecuencia)** | | Se considera dentro de la zona ALARP el riesgo para los trabajadores, ya que esa zona es de acceso restringido, lo que implica que el público general no estaría afectado | | | 1.00E-03 |
| **Evento Iniciador (Frecuencia)** | | Error de logística durante el abastecimiento de combustible al tanque | | | 1 |
| **Evento Facilitador o Condición** | | | | | |
| **Modificadores Condicionales** | | | | | |
| | | Probabilidad de ignición | | 0.03 | |
| | | Probabilidad de personal en área afectada | | 0.1 | |
| | | Probabilidad de Fatalidad/daño | | 1.00E-02 | |
| | | Otras | | | |
| **Frecuencia de la Consecuencia no-mitigada** | | | | | 3.00E-05 |
| **Barreras de Protección independientes (BPi)** | | | | | |
| Sistema de Control de Proceso | | Medición y control de nivel con cierre de válvulas | | 0.1 | |
| intervención humana | | | | | |
| SIF | | | | | |
| PSV | | | | | |
| Otras | | | | | |
| **Salvaguradias (no-Bpi)** | | | | | |
| | a) | | | | |
| | b) | | | | |
| | c) | | | | |
| | d) | | | | |
| **PFD Total para todas las Bpi** | | | | 0.1 | |
| **Frecuencia de la Consecuencia mitigada** | | | | | 3.00E-06 |
| **Se satisface el criterio de tolerancia al riesgo (Si/No):** | | | | Si | |

**sky**

**Notas:**

**Referencias a documentos:**

**Equipo de LOPA:**

| *L O P A (Análisis de Barreras de Protección) Documentación y Cálculo de ESCENARIO* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **No. Escenario** | 4 | **id. Equipo** | **Título del Escenario:** | Incendio fuera del dique debido a ruptura de tubería en la plataforma de bombeo | |
| **Fecha:** | Noviembre, 2021 | **Descripción:** | | **Probabilidad** | **Frecuencia (por año)** |
| **Descripción Consecuencia y Categoría** | | Incendio no confinado debido a ruptura del ducto de 24" a la salida de la casa de bombas hacia la red de hidrantes | | | |
| **Criterio de Tolerancia al Riesgo (Categoría o Frecuencia)** | | Se considera dentro de la zona ALARP el riesgo para los trabajadores, ya que esa zona es de acceso restringido, lo que implica que el público general no estaría afectado | | | 1.00E-03 |
| **Evento Iniciador (Frecuencia)** | | Falla de la tubería por ruptura | | | 1.00E-05 |
| **Evento Facilitador o Condición** | | | | | |
| **Modificadores Condicionales** | | | | | |
| | | Probabilidad de ignición | | 0.03 | |
| | | Probabilidad de personal en área afectada | | 0.1 | |
| | | Probabilidad de Fatalidad/daño | | 0.3 | |
| | | Otras | | | |
| **Frecuencia de la Consecuencia no-mitigada** | | | | | 9.00E-09 |
| **Barreras de Protección independientes (BPi)** | | | | | |
| Sistema de Control de Proceso | | | | 0.1 | |
| intervención humana | | Activación del sistema de cierre de emergencia de | | 1 | |
| SIF | | | | | |
| PSV | | | | | |
| Otras | | | | | |
| **Salvaguradias (no-Bpi)** | | | | | |
| | a) | | | | |
| | b) | | | | |
| | c) | | | | |
| | d) | | | | |
| **PFD Total para todas las Bpi** | | | | 0.1 | |
| **Frecuencia de la Consecuencia mitigada** | | | | | 9.00E-10 |
| **Se satisface el criterio de tolerancia al riesgo (Si/No):** | | | | Si | |
| **Acciones que se requieren para cumplir con dicho criterio:** | | | | | |
| **Notas:** | | | | | |
| **Referencias a documentos:** | | | | | |
| **Equipo de LOPA:** | | | | | |

