

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECANICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECANICA Y ENERGIA**



**“DISEÑO DE UN AISLAMIENTO TERMICO COMO SISTEMA DE
PROTECCION CONTRA INCENDIO PARA LOS TANQUES ESFERICOS
DE ALMACENAMIENTO DE GLP EN UNA PLANTA DE
ABASTECIMIENTO DE GLP, UBICADA EN EL CALLAO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO
MECANICO**

CARLOS OLIVARES ZEGARRA

Callao, 2019

PERÚ

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En el auditorio Ausberto Rojas Saldaña de la Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía, sito Av. Juan Pablo II N° 306, Bellavista - Callao, siendo las 5.53 hrs. del día viernes 06 de diciembre de 2019, se reunieron los miembros del Jurado Revisor y Evaluador para la Sustentación de Tesis del I Ciclo Taller de Tesis -Titulación por la modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis- de la Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía de la Universidad Nacional del Callao.

- Dr. Jaime Gregorio Flores Sánchez : Presidente
- Dr. Juan Manuel Lara Márquez : Secretario
- Dr. Rubén Francisco Pérez Bolívar : Vocal
- Mg. Juan Carlos Huamán Alfaro : 2do. Vocal (Suplente)

Designados por y Resolución Decanal N° 044-2019-D-FIME de fecha 22 de noviembre de 2019 y Resolución de Consejo de Facultad N° 165-2019-CF-FIME de fecha 26 de noviembre de 2019, a fin de proceder al acto de evaluación de la Tesis titulada: "**DISEÑO DE UN AISLAMIENTO TÉRMICO COMO SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO PARA LOS TANQUES ESFÉRICOS DE ALMACENAMIENTO DE GLP EN UNA PLANTA DE ABASTECIMIENTO DE GLP, UBICAA EN EL CALLAO**", presentada por el señor Bachiller **OLIVARES ZEGARRA CARLOS HÉCTOR RAFAEL**.

Contando con la presencia del Supervisor General, Decano de la Facultad de Ingeniería Química, Dr. Luis Américo Carrasco Venegas, Supervisor de la FIME, Dr. José Hugo Tezen Campos y el representante de la Comisión de Grados y Títulos Eco. Guillermo Alonso Gallarday Morales.

A continuación, se dio inicio a la sustentación de la Tesis de acuerdo a lo normado en los artículos del 51° al 60° del CAPÍTULO III: TITULACIÓN y GRADUACIÓN CON CICLO TALLER DE TESIS del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 245-2018-CU de fecha 30 de octubre de 2018.

Culminado el acto de sustentación, los señores miembros del Jurado Revisor y Evaluador procedieron a formular las preguntas al indicado bachiller, las mismas que no fueron absueltas satisfactoriamente.

Luego de un cuarto de intermedio, para la deliberación en privado del Jurado respecto a la evaluación de la Tesis, se acordó: calificar la tesis sustentada por el señor bachiller **OLIVARES ZEGARRA CARLOS HÉCTOR RAFAEL** para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico por la modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, según la puntuación cuantitativa y cualitativa que a continuación se indica:

CALIFICACIÓN CUANTITATIVA	CALIFICACIÓN CUALITATIVA
<u>16</u>	<u>Muy Bueno</u>

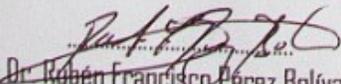
Finalmente, se procedió a leer en público el acta de sustentación.

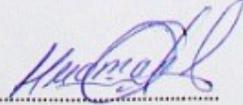
Siendo las 6.08 horas del día viernes seis de diciembre del dos mil diecinueve, el señor Presidente del Jurado Revisor y Evaluador dio por concluido el acto de sustentación de Tesis.

En señal de conformidad con lo actuado, se levanta la presente acta.


.....
Dr. Jaime Gregorio Flores Sánchez
Presidente de Jurado


.....
Dr. Juan Manuel Lara Márquez
Secretario de Jurado


.....
Dr. Rubén Francisco Pérez Bolívar
Vocal de Jurado


.....
Mg. Juan Carlos Huamán Alfaro
2do. Vocal de Jurado

**“DISEÑO DE UN AISLAMIENTO TERMICO COMO SISTEMA DE
PROTECCION CONTRA INCENDIO PARA LOS TANQUES ESFERICOS
DE ALMACENAMIENTO DE GLP EN UNA PLANTA DE
ABASTECIMIENTO DE GLP, UBICADA EN EL CALLAO”**

DEDICATORIA

A esa persona importante en mi vida que siempre estuvo dispuesto para brindarme su ayuda, con todo mi cariño este proyecto se lo dedico a el:

Mi padre

ÍNDICE

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. Descripción de la realidad problemática	14
1.2. Formulación del problema	17
1.2.1. Problema general	17
1.2.2. Problemas específicos	17
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
1.4. Limitantes de la investigación	18
1.4.1. Teórica	18
1.4.2. Espacial	18
1.4.3. Temporal	18
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1. Antecedentes	19
2.1.1. Nacional	19
2.1.2. Internacional	20
2.2. Marco teórico	24
2.2.1 Tipos de incendios de GLP	24
2.2.2 BLEVE	25
2.2.3 Sistema de protección contra incendio	26
2.2.4 Comportamiento del tanque de almacenamiento de GLP frente a un incendio.	35
2.2.5 Aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio	42
2.2.6 Consideraciones respecto al uso del aislamiento térmico	45
2.2.7 Cargas térmicas	46
2.2.8 Fenómenos no considerados por la normativa internacional	48
2.2.9 Consideraciones en el modelamiento matemático	52

2.2.10 Variables importantes para el balance de energía y la transferencia de calor	54
2.2.11 Ecuación de balance de energía	62
2.2.12 Mecanismos básicos de transferencia de calor	64
2.2.13 Números adimensionales	70
2.2.14 Propiedades de diseño de materiales	72
2.2.15 Resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias	78
2.3. Conceptual	79
2.4. Definición de términos básicos	81
3. HIPÓTESIS Y VARIABLES	83
3.1. Variables de la investigación	83
3.1.1 Definición conceptual de las variables	83
3.2. Operacionalización de variables	84
3.3 Hipótesis	85
3.3.1 Hipótesis general	85
3.3.2 Hipótesis específicas	85
4. DISEÑO METODOLÓGICO	86
4.1. Tipo y diseño de la investigación	86
4.2. Método de investigación	86
4.2.1 Esquema del diseño	87
4.3. Población y muestra	87
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado	87
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	87
4.6. Análisis y procedimientos de datos	88
5. RESULTADOS	134
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	143
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	143
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	144
7. CONCLUSIONES	145
8. RECOMENDACIONES	146
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA	148
10. ANEXOS	153

10.1.	ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA	153
10.2.	ANEXO 2: ANALISIS DE CONSECUENCIAS	153
10.3.	ANEXO 3: PLANOS DEL AISLAMIENTO TERMICO EN LAS ESFERAS	163
10.4.	ANEXO 4: TABLA DE RESULTADOS DEL MODELAMIENTO PARA LA FIBRA CERAMICA CON UN ESPESOR DE 0.01778 mm.	163

TABLA DE CONTENIDO

Tabla 1	Definición de términos.....	27
Tabla 2	Comparación entre el sistema de aislamiento y sistema de enfriamiento.....	28
Tabla 3	Nivel de protección del Fireproofing en un incendio	30
Tabla 4	Pruebas realizadas en tanques de almacenamiento de GLP.....	47
Tabla 5	Operacionalización de variables.....	84
Tabla 6	Técnicas e Instrumentos.....	88
Tabla 7	Propiedades de la lana de roca mineral.....	113
Tabla 8	Propiedades de la Fibra cerámica.....	115
Tabla 9	Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min.....	122
Tabla 10	Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min.....	127
Tabla 11	Resultados- Hoja de Cálculo en EXCEL.....	128
Tabla 12	Resultados- Hoja de Cálculo en EXCEL.....	129
Tabla 13	Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min.....	129
Tabla 14	Resultados NFPA 290- Hoja de Cálculo en EXCEL	131
Tabla 15	Resultados NFPA 290- Hoja de Cálculo en EXCEL	132
Tabla 16	Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min.....	132
Tabla 17	Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min	137
Tabla 18	Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min	139
Tabla 19	Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min.....	141
Tabla 20	Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min.....	142
Tabla 21,	Cuadro resumen	157
Tabla 22,	Cuadro resumen	161

TABLA DE FIGURAS

Figura 1	Secuencia del BLEVE-FIREBALL, en una esfera de almacenamiento de GLP	26
Figura 2	Configuración del aislamiento en el tanque de almacenamiento.....	32
Figura 3	Relación de la temperatura del GLP almacenado vs el tiempo	33
Figura 4	Relación de la temperatura en la pared metálica vs el tiempo.....	34

Figura 5 Comparación de las pruebas realizadas en el sistema de aislamiento y sistema de enfriamiento	34
Figura 6 Fenómenos físicos externos involucrados en el calentamiento del Recipiente	35
Figura 7 Fenómenos físicos internos involucrados en el calentamiento del Recipiente	36
Figura 8 Esquematación del fenómeno de estratificación térmica	37
Figura 9 Tiempo necesario para alcanzar la presión de 2.1 Mpa para diferentes flujos de calor	38
Figura 10 Resistencia relativa vs Temperatura	39
Figura 11 Esfuerzo de ruptura vs Tiempo de ruptura.....	40
Figura 12 Esfuerzo de ruptura vs Tiempo de ruptura.....	41
Figura 13 Propiedades físicas de los materiales de protección térmica de uso más común en sistemas contra incendios	43
Figura 14 Diferentes materiales de recubrimiento expuestos al fuego.....	44
Figura 15 Aislamiento térmico sin barreras de vapor	46
Figura 16 Aislamiento térmico con barrera de vapor.....	46
Figura 17 Balance de energía y condiciones de frontera usados en el térmico FEM ...	48
Figura 18 Esquema del modelamiento del pool fire en tanque de almacenamiento de GLP.....	49
Figura 19 Distribución de Temperatura en la parte externa y la placa metálica	50
Figura 20 Distribución de los esfuerzos en la placa metálica	51
Figura 21 Viscosidad vs Temperatura, para líquidos y gases	61
Figura 22 Volumen de control	63
Figura 23 Conservación de la energía	63
Figura 24 Asociación de la transferencia de calor por conducción con la difusión de energía debido a la actividad molecular	65
Figura 25 Gradiente de temperatura vs Posición.....	66
Figura 26 Convección Forzada y Natural	67
Figura 27 Esquematación de la radiación incidente y la emitida	69
Figura 28 Diagrama esfuerzo- deformación unitaria para un acero dúctil	73
Figura 29 Curva característica del Creep a diferentes temperaturas	75
Figura 30 Curva característica de Creep.....	75
Figura 31 Tipos de Fractura Dúctil	76
Figura 32 Fractura Frágil Transgranular.....	77
Figura 33 Fractura Frágil Intergranular	77
Figura 34 Esquema de diseño	87
Figura 35 Esquematación del modelo matemático	90
Figura 36 Modelamiento de la transferencia de calor entre el vapor de GLP y la carcasa metálica.....	91
Figura 37 Modelamiento de transferencia de calor entre el vapor de GLP, la carcasa metálica y el material aislante 1	93
Figura 38 Modelamiento de transferencia de calor entre la carcasa metálica, el material aislante 1 y material aislante 2.....	95

Figura 39 Modelamiento de la transferencia de calor entre el material aislante 1, material aislante 2 y la carga de radiación generada por el incendio	98
Figura 40 Esquema del modelamiento de la prueba de la NFPA 290.....	102
Figura 41 Modelamiento de los mecanismos de transferencia de calor en el material aislante 2.....	103
Figura 42 Modelamiento de los mecanismos de transferencia de calor en el material aislante 1.....	106
Figura 43 Modelamiento de los mecanismos de transferencia de calor del acero.....	108
Figura 44 Lana de Roca Mineral - CALORCOL	114
Figura 45 Temperatura de vapor de GLP en función del tiempo.....	135
Figura 46 Temperatura del acero en función del tiempo	135
Figura 47 Temperatura de la fibra ceramica en función al tiempo	136
Figura 48 Temperatura de la lana de roca mineral en función al tiempo.....	136
Figura 49 Temperatura de la fibra cerámica en función al tiempo.....	137
Figura 50 Temperatura de la roca de mineral en función al tiempo.....	138
Figura 51 Temperatura del acero en función del tiempo	138
Figura 52 Temperatura de vapor de GLP en función del tiempo.....	139
Figura 53 Temperatura del acero en función del tiempo	140
Figura 54 Temperatura de la fibra cerámica en función al tiempo.....	140
Figura 55 Temperatura de la fibra cerámica en función al tiempo.....	141
Figura 56 Temperatura del acero en función del tiempo	142
Figura 57, Posibles escenarios de peligros en la zona estanca de los tanques esféricos de almacenamiento.....	155
Figura 58, Radiación térmica del Jet Fire, en el escenario N° 01	156
Figura 59, Alcance de la radiación térmica en un Jet Fire en la planta Z gas, en el escenario N° 01	157
Figura 60, Radiación vs Distancia	158
Figura 61, Radiación térmica del Jet Fire, en el escenario N° 02	159
Figura 62, Radiación térmica del Jet Fire, en el escenario N° 03	160
Figura 63, Alcance de la radiación térmica en un Jet Fire en la planta Z gas, en el escenario N° 03	161
Figura 64, Radiación térmica del Jet Fire, en el escenario N° 03	162

RESUMEN

El presente informe de tesis es una investigación de tipo aplicada desarrollada para el diseño de un aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio. El objetivo de esta tesis es diseñar un aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio que brinde un adecuado nivel de seguridad a los tanques esféricos de almacenamiento de GLP en una planta de abastecimiento de GLP ubicada en el Callao.

Actualmente la planta de abastecimiento de GLP tiene proyectado implementar un sistema de aislamiento para la protección contra incendios de los tanques esféricos de almacenamiento de GLP, en vez de los sistemas de extinción a base de agua.

Para la recolección de datos se utilizó la técnica documental, donde se analizó la información de los siguientes documentos: Investigaciones realizadas en el extranjero, normas técnicas internacionales, Handbooks y el estudio de riesgos de la planta.

Los resultados obtenidos en el diseño del aislamiento indican que tiene la capacidad de mitigar la carga térmica generada en un incendio, lo suficiente para garantizar una adecuada protección para los tanques esféricos y evitar la ocurrencia del fenómeno más catastrófico que podría ocurrir, BLEVE.

Palabras clave:

Aislamiento térmico

Protección contra incendio

Tanques esféricos

ABSTRACT

This thesis report is an applied type investigation developed for the design of thermal insulation as a fire protection system. The objective of this thesis is to design a thermal insulation as a fire protection system that provides an adequate level of security for spherical LPG storage tanks in a LPG supply plant located in Callao.

The LPG supply plant is currently planning to implement an insulation system for fire protection of spherical LPG storage tanks, instead of water-based extinguishing systems.

For the data collection the documentary technique was used, where the information of the following documents was analyzed: Investigations carried out abroad, international technical standards, Handbooks and the risk studies of the plant.

The results obtained in the design of the insulation indicate that it has the capacity to mitigate the thermal load generated in a fire, enough to guarantee adequate protection for spherical tanks and avoid the occurrence of the most catastrophic phenomenon that could occur, BLEVE.

Keywords:

Thermal isolation

Fire protection

Spherical tanks

INTRODUCCIÓN

El presente estudio explora como tema de investigación el diseño del Sistema de Aislamiento Térmico como Sistema de Protección Contra Incendio para los tanques esféricos de almacenamiento de GLP, con capacidad de (2000 TM c/u), en una planta de abastecimiento de GLP.

La planta tiene como visión cambiar el aislamiento térmico que tienen instalado, ello se debe a la antigüedad del mismo y otros factores.

Un sistema contra incendio en una planta de GLP es la última capa de protección del sistema de seguridad, es decir, evita que ocurra el peligro potencial más grande que presenta esta industria, el BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). Este fenómeno podría originarse bajo el impacto de una llama en el recipiente de almacenamiento de GLP. Dicho fenómeno en tiempos pasados ocasiono muchas muertes (Arturson, 1987), (French Ministry of the environment, 2008); por tal motivo, es necesario que los sistemas de protección contra incendio cumplan una serie de estándares (requerimientos mínimos) para garantizar el adecuado diseño e instalación del sistema.

El D.S. N° 043-2007-EM, Reglamento de Seguridad para las Actividades de Hidrocarburos, capítulo de sistemas contra incendio; indica el uso de las normas NFPA (National Fire Protection Association) para su diseño e instalación, entre ellas la NFPA 58, Liquefied Petroleum Gas Code. Esta norma, menciona en uno de sus capítulos los tipos de sistemas de protección contra incendio que se deben instalar en una planta de GLP, siendo uno de ellos el aislamiento. El requisito normativo para la instalación del aislamiento es una prueba, la cual es definida por la NFPA 290, Standard for Fire Testing of Passive Protection Materials for Use on LP-Gas Containers. La NFPA 290 indica el procedimiento y las condiciones que el material aislante deberá soportar para certificar su uso en una instalación de GLP. El problema de esta norma es que solo contempla un mecanismo de falla, en los recipientes de almacenamiento de GLP, tal mecanismo es cuando el metal base aumenta su temperatura a niveles donde

su resistencia estructural cae drásticamente (Birk, 1995). Cabe resaltar que no es el único y la norma no está siendo conservadora. Sin embargo, si se contemplara otros mecanismos de falla adicionales al de la norma, NFPA 290, se garantizaría un adecuado nivel de seguridad, el cual por obvias razones es superior.

El objetivo del presente estudio es diseñar un sistema de aislamiento térmico como sistema de protección contra incendios para los tanques esféricos de almacenamiento de GLP en una planta de abastecimiento de GLP, ubicado en el Callao. Para poder cumplir con esta meta se propone dos pasos previos, siendo el primero la selección del tipo de material aislante el cual debe garantizar: la resistencia a elevadas temperaturas; un bajo coeficiente de conductividad térmica; resistencia a la corrosión; características refractarias; de fácil montaje, entre otros. El segundo es determinar el espesor, para ello se hará uso de un modelamiento matemático, ello por la necesidad de obtener perfiles de temperatura en función del tiempo, ya que el aislamiento térmico debe proveer protección el tiempo suficiente para la llegada de la brigada contra incendios, el tiempo seleccionado será el contemplado por la norma NFPA 290. Para el desarrollo de los cálculos es necesario conocer las propiedades del GLP, las propiedades del metal base y del aislamiento térmico. Los parámetros base del diseño tendrán como finalidad contemplar los mecanismos de falla estructural y las medidas para mitigarlo.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

El presente estudio explora como tema de investigación el diseño de un Aislamiento Térmico como Sistema de Protección Contra Incendio para los seis (06) tanques esféricos de almacenamiento de GLP, con capacidad de (2000 TM c/u), en una planta de abastecimiento de GLP. Dichos tanques fueron aprobados para su funcionamiento en el año 1996 por el MINEM. Todos los tanques esféricos cuentan con un sistema de aislamiento como medio principal de protección contra incendio y un sistema de deluge (gorro chino), monitores e hidrantes distribuidos en el perímetro del patio de tanques esféricos de almacenamiento de GLP. El GLP se almacena en proporciones volumétricas de 70% propano y 30% butano y los tanques esféricos fueron diseñados bajo el Código ASME SECC VIII DIV I, con una plancha de acero de material, SA -516 - Gr 70.

OSINERGMING¹ cuestiona el uso del sistema de aislamiento térmico como sistema principal de protección contra incendios. Dicho cuestionamiento fue basado en una exigencia normativa expuesta en el D.S. N° 052-93-EM², donde indica que el sistema de protección contra incendio debe ser a base de agua (sistema de enfriamiento convencional); a su vez, el D.S. N° 043-2007-EM indica que el sistema de protección contra incendios debe ser determinado por el estudio de riesgos. Es decir, no exige el uso del sistema de enfriamiento, sino que el tipo de sistema de protección contra incendios depende de un análisis de riesgos.

De lo anterior se puede dilucidar la incongruencia presentada en ambas normas, respecto al tipo de sistema de protección contra incendio, por tal motivo se realizaron diferentes descargos hacia la entidad superior, Dirección General de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas (MINEN), para que evalué el problema. Los descargos presentados fueron documentos técnicos cuyo objetivo

¹ Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería

² Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento de Hidrocarburos

era sustentar el uso del aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio.

La planta tiene como visión cambiar el aislamiento térmico que tienen instalado, ello se debe a factores como: envejecimiento del material; exposición a un ambiente salino (corrosivo); falta de una adecuada inspección y mantenimiento (provocado por el difícil acceso a la instalación). Además, es importante mencionar que el costo de instalación de un sistema de protección contra incendio a base de agua para este tipo de instalación costaría más que el propuesto.