| *L O P A (Análisis de Barreras de Protección) Documentación y Cálculo de ESCENARIO* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **No. Escenario** | 6 | **id. Equipo** | **Título del Escenario:** | Incendio no confinado por derrame en hidrante o manguera de 6" de alimentación en plataforma de carga | |
| **Fecha:** | Noviembre, 2021 | **Descripción:** | | **Probabilidad** | **Frecuencia (por año)** |
| **Descripción Consecuencia y Categoría** | | Incendio no confinado por derrame en hidrante o manguera de 6" de alimentación en plataforma de carga | | | |
| **Criterio de Tolerancia al Riesgo (Categoría o Frecuencia)** | | Se considera dentro de la zona ALARP para el público general | | | 1.00E-05 |
| **Evento Iniciador (Frecuencia)** | | Falla en el hidrante o en la manguera flexible | | | 1.00E-02 |
| **Evento Facilitador o Condición** | | | | | |
| **Modificadores Condicionales** | | | | | |
| | | Probabilidad de ignición | | 0.03 | |
| | | Probabilidad de personal en área afectada | | 1 | |
| | | Probabilidad de Fatalidad/daño | | 0.5 | |
| | | Otras | | | |
| **Frecuencia de la Consecuencia no-mitigada** | | | | | 1.50E-04 |
| **Barreras de Protección independientes (BPi)** | | | | | |
| Sistema de Control de Proceso | | | | | |
| intervención humana | | Activación del sistema de cierre de emergencia de combustible (EFSO) | | 0.1 | |
| SIF | | | | | |
| PSV | | | | | |
| Otras | | Deadman´s control (Control tipo hombre muerto) | | 0.1 | |
| Otras | | Lanyard (cable de seguridad) | | 0.1 | |
| **Salvaguradias (no-Bpi)** | | | | | |
| | a) | | | | |
| | b) | | | | |
| | c) | | | | |
| | d) | | | | |
| **PFD Total para todas las Bpi** | | | | 0.001 | |
| **Frecuencia de la Consecuencia mitigada** | | | | | 1.50E-07 |
| **Se satisface el criterio de tolerancia al riesgo (Si/No):** | | | | Si | |
| **Acciones que se requieren para cumplir con dicho criterio:** | | | | | |
| **Notas:** | | | | | |
| **Referencias a documentos:** | | | | | |
| **Equipo de LOPA:** | | | | | |

- **Análisis SIL (*Safety Integrity Level*) Nivel de Integridad de Seguridad.**

Un estudio SIL es un proceso de decisión colaborativo para determinar la confiabilidad de las salvaguardas que se implementan para prevenir consecuencias específicas, que han sido identificadas durante el proceso de evaluación del riesgo.

El análisis HazOp es un método efectivo para identificar los escenarios de consecuencias severas. Cuando dichos escenarios han sido identificados, es entonces posible un análisis LOPA (*Layer Of Protection Analysis*) i.e. análisis de capas de protección, para determinar si se requieren capas de protección independientes (IPL – *independent protection layers*) adicionales para satisfacer la frecuencia tolerable prescrita.

En algunos casos, estas capas adicionales de protección requieren ser automatizadas con base en funciones que cumplen con una probabilidad de falla en demanda prescrita, PFD (*Probability of Failure on Demand*). Estas funciones instrumentadas de seguridad se denominan SIF (*Safety Instrumented Functions*); que engloba la combinación de sensores, del programa que procesa la lógica de decisión, e.g. PLC; y los elementos finales de actuadores,
e.g. solenoides y válvulas. La SIF puede entonces detectar una condición anormal en el proceso, e iniciar entonces las acciones para llevar al proceso a un estado de seguridad. La ejecución de una SIF se realiza a través de un PLC de alta integridad, y todo el sistema se denomina Sistema Instrumentado de Seguridad, SIS (*Safety Instrumented System*).

El estudio SIL se realiza para verificar cuantitativamente la confiabilidad (*reliability*) de la SIF, para asegurar que se alcanza dicha confiabilidad prescrita, y que entonces constituye una IPL adicional que se ha identificado durante el proceso LOPA para que la frecuencia 'mitigada' alcance la frecuencia 'tolerable' del escenario en cuestión.

Una SIF se categoriza de acuerdo con su nivel de confiabilidad, y la SIL de la SIF describe el rango de confiabilidad del 'lazo' (*loop*) de control. Dicha clasificación se basa en los estándares internacionales. El estándar ISA 84.00.01 / IEC 61511 prescribe el análisis de ciclo de vida, y provee información sobre los requerimientos de implementación, i.e. determinación y verificación del SIL, así como su mantenimiento. El estándar IEC 61508 provee la información requerida por los fabricantes (de la instrumentación y equipo) para el diseño y para la certificación de sus productos para que satisfagan el SIL, y que puedan integrarse en una SIF.

En la siguiente tabla (del IEC 61508) se prescriben los cuatro niveles de SIL de acuerdo con el rango de la PFD. En dicha tabla, RRF (*Risk Reduction Factor*) describe el rango del factor de reducción del riesgo, que es simplemente el inverso del PFD.

Un nivel SIL de 1 de una SIF describe la menor confiabilidad (entre el 90 y 99 %) y el rango más alto de PFD. El nivel 4 describe la más alta confiabilidad, y el rango más bajo de PFD.

***Tabla XIV-1 Correlación entre el nivel SIL con el PFD & RRF***

| SIL | PFD | RRF |
|---|---|---|
| 1 | $10^{-2} \leq PFD < 10^{-1}$ | $10 < RRF \leq 100$ |
| 2 | $10^{-3} \leq PFD < 10^{-2}$ | $100 < RRF \leq 1{,}000$ |
| 3 | $10^{-4} \leq PFD < 10^{-3}$ | $1{,}000 < RRF \leq 10{,}000$ |
| 4 | $10^{-5} \leq PFD < 10^{-4}$ | $10{,}000 < RRF \leq 100{,}000$ |

Para cada nivel de SIL se requiere una ejecución de pruebas (*proof testing*) y configuración diferente, para que pueda alcanzar el nivel requerido. Otra consideración es la tolerancia a falla mínima del equipamiento del SIS; esto es, la redundancia que se requiere en la SIF para cada nivel del SIL, i.e. 2 para nivel 4 -- 1 para nivel 3 -- 1 para nivel 2 en modo continuo – 0 para nivel 2 en demanda baja -- 0 para nivel 1.

Después de realizar un LOPA (cuya metodología permite determinar el SIL de una SIF), puede resultar necesario agregar salvaguardas adicionales para prevenir el desarrollo de ciertos escenarios de riesgo. Dichas salvaguardas pueden incluir funciones automáticas de seguridad,como, por ejemplo, un transmisor de presión que dispara una válvula de paro de emergencia por alta presión. Si bien el diseño de dicha SIF puede especificarse para cero-incidentes, es posible que ello implique disparos "espurios", y entonces exponga al proceso a transitorios dearranque y paro con peligros asociados, lo cual compromete la seguridad y operabilidad.

Durante la fase de diseño, se deben tomar en cuenta tanto los costos de capital como los de mantenimiento. Los SIF de alta confiabilidad tendrán diferentes requerimientos en la tecnología requerida, e.g. un interruptor (switch) de presión vs un transmisor de presión; para la redundancia en equipo, e.g. 1oo1 o bien 1oo2 en lógica de 'votación'; requisito de ejecución de pruebas, e.g. anuales, o bien cada 4 años para el cierre total de válvulas. Además, el servicio de certificación de SIL es oneroso, así como el equipamiento requerido. Por ello, especificar un SIL 3 cuando un SIL 2 es suficiente para lograr la tolerancia en la frecuencia determinada en el LOPA, incrementaría el costo innecesariamente con un margen de beneficio en la seguridad menor. Los requerimientos en el mantenimiento de un SIS con alto SIL también implican recursos humanos y materiales mayores.