En el Perú, los sistemas de protección contra deben cumplir una serie de normas obligatorias, los cuales son expuestos en el D.S. N° 043-2007-EM y D.S. N° 052-93-EM³. En ambos decretos elevan a las normas NFPA, API, ASME desde una práctica recomendada a ley. Pero no es el único país donde realizan exigencias respecto a la seguridad industrial de echo es una tendencia a nivel internacional. La razón del nivel de exigencia en esta industria se debe a que pueden ocurrir diversos tipos de incendios, producidos por una fuga de GLP, es decir existe riesgos potenciales; por tal motivo, las normas internacionales reconocen este hecho y proponen protección especial en los recipientes a presión para almacenamiento de GLP, siendo la más importante en E.E.U.U la NFPA 58 y NFPA 59⁴.

La protección contra incendios aborda el impacto de la llama en un recipiente que, en el peor de los casos, puede llevar a un BLEVE. Este fenómeno, tiene probabilidades muy bajas de suceder pero por la magnitud de su consecuencia suele ser motivo de preocupación, ya que la energía liberada podría ocasionar sobrepresiones muy altas y los fragmentos generados, por la falla catastrófica del material podrían viajar aproximadamente más de 1km (Joaquim Casal, 2009, p.194). Además, de las consecuencias generadas por el choque térmico como consecuencia de la bola de fuego. La protección especial es un medio para proteger un recipiente de GLP de temperaturas elevadas debido al fuego. Según

³ Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento de Hidrocarburos

⁴ Norma Para La Producción, Almacenamiento y Manejo Del Gas Natural Licuado

la NFPA 58 la verificación de la efectividad de tales métodos alternativos se deja a laboratorios de pruebas independientes.

A su vez, el estandar NFPA 58 reconoce cinco (05) métodos para lograr la protección adecuada, siendo estos: Aislamiento; Monticulado; Enterrado; Sistemas fijos de pulverización de agua; Monitores de boquillas. De los cuales para el proyecto de investigación el escogido es el aislamiento. Como fue indicado en el párrafo anterior para verificar la efectividad del sistema de protección es necesario someterlo a una prueba.

La prueba planteada por la NFPA 58 para el aislamiento es expuesta ampliamente por la NFPA 290. Dicha prueba tiene como finalidad la protección del metal base de toda la envolvente metálica de cualquier tanque de almacenamiento de GLP en un tiempo de 50 min (busca que la temperatura en la placa base no se eleve hasta un nivel donde su resistencia estructural disminuye drásticamente), generalmente ello sucede a temperaturas por encima de 600°C; donde su pérdida de resistencia estructural es de 80 a 90 % (Birk y Yoon, 2006).

Las normas son de carácter recomendado y siempre debe anteponerse el buen criterio del ingeniero, esto principalmente porque no todas las condiciones de aplicación son iguales. El problema de la NFPA 290 es que no contempla todos los mecanismos de falla de un recipiente a presión que este sujeto a un incendio, siendo uno de los más críticos el que se genera cuando existe un elevado gradiente de temperatura (300°C – 400°C) entre la superficie metálica en contacto con el vapor y la superficie metálica en contacto con el líquido, adicionando de esta manera un alto esfuerzo térmico a la placa base del tanque, ocasionando la falla en esta zona crítica (Landucci, Molag y Cozzani, 2009). Tampoco considera el envolvimiento de las llamas que podría generarse por el flujo de GLP que escapa por la válvula de alivio como consecuencia de sobrepresiones provocadas por el incendio tal y como ocurrió en el accidente de Feyzin (French Ministry of the environment, 2008). Ello podría agravar aún más las consecuencias del incendio porque el recipiente estaría expuesto a un envolvimiento de llamas aumentando la carga térmica neta sobre el recipiente.

Sin embargo, al contemplar las condiciones térmicas que se desarrollan en un incendio y otros mecanismos de falla, además del contemplado por la norma, como criterios al momento de desarrollar el diseño del sistema de aislamiento térmico se garantiza un adecuado nivel de seguridad el cual es superior al indicado por la norma.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo diseñar un aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio que brinde un adecuado nivel de seguridad a los tanques esféricos de almacenamiento de GLP en una planta de abastecimiento ubicada en el Callao?

1.2.2. Problemas específicos

1. ¿Cómo seleccionar un material aislante que resista las condiciones generadas en un incendio ubicado en el patio de tanques esféricos de almacenamiento de GLP?
2. ¿Cómo determinar el espesor del aislamiento térmico para que, en caso de un incendio, los tanques esféricos de almacenamiento de GLP cuenten con un adecuado nivel de seguridad?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio que brinde un adecuado nivel de seguridad a los tanques esféricos de almacenamiento de GLP en una planta de abastecimiento de GLP ubicada en el Callao.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Seleccionar el tipo de material aislante que resista las temperaturas alcanzadas en un incendio ubicado en el patio de tanques esféricos de almacenamiento de GLP.
2. Determinar el espesor del aislamiento térmico para que, en caso de un incendio, los tanques esféricos de almacenamiento de GLP cuenten con un adecuado nivel de seguridad.

1.4. Limitantes de la investigación

1.4.1. Teórica

La limitación teórica del presente problema de investigación abarca: tipos de incendios con GLP, BLEVE, sistema de protección contra incendio, comportamiento del tanque de almacenamiento, aislamiento térmico como sistemas de protección contra incendios, consideraciones respecto al uso de aislamiento térmico, cargas térmicas, fenómenos no considerados por la normativa internacional, consideraciones en el modelamiento matemático, variables importantes para el balance de energía y la transferencia de calor, ecuación de balance de energía, mecanismos básicos de transferencia de calor, números adimensionales, propiedades adimensionales, propiedades de diseño de materiales, resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias.

1.4.2. Espacial

El presente estudio abarca la protección de los tanques esféricos a una planta de Abastecimiento de GLP.

1.4.3. Temporal

El presente estudio contempla como periodo de investigación los años 2018 – 2019.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Nacional

En el informe presentado por Villa (2019) al MINEN, con nombre **“Estudio Técnico sobre Uso de un Sistema de Aislamiento Térmico como Protección Contra Incendios en Esferas que Almacenan GLP”**, se demuestra la efectividad de un sistema de aislamiento térmico como sistema de protección contra incendios en tanques esféricos para almacenamiento de GLP.

Además; concluye que el sistema de protección contra incendio del tipo aislamiento térmico brinda mayor seguridad que el sistema convencional aplicado a los recipientes de almacenamiento de GLP.

En el informe desarrollado por SERGINGSEG (2018) titulado **“Estudio de Riesgos del Terminal de Abastecimiento y Planta Envasadora de GLP”**, explican el funcionamiento y operación de la Planta de Abastecimiento de GLP en mención, evaluando y priorizando las actividades a fin de llevar los riesgos a niveles aceptables y/o tolerables.

Además, menciona que la planta cuenta con una zona de tanques; seis (06) esferas para el almacenamiento de GLP teniendo cada esfera un diámetro de 19.35 m y una capacidad de 2,000 TM. Todas las esferas fueran fabricadas en el año 1995, marca CANADIAN ERECTORS LIMITED, construidas de acuerdo al código ASME, sección VIII, Div. 1, 1992.Add 93, con un diámetro total de 63' - 6", cuyo espesor de plancha en la parte superior al ecuador varía de 1.32" a 1.21" y en la parte inferior al ecuador es de 1.38", la presión máxima de operación es 104 psig y la presión de prueba hidrostática fue a 165 psig.

Asimismo, indican que la máxima presión operativa de almacenamiento de cada esfera, es de 85 psig, la misma que está a 19 psig por debajo de la máxima presión permisible de trabajo (MAVP) de 104 psig.

Normas nacionales

- Decreto Supremo N° 043-2007-EM (Reglamento de Seguridad para las Actividades de Hidrocarburos y modifican diversas disposiciones) y sus modificatorias.
- Decreto Supremo N° 052-93-EM (Reglamento de Seguridad para el Almacenamiento de Hidrocarburos) y sus modificatorias.

2.1.2. Internacional

- En la investigación desarrollada por el ministerio del medio ambiente de Francia (1996), “**BLEVE in an LPG storage, Facility at a Refinery, January 4, 1966**”, se especificó minuto a minuto como y porque ocurrió el accidente (BLEVE); además, indican como podría prevenirse en el futuro.

La refinería de Feyzin contaba con capacidad total de 13 100 m³ que incluyen 8 esferas y 2 cilindros a presión para el almacenamiento de GLP. Se menciona que el 4 de enero de 1966, la fuga se debió a un error humano, ello porque el técnico encargado en tomar una muestra en la esfera de GLP T 61-443, no realizó el procedimiento adecuado en las válvulas de purga, provocando un congelamiento de esta y como consecuencia no pudieron cerrar la válvula de purga.

Al no poder controlar la fuga de GLP, este se expandió en forma de nube de vapor hasta encontrar un punto de ignición fuera de la planta. El incendio en la parte baja de los tanques tardó 120 min en hacer BLEVE en la primera esfera. Dichas esferas solo tenían un sistema de enfriamiento como protección contra incendios. El accidente terminó con 18 muertos, 85 heridos, 49 personas hospitalizadas y a 1475 hogares dañados.

- B.Droste y W.Shoen (1988) en su investigación titulada “**Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks**”, referencian el estándar TRG (alemán) que contiene reglas para los recipientes de almacenamiento de GLP, en él se realizó tres pruebas

donde los recipientes son sometidos a un pool fire, la finalidad fue evaluar la eficacia del aislamiento como medio de protección contra incendios para tanques de almacenamiento de GLP. La primera prueba consistió en someter tal tanque, sin aislamiento, a un incendio del tipo pool fire y obtener el tiempo de falla; mientras en los otros dos los tanques son cubiertos por un aislamiento térmico de roca mineral con espesores de 80mm y 100mm respectivamente.

El aislamiento térmico fue evaluado en la tercera prueba y se concluyó que es capaz de prevenir una falla en el recipiente de almacenamiento de GLP, incluso en 90 minutos de exposición envuelto en un pool fire.

De ambas pruebas realizadas se concluyó que dicho sistema de aislamiento garantiza que el tanque de almacenamiento de GLP no fallara por un incremento excesivo de temperatura en la carcasa, cumpliendo su papel de sistema de protección contra incendios.

- Landucci, Molag y Cozzani (2009) en su investigación **“Modeling the performance of coated LPG tanks engulfed in fires”**, tuvo como objetivo realizar un modelo que describa el comportamiento de un tanque de almacenamiento de GLP envuelto en llamas; dicho modelamiento está basado en un enfoque de elementos finitos. El FEM⁵ fue implementado mediante un programa que realiza un balance de energía térmica, así como la evaluación de la carga térmica y mecánica generada.

El modelamiento presenta algunas consideraciones, por ejemplo, no considera la región plástica para evaluar el impacto de la carga térmica sobre el tanque de almacenamiento⁶, a su vez, no toma en cuenta la variación de la conductividad térmica del material cuando es expuesto a gradientes elevados de temperatura.

Landucci, concluye que la magnitud del espesor aislante varía el tiempo en que falla un tanque en un incendio, las cargas térmicas ingresadas en

⁵ FEM: Método de elementos finitos

⁶ No considera el endurecimiento generado en la región plástica, es decir cuando sobre pasa el punto de fluencia, por lo tanto, los resultados obtenidos son conservadores.

el modelamiento fueron de 100 a 180 kW/m², además, indica que la pared metálica del tanque en contacto con la fase vapor del GLP eleva más rápido su temperatura que el metal en contacto con la fase líquida.

- **Landucci (2016) en su investigación “CFD Modeling of LPG Vessels Under Fire Exposure Condition”**, desarrolló un modelo computacional de dinámica de fluidos (CFD) para evaluar la temperatura interna del fluido y el perfil de presión en recipientes presurizados que contienen GLP expuestos a un incendio. En él se configuró una simulación transitoria bidimensional utilizando ANSYS FLUENT para predecir la evolución de las fases de líquido y vapor durante el calentamiento del tanque. El modelo se validó con datos experimentales a gran escala disponibles para recipientes de GLP expuestos a incendios de hidrocarburos, y se aplicó a eventos accidentales recientes para evaluar el tiempo esperado de acumulación de presión en diferentes escenarios de incendios
Los resultados mostraron la importancia de la estratificación del líquido y la expansión térmica del líquido en el aumento de la presión interna de un recipiente expuesto a un incendio.
- **Gong (2004) en su trabajo de investigación “A simplified model to predict the thermal response of PLG and its influence on BLEVE “**, desarrollo un modelo simplificado para describir la respuesta térmica de los tanques que almacenan GLP sometidos a un incendio. Se consideró el desarrollo de la capa de estratificación. La comparación de los resultados con los datos experimentales disponibles muestra que el modelo planteado puede predecir razonablemente la respuesta térmica. Los resultados muestran que la presión en el tanque aumenta más rápido como resultado de la estratificación térmica, y para la misma presión del tanque, la energía en el líquido es menor cuando el líquido se estratifica. La estratificación puede reducir la gravedad de los peligros de la explosión de vapor de líquido en ebullición (BLEVE).
- **Hemmatian, Planas y Casal (2015) en el informe “Fire as a primary event of accident domino sequences: The case of BLEVE”**. Indican reportes

históricos sobre los accidentes que han originado un BLEVE. Mencionan que históricamente ocurrieron tres (03) accidentes importantes (México, Japón y Francia), donde el incendio fue provocado por una fuga de GLP y consecuencia de ello originaron un BLEVE.

➤ **En el Handbook de la NFPA 58 – Código del Gas Licuado de Petróleo**

Indica en el ítem 6.29.5 lo siguiente:

Que el sistema de aislamiento se encuentra dentro de los cinco métodos de protección especial. Además, la protección especial es un medio para proteger un recipiente que almacena GLP de las temperaturas elevadas provocadas por un incendio.

El ítem 6.29.5.1, especifica que el aislamiento utilizado, debe ser capaz de limitar la temperatura en el recipiente a no más de 800 °F (430 °C) durante un mínimo de 50 minutos según lo determinado por la prueba (las condiciones de la prueba son explicados ampliamente en la NFPA 290).

El ítem 6.29.5.2, señala que el sistema de aislamiento debe ser inherentemente resistente a la intemperie y a la acción de las mangueras. (Condiciones de la prueba NFPA 290) Mencionan que la resistencia al flujo de manguera debe conocerse porque estos probablemente se apliquen en una emergencia de incendio, aunque un tanque con aislamiento no requiera esta medida.

El Anexo H de la NFPA 58, es un método de prueba para evaluar el aislamiento según los criterios de 6.27.5.1. El Comité Técnico de la NFPA sobre Pruebas de Incendio también ha desarrollado la Norma NFPA 290, Prueba de Incendio de Materiales de Protección Pasiva para Contenedores de Gas LP, que ahora está disponible en la NFPA y se utiliza en lugar del Anexo H (brinda más información).

Normas internacionales

- API 2218 “Fireproofing Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants”
- API 2510 “Design and Construction of LPG Installations”
- NFPA 58 “Código del Gas Licuado de Petróleo”
- NFPA 290 “Standard for Fire Testing of Passive Protection Materials for Use on LP-Gas Containers”

2.2. Marco teórico

2.2.1 Tipos de incendios de GLP

El almacenamiento y transporte de gases licuados de petróleo (GLP) son fuentes potenciales de peligros graves. Aquellos que resultan en la “Explosión de Vapores que se Expanden al Hervir el Líquido” (BLEVE - Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), seguido de la "Bola de Fuego", son la principal preocupación debido a los daños catastróficos producidos. Los fenómenos observados ocurrieron principalmente como consecuencia de una fuerte carga de calor externa derivada de incendios, que involucran vagones de GLP, camiones cisterna o tanques de almacenamiento fijos (Salzano et al., 2003).

En muchos accidentes importantes, el efecto domino que se origina en estos eventos ha jugado un papel importante en la ampliación de la gravedad del accidente tanto en plantas fijas como en el transporte de materiales peligrosos por carretera o ferrocarril. Por lo tanto, un primer evento (un incendio o una explosión), puede llevar después de un tiempo relativamente corto a un segundo, y luego a un tercero evento.

Dependiendo de las circunstancias (por ejemplo, cantidad de vagones de ferrocarril involucrados en un descarrilamiento), este efecto puede llevar a una serie catastrófica de explosiones y/o incendios o emisiones tóxicas. Esto puede tener graves consecuencias en la población y, con mayor frecuencia en los bomberos, aumentando también las pérdidas de materiales (Hemmatian, Planas y Casal, 2015).

Los tipos de incendios de GLP más comunes son:

- Fireball
- Jet Fire
- Pool Fire

2.2.2 BLEVE

Descripción del fenómeno

Si un recipiente que almacena un líquido a presión es afectado, por un incendio, la carga térmica elevara la presión del líquido almacenado. Al transcurrir el tiempo la presión aumentara y las paredes del recipiente no tendrán la capacidad de resistir las elevadas presiones y fallara.

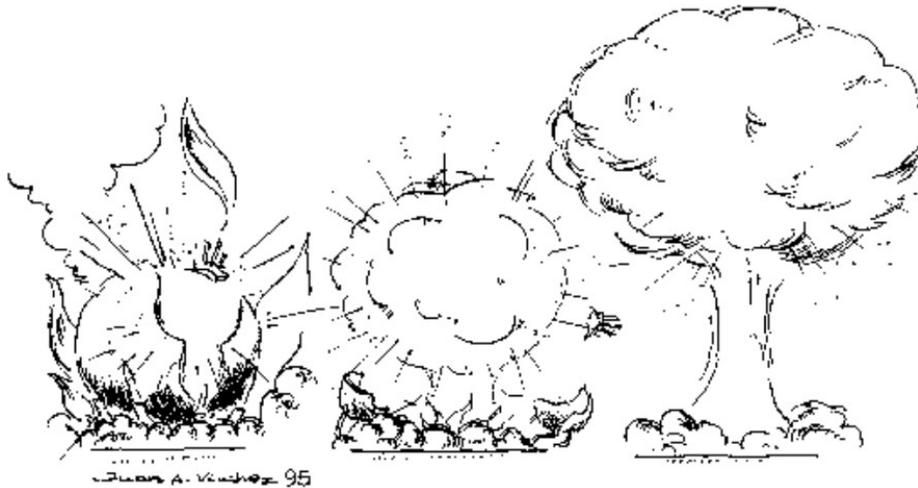
La falla tendrá lugar en la parte superior del recipiente, dicho proceso se explicará a detalle más adelante. Al provocarse la falla estructural el líquido que se encuentra a una presión elevada estará en condición de sobrecalentamiento porque se encuentra en este estado siendo el vapor el estado natural para las condiciones a las cuales se encuentra. Lo siguiente que ocurrirá será que todo el líquido sobrecalentado tendera a vaporizarse instantáneamente.

El incremento extraordinario de volumen que experimenta un líquido al vaporizarse, en el caso específico de propano es de una 250 veces, más la expansión del vapor preexistente, provocaran una onda de presión que provocara la rotura total del recipiente (Joaquim Casal, 2009, p. 176).

“Si la substancia almacenada en el recipiente es infamable, como suele suceder en la industria química (por ejemplo, propano), la masa de líquido y vapor vertida en el momento de la explosión se incendiará, y dará lugar a una hoguera de forma aproximadamente hemisférica que se extenderá inicialmente a ras de suelo. El efecto de la radiación térmica en esta primera fase (muy corta, ya que suele durar sólo un par de segundos), si bien ha sido menospreciada por algún autor, es muy importante. Esta masa de combustible sólo puede arder en superficie, porque su interior, muy rico en combustible (hay que tener en cuenta la presencia de la fase líquida arrastrada en el proceso de vaporización

instantánea) y prácticamente sin aire, se encuentra fuera de los límites de inflamabilidad” (Joaquim Casal, 2009, p. 176).

Figura 1 Secuencia del BLEVE-FIREBALL, en una esfera de almacenamiento de GLP



Fuente: Libro de “Análisis de Riesgo en Plantas Industriales” publicado por Joaquim Casal (2009)

2.2.3 Sistema de protección contra incendio

La protección contra incendio abarca la prevención, detección y supresión de incendios.

“El termino prevención de incendios cubre las medidas que debe cumplir una instalación para evitar que se produzca un incendio o se dé una escalada del incidente luego de la liberación de GLP. Las medidas podrían ser equipo de control del producto, aislamiento eléctrico, entre otros.

El termino detección de incendio abarca los equipos que detectan la presencia de calor, gases de combustión; e inmediatamente la activación de las alarmas, o también la activación inmediata de una válvula, como por ejemplo las válvulas de shutoff de cierre manual-remoto-automático que contienen un sensor térmico, su función es cerrar la válvula al percibir un aumento en su temperatura evitando la alimentación del incendio ya ocasionado.