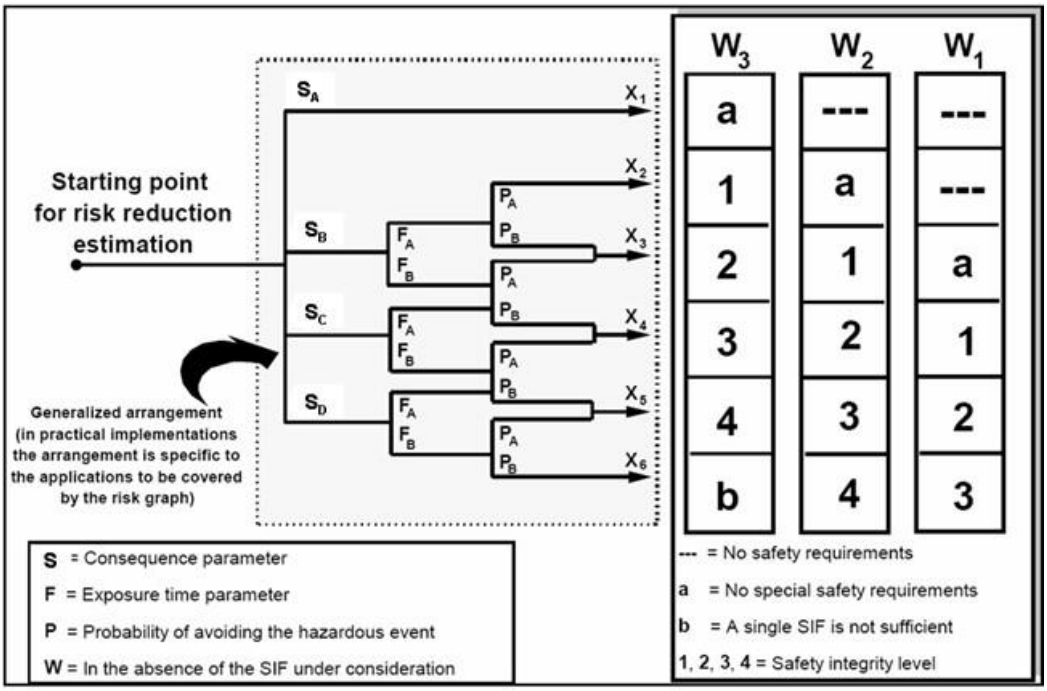
Para cada SIF que se prescribe en el LOPA como una capa de protección independiente (IPL) adicional, se deben identificar los elementos sensores, los actuadores, las acciones que debe ejecutar el PLC, las causas de la demanda (i.e. que activan el SIF), la consecuencia que ocurre si la SIF no se ejecuta exitosamente, y las alternativas independientes (si es que existen).

En las hojas de cálculo que se han implementado en el LOPA con los 5 escenarios de riesgo que se han identificado en el análisis HazOp realizado para el AIT, se ha prescrito el 'Criterio de Tolerancia al Riesgo', que se considera dentro de la zona ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) 'tan bajo como sea razonablemente factible'. En todos los casos, se satisface dicho criterio de tolerancia con las capas/barreras de protección independientes que ahí se proponen, y considerando los modificadores condicionales.

Con el propósito de 'validar' la especificación del SIL, se ha también considerado el proceso de clasificación prescrito en los estándares arriba mencionados. Se han considerado los aspectos de seguridad del personal y de riesgo ambiental.

El gráfico que calibra el primer aspecto se presenta en la siguiente figura.