El termino extinción de incendios cubre los medios para suministrar agentes para la extinción o control de incendios” (NFPA 58, 2017).

Los sistemas de protección contra incendio se clasifican en dos grandes grupos, protección pasiva contra incendio y protección activa contra incendio. Los estándares internacionales tales como API y NFPA presentan sus propias definiciones, las cuales serán expuestas en la Tabla 1.

Tabla 1 Definición de términos

Termino	Definición	Estándar de Referencia
Sistema activo de protección contra incendios	Un sistema que utiliza partes mecánicas o eléctricas móviles para lograr un objetivo de protección contra incendios.	NFPA 3
Sistema pasivo de protección contra incendios	Cualquier componente de un edificio o estructura que proporcione protección contra incendios o humo sin ningún tipo de activación o movimiento del sistema.	
Protección contra incendios, activa	Cualquier sistema o componente de protección contra incendios que requiera la detección manual o automática de un incendio y que inicie una respuesta consecuente.	API RP 14G
Protección contra incendios, pasiva	Cualquier sistema o componente de protección contra incendios que, por su naturaleza inherente, juega un papel inactivo. La protección pasiva contra incendios funciona independientemente de una intervención humana, mecánica u otra para luego iniciar una respuesta.	
Material de protección pasiva contra incendios	Un material que se aplica a un sustrato (material base) y está diseñado para protegerlo de los efectos térmicos de un incendio.	NFPA 290
Protección pasiva contra incendios	Una barrera, recubrimiento u otra protección que brinda protección contra el calor de un incendio sin intervención adicional.	API 2218

Fuente: Elaboración propia

Los sistemas de supresión, extinción son tradicionalmente reconocidos como sistemas activos, mientras que los sistemas de aislamiento, entierro, monticulados son conocidos como sistemas pasivos.

Una comparación entre ambos modos de protección contra incendios se describe en la Tabla 2.

Tabla 2 Comparación entre el sistema de aislamiento y sistema de enfriamiento

	Sistema de Aislamiento	Sistema de enfriamiento
Funcionamiento	El material aislante minimiza el impacto de la llama, reduciendo el aumento de la temperatura del acero, retrasando la falla estructural.	El agua es un agente extintor muy efectivo debido a su capacidad de enfriamiento (absorbe grandes cantidades de calor al momento de cambiar de fase), así mismos los vapores puede diluir los vapores inflamables.
Operación	Al ser un sistema de protección pasivo, no necesita sistemas de detección, alarmas para brindar protección. No es propenso a fallas eléctricas o mecánicas.	Requiere un sistema de activación (automático, manual remoto). Es propenso a fallas mecánicas y eléctricas
Inspección y mantenimiento	El estándar API 2218, cuenta con los criterios para la inspección y mantenimiento de los sistemas de aislamiento térmico.	El estándar NFPA 25, cuenta con los criterios para la inspección y mantenimiento de los sistemas contra incendio a base de agua.
Pruebas de aceptación	El estándar API 2510 recomienda la prueba UL 1709 ⁷ , dicho ensayo consiste en someter al material a un pool fire por un tiempo de 1 ½ horas. El estándar NFPA 58 y el API 2510 indican que el sistema de aislamiento debe ser sometido a la prueba de mangueras y antorcha, el proceder de dicha prueba es detallado en el estándar NFPA 290 ⁸ .	Las descritas por la NFPA 25, según el tipo de sistema; aspersores, rociadores, mangueras, extintores o funcionamiento de la bomba contra incendio.

Fuente: Elaboración propia

⁷ UL 1709, Standard for Rapid Rise Fire Tests of Protection Materials for Structural Steel.

⁸ La NFPA 290 edición 2018, somete al material aislante a una prueba de antorcha (jet fire) y posteriormente se aplica un chorro de agua por medio de mangueras, la prueba abarca un tiempo total de 50 min.

Por lo señalado en la Tabla 2, los sistemas de protección pasiva son más seguros porque no requieren un medio de activación para funcionar, además, se encuentra siempre operativo, contrariamente al sistema de protección activo⁹ que requiere un medio para funcionar (manual o automático).

Protección contra incendios del tipo aislamiento según normas internacionales

Los estándares internacionales clasifican los diferentes tipos de sistemas; en el estándar API 2510 (1994), proporcionan la siguiente información:

El numeral 5.3.1, indica que el agua es el primer medio de protección contra incendio para las instalaciones de GLP ya que proporciona protección de exposición¹⁰; asimismo menciona la existencia de tres métodos principales que pueden usarse para la aplicación de agua en los recipientes de almacenamiento de GLP expuestos en un incendio; diluvio de agua; monitores fijos; agua pulverizada.

El numeral 5.8.1.1, se especifica que la función principal del fireproofing¹¹ es reducir el aumento de la temperatura de la superficie metálica cuando está expuesta a un incendio. El mecanismo para esto funcione es la absorción de calor a través de la descomposición química del fireproofing o aislamiento térmico, dependiendo de la naturaleza del fireproofing.

En el estándar API 2218 (1999) proporcionan la siguiente información:

En el numeral 1.3, indica que el fireproofing puede proteger contra la exposición prolongada de calor que podría causar el colapso de equipos no protegidos y provocar la propagación de un pool fire o la pérdida sustancial de bienes.

⁹ Los sistemas de protección contra incendio activo incluyen equipos de detección automática, neumática y manual remoto. El objetivo de estos sistemas es activar alarmas y equipos de protección para la mitigación del incendio.

¹⁰ Absorción de calor por medio de aplicación de agua pulverizada a equipos expuestos a un incendio, para limitar la temperatura superficial a un nivel que minimice los daños y prevenga su falla.

¹¹ Un proceso sistemático, incluidos los materiales y la aplicación de materiales, que proporciona un grado de resistencia al fuego para sustratos (material base) y conjuntos protegidos.

Además, proporciona información, ver Tabla 3, donde muestra el nivel de protección que tendrá el Fireproofing en un incendio.

Tabla 3 Nivel de protección del Fireproofing en un incendio

Equipos	Nivel de Protección	Sección en API 2218 o otra referencia
Recipientes de GLP que no están protegidos por un sistema de aspersores	Fireproofed equivalente para 1 1/2 horas en UL 1709	API 2510 (1995) sección 8.7 -6.2.2
Soporte de tubería dentro de 50 ft o en el área de llenado de los recipientes de GLP, el que sea mayor	Fireproofed equivalente para 1 1/2 horas en UL 1709	Sección 6.2.2 y 6.2.3 API 2510 (1995) sección 8.8.5
Sistemas de controles y cables críticos	15 a 30 minutos de protección en UL 1709 en condiciones de temperatura	Sección 6.1.8.1 API 2510 (1995) sección 8.11

Fuente: Estandar API 2218, Fireproofing Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants

En el numeral 7.3, menciona los tipos materiales fireproofing indicando sus propiedades térmicas, su mecanismo de absorción térmica; así como las ventajas/desventajas de cada uno de ellos.

En el estándar NFPA 58 (2017) indican lo siguiente:

“Si la revisión del Análisis de Seguridad Contra Incendio determina que existe un peligro para las estructuras adyacentes que excede la protección provista por las disposiciones del código, se debe proporcionar protección especial. Cinco métodos para lograr una protección especial se especifican en 6.29.5 y 6.29.6 de la siguiente manera:

1. *Aislamiento.*
2. *Monticulado.*
3. *Enterrado.*
4. *Sistemas fijos de pulverización de agua.*
5. *Monitores de boquillas.*

Donde uno de los métodos para lograr la protección contra incendio es el Aislamiento, dicho método de protección tiene que garantizar la adecuada protección al sistema que se desea proteger.

En el numeral 6.29.5.1.- Si se utiliza aislamiento, debe ser capaz de limitar la temperatura del recipiente a no más de 800 ° F (430 ° C) durante un mínimo de 50 minutos según lo determinado por la prueba, con aislamiento aplicado a una placa de acero y sujeto a una llama de prueba aplicada sustancialmente sobre el área de la placa de prueba.

En el numeral 6.29. 5.- El sistema de aislamiento debe ser inherentemente resistente a la intemperie y a la acción de las mangueras.

En el anexo H.- Los sistemas aislantes de protección térmica, propuestos para su uso en contenedores de Gas LP como medio de "Protección Especial" según 6.29.5.1, deben someterse a pruebas de rendimiento térmico como condición previa para la aceptación. La intención de este procedimiento de prueba es identificar sistemas de aislamiento que retarden o impidan la liberación del contenido de un contenedor en un ambiente de incendio de 50 minutos de duración y que resisten una corriente de manguera concurrente de 10 minutos de duración.

H.3 Prueba de aislamiento térmico. - El aislamiento térmico se probará de acuerdo con NFPA 290."

El alcance de la NFPA 290 edición 2018 menciona lo siguiente:

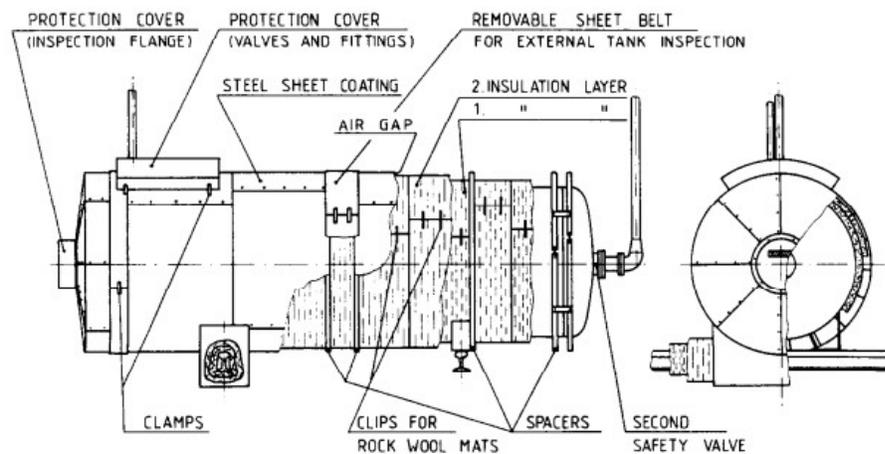
"La prueba descrita en este procedimiento debe usarse para determinar la resistencia a la resistencia de los materiales de protección pasiva (PFP) aplicados al exterior de los recipientes de Gas LP.

Según la NFPA 290 edición 2018, considera la prueba aceptable si ninguna de las termocuplas llega a 427°C en el periodo de 50 min."

Prueba del aislamiento térmico como sistema de protección contra incendios

En la investigación realizada por B.droste y Wshoen (1988) referencian el estándar TRG¹² que contiene reglas para los recipientes de almacenamiento de GLP, además realiza tres pruebas donde los recipientes son sometidos a un pool fire, la finalidad fue evaluar la eficacia de los medios de protección contra incendios para tanques de almacenamiento sobre el suelo. La configuración del aislamiento sobre el tanque horizontal de almacenamiento de GLP se visualiza en la Figura 2.

Figura 2 Configuración del aislamiento en el tanque de almacenamiento



Fuente: Informe técnico “Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks” publicado en 1988

Los resultados de las pruebas fueron los siguientes:

Para la primera prueba. - La sobrepresión de estallido fue la más alta (39 bar), el tiempo hasta que se produjo el estallido del tanque fue el más bajo (7 minutos, 20 segundos), cabe mencionar que en esta prueba el tanque se encontraba sin recubrimiento aislante.

Segunda prueba. - Tuvo una duración de 70 minutos, ello se debió a que una fuga en las válvulas ubicadas en la parte superior del tanque provocó un jet fire.

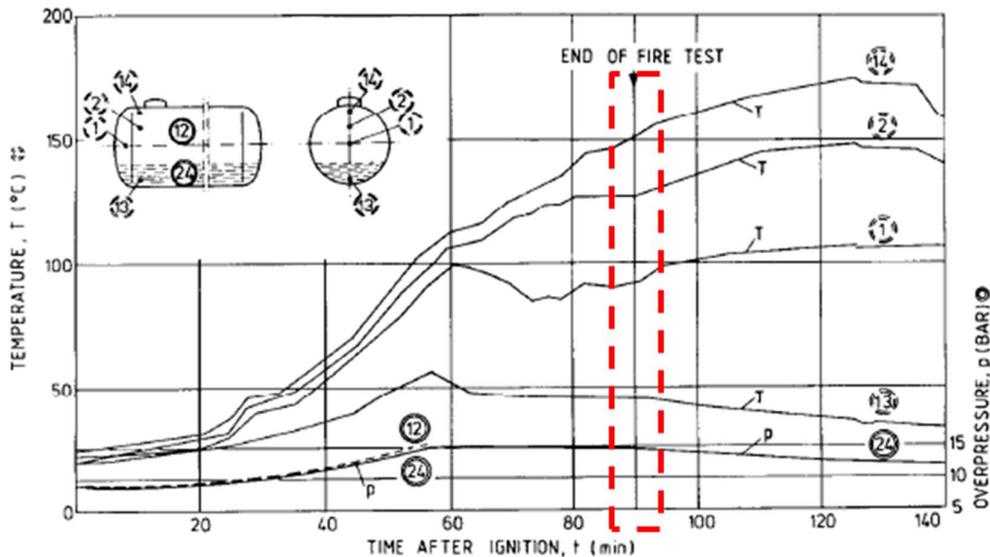
¹² TRG, Normativa técnica para recipientes a presión procedente de Alemania.

La razón de esta fuga es que el sello no era resistente a elevadas temperaturas y que esa área no se encontraba debidamente aislada.

Tercera prueba. - Tuvo una duración de 90 minutos sin que se produzca ninguna situación peligrosa. La sobrepresión de propano al comenzar la prueba fue de 9.0 bar, 53 minutos después del incendio la primera válvula de seguridad comenzó a descargarse lentamente a una sobrepresión de 14.8 bar y la sobrepresión permaneció por debajo de 15 bar durante toda la prueba.

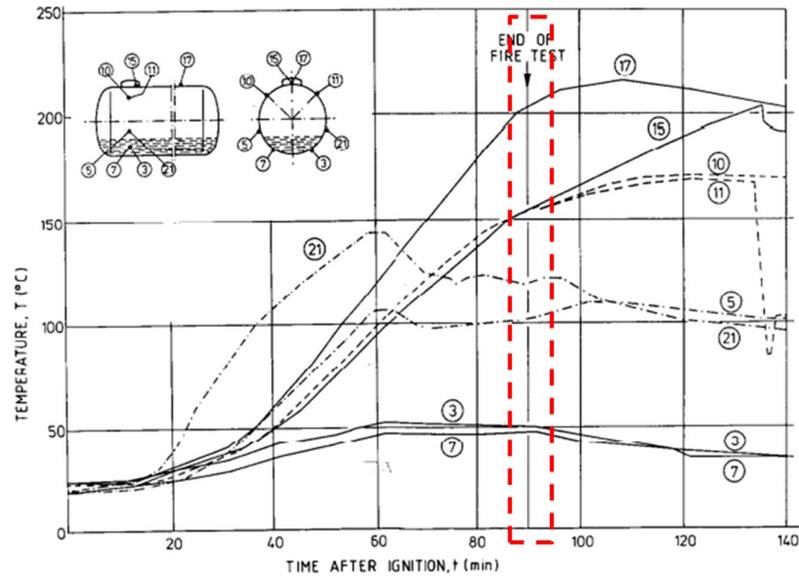
Las Temperaturas registradas en el GLP almacenado y la carcasa del recipiente de almacenamiento de GLP se visualizan en la Figura 3 y Figura 4 respectivamente, donde se observa que la temperatura de la carcasa metálica del tanque en contacto con el vapor de GLP es mayor respecto a la carcasa en contacto con el GLP en fase líquida. La temperatura máxima de la carcasa metálica del tanque fue de 215 °C y se midió en la parte superior (B.Droste y W.Shoen, 1988).

Figura 3 Relación de la temperatura del GLP almacenado vs el tiempo



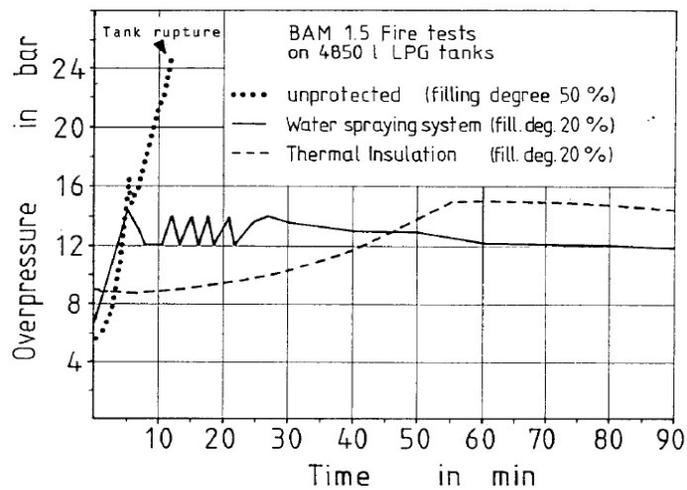
Fuente: Informe técnico "Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks" publicado en 1988

Figura 4 Relación de la temperatura en la pared metálica vs el tiempo



Fuente: Informe técnico “Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks” publicado en 1988

Figura 5 Comparación de las pruebas realizadas en el sistema de aislamiento y sistema de enfriamiento



Fuente: Informe técnico “Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks” publicado en 1988

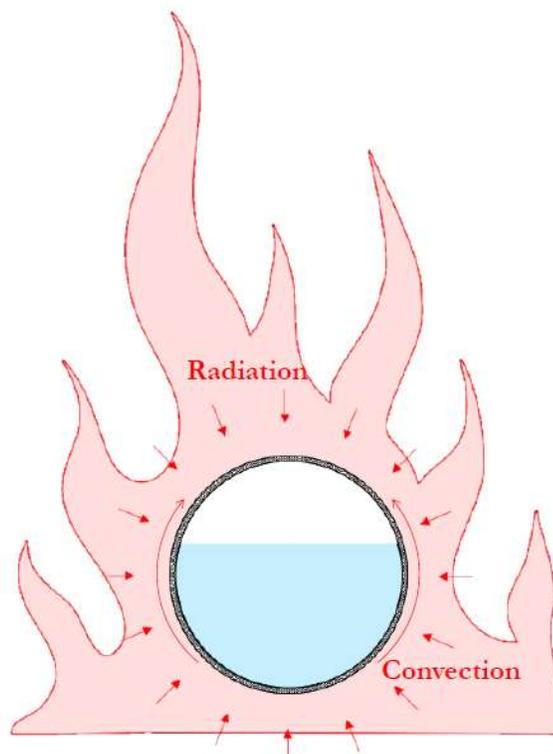
La Figura 5 sintetiza los resultados de las pruebas realizadas por B.Droste y W.Shoen en 1988, donde concluyen que el sistema de aislamiento termico es mas eficiente que el sistema de extincion por agua.

2.2.4 Comportamiento del tanque de almacenamiento de GLP frente a un incendio.

Descripción del fenómeno

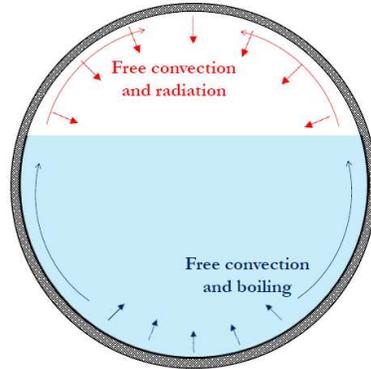
En la investigación realiza por Qiao y otros (2012) describen los fenómenos térmicos que afectan a los recipientes presurizados que almacenan GLP durante un incendio, independientemente de si utilizan o no aislamiento térmico, dichos fenómenos no dependen de la geometría del recipiente, ver Figura 6 y Figura 7.

Figura 6 Fenómenos físicos externos involucrados en el calentamiento del Recipiente



Fuente: Estudio tecnico "CFD Modeling of LPG Vessels Under Fire Exposure Conditions" publicado en AICHE Journal (2012)

Figura 7 Fenómenos físicos internos involucrados en el calentamiento del Recipiente

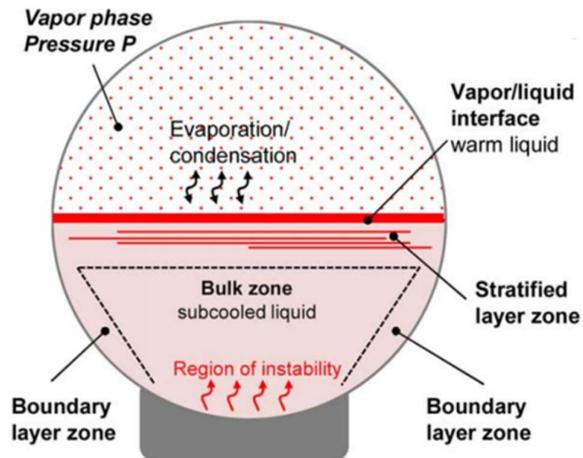


Fuente: Estudio técnico “CFD Modeling of LPG Vessels Under Fire Exposure Conditions” publicado en AICHE Journal (2012)

Asimismo, indican que un recipiente presurizado expuesto al fuego recibe calor debido a la radiación y convección. La carga de calor recibida se transfiere por conducción a través de la pared del recipiente al producto almacenado, lo que provoca el aumento de la temperatura y presión de vapor del líquido. La convección natural gobierna la transferencia de calor desde la pared del recipiente a la mayor parte de las fases de líquido y vapor. Inicialmente, se puede suponer un equilibrio líquido-vapor y una temperatura uniforme. La transferencia de calor de la pared de acero al fluido almacenado provoca el aumento de la temperatura del fluido en contacto con la porción de los recipientes expuestos al fuego. En la zona donde el GLP líquido tiene contacto con el recipiente se produce una disipación de calor significativa con respecto a la zona de vapor debido a los muy altos coeficientes de transferencia de calor posibles por la naturaleza y cambio de fase del líquido, ello implica un efecto refrigerante en la zona donde el GLP en fase líquida tiene contacto con el recipiente. Esto, a su vez, provoca un flujo ascendente del líquido en la capa límite en contacto con la pared caliente, y un flujo descendente en la región central del líquido; movimiento convectivo. El principal causante de la recirculación del flujo, es la formación de un gradiente de temperatura vertical dentro del tanque, generando de esta

manera diferencia de densidades que impulsan el movimiento del fluido, ver Figura 8.

Figura 8 Esquematación del fenómeno de estratificación térmica



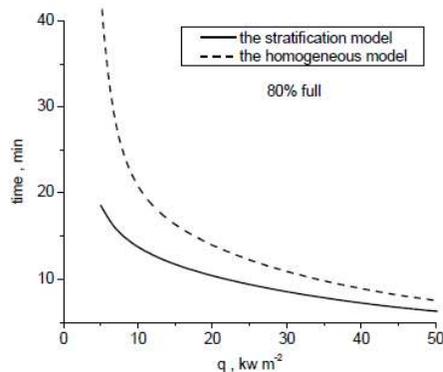
Fuente: Estudio “CFD Modeling of LPG Vessels Under Fire Exposure Conditions” publicado en Journal of Hazardous Materials

Como el líquido cerca de la parte superior del tanque estará a una temperatura más alta que el líquido hacia abajo, la interfaz vapor / líquido está formada por la capa de líquido más caliente de la zona de líquido estratificado. En la interfaz vapor / líquido, se satisfacen las condiciones de equilibrio, por lo que el vapor en la interfaz se satura a la temperatura alcanzada por la capa líquida más elevada. Es importante remarcar que lo expuesto es una consideración, en realidad el comportamiento de la temperatura en la zona vapor y líquida son diferentes; ello se corrobora en la investigación realizada por Landucci, Cozzani Molag (2009) en “Modeling the performance of coated LPG tanks engulfed in fires”.

Es importante mencionar que existe dos maneras de conceptualizar lo ocurrido en la fase líquida; el modelo de temperatura homogénea y estratificación térmica. La primera considera que la variación de temperatura se realiza de manera homogénea en todo su volumen y la otra que fue expuesta en el párrafo anterior. Es importante mencionar que la estratificación térmica es la conceptualización que se acerca más al comportamiento real del fluido, bajo condiciones de incendio.

En la investigación realizada por Gong, Lin y otros en “A simplified model to predict the thermal response of LPG and its influence on BLEVE” desarrollan un modelo simplificado para describir la respuesta térmica de los recipientes de almacenamiento de GLP sometidos al fuego, el cual compara los resultados de ambos modelos de manera experimental. Los resultados mostraron que la presión del tanque aumenta más rápido como resultado de la estratificación térmica, ver Figura 9, pero la energía almacenada en el líquido es menor cuando el líquido se estratifica, todo lo contrario si se utiliza el otro modelo donde la energía del líquido será mucho mayor, debido a que la máxima temperatura presentada será igual en todo su volumen. Por lo tanto, es importante indicar que el modelamiento en base a la temperatura homogénea suministra resultados más conservadores respecto al de estratificación térmica, referidos al peor peligro posible (BLEVE).

Figura 9 Tiempo necesario para alcanzar la presión de 2.1 Mpa para diferentes flujos de calor



Fuente: Estudio técnico “A simplified model to predict the thermal response of PLG and its influence on BLEVE” publicado en Journal of Hazardous Materials (2004)

Como se visualiza en la Figura 8, en el modelo de estratificación térmica el fluido alcanza la misma presión en un menor tiempo para la misma carga calorífica; sin embargo, al aumentar la carga calorífica esta diferencia se acorta. La gráfica representa los datos obtenidos al someter a un recipiente cilíndrico vertical que almacena GLP a cargas caloríficas variables por medio de resistencias térmicas.

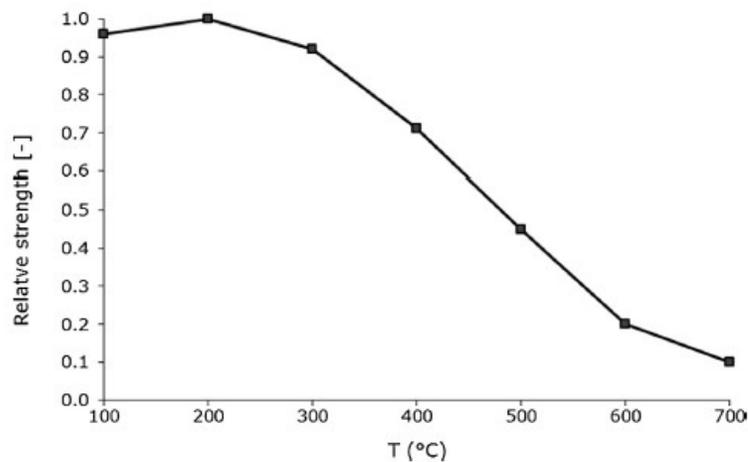
Por lo expuesto en párrafos anteriores, el modelo de la estratificación térmica describe de manera más precisa (real) el fenómeno; sin embargo, se puede optar por el modelo de temperatura homogénea sin errores significativos, esto es validado por numerosas observaciones reportadas (Beynon et al., 1988).

Además, en el estudio realizado por Hadjisophocleous, Sousa y Venart (1990) indican que la estratificación térmica se reduce rápidamente cuando incrementa el diámetro del tanque, en tal estudio los diámetros son menores 3 m.

Incremento de la temperatura en la pared del recipiente

En el estudio realizado por Bubbico y Mazzarotta (2018) indican que la resistencia del material del acero al carbono disminuye rápidamente a medida que la temperatura de la pared sube por encima de los 300°C. En la Figura 10, muestra la relación resistencia -temperatura para el acero al carbono simple.

Figura 10 Resistencia relativa vs Temperatura



Fuente: Estudio técnico “Dynamic response of a tank containing liquefied gas under pressure exposed to a fire: A simplified model. Process Safety and Environmental Protection” publicado en Process Safety and Environmental Protection

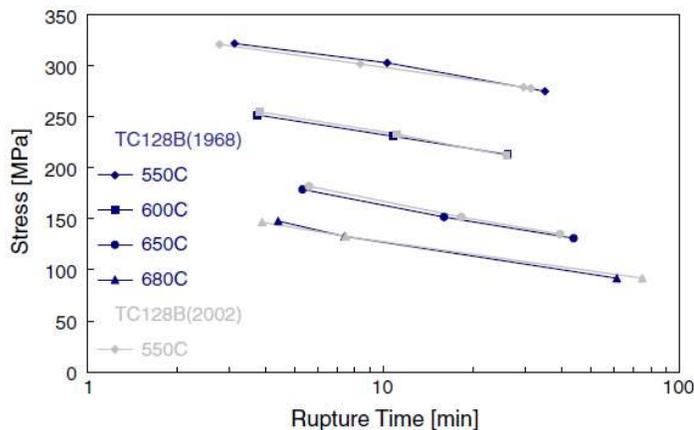
Se puede visualizar que para el acero al carbono simple a 500°C el esfuerzo de fluencia cae en casi 50% del medido a condiciones atmosféricas.

En el libro Heat Transfer (2010) mencionan que los trabajos experimentales proporcionan información valiosa sobre cómo el recipiente de almacenamiento de GLP responde al impacto del fuego en un incendio.

Los resultados obtenidos incluyen lo siguiente:

El aumento en la temperatura en la pared del recipiente implica una reducción gradual de la capacidad estructural cuando excede cierto valor de temperatura. Birk y Yoon (2006) en “High-temperature stress-rupture data for the analysis of dangerous goods tank-cars exposed to fire” realizaron pruebas de tensión y pruebas de ruptura por tensión en muestras de aceros utilizados en tank-car, aceros comerciales, a temperatura ambiente y temperaturas entre 500 y 720 °C, ver Figura 11. La prueba de ruptura por tensión se realizó a carga constante a diferentes temperaturas.

Figura 11 Esfuerzo de ruptura vs Tiempo de ruptura



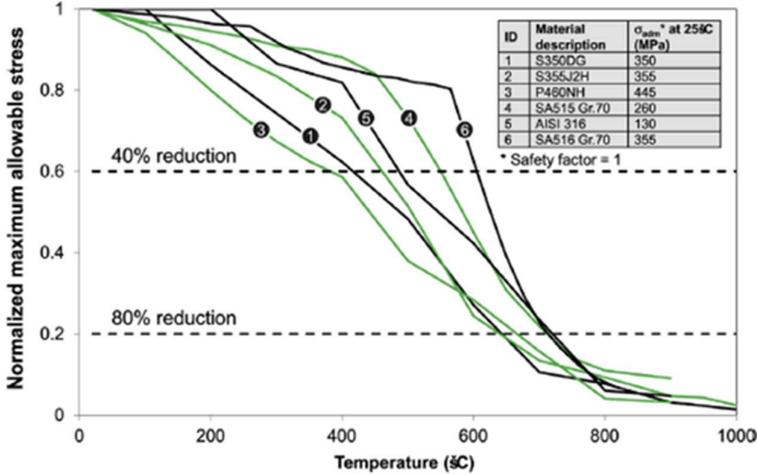
Fuente: Estudio técnico “High-temperature stress-rupture data for the analysis of dangerous goods tank-cars exposed to fire” publicado en Journal of Loss Prevention in the Process Industries (2006)

Representa las curvas de tensión nominal de ruptura versus tiempo de ruptura a diferentes temperaturas para varios tipos de acero.

Adicionalmente, en la Figura 12, se indica que por debajo de 300 °C, la resistencia de los materiales considerados no se ve afectada drásticamente por el calentamiento de la plancha de acero, mientras que por encima de esta

temperatura se produce una caída en la resistencia del recipiente, lo que lleva a una pérdida de 80 a 90% de su resistencia para temperaturas superiores a 600 °C (es decir, la temperatura experimentada por la estructura de acero en el caso de exposición al fuego severo). Sin embargo, este tipo de análisis puede no ser suficiente para los tanques que están expuestos a incendios menos severos donde las temperaturas de las paredes pueden no alcanzar los 600 °C o más.

Figura 12 Esfuerzo de ruptura vs Tiempo de ruptura



Fuente: Estudio técnico “Heat Radiation” publicado 2013

Se visualiza el efecto de la temperatura en la tensión máxima admisible normalizada de los aceros de construcción utilizados en la industria de procesos. La tensión normalizada a 25 °C de todos los aceros sometidos a prueba se visualiza en la tabla superior derecha.

Aumento de la temperatura interna del fluido

La carga calorífica recibida por el recipiente de almacenamiento en un incendio, además de causar el aumento de temperatura de la carcasa del recipiente, también se transfiere al fluido interno. La radiación y la convección natural son los principales modos de transferencia de calor al fluido interno. El comportamiento del fluido interno es crítico para el aumento de la presión en el recipiente expuesto al fuego, ya que la presión del fluido influye en la presión

interna. En los recipientes que contienen fluidos de dos fases (por ejemplo, recipientes de almacenamiento parcialmente llenos, separadores de dos o tres fases, etc.), la presión interna también se ve muy afectada por la presión de vapor del líquido y, por lo tanto, por la temperatura del líquido. En el caso del GLP, la temperatura del líquido está asociada a la cantidad de energía que puede liberarse en caso de falla de un recipiente. En particular, el proceso de calentamiento del líquido afecta la fuerza de una explosión de vapor líquido en expansión (BLEVE), como ya se explicó (con el fenómeno de estratificación térmica).

2.2.5 Aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio

Los Sistemas de Aislamiento Térmico usados como un Sistema de protección contra incendios tienen como objetivo retrasar el tiempo de falla de un recipiente de ocurrir un incendio, por esta razón se han realizado diversos estudios para poder evaluar su eficiencia. Dichos estudios abarcan tanto pruebas como simulaciones, ello con la finalidad de obtener información para dilucidar cuál es el grado de protección que ofrece el sistema de aislamiento térmico.

El sistema de aislamiento térmico como sistema de protección pasiva contra incendios, forma parte de un conjunto barreras destinadas a retrasar la falla del recipiente, por lo tanto, brindan tiempo adicional para la implementación de protecciones activas (por ejemplo, extinción de incendios por medio de la brigada de bomberos) o de medidas de mitigación (por ejemplo, despresurización a través de una válvula de alivio).

Tugnoli, Cozzani, Valerio, Barbaresi y otros en “Mitigation of fire damage and escalation by fireproofing: A risk-based strategy” señalan que la protección pasiva contra incendios, mediante la aplicación de materiales ignífugos, es una barrera de seguridad crucial en la prevención de la sucesión de eventos en los escenarios de incendio, además, dicha protección mejora la capacidad de los elementos del proceso y de las estructuras de soporte para mantener su integridad estructural durante un incendio, previniendo o al menos retrasando el colapso de los elementos estructurales.

Además, Landucci, Cozzani y Birk en el estudio técnico “Heat radiation” presentan información sobre los materiales de protección térmica más común en sistemas contra incendios.

Figura 13 Propiedades físicas de los materiales de protección térmica de uso más común en sistemas contra incendios

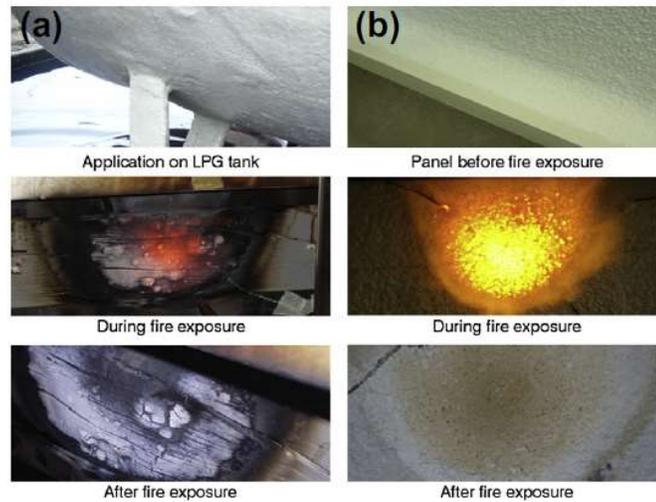
Características de los recubrimientos				
Nombre comercial	Chartek 7	Fendolite M-II	ISOVER MD2	Pyrocrete 241
Definición	Epoxico intumecente	Spray de Vernaculita	Fibra mineral	Formula de Cemenos inorganico
Conductividad termica (W/mK)	0.066	0.03-0.2	0.38	0.9
Capacidad calorifica (J/kgK)	1172	970	920	1507
Emisividad de la superficie	0.9-0.95	0.65-0.75	0.65-0.75	0.65-0.75
Densidad (kg/m3)	1000	680	100	850

Fuente: Estudio técnico “Heat Radiation” publicado en el 2013

En la Figura 13, se visualiza el comportamiento de algunos de estos materiales durante su exposición al fuego.

Figura 13, (a), se muestra un ejemplo de material epoxi intumesciente aplicado a un tanque de GLP luego de 90 minutos de exposición al fuego. En el estándar API 2218 mencionan que al exponerse al fuego, el material epoxi intumesciente se expande como resultado del mecanismo de degradación térmica activado por la exposición al fuego. Se produce un efecto "espumante", que aumenta las propiedades aislantes del material, debido a la descomposición de los productos volátiles y al proceso de carbonización.

Figura 14 Diferentes materiales de recubrimiento expuestos al fuego



Fuente: Estudio técnico “Heat Radiation” publicado en el 2013

Figura 13, muestra al material de Spray de vermiculita luego de 90 min de exposición al fuego. En el estándar API 2218 indican que estos materiales de recubrimiento aprovechan el contenido de agua para limitar la temperatura del lado no expuesto. Además, se necesita un espesor mínimo requerido de 35 mm para la activación de este comportamiento.

La lana mineral es un material de aislamiento térmico usado ampliamente para aplicaciones industriales (Malloy F, 1969). Algunas aplicaciones son la protección contra incendios de estructuras de edificios o el aislamiento térmico de generadores de vapor, reactores y tuberías.

Según Malloy en “Thermal Insulation” el término “lana mineral” generalmente hace referencia a varios tipos de materiales de aislamiento:

1. Lana de piedra: material compuesto de minerales naturales como el basalto o la diabasa;
2. Lana de escoria: material de escoria de alto horno (la capa que se forma en la superficie del metal fundido);
3. Lana de vidrio: material consistente en lana de fibra de vidrio;
4. Fibra cerámica: acumulación de fibras de diferentes longitudes y diámetros, producidas sintéticamente a partir de materias primas

minerales, típicamente silicatos, tiene un comportamiento resistente al choque térmico y algunos tipos resisten temperaturas mayores a los 1300°C.

La lana mineral se puede utilizar en dos formas diferentes; manta y relleno de aislamiento. La baja densidad de este material lo hace atractivo, pero se necesitan altos espesores para una protección aceptable. Por esta razón generalmente se aplican diferentes capas del material, y se enchaquetan con una lámina de aluminio o acero (busca impermeabilizar el arreglo).

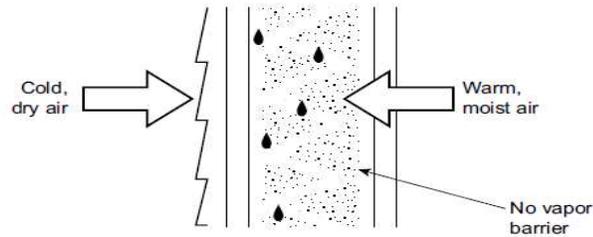
Es importante mencionar que en Norteamérica los camiones cisterna que almacenan GLP mayormente utilizan una cubierta de 13 mm de espesor de fibra cerámica y 3 mm de acero para su protección (US Federal Government, 2012).

2.2.6 Consideraciones respecto al uso del aislamiento térmico

Es fundamental comprender qué causa el fallo de algunos materiales aislantes a lo largo del tiempo. La principal causa de que el material de aislamiento pierda su resistencia térmica es la condensación del vapor de agua o la humedad. Con el tiempo los materiales de aislamiento absorben agua y se asientan o causan daños a los materiales circundantes. La Figura 15 y Figura 16, ilustra el papel de las barreras de vapor en la instalación de un sistema de aislamiento térmico (Bahadori, 2014, p. 155).

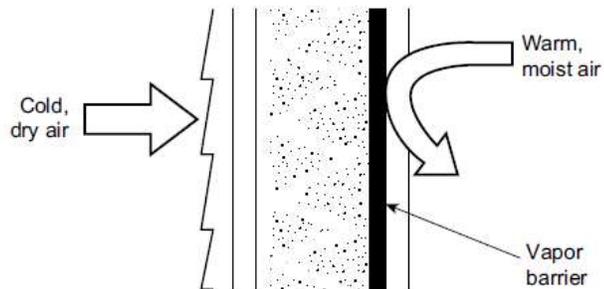
Con el sellado adecuado de las juntas de vidrio celular y el diseño adecuado para evitar su agrietamiento o corte debido al movimiento de expansión y contracción, no es necesario aplicar material de barrera de vapor sobre su superficie exterior. Sin embargo, sí requiere una barrera climática en el exterior y un acabado en el interior para protegerla de la intemperie normal y el abuso mecánico (Bahadori, 2014, p. 155).

Figura 15 Aislamiento térmico sin barreras de vapor



Fuente: Libro "Design and Application of Thermal Insulation"

Figura 16 Aislamiento térmico con barrera de vapor



Fuente: Libro "Design and Application of Thermal Insulation"

Además, el aislamiento al no contar con una barrera contra el medio ambiente, especialmente en ambientes húmedos, podría generarse corrosión sobre el metal base debido a la precipitación del vapor el cual atravesaría el aislamiento térmico, trayendo como consecuencia pérdida de la integridad del tanque y un punto de falla al momento de estar expuesto a un incendio.