***Figura XIV-1 Gráfico de riesgo calibrado para la seguridad del personal***




Los cuatro parámetros que deben determinarse para describir la 'ruta' de opciones que determina el nivel de SIL, son los siguientes:

1) Parámetro de consecuencia S.- representa el potencial de daño si el SIS falla en demanda, i.e. cuando ocurre un evento de peligro. Si no hay daño, entonces el SIS no se requiere, en cuanto a seguridad del personal. Las opciones por considerar son:
   - SA = daño menor (no incapacita)
   - SB = daño severo (1 fatalidad)
   - SC = varias fatalidades
   - SD = catastrófico (múltiples fatalidades)

2) Parámetro de presencia F.- representa la verosimilitud de la presencia de una persona que puede ser dañada al estar en el área por el potencial peligro que ocurre, con la demanda en el SIF.
   - FA = de ocasional a frecuente (por un 10 % de tiempo o menor)
   - FB = de frecuente a continuo (más del 10% del tiempo)

3) Parámetro de probabilidad P.- representa la posibilidad para que las personas puedan evitar la situación de peligro. Debe ser independiente de la SIF en consideración, y

   depende en que existan métodos independientes para alertar a las personas expuestas al peligro, previo a que ocurra, y además que existan rutas de escape. Si existe una alternativa (independiente), entonces la probabilidad de evitar el peligro se prescribe como PA; si no, entonces se prescribe PB.
   - PA = bajo ciertas condiciones
   - PB = prácticamente imposible

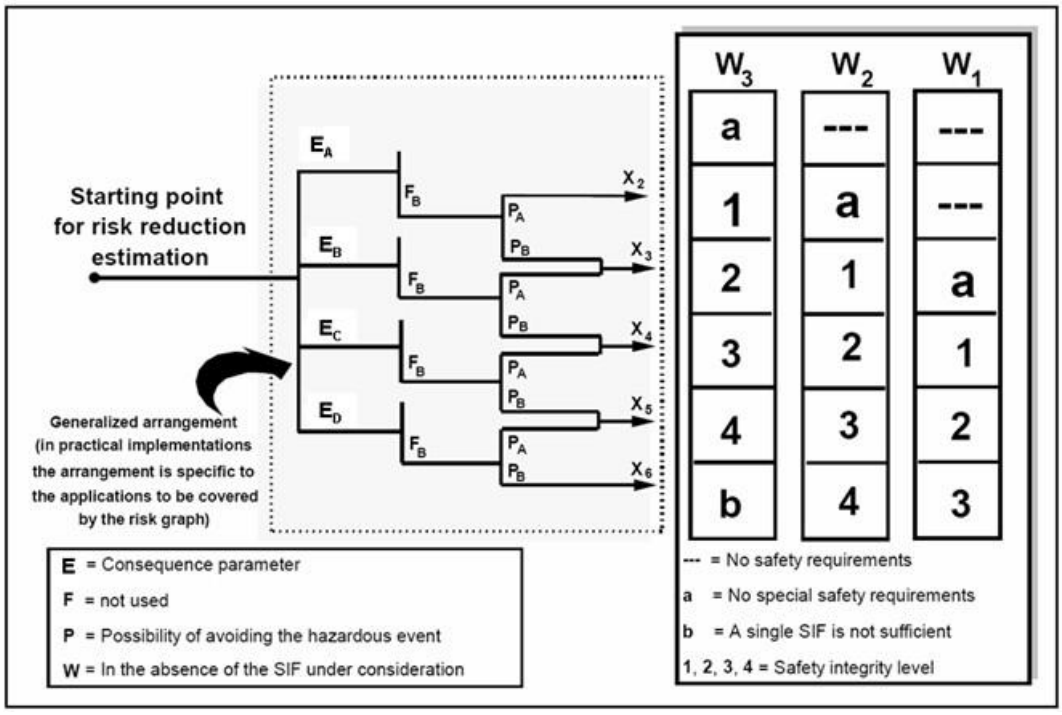
4) Parámetro de tasa de demanda W.- representa el número de veces por año que podrá ocurrir

el evento de peligro, en ausencia de la SIF en consideración. La demanda puedeser provocada por falla en la instrumentación, por error del operador, etc. En el estándar IEC 61511 se describe esta demanda en términos cualitativos como baja, moderada y alta, por lo que se consideran las frecuencias descritas:

- W1 = Bajo (demanda menor de 0.1 por año, i.e. una vez cada 10 años)
- W2 = Moderado (demanda entre 1 y 0.1 por año)
- W3 = Alto (demanda entre 10 y 1 por año)

Para el caso de análisis de riesgo ambiental, la figura correspondiente es la siguiente:

***Figura XIV-2 Gráfico de riesgo calibrado para análisis de riesgo ambiental.***




Cabe remarcar la diferencia entre los dos gráficos, de seguridad del personal y del riesgo ambiental. Mientras que en el primero incluye una bifurcación que considera la ausencia de cualquier persona en la zona de peligro (opción A), esto no es relevante para el caso del medio ambiente, por lo que no está presente dicha bifurcación (opción A) en el gráfico.

En este caso, el primer parámetro prescribe la consecuencia ambiental E.- representa la consecuencia de la fuga o derrame sobre dicho medio ambiente.

- EA = daño menor sobre el ambiente que es reportable
- EB = derrame/fuga dentro del límite de batería con daño significativo
- EC = derrame/fuga fuera del límite de batería con daño mayor
- ED = derrame/fuga fuera del límite de batería con daño mayor que es permanente

Las demás opciones, i.e. parámetros P y W tienen la misma 'escala' en el significado, previamente descrito para la seguridad del personal.

En el caso de riesgo ambiental, para los 6 escenarios en consideración, no se vislumbra un derrame de turbosina que genere un daño significativo al medio ambiente; por lo que en todos los casos se

opta por EA con PA (bajo ciertas condiciones), por la existencia de los medios decontención del derrame, i.e. diques y coladeras circundantes en las zonas de peligro.

En el caso más severo de seguridad al personal (que para el escenario de fuga en hidrantes incluye a los pasajeros, que probablemente deban evacuar el avión en caso de derrame mayor), la 'ruta' del gráfico sería: SC ¬> FA ¬> PA ¬> W1, lo que evita la prescripción de SIL.

1. En todo caso, en las IPL adicionales recomendadas en el LOPA se prescribe la "activación del sistema de cierre de emergencia de combustible", el "deadman's control", y el "lanyard" ('maneral de hombre-muerto' y cable directo al cierre de la válvula de suministro).
Los otros 5 escenarios en consideración también llevan a no prescribir un SIF adicional con SIL de nivel 1.
Es de notar que el presente análisis de SIL se ha realizado con base en los DTI's que ha sido proporcionados al equipo de trabajo del Instituto de Ingeniería. Una recomendación que dicho equipo emite es que con base en el nivel de inversión del AIT, que requiere la operación exitosay sin riesgo para el personal y público que ello implica, deberá considerarse la implementación de un SIS para el paro de emergencia automático tanto para el nodo que considera las bombasde suministro a plataforma, como para el control de nivel en los tanques de almacenamiento para evitar un derrame. Entonces sería factible realizar una verificación del SIL de estos SIS, con la documentación dela instrumentación, equipo y sensores certificados por una entidad como TÜV, en la cual se especifiquen las tasas de falla (detectable y no-detectables), el tiempo promedio para reparación (MTTR), los intervalos para la ejecución de prueba (TI), la lógica de voto (1oo1, 1002), para poder cuantificar el PDF promedio del SIF.

**Sufragio efectivo. No Reelección**

**El Representante Legal**

**Myr. J.M. y Lic.**
**Moisés Espinoza Ordaz**

Técnicos encargados de la elaboración del estudio

Sandra V.S.A.

Ing. Sandra Victoria Sánchez Aguilar

Ing. Valeria de la Cruz Fernández

Ing. Bryan Bruno Delgado Bautista