2.2.7 Cargas térmicas

Las cargas térmicas generadas por incendios provocados por fugas de GLP son un campo de estudio que sigue desarrollándose en la actualidad.

Existen datos sobre las cargas térmicas en pruebas de incendio sobre un recipiente de GLP. En el presente estudio, debido a las condiciones

atmosféricas¹³, solo se considerará la carga térmica debido a un incendio del tipo Jet fire, dichas cargas se visualizan en la Tabla 4.

Tabla 4 Pruebas realizadas en tanques de almacenamiento de GLP

Nombre del test	Experiencia 1	Experiencia 2	Experiencia 3
Tipo de fuente	Jet Fire de propano	Quemador de Butano	Quemador de Butano
Temperatura ambiente (°C)	2	17-20	10-20
Tipo de exposición	Envolvimiento total	Envolvimiento parcial	Envolvimiento parcial
Temperatura de la llama (°C)	900-1100	815-927	815-927
Cantidad del flujo calorífico ((kW/m ²))	180-200	180-200	180-200

Fuente: Estudio técnico “Heat Radiation” publicado en 2013

Si bien la NFPA 290 no indica la carga térmica a la cual estará expuesto el sistema, plancha metálica – aislamiento para la prueba; si indica otros parámetros como la temperatura que alcanzará la llama de propano. Por lo anterior, la carga térmica puede ser calculada.

Además, la planta presenta un estudio de riesgos y un documento adicional¹⁴ donde se analiza los posibles escenarios de incendio en el patio de tanques, dichos estudios nos brindan información sobre la carga térmica que impactara sobre las esferas.

¹³ Hace referencia a la ubicación de la planta y por ende a las condiciones de presión temperatura que estará expuesto el GLP si es que hubiera una fuga.

¹⁴ Estudio Técnico sobre Uso de un Sistema de Aislamiento Térmico como Protección Contra Incendios en Esferas que Almacenan GLP

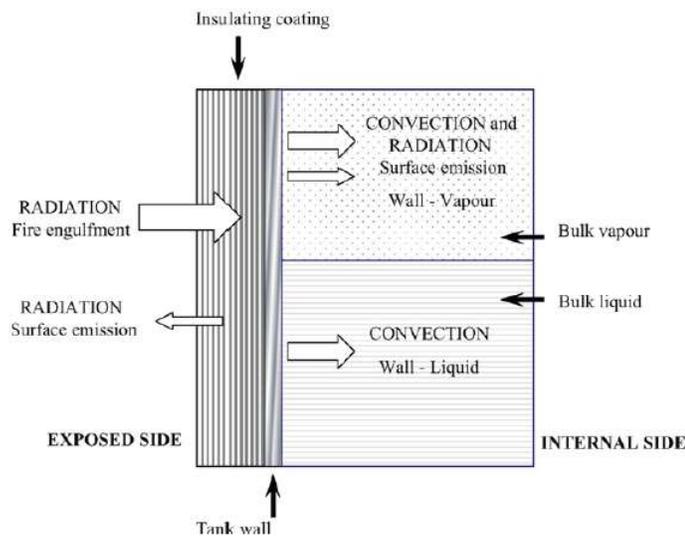
Para el presente trabajo considerara la mayor carga térmica de las tres (03) fuentes mencionadas párrafos atrás, la finalidad es brindar la mayor protección posible y garantizar un adecuado nivel de seguridad.

2.2.8 Fenómenos no considerados por la normativa internacional

Las consideraciones que se llevaran a cabo en el presente trabajo de investigación contemplan lo siguiente:

Landucci, Molag y Cozzani en el estudio “Modeling the performance of coated LPG tanks engulfed in fires” realizaron un modelamiento basado en elementos finitos, implementado mediante un programa que realiza un balance de energía térmica en cada nodo esquematizado en la , así como, la evaluación de la carga térmica y mecánica generada, con la finalidad de evaluar la eficiencia de diversos materiales aislantes como medio de protección de un recipiente a presión que almacena GLP, afectado por un envolvimiento de las llamas. Dicho estudio suministra información valiosa sobre los diferentes tipos de fallas.

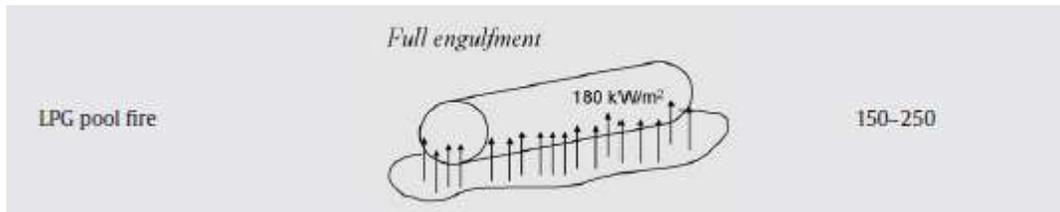
Figura 17 Balance de energía y condiciones de frontera usados en el térmico FEM



Fuente: Estudio técnico “Modeling the performance of coated LPG tanks engulfed in fires” publicado en Journal of Hazardous Materials (2009)

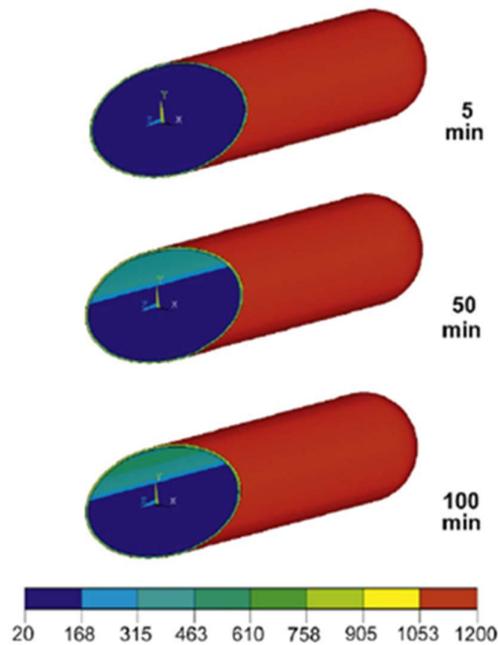
En la Figura 19, se puede visualizar la temperatura en la superficie interna y externa del tanque, donde se muestra la relación entre la temperatura del interior del recipiente y el tiempo. También se puede observar las temperaturas más altas en la pared interior que se encuentra en contacto con la fase vapor, esto se debe a los bajos coeficientes de convección natural que se presenta en esta zona; sin embargo, aunque presenta temperaturas elevadas dicho valor nunca supera los 470°C, incluso después de 100 minutos de exposición al fuego. La sección de la pared interna en contacto con la zona en fase líquida presenta menores temperaturas, ello se debe a los altos coeficientes de convección que se generan, es decir el fluido en el estado líquido tiende a absorber mayor cantidad de calor actuando como un refrigerante para la plancha de acero con la que está en contacto.

Figura 18 Esquema del modelamiento del pool fire en tanque de almacenamiento de GLP



Fuente: Estudio técnico "Modeling the performance of coated LPG tanks engulfed in fires" publicado en Journal of Hazardous Materials (2009)

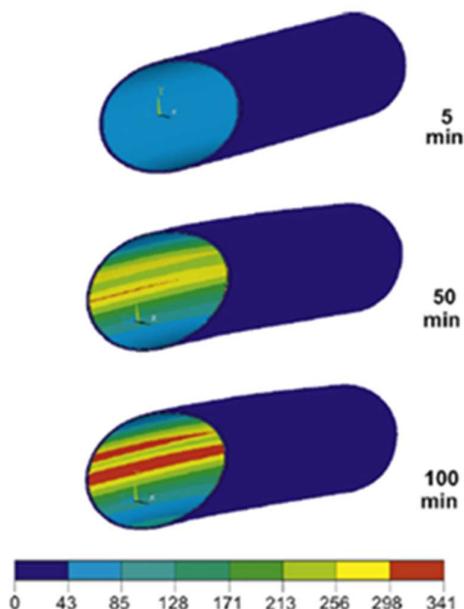
Figura 19 Distribución de Temperatura en la parte externa y la placa metálica



Fuente: Estudio tecnico “Modeling the performance of coated LPG tanks engulfed in fires” publicado en Jornal of Hazardous Materials (2009)

En la Figura 20, se muestra la variación de los esfuerzos ejercidos sobre el tanque durante la simulación, dicho cambio es creciente y se debe principalmente a que la presión de vapor del sistema se ve afectado por el aumento de la temperatura en el GLP. La zona critica es la interfaz liquido-vapor, en esta zona dicho modelo previo los valores más altos de intensidad de tensión en la estructura, la razón es que los gradientes térmicos en esta zona son elevados, 400°C, generando tensiones térmicas muy elevadas.

Figura 20 Distribución de los esfuerzos en la placa metálica



Fuente: Estudio técnico “Modeling the performance of coated LPG tanks engulfed in fires” publicado en *Journal of Hazardous Materials* (2009)

Cabe mencionar que en la zona donde se encuentra el mayor gradiente térmico, interface líquido – vapor, es donde se ha registrado el mayor número de fallas, ello se ha visualizado en accidentes pasados y en pruebas realizadas (Cotgreave, 1992).

Esto demuestra que un análisis detallado es una herramienta invaluable para poder predecir los mecanismos de falla, y así tomar medidas en el diseño para mitigarlos.

Por lo tanto, de todo lo expuesto hasta aquí los escenarios más críticos en un incendio para un tanque de almacenamiento de GLP son:

- Temperatura elevada en la placa base del tanque de almacenamiento (400 °C – 500°C).
- Gradiente de temperatura generado en la interface líquido -vapor en contacto con el metal base del tanque de almacenamiento.

- Debido a que la temperatura en el metal en contacto con la fase vapor es mayor que en el metal en contacto con la fase líquida en un incendio; el escenario más crítico será cuando el tanque de almacenamiento contenga solamente GLP en fase vapor.

2.2.9 Consideraciones en el modelamiento matemático

Para el desarrollo del modelamiento matemático se tomará en cuenta lo siguiente:

- Se realizará un cálculo del sistema no estacionario, es decir en los resultados se obtendrán graficas del gradiente de temperatura en función al tiempo¹⁵.
- El modelamiento está basado en el enfoque de “nodos térmicos”, donde todo el sistema es afectado por la carga térmica generada por el incendio.
- Las temperaturas de cada zona (nodos) se considerarán homogénea, el modelamiento de la temperatura homogénea fue descrito en párrafos anteriores.
- La energía térmica entrante al tanque de almacenamiento es uniforme.
- La radiación solar es despreciable en comparación con la radiación del fuego.
- Se considerará la convección natural para el exterior de la esfera, esto porque el coeficiente de convección forzada es mayor al de convección natural¹⁶.
- Se considerará la radiación térmica reflejada por la región exterior de la capa aislante.
- Para el desarrollo numérico de las ecuaciones planteadas se utilizará el “Método de Euler para sistemas de ecuaciones diferenciales de primer orden”.

¹⁵ Los cálculos realizados siguen los criterios del modelamiento de Landucci. Birk, Cozzani, otros.

¹⁶ El caso más crítico es cuando el ambiente ofrece un menor grado de refrigeración, ello se logra cuando la velocidad del viento es igual a cero, es decir cuando el mecanismo de transferencia de calor es por convección natural.

- Se realizará un cálculo iterativo, en una hoja de cálculo en Excel para poder determinar el espesor del material aislante que cumpla con todas las restricciones del sistema.
- No se considera la radiación térmica generada en la pared metálica en contacto con el vapor de GLP del tanque de almacenamiento.
- La carga térmica generada por el incendio de GLP que considerara el presente estudio será la mayor entre los valores indicados en la Tabla 4 y los métodos mencionados en el punto 2.2.7.
- Si bien la válvula de alivio es un equipo que mantiene la presión del tanque de almacenamiento constante, genera liberación de GLP en la parte más alta del tanque. Por lo anterior, existe la probabilidad de que el incendio se vuelva parcialmente envolvente tal y como sucedió en el accidente de Feyzim; aumentando el área de cobertura de radiación.
- Para los tanques de almacenamiento del presente estudio, la temperatura de activación de la válvula de alivio es $22.27^{\circ}\text{C}^{17}$, es decir en caso de un incendio esta se activara. Por tanto, para generar un grado de seguridad aceptable se considerará un envolvimiento parcial del 50% de toda la superficie del tanque esférico, siendo este valor muy superior a los generados por el impacto de un jet fire, que es el incendio más probable de ocurrir bajo las condiciones de almacenamiento.
- Debido a lo descrito en el punto 2.2.8, la temperatura limite en la superficie metálica será de 300°C , de esta forma se estará garantizando que nunca se alcance el gradiente térmico crítico el cual es 400°C , que generaría la falla estructural.
- El fluido almacenado que se considerara será el GLP en fase vapor, esto por ser el más crítico¹⁸.
- El tiempo de exposición a un incendio será de 50 min, siendo el exigido por el estándar NFPA 290.

¹⁷ Según cálculos realizados y considerando una proporción de 70% propano y 30% butano.

¹⁸ El vapor no ofrece refrigeración a la pared metálica, siendo este el estado más crítico para el almacenamiento, tal y como se menciona en 2.2.9.

2.2.10 Variables importantes para el balance de energía y la transferencia de calor

Temperatura

Existe cuatro escalas de temperaturas: Fahrenheit (°F), Celsius (°C), kelvin (K) y Rankine (R). Es muy frecuente que se necesite obtener valores equivalentes de una escala a la otra. Para convertir de una escala a otra pueden usarse las siguientes ecuaciones (Yunes A Cengel, 2012, p. 18):

$$T(K) = 273.15 + T(^{\circ}C) \quad (1)$$

$$T(^{\circ}C) = \frac{1}{1.8} [T(^{\circ}F) - 32] \quad (2)$$

$$T(^{\circ}R) = T(^{\circ}F) + 459.67 \quad (3)$$

$$T(K) = 32 + 1.8T(^{\circ}C) \quad (4)$$

Calor específico

El calor específico se define como la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura en un grado de una unidad de masa de una sustancia. Expresada en unidades del SI como $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ (Yunes A Cengel, 2012, p. 178-179).

Las capacidades caloríficas son funciones de la temperatura y con frecuencia se expresan mediante las siguientes ecuaciones:

$$C_p = a + Bt + Ct^2 \quad (5)$$

Puesto que el valor de calor específico varía con la temperatura, es necesario integrar o usar un valor promedio adecuado. Existen expresiones simples entre el calor específico a presión constante (C_p) y el calor específico a volumen constante (C_v), estas son (Yunes A Cengel, 2012, p. 178-179):

$$\text{Líquidos y sólidos:} \quad C_p = C_v \quad (6)$$

$$\text{Gases ideales:} \quad C_p = C_v + R \quad (7)$$

Donde R, es la constante universal de los gases.

Donde a, b, c y d tiene valores según el tipo de sustancia.

Las siguientes correlaciones se utilizaran para el cálculo del calor específico a volumen constante del propano y butano, respectivamente (Landucci et al., 2016).

Para el propano:

$$C_{v\text{prop}} = 168.03 + 5.6056.T - 0.0014.T^2 \quad (8)$$

Donde:

T: Temperatura (K) Kelvin

C_{vprop} : Calor específico a volumen constante del propano, $J.kg^{-1}.K^{-1}$.

Para el butano:

$$C_{vbut} = -322.796 + 8.413172.T - 0.00647.T^2 + 2.914.(10^{-6})T^3 - 5.835.(10^{-10})T^4 \quad (9)$$

Donde:

T: Temperatura (K) Kelvin

C_{vbut} : Calor específico a volumen constante del butano, $J.kg^{-1}.K^{-1}$.

Para la mezcla de ambos gases se considerara la siguiente expresión (Yunes A Cengel. 2012. p. 702-709):

$$C_{vm} = X_{but}C_{vbut} + X_{pro}C_{vpro} \quad (10)$$

Donde:

C_{vm} : Calor específico a volumen constante de la mezcla, $J.kg^{-1}.K^{-1}$.

X_{but} : Fracción molar del butano en la mezcla.

X_{pro} : Fracción molar del propano en la mezcla.

Conductividad térmica

La Conductividad Térmica es una propiedad de transporte de energía, en forma de calor, a través de un cuerpo con masa como resultado de un gradiente de temperatura. Además, es una propiedad específica de cada material y depende de la temperatura (Incropera, 1993, p. 3).

Las siguientes correlaciones se utilizarán para el cálculo de la conductividad térmica del propano y butano en estado gaseoso, respectivamente (Landucci et al., 2016).

Para el propano:

$$K_{vprop} = -0.0088 + 6 \cdot (10^{-5})T - (10^{-7}) \cdot T^2 \quad (11)$$

Donde:

T: Temperatura (K) Kelvin

K_{vprop} : Conductividad térmica del propano, $W.m^{-1}.K^{-1}$

Para el butano:

$$K_{vbut} = -0.0107 + 6 \cdot (10^{-5})T - 9 \cdot (10^{-8})T^2 \quad (12)$$

Donde:

T: Temperatura (K) Kelvin

K_{vbut} : Conductividad térmica del butano, $W.m^{-1}.K^{-1}$

Para la mezcla de ambos gases se considerara la siguiente expresión, para una presión de la mezcla mayor a 50 psi (American Petroleum Institute Handbook, 1997).

$$K_m = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{y_i \sum_{j=1}^n y_j A_{ij}} \quad (13)$$

Donde:

K_m : Conductividad térmica de la mezcla, en Btu.ft/(hr.ft².°F).

K_i : Conductividad térmica de cada componente, en Btu.ft/(hr.ft². °F).

n : Numero de componentes en la mezcla.

y_i, y_j : Fracción molar de los componentes i y j .

$$A_{ij} = 0.25 \left\{ 1 + \left[\frac{\mu_i}{\mu_j} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{0.75} \frac{\left(1 + \frac{S_i}{T} \right)^{0.5}}{\left(1 + \frac{S_j}{T} \right)} \right]^2 \right\} \times \frac{\left(1 + \frac{S_{ij}}{T} \right)}{\left(1 + \frac{S_i}{T} \right)} \quad (14)$$

$$S_i, S_j \text{ (Constante de Sutherland)} = 1.5T_i \quad (15)$$

$$S_i, S_j = 142^\circ\text{R para hidrogeno, deuterio y helio} \quad (16)$$

$$S_{ij} = \sqrt{S_i S_j} \quad (17)$$

Donde:

μ_i, μ_j : Viscosidades de los componentes i y j , en (mPa.s)

M_i, M_j : Peso molecular de los componentes i y j

T_b : Punto normal de ebullicion, en grados Rankine°R

T : Temperatura, en grados Rankine°R

Densidad

La densidad se define como la masa por unidad de volumen, las densidades de los líquidos son principalmente constante y contantemente se toman como sustancias incompresibles, con un error insignificante en la exactitud.

La densidad de los gases ideales en contraste con la de los líquidos si varía debido a la compresibilidad del fluido, es decir el cambio de su volumen con la misma cantidad de masa. Para estos tipos de gases la densidad puede ser calculada por las ecuaciones de estado, siendo la más sencilla (Yunus A. Cengel y John M. Cimbala, 2006, p. 138).

$$\frac{PM}{RT} = \rho \quad (18)$$

Donde:

T: Temperatura absoluta expresada en Kelvin (K)

R: La constante de gases, $8.3144 \frac{J}{K.mol}$

M: Masa molar del gas, en $kg/kmol$

La siguiente expresión se utilizará para el cálculo de la densidad de la mezcla, propano y butano en estado gaseoso (Yunus A. Cengel y John M. Cimbala, 2006, p. 702-709):

$$\rho_m = \frac{PM_m}{RT} \quad (19)$$

$$M_m = \sum_{i=1}^k y_i M_i \quad (20)$$

Donde:

P: Presión a la cual está sometida la mezcla, en Pas

M_m: Masa molar de la mezcla, en Kg/Kmol

R: Constante de los gases $8.3144 \frac{J}{K.mol}$

y_i: Fracción molar de cada componente

T: Temperatura a la cual esta sometida la mezcla, en (K)

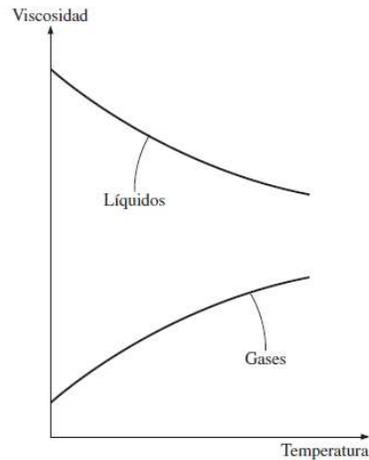
ρ_m: Densidad de la mezcla, en kg/m³

Viscosidad

La viscosidad es una propiedad que representa la resistencia del fluido a fluir, esta propiedad divide a los fluidos en dos ramas en fluidos newtoneanos y no newtoneanos; los primeros guardan una relacion linean entre la el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformacion, mientras los segundos guardan una relacion no lineal.

Es importante mencionar que esta propiedad es una funcion de la temperatura, generalmente en los liquidos al aumentar la temperatura la magnitud de la viscosidad disminuye, en contraste con los gases donde la viscosidad aumenta al aumentar la temperatura, ver Figura 21, es decir este parametro es importante porque altera las propiedades de la viscosidad (Yunus A. Cengel y John M. Cimbala, 2006, p. 49).

Figura 21 Viscosidad vs Temperatura, para líquidos y gases



Fuente: Libro “Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones”

Las siguientes correlaciones se utilizarán para el cálculo de la viscosidad dinámica del propano y butano en estado gaseoso, respectivamente (Landucci et al., 2016):

Para el propano:

$$\mu_{vprop} = 4.9054 \cdot T^{0.90125} \quad (21)$$

Donde:

T: Temperatura del propano, en kelvin (K)

μ_{vprop} : Viscosidad dinámica del propano, en Pa.s

Para el butano:

$$\mu_{vbut} = 3.44 \cdot 10^{-8} T^{0.94604} \quad (22)$$

Donde:

T: Temperatura del butano, en kelvin (K)

μ_{vbut} : Viscosidad dinámica del butano, en Pa.s

Para la mezcla de ambos gases se considerará la siguiente expresión, para baja presión (American Petroleum Institute Handbook, 1997).

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n \frac{i}{1 + \sum_{j=1}^n \phi_g \frac{x_i}{x_j}} \quad (23)$$

$$\phi_g = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{0.5} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{0.25} \right]^2}{\sqrt{8} \left[1 + \frac{M_i}{M_j} \right]^{0.5}} \quad (24)$$

Donde:

μ_m : Viscosidad de la mezcla, en Cp (Pa.s).

μ_i : Viscosidad del componente i, en Cp (Pa.s).

μ_j : Viscosidad del componente j, en Cp (Pa.s).

n: Numero de componentes de la mezcla.

x_i : Fracción molar del componente i.

x_j : Fracción molar del componente j.

Φ_{ij} : Parámetro de interacción para el componente i respecto al componente j.

M_i : Peso molecular del componente i.

M_j : Peso molecular del componente j.

2.2.11 Ecuación de balance de energía

El principio base del balance de energía es la ley de conservación de la energía, la cual indica que la energía no se crea ni se destruye (Yunes A Cengel. 2012. p. 166 - 201).

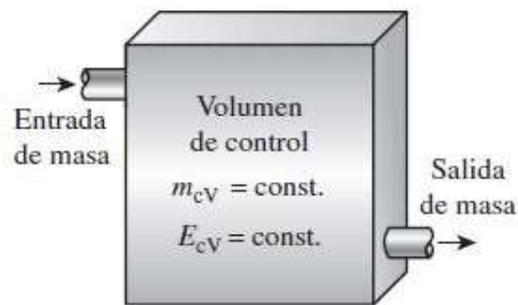
Para la aplicación de la primera ley de la termodinámica, se debe identificar primero el volumen de control (una región de espacio limitada por una superficie de control a través de la cual pueden pasar energía y materia). Cuando se escoge el volumen de control, debe especificarse una base de tiempo adecuada. Existen dos opciones la primera es en un intervalo de tiempo (Δt) y la otra es en un instante.

“En un instante (t):

La velocidad a la que la energía térmica y mecánica ingresa en un volumen de control, más la velocidad a la que se genera energía térmica dentro del volumen de control, menos la velocidad a la que sale energía térmica y mecánica del volumen de control debe ser igual a la velocidad de incremento de la energía almacenada dentro del volumen de control.” (Incropera, 1993, p. 14)

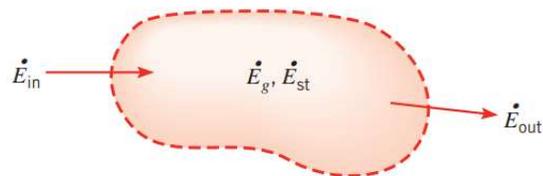
Si el flujo de energía de entrada y la generación de energía es mayor que el flujo de energía de salida, entonces habrá un aumento en la energía almacenada en el volumen de control, ver Figura 22.

Figura 22 Volumen de control



Fuente: Libro “Termodinámica” publicado por Yunes Cengel

Figura 23 Conservación de la energía



Fuente: Libro “Fundamentals of Heat and Mass Transfer” publicado por Incropera

Para la aplicación de la conservación de energía se seguirán los siguientes pasos:

- Identificar la superficie de control trazando una línea punteada.

- Identificar las fuentes de energía.

En un instante dado, los términos que incluyen la velocidad a la que la energía térmica y mecánica atraviesa la superficie de control son denominados \dot{E}_{ent} y \dot{E}_{sal} . La energía térmica generada dentro del volumen de control se denomina \dot{E}_g . La velocidad de cambio de energía almacenada dentro del volumen de control, \dot{E}_{alm} (Incropera, 1993, p.14 - 16).

Ecuación de energía para el volumen de control, aplicado a un instante:

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sal} = \frac{dE_{alm}}{dt} \quad (25)$$

Donde:

\dot{E}_{ent} : *Energía de entrada, en W*

\dot{E}_{sal} : *Energía de salida, en W*

\dot{E}_g : *Energía de generación, en W*

$\frac{d\dot{E}_{alm}}{dt}$: *Energía almacenada, en W*

2.2.12 Mecanismos básicos de transferencia de calor

El estudio de los mecanismos de transferencia de calor busca cuantificar la velocidad a la que ocurre la transferencia de calor en términos del grado de desequilibrio térmico, esto se lleva a cabo de tres modelos los cuales son: conducción, convección y radiación (Incropera, 1993).

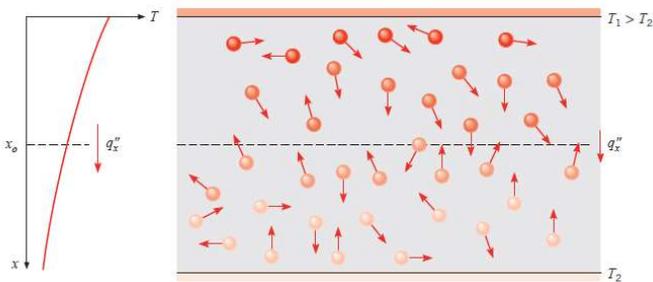
Conducción

Para definir la conducción debemos entender los conceptos de actividad atómica y molecular, pues los procesos desarrollados en estos niveles son la base de este mecanismo de transferencia de calor. La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energizadas a las menos energizadas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas, ver Figura 24. En un gas las moléculas más calientes, que tienen más energía y movimiento, se encargan de impartir energía a moléculas colindantes que están a niveles energéticos más bajos. La situación es muy similar en los líquidos,

aunque las moléculas están menos espaciadas y las interacciones moleculares son más fuertes y frecuentes. De igual manera, en un sólido, la conducción se atribuye a la actividad atómica en forma de vibraciones reticulares (Incropera, 1993, p. 4).

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados. Estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo para la conducción de calor la ecuación modelo se conoce como “ley de Fourier”, ver ecuación (26), (Incropera, 1993, p.4).

Figura 24 Asociación de la transferencia de calor por conducción con la difusión de energía debido a la actividad molecular



Fuente: Libro “Fundamentals of Heat and Mass Transfer” publicado por Incropera

Donde:

$$\dot{q} = -K \frac{dT}{dx} \tag{26}$$

\dot{q} : Transferencia de calor por unidad de area, en W/m^2

$\frac{dT}{dx}$: Gradiente de temperatura en la direccion x, en K/m

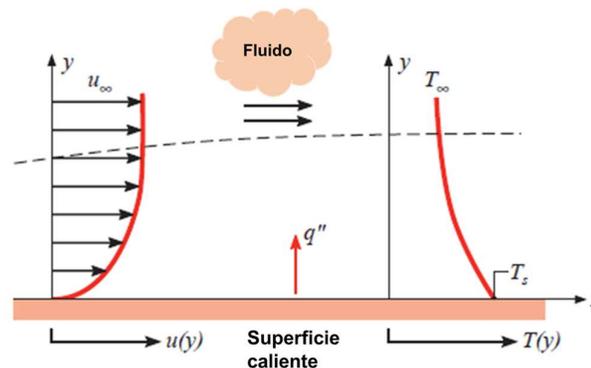
K: Coeficiente de conductividad termica, en $W/(m \cdot K)$

Convección

La transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos de transferencia de energía; movimiento molecular aleatorio (difusión) y movimiento global del fluido. Por ello, la transferencia de energía total se debe a una superposición de ambos mecanismos. El interés para el presente estudio, sobre este modo de transferencia, radica en la convección que ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie, cuando existe un gradiente de temperatura entre ambos (Incropera, 1993, p. 6-7).

El aporte del movimiento molecular aleatorio domina respecto al del movimiento global del fluido domina sobre la superficie del fluido, ello se debe a que la velocidad sobre la superficie del fluido es cero, por lo tanto, en dicha zona el calor solo se transfiere por ese mecanismo. La contribución respecto al movimiento global de fluido, inicia a medida que la capa límite crece en la dirección x , ver Figura 25 entonces, el calor que se conduce aquí es arrastrado corriente abajo y finalmente se transfiere al fluido fuera de la capa límite¹⁹(Incropera, 1993, p. 6-7).

Figura 25 Gradiente de temperatura vs Posición



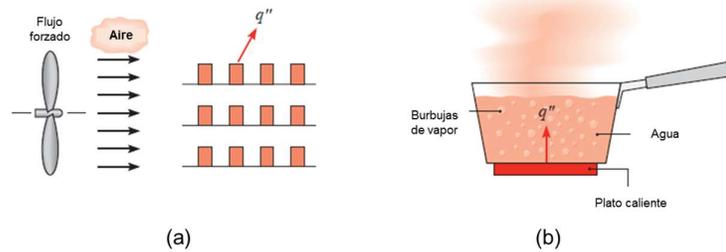
Fuente: Libro "Fundamentals of Heat and Mass Transfer" publicado por incropera

La transferencia de calor por convección depende de la naturaleza del fluido; natural y forzada, donde en el primero el movimiento del fluido es debido al

¹⁹ La región del fluido adyacente a la pared, en la cual los efectos viscosos (y, por consiguiente, los gradientes de velocidades) son significativos se llama capa límite.

gradiente de densidades generado por las diferencias de temperatura en el mismo fluido. Mientras, en el segundo el movimiento del fluido es generado por un fuente externa ajena a él; ventilador, bomba, otros, ver Figura 26 (Incropera, 1993, p 7-8).

Figura 26 Convección Forzada y Natural



Fuente: Libro “Fundamentals of Heat and Mass Transfer” publicado por incropera

En la Figura 26 (a) representa la transferencia de calor por convección forzada y (b) la transferencia de calor por convección natural.

Sin importar la naturaleza de la transferencia por convección (natural o forzada), el modelo para cuantificarlo es la siguiente expresión.(Incropera, 1993, p.6-8)

$$\dot{q} = h(T_s - T_\infty) \quad (27)$$

Donde:

\dot{q} : Flujo de calor por conveccion, en W/m^2

h : Coeficiene de transferencia de calor por conveccion, $W/(m^2 \cdot K)$

T_s : Temperatura en la superficie, en kelvin (K)

T_∞ : Temperatura del fluido, en kelvin(K)

Radiación

La energía transferida por radiación es transportada por ondas electromagnéticas, la diferencia de este modo de transferencia respecto a los de conducción y convección, es que no necesita un medio para hacerlo. De hecho,

la transferencia de radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío (Incropera, 1993, p 8-9).

La ley de Stefan-Boltzmann establece el límite superior de la potencia emisiva E para un cuerpo negro*, la cual se define como la velocidad a la que se libera energía por unidad de área (W/m^2), la ecuación queda definida por (Incropera, 1993, p. 9-11):

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (28)$$

Donde:

E_b : Potencia emisiva, en W/m^2

σ : Constante de Stefan Boltzmann, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2.K^4)$

T_s : Temperatura absoluta de la superficie, en Kelvin (K)

El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y queda definido por (Incropera, 1993, p. 8-11):

$$E_b = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (29)$$

Donde:

E_b : Potencia emisiva, en W/m^2

σ : Constante de Stefan Boltzmann, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2.K^4)$

ϵ : emisividad

T_s : Temperatura absoluta de la superficie, en Kelvin (K)

Donde ϵ es una propiedad que relaciona la potencia emisiva de un cuerpo real respecto a la idealización del cuerpo negro, dicha propiedad depende de la superficie del material.

La radiación incidente sobre un área se denomina irradiación G . Una fracción de la irradiación, o toda, será absorbida por la superficie y de esta manera se

incrementará la energía térmica del material, ver Figura 27. La velocidad a la que la energía radiante es absorbida por la superficie se cuantifica a través de una propiedad denominada absorptividad y se modela de la siguiente manera:

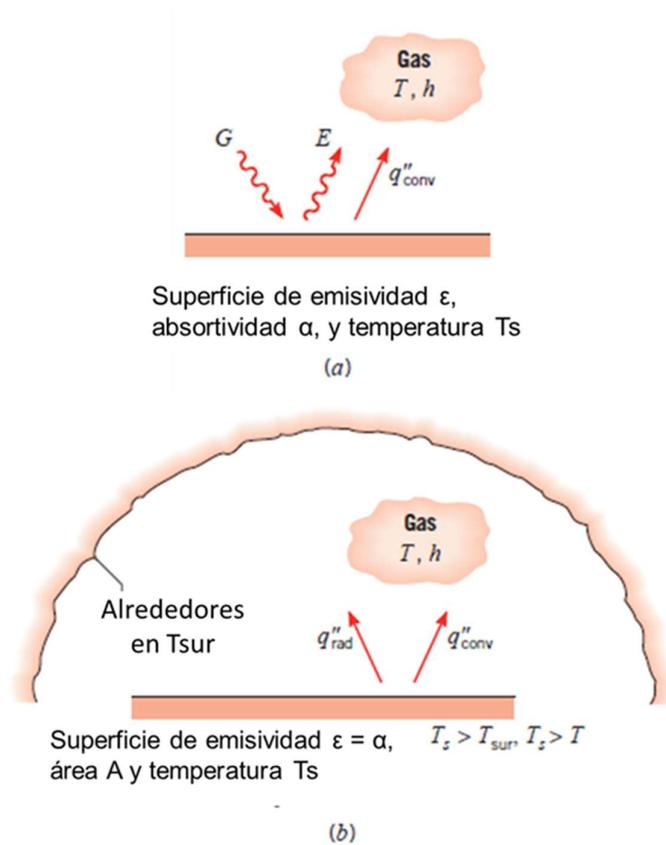
$$G_{\text{abs}} = \alpha G \quad (30)$$

Donde:

G: irradiación, en W/m²

α : Absorptividad

Figura 27 Esquematización de la radiación incidente y la emitida



Intercambio de radiación: (a) en la superficie, y (b) entre la superficie y sus alrededores.

Fuente: Libro "Fundamentals of Heat and Mass Transfer" publicado por incropera

“Un caso especial que ocurre con frecuencia implica el intercambio de radiación entre una superficie pequeña a T_s y una superficie isotérmica mucho más grande que rodea por completo a la pequeña Figura 27. Los alrededores podrían ser, por ejemplo, las paredes de un horno cuya temperatura es diferente de la de una superficie rodeada; en este caso la irradiación se aproxima con la emisión de un cuerpo negro a T_{alr} , entonces $G = \sigma(T_{alr})^4$. Suponiendo que la superficie es tal que $\alpha = \epsilon$ (superficie gris), el flujo neto de calor por radiación desde la superficie es” (Incropera, 1993, p. 6-7).

$$\dot{q} = \epsilon A E_b - \alpha A G = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (31)$$

Donde:

G: irradiación, en W/m²

α : Absortividad

E_b : Potencia emisiva, en W/m²

σ : Constante de Stefan Boltzmann, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

ϵ : emisividad

T_s : Temperatura absoluta de la superficie, en Kelvin (K)

T_{alr} : Temperatura absoluta de los alrededores, en Kelvin (K)

2.2.13 Números adimensionales

En los procesos de transferencia de calor se puede presentar una combinación de los tres mecanismos de transferencia; convección, conducción y radiación. Las correlaciones para poder estimar los coeficientes de convección (h) son semi-empíricas y dependen de las propiedades del fluido, del gradiente de temperatura y de la geometría del cuerpo físico en contacto. Existe una relación de proporcionalidad entre el nivel de turbulencia del fluido y el coeficiente de

transferencia, por lo tanto, al aumentar la turbulencia aumenta el valor del coeficiente de transferencia por convección (Incropera, 1993).

Los números adimensionales, tales como, Reynolds y Prandtl establecen una relación entre variables que brinda información útil para el sistema. El número de Prandtl es relación entre la difusividad de la cantidad de movimiento (μ/ρ) y la difusividad térmica [$k/(\rho C_p)$]. (Referenciar). El Reynolds es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas, brinda información sobre en qué régimen se encuentra el sistema (Incropera, 1993).

$$N_{Pr} = \frac{(\mu/\rho)}{[k/(\rho C_p)]} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (32)$$

El Reynolds es la relación entre las fuerzas de inercia (ρDV) y las fuerzas viscosas (μ), brinda información sobre en qué régimen se encuentra el sistema (Yunus A. Cengel y John M. Cimbala, 2006).

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (33)$$

El número de Nusselt adimensional (N_{Nu}) relaciona el coeficiente de convección (h) con la conductividad térmica del fluido y una dimensión característica. Por ejemplo, para el flujo del fluido dentro de una esfera de diámetro interior (D), el número de Nusselt se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$N_{Nu} = \frac{hD}{k} \quad (34)$$

El número de Grashof (Gr) es la relación entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas que actúan en un fluido, y se define de la siguiente manera:

$$Gr = \frac{g\beta L(T_s - T_\infty)}{\nu^2} \quad (35)$$

Donde:

Gr: Numero adimensional de Grashof

B: Coeficiente de expansión volumétrica

Ts: Temperatura de una superficie, en Kelvin (K)

T_{∞} : Temperatura ambiente, en Kelvin (K)

L: Longitud característica, en m

V: Viscosidad cinemática, en m^2/s

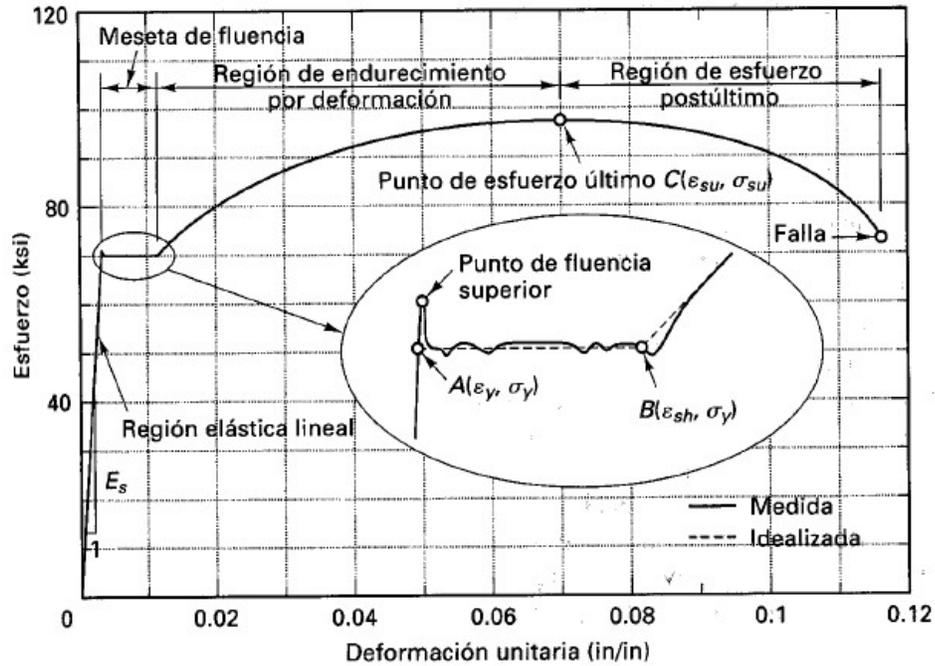
2.2.14 Propiedades de diseño de materiales

La forma genérica del diagrama esfuerzo-deformación para una probeta de acero en tensión para una carga que aumenta constantemente se muestra en la Figura 28. Dicha figura muestra la relación entre el esfuerzo normal aplicado y la deformación unitaria. La grafica puede ser dividida en cuatro regiones bien definidas:

- La región elástica lineal
- La fluencia
- La región de endurecimiento por deformación
- La región de suavización de la deformación unitaria

(Egor P Povop. 2000. p. 60-61).

Figura 28 Diagrama esfuerzo- deformación unitaria para un acero dúctil



Fuente: Libro “Mecánica de Sólidos” de Egor P povop (2000)

La región que se utiliza para los cálculos de ingeniería es la región elástica lineal, dicha región representa el comportamiento elástico del material a temperatura ambiente y es modelado mediante la siguiente ecuación (Egor P Povop, 2000).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (36)$$

Donde:

E: Modulo de Young, en MN/m²

σ : Esfuerzo axial, en N/m²

ϵ : Deformación unitaria del material

Esfuerzo Térmicos

Con los cambios de temperatura, los cuerpos sólidos se expanden al aumentar la temperatura y se contraen en su disminución. La tensión térmica causada por un cambio en la temperatura, se puede expresar como (Egor P Povop, 2000):

$$\sigma = E\alpha\Delta T \quad (37)$$

Donde:

σ : Esfuerzo térmico, en N/m²

E: Modulo de Young, en N/m²

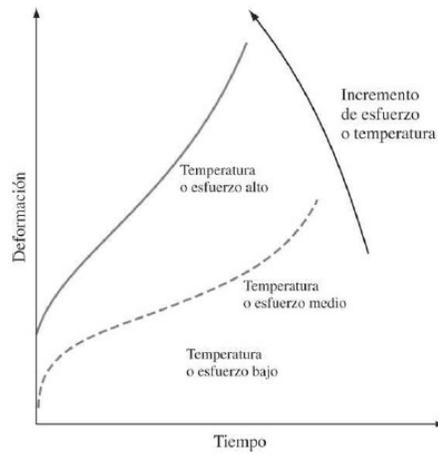
α : Coeficiente de dilatación térmica, en K⁻¹

ΔT : Diferencia de temperatura, en °K

Creep y esfuerzo de ruptura en metales

Cuando un metal o aleación es sometido a una carga, puede sufrir una deformación plástica progresiva luego de un tiempo. A eso se le denomina Creep, este fenómeno es importante en algunos diseños, en especial los que trabajan a elevada temperatura. El Creep es un fenómeno limitante para muchos diseños que operan a elevada temperatura, porque en un determinado tiempo podrían sobrepasar la deformación plástica permitida. El comportamiento del Creep depende de la temperatura y la carga aplicada, a diferentes temperaturas y cargas el metal tendrá diferentes comportamientos, ver Figura 29. Este fenómeno es visualizado en la prueba de Creep, el cual tiene como resultado la representación gráfica de la deformación en función del tiempo, ver Figura 30 (Smith. 2006. p. 293-295).

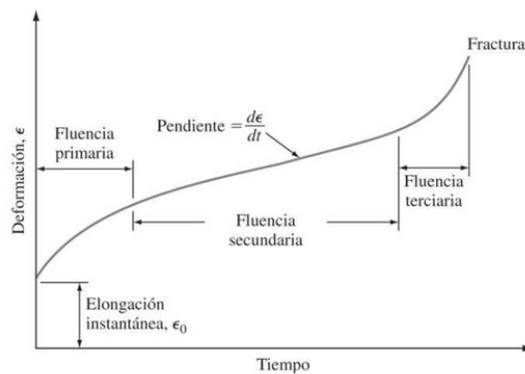
Figura 29 Curva característica del Creep a diferentes temperaturas



Fuente: Libro "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales" publicado por Smith (2006)

Se puede visualizar el comportamiento del Creep con el aumento de temperatura, el mismo material con la misma carga aplicada falla en un tiempo menor debido al aumento de la temperatura.

Figura 30 Curva característica de Creep

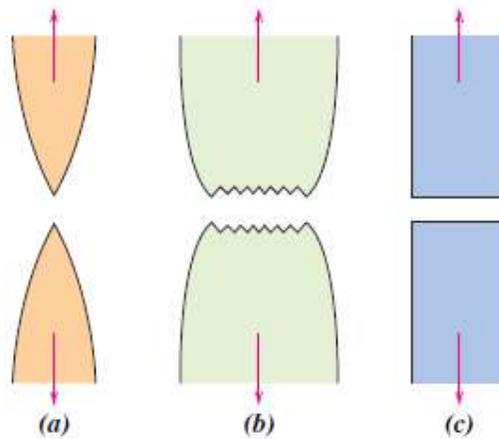


Fuente: Fuente: Libro "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales" publicado por Smith (2006)

Fractura de los metales

“La fractura es la separación de un sólido en dos o más piezas bajo la acción de una fuerza. En general, la fractura de los metales puede clasificarse en dúctil y frágil, pero puede ser una mezcla de ambas. La fractura dúctil de un metal tiene lugar después de una deformación plástica intensa y se caracteriza por la lenta propagación de la fisura Figura 31. La fractura frágil, en contraste, se produce usualmente a lo largo de planos cristalográficos característicos, denominados planos de exfoliación y presenta una rápida propagación de la fisura.”(Callister y Rethwisch. 2014. p. 253-254)

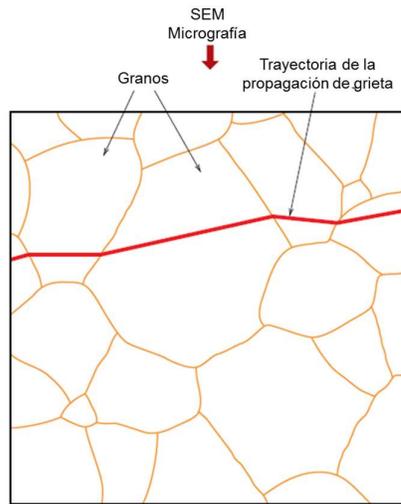
Figura 31 Tipos de Fractura Dúctil



Fuente: Libro “Materials Science and Engineering” publicado por Callister y Rethwisch (2014)

- (a) Fractura altamente dúctil en la cual el espécimen se cuelga hasta un punto.
- (b) Fractura moderadamente dúctil después de algunos cuellos.
- (c) Fractura frágil sin deformación plástica.

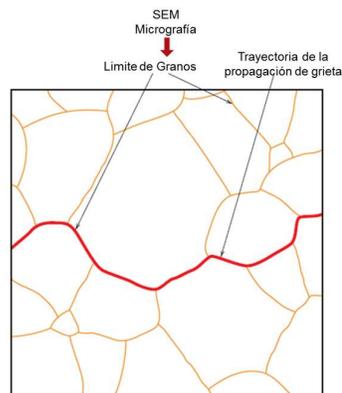
Figura 32 Fractura Frágil Transgranular



Fuente: Libro “Materials Science and Engineering” publicado por Callister y Rethwisch (2014)

Cuando la propagación de la grieta es debida a rotura de los enlaces atómicos, a este tipo de rotura se le denomina transgranular.

Figura 33 Fractura Frágil Intergranular



Fuente: Libro “Materials Science and Engineering” publicado por Callister y Rethwisch (2014)

Cuando la propagación de la grieta ocurre a lo largo de los bordes de grano, se le denomina intergranular (normalmente ocurre debido a un proceso de debilitamiento de los bordes de grano).

2.2.15 Resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias

La forma de resolver ecuaciones diferenciales es mediante los métodos numéricos; brindan soluciones de manera aproximada, pero para fines de ingeniería son muy utilizados y aplicables.

Entre los métodos numéricos más frecuentes para resolver ecuaciones del tipo:

$$Y' = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0, \quad (38)$$

Se encuentran los métodos de discretización, que consiste en encontrar los valores aproximados de la ecuación (39) en puntos t_k en el intervalo $(t_0, t_0+\alpha)$. La notación que utilizaremos será la siguiente: $y(t_k)$ representará al valor exacto de la solución en el punto t_k , e y_k será el valor aproximado de la solución que obtenemos cuando aplicamos un método numérico. La diferencia de $y(t_k) - y_k$ se conoce como error de truncadura.

El siguiente esquema general que siguen los métodos que representaremos, es el siguiente:

Se inicia realizando una partición del intervalo $(t_0, t_0 + \alpha)$ en N partes iguales.

$$t_j = t_0 + jh, \quad j = 0, 1, \dots, N, \quad h = \alpha/N$$

Conocemos los valores y_0, y_1, \dots, y_{k-1}

El resto de los valores y_k, y_{k+1} , se calculan de forma progresiva, en función de los k anteriores.

A todo método que sigue el esquema anterior se le conoce con el nombre de método de k -pasos. Por último, es interesante hacer notar el hecho de que en la práctica la implementación de estos métodos se lleva a cabo con el uso del ordenador.

El método de Euler. - El método de Euler es muy interesante para la resolución numérica de ecuaciones diferenciales ya que es muy simple, pero a efectos prácticos se aplica, pues converge hacia la solución

El valor de y_k lo encontraremos del valor anterior y_{k-1} . Por tanto, estamos ante un

método de un solo paso. Consiste en dividir el intervalo $(t_0, t_0+\alpha)$ en N partes iguales.

$$t_1 = t_0 + h, t_2 = t_0 + 2h, \dots, t_n = t_0 + Nh = t_0 + \alpha, h = \alpha/N \quad (39)$$

Si aplicamos la definición de derivada

$$y'_{(t_k)} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{y(t_k + h) - y(t_k)}{h} \quad (40)$$

Deducimos que para h “suficientemente pequeño”

$$y'_{(t_k)} = f(t_k, y(t_k)) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{y(t_k + h) - y(t_k)}{h} \quad (41)$$

Por lo tanto,

$$y(t_{k+1}) = y(t_k) + hf(t_k, y(t_k)), k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (42)$$

La igualdad (42) nos sugiere el cálculo de los y_k mediante la ley de recurrencia.

$$y_{k+1} = y_k + hf(t_k, y_k), k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (43)$$

Partiendo de $y(0) = y_0$. La ecuación 43 se conoce como el método de Euler.

Interpretación geométrica

La condición inicial (39), representa al punto $P_0 = (t_0, y_0)$ por donde pasa la curva solución. Para este punto se cumple:

$$\left. \frac{dy}{dt} \right|_{P_0} = f(t_0, y_0) \quad (44)$$

Lo cual nos permite trazar una recta que pasa por el punto P_0 y tiene de pendiente $f(t_0, y_0)$. Esta recta, aproxima a la solución en los alrededores de t_0 . Entonces, tomamos la recta y encontramos el valor de y correspondiente a t_1 . Ahora tendremos el punto (t_1, y_1) , y repetimos el proceso.

2.3. Conceptual

- ❖ **FIREBALL(Bola de fuego):** (TNO, 2005), define al Fireball como “*fuego, que arde lo suficientemente rápido para que la masa en llamas se levante en el aire como una nube*”.

Una Fireball ocurre cuando un líquido inflamable, gas o nube de polvo se libera repentinamente y presenta una mezcla limitada con aire antes de la ignición. Este evento es diferente de una explosión de fuego o de una nube de vapor donde la liberación inflamable se enciende antes de mezclarse antes con el aire exterior.

El evento de combustión de la Fireball implica el arrastre y la mezcla con el aire circundante a medida que se quema, es importante indicar que la combustión se da principalmente con la capa exterior del Fireball, donde la nube es rica en combustible y se mezcla con el aire circundante. A medida que se calientan los gases dentro de la Fireball, aumenta la flotabilidad y la Fireball aumenta a medida que se expande (SFPE, 2015).

- ❖ **JET FIRE:** Es un tipo de incendio que resulta de la descarga de líquido, vapor o gas al espacio libre desde un orificio, cuyo impulso induce a la atmósfera circundante a mezclarse con el material descargado.

El Jet Fire es un incendio con llamas de difusión turbulentas causadas por la combustión de un gas o vapor inflamable liberado a una cierta velocidad a través de un orificio, una brida, etc. Los incendios de jet arrastran grandes cantidades de aire hacia la llama, debido a la turbulencia del flujo²⁰.

- ❖ **POOL FIRE:** Se define al Pool Fire como *“una llama de difusión flotante en la que el combustible se configura horizontalmente. El combustible no se limita a líquido, puede ser un gas o sólido”*. (Yi y Wang, 2017)

En un incendio tipo Pool Fire, el líquido recibe calor de las llamas por convección y radiación, y puede perder o ganar calor por conducción hacia/desde el sustrato sólido o líquido debajo de la capa líquida. Una vez que el fuego ha alcanzado el estado estable, existe un mecanismo de retroalimentación que controla la alimentación del vapor de combustible a las llamas. La cantidad de calor transferido entre el combustible y la interfaz subyacente dependerá de las condiciones del combustible y del sustrato. Si el sustrato es agua fría y el combustible es un líquido que se

²⁰ Glosario de la CCPS.

encuentra inicialmente a temperatura ambiente, las pérdidas de calor pueden ser sustanciales y la vaporización del combustible puede disminuir hasta tal punto que la llama no pueda mantenerse. Por el contrario, si el combustible es criogénico, el calor se transferirá del sustrato al combustible, al menos en el primer período, y la combustión se puede mejorar.

- ❖ **AISLAMIENTO TERMICO:** Definido por “API 2218” (FIREPROOFING PRACTICES IN PETROLEUM AND PETROCHEMICAL PROCESSING PLANTS), es una barrera, revestimiento u otra protección que proporciona protección contra el calor del fuego sin intervención adicional.
- ❖ **PLANTA DE ABASTECIMIENTO DE GLP:** Definido por “DECRETO SUPREMO N° 032-2002-EM” (Glosario, Siglas y Abreviaturas del Subsector Hidrocarburos), Instalación en un bien inmueble donde se realizan operaciones de recepción, almacenamiento, transferencia, agregado de aditivos y despacho de Combustibles Líquidos y Otros Productos Derivados de los Hidrocarburos.
- ❖ **GAS LICUADO DE PETROLEO:** Definido por “DECRETO SUPREMO N° 032-2002-EM” (Glosario, Siglas y Abreviaturas del Subsector Hidrocarburos), hidrocarburo que, a condición normal de presión y temperatura, se encuentra en estado gaseoso, pero a temperatura normal y moderadamente alta presión es licuable. Usualmente está compuesto de propano, butano, polipropileno y butileno o mezcla de los mismos. En determinados porcentajes forman una mezcla explosiva. Se le almacena en estado líquido, en recipientes a presión.
- ❖ **PROTECCION CONTRA INCENDIOS:** Definido por “NFPA 58” (Código del Gas Licuado de Petróleo), en el sentido amplio lo que incluye la prevención, la detección y la supresión de incendios.

2.4. Definición de términos básicos

- ❖ **API:** Definido por sus siglas en inglés “The American Petroleum Institute” (Institución Americano del Petróleo), el servicio de este Instituto en la industria petrolera incluye: representaciones legales, investigaciones, normas, certificaciones y más.

- ❖ **BLEVE:** Definido por la CCPS como, “una pérdida repentina de la contención de un gas licuado a presión que existe por encima de su punto de ebullición atmosférico normal en el momento de su fallo, lo que resulta en una rápida expansión de vapor y líquido intermitente”
- ❖ **NFPA:** Definida por sus siglas en inglés “National Fire Protection Association” (Asociación Nacional de protección contra Fuego), es una organización fundada en Estados Unidos en 1896, encargada de crear y mantener las normas y requisitos mínimos para la prevención contra incendio.
- ❖ **CCPS:** Definidas por sus siglas en inglés “El Centro para la Seguridad de Procesos Químicos” fue establecido en 1985 por el Instituto Americano de Ingenieros Químicos (AIChE) con el propósito expreso de ayudar a la industria a evitar o mitigar accidentes químicos catastróficos.
- ❖ **ASME:** Definidas por sus siglas en inglés “American Society of Mechanical Engineers”, fue establecido en 1880. Es una asociación de profesionales, que ha generado un código de diseño, construcción, inspección y pruebas para equipos, entre otros, calderas y recipientes sujetos a presión.
- ❖ **TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE GLP:** Son elementos estructurales cuya finalidad es contener las presiones alcanzadas por el GLP, otorgando de esta forma la seguridad de que el producto almacenado.

3. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Variables de la investigación

3.1.1 Definición conceptual de las variables

Variable Dependiente:

Protección de los tanques esféricos de GLP

Para el presente trabajo de investigación, la protección de los tanques esféricos de GLP significa garantizar la integridad estructural del tanque de GLP inmerso en un incendio a través de un aislamiento térmico y de esta forma mitigar la ocurrencia del BLEVE.

Variable Independiente:

Diseño del aislamiento térmico

El diseño es el proceso de aplicar diversos principios científicos con el objetivo de brindar un beneficio (Institute of industrial Engineers, 2018). Para el presente trabajo de investigación el diseño del aislamiento térmico implica la selección del material aislante y el cálculo del espesor considerando los parámetros mencionados en el punto 2.2.9, dichos parámetros son más exigentes que los recomendados por la NFPA 58 y NFPA 290.

Y: Protección de los tanques esféricos.

X₁: Selección del material aislante

X₂: Espesor del material aislante

$$Y = f(X_1, X_2)$$

3.2. Operacionalización de variables

En la Tabla 5, se muestra la relación de las variables de la investigación con los objetivos específicos.

Tabla 5 Operacionalización de variables

VARIABLES	CONCEPTOS	DIMENSION	INDICADORES
V.INDEPENDIENTE Diseño de un aislamiento térmico	Calculo y selección del sistema de protección contra incendio	Selección del material(es) aislante(s).	Temperatura máxima de operación. Conductividad térmica. Calor específico. Permeabilidad Resistencia a la corrosión
		Calculo de los espesores del sistema de aislamiento	Propiedades térmicas del material aislante Propiedades físico – térmicas de la pared metálica Propiedades Físico - químicas del GLP almacenado. Temperatura máxima en la pared metálica de los tanques esféricos de almacenamiento de GLP. Máximo gradiente térmico generado en la interfase vapor – liquido en contacto con la pared metálica de los tanques.
V.DEPENDIENTE Protección de los tanques esféricos de almacenamiento de GLP	Recipientes a presión equipados con un sistema capaz de mitigar las consecuencias en un incendio, BLEVE.	Reducción de la temperatura en la pared metálica y en el GLP almacenado en los tanques esféricos para garantizar un nivel de seguridad apropiado.	Material y espesor del aislamiento térmico.

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Hipótesis

3.3.1 Hipótesis general

Si se diseña un aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio entonces los tanques esféricos de almacenamiento de GLP de una planta de abastecimiento de GLP contarán con un nivel de seguridad adecuado.

3.3.2 Hipótesis específicas

1. Seleccionando el material aislante adecuadamente entonces resistirá las temperaturas alcanzadas en un incendio ubicado en el patio de tanques esféricos de almacenamiento de GLP.
2. Determinando el espesor del sistema de aislamiento térmico entonces los tanques esféricos de almacenamiento de GLP contarán con un adecuado nivel de seguridad.

4. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y diseño de la investigación

El tipo de investigación que se desarrollo fue la siguiente:

Se desarrollará una investigación del tipo tecnológica dado que se busca aplicar los conocimientos en la solución de problemas prácticos en beneficio de la sociedad, (Espinoza, 2010). El presente proyecto buscara brindar la protección adecuada para garantizar un grado seguridad aceptable.

El nivel de la investigación es aplicada, tiene como propósito aplicar los resultados de la investigación experimental para diseñar tecnologías de aplicación inmediata en la solución de los problemas de la sociedad, (Espinoza, 2010). El presente proyecto utilizara los resultados de investigaciones como parámetros en el diseño del sistema de aislamiento.

4.2. Método de investigación

Segun H.Sampieri (2014), el método de investigación no experimental es aquel donde no se realiza manipulación de variables. El presente informe utilizara resultados de investigaciones relacionadas con el fenómeno de transferencia de calor, ligado al calentamiento de la placa de acero; así como parámetros ya establecidos (medidos) como la temperatura de la llama, temperatura de operación del material aislante, relación temperatura esfuerzo de fluencia de la placa estructural del tanque esférico, entre otros.

4.2.1 Esquema del diseño

Figura 34 Esquema de diseño



Fuente: Elaboración propia

4.3. Población y muestra

Para los fines de la presente investigación, la población quedó delimitada por los Tanques de Almacenamiento de GLP.

La muestra para esta investigación es igual a la población, ya que se trata de un diseño, por tanto:

Población: Tanque esférico de almacenamiento de GLP en la planta de abastecimiento de GLP.

4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

El presente estudio abarcó únicamente el patio de tanques esféricos de la Planta de Abastecimiento de GLP, ubicado en el Callao. El periodo de desarrollo fue entre los años 2018-2019.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

La Tabla 6 define el tipo de técnicas e instrumentos que se utilizaron en la investigación.

Tabla 6 Técnicas e Instrumentos

TECNICAS	INSTRUMENTOS
<p>Análisis documental</p> <p>Esta técnica permitirá obtener información documentada que permita demostrar la hipótesis (Espinoza, 2010).</p>	<p>Handbooks NFPA</p> <p>Resultados del Estudio de Riesgos.</p> <p>Investigaciones realizadas en el extranjero.</p> <p>Normas internacionales; NFPA, API, entre otras.</p>

Fuente: Elaboración propia

4.6. Análisis y procedimientos de datos

Descripción y desarrollo del modelo matemático

El modelo matemático presentado en el presente estudio, fue deducido basándose en investigaciones y modelamientos hechos en el extranjero (Landucci, Molag y Cozzani, 2009). Este modelo tiene en cuenta la variación de la temperatura en función del tiempo, transferencia de calor en estado no estacionario. El planteamiento consiste en el balance de energía en los nodos, ver Figura 35. Donde parte de la energía que ingresa en cada nodo se almacena aumentando la temperatura a medida que avanza el tiempo. Los mecanismos de transferencia de calor en este proceso, dictaran la cantidad de energía que se transmitirá de nodo a nodo, siendo el mecanismo predominante el de conducción, ello por la naturaleza solida de tres (03) de los cuatro (04) nodos en mención. La energía motriz de todos los procesos de transferencia de calor es la carga térmica generada por el incendio, y será calculada de acuerdo a 2.2.7.

La cantidad de calor que se transfiere de nodo a nodo será calculada según la naturaleza de la transferencia de energía, para obtener los coeficientes de convección y conducción se utilizó correlaciones de investigaciones hechas en el extranjero (J.Kumana et al., 1982). Los parámetros base para el desarrollo del modelo fueron los mencionados en 2.2.10. El fin del modelo es tener una relación de las temperaturas de cada nodo en función del tiempo, dicho arreglo dependerá en gran medida del espesor y coeficiente de conductividad del

material aislante. El aislante térmico genera la mayor resistencia al flujo del calor comparado con los demás elementos que participan en el sistema, esto debido a sus propiedades térmicas, por esta razón de él depende como variaran las temperaturas en los demás nodos.

Los nodos son considerados en modelo serán los siguientes:

Nodo V : GLP en fase vapor

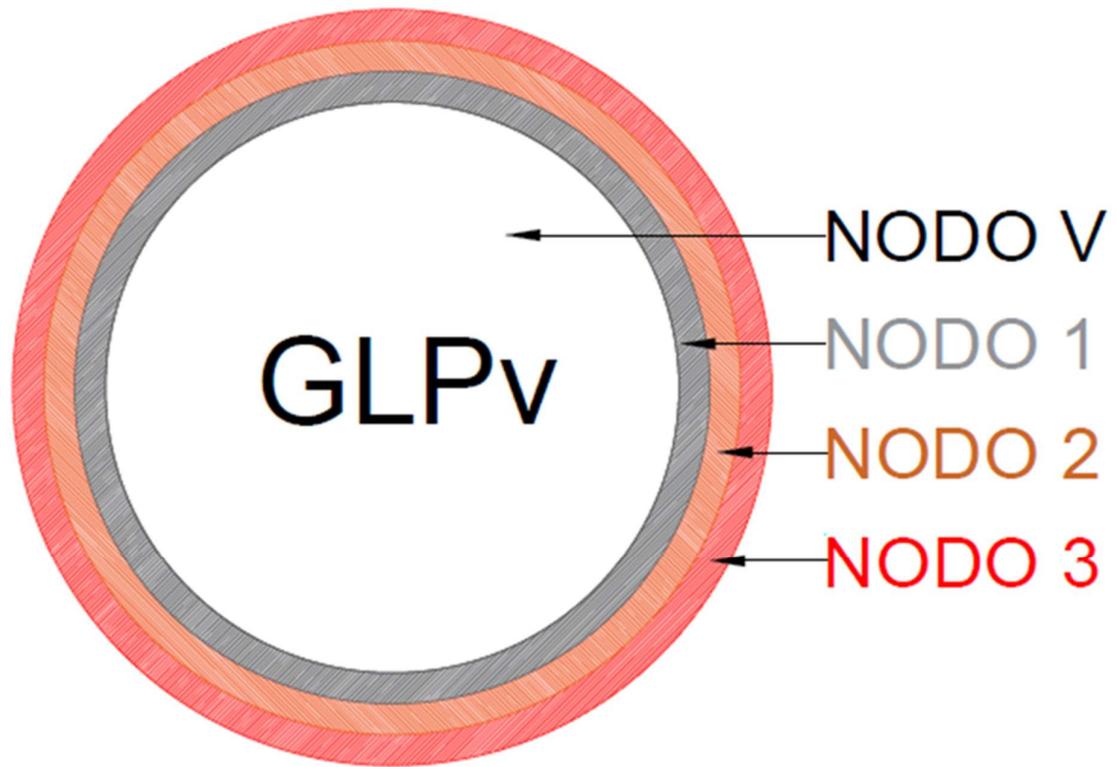
Nodo 1 : Metal de la carcasa del tanque esférico.

Nodo 2 : Material Aislante 1

Nodo 3 : Material Aislante 2

La razón de contemplar dos materiales aislantes, es porque se pretende aprovechar al máximo las propiedades térmicas de dos materiales de naturaleza diferente, siendo el material aislante 2 el que se encontrara en contacto directo con el incendio; y el material aislante 1 mitigara gran parte de la carga térmica para que la temperatura en la carcasa del tanque esférico se encuentre dentro de los márgenes definidos en 2.2.9. De lo anterior, se desea proyectar dos capas donde una tendrá la temperatura de operación muy alta y la otra una resistencia térmica considerable.

Figura 35 Esquematización del modelo matemático



Leyenda :

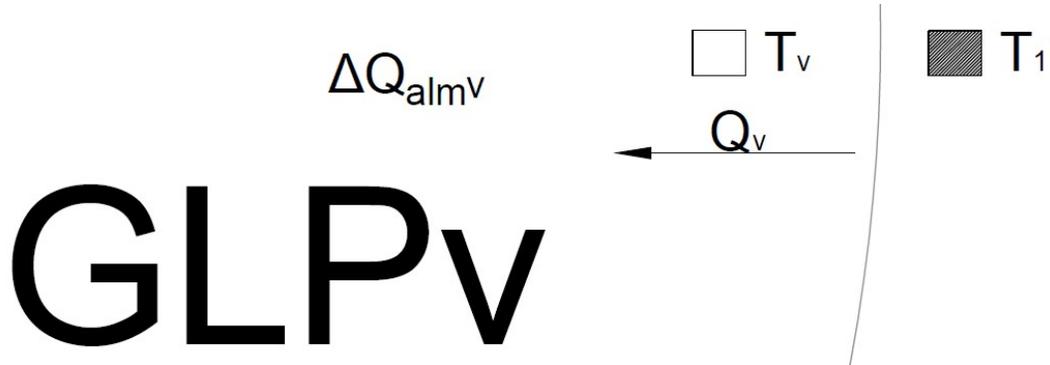
-  GLP en fase vapor
-  Metal de la carcasa del tanque esférico
-  Material Aislante 1
-  Material Aislante 2

Fuente: Elaboración propia

La Figura 35 representa un tanque esférico de almacenamiento de GLP, cubierto por dos materiales aislantes. Los nodos fueron seleccionados estratégicamente para poder calcular las temperaturas de cada material aislante, carcasa metálica y GLP en fase vapor, en función de las propiedades térmicas de los aislantes y el espesor seleccionado.

Se considera el GLP en fase vapor por ser el estado más crítico de almacenamiento, ello por su limitada capacidad de refrigeración para la carcasa metálica que lo contiene, los fenómenos de transferencia de calor y los mecanismos que explican ello fueron abarcados ampliamente en 2.2.9.

Figura 36 Modelamiento de la transferencia de calor entre el vapor de GLP y la carcasa metálica



Fuente: Elaboración propia

El esquema presentado en la Figura 36, modela la transferencia de calor entre el GLP en fase vapor y la carcasa de acero. Los mecanismos de transferencia de calor son:

- La energía que ingresa al nodo v se transfiere mediante convección natural, debido a la agitación del GLP en fase de vapor, principalmente por cambios en la densidad (velocidad convectiva).

La energía almacenada es representada como la diferencia entre la energía que ingresa y sale, provocando el aumento de la temperatura en el nodo v, de manera proporcional a su calor específico de volumen constante.

El modelamiento es representado mediante la siguiente expresión:

$$Q_v = \Delta Q_{almv} \quad 45$$

Siendo

$$Q_v = h_v * (T_1 - T_v) * A_{int} \quad 46$$

$$\Delta Q_{almv} = \rho_v * cp_v * V_v * \frac{dT_v}{dt} \quad 47$$

$$h_v * (T_1 - T_v) * A_{int} = \rho_v * cp_v * V_v * \frac{dT_v}{dt} \quad 48$$

Donde:

ΔQ_{almv} : Calor almacenado en el vapor de GLP

Q_v : Calor generado por la convección natural del vapor de GLP

A_{int1} : Área interior de la carcasa de acero

T_1 : Temperatura de la carcasa de acero

T_v : Temperatura del vapor de GLP

h_v : Coeficiente convectivo de transferencia de calor

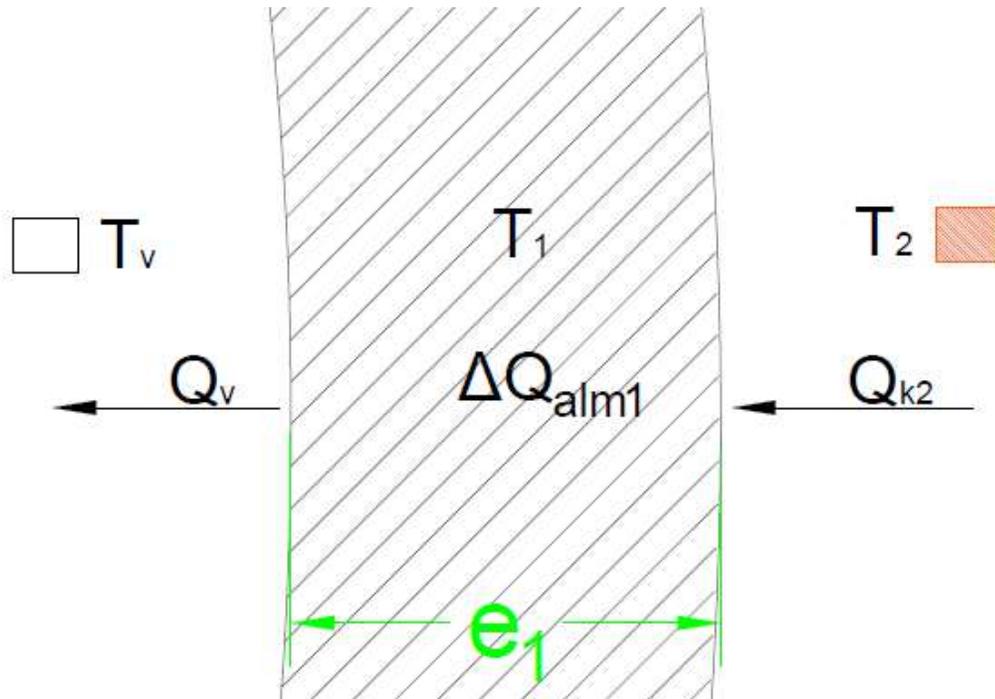
ρ_v : Densidad del vapor de GLP

cp_v : Calor específico de a volumen constante del vapor de GLP

V_v : Volumen de vapor almacenado en el tanque esférico

dT_v/dt Razón de cambio de la temperatura del vapor de GLP en función del tiempo.

Figura 37 Modelamiento de transferencia de calor entre el vapor de GLP, la carcasa metálica y el material aislante 1



Fuente: Elaboración propia

El esquema presentado en la Figura 37, modela la transferencia de calor entre el material aislante 1, el GLP en fase vapor y la carcasa de acero. Los mecanismos de transferencia de calor son:

- La energía que sale del nodo 1 se transfiere mediante convección natural, debido a la agitación del GLP en fase de vapor, principalmente por cambios en la densidad (velocidad convectiva).
- La energía que sale del nodo 2 se transfiere mediante conducción, entre la carcasa de metal y la primera capa aislante.

La energía almacenada es representada como la diferencia entre la energía que ingresa y sale, provocando el aumento de la temperatura en el nodo 1 de manera proporcional a su calor específico de volumen constante.

El modelamiento es representado mediante la siguiente expresión:

$$Q_{k2} - Q_v = \Delta Q_{alm1} \quad 49$$

Siendo:

$$Q_v = h_v * (T_1 - T_v) * A_{int} \quad 50$$

$$Q_{k2} = \frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_1) * A_{M2} \quad 51$$

$$\Delta Q_{alm1} = \rho_1 * cp_1 * V_1 * \frac{dT_1}{dt} \quad 52$$

$$\frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_1) * A_{M2} - h_v * (T_1 - T_v) * A_{int} = \rho_1 * cp_1 * V_1 * \frac{dT_1}{dt} \quad 53$$

Donde:

ΔQ_{alm1} : Calor almacenado en la carcasa de acero

Q_{k2} : Calor de conducción entre el material aislante 1 y la carcasa de acero

Q_v : Calor de convección entre el vapor de GLP y la carcasa de acero

A_{int1} : Área interior de la carcasa de acero

A_{M2} : Área media de la carcasa de acero

T_1 : Temperatura de la carcasa de acero

T_2 : Temperatura del material aislante 1

T_v : Temperatura del vapor de GLP

h_v : Coeficiente de convección natural entre el vapor de GLP y la superficie de la carcasa de acero

k_2 : Coeficiente de conductividad del material aislante 1

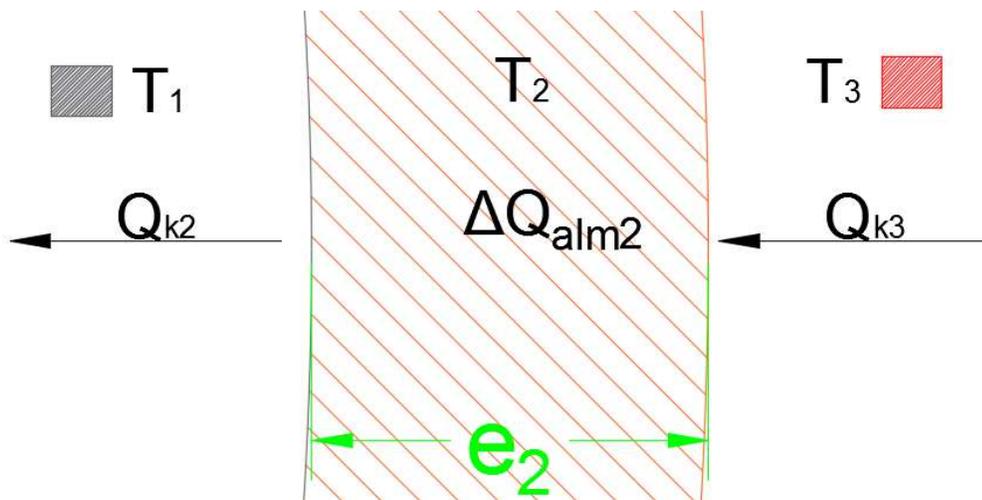
e_2 : Espesor del material aislante 1

ρ_1 : Densidad de la carcasa de acero

c_{p1} : Calor específico de la carcasa de acero

V_1 : Volumen de la carcasa de acero

Figura 38 Modelamiento de transferencia de calor entre la carcasa metálica, el material aislante 1 y material aislante 2



Fuente: Elaboración propia

El esquema presentado en la Figura 38, modela la transferencia de calor entre el material aislante 2, el material aislante 1 y la carcasa de acero. Los mecanismos de transferencia de calor son:

- La energía que sale del nodo 2 se transfiere mediante conducción, entre la carcasa de metal y el material aislante 1.
- La energía que ingresa en el nodo 2 se transfiere mediante conducción, entre el material aislante 1 y 2.

La energía almacenada es representada como la diferencia entre la energía que ingresa y sale, provocando el aumento de la temperatura en el nodo 2, de manera proporcional a su calor específico de volumen constante.

El modelamiento es representado mediante la siguiente expresión:

$$Q_{k3} - Q_{k2} = \Delta Q_{alm2} \quad 54$$

Siendo:

$$Q_{k3} = \frac{K_3}{e_3} * (T_3 - T_2) * A_{M3} \quad 55$$

$$Q_{k2} = \frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_1) * A_{M2} \quad 56$$

$$\Delta Q_{alm2} = \rho_2 * cp_2 * V_2 * \frac{dT_2}{dt} \quad 57$$

$$\frac{K_3}{e_3} * (T_3 - T_2) * A_{M3} - \frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_1) * A_{M2} = \rho_2 * cp_2 * V_2 * \frac{dT_2}{dt} \quad 58$$

Donde:

ΔQ_{alm2} : Calor almacenado en el material aislante 1

Q_{k3} : Calor de conducción entre el material aislante 1 y 2

Q_{k2} : Calor de conducción entre el material aislante 1 y la carcasa metálica

A_{M3} : Área media del material aislante 2

A_{M2} : Área media del material aislante 1

T_1 : Temperatura de la carcasa de acero

T_2 : Temperatura del material aislante 1

T_3 : Temperatura del material aislante 2

K_3 : Coeficiente de conductividad térmica del material aislante 2

e_3 : Espesor del material aislante 2

k_2 : Coeficiente de conductividad térmica del material aislante 1

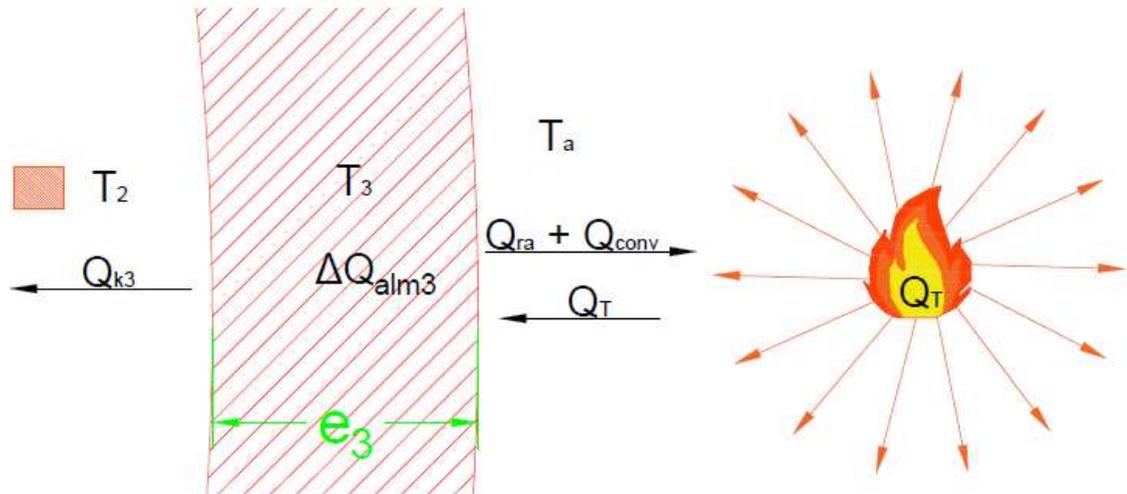
e_2 : Espesor del material aislante 1

ρ_2 : Densidad del material aislante 1

c_{p2} : Calor específico del material aislante 1

V_2 : Volumen del material aislante 1

Figura 39 Modelamiento de la transferencia de calor entre el material aislante 1, material aislante 2 y la carga de radiación generada por el incendio



Fuente: Elaboración propia

El esquema presentado en la Figura 39, modela la transferencia de calor entre la carga térmica generada por el incendio, la primera capa aislante, la segunda capa aislante y la el ambiente. Los mecanismos de transferencia de calor en este proceso son:

- La energía que sale del nodo 3 se transfiere mediante tres mecanismos: radiación, convección, conducción. Siendo la radiación y convección entre la superficie del material aislante 2 y el ambiente, la conducción entre el material aislante 2 hacia el material aislante 1.
- La energía que ingresa en el nodo 3 se transfiere mediante radiación, y es la carga térmica generada en el incendio.

La energía almacenada es representada como la diferencia entre la energía que ingresa y sale, provocando el aumento de la temperatura en el nodo 3; proporcional a su calor específico de volumen constante.

El modelamiento es representado mediante la siguiente expresión:

$$Q_t - Q_{k3} - Q_{ra} - Q_{conv} = \Delta Q_{alm3} \quad 59$$

Siendo:

$$Q_{ra} = \varepsilon_{F.C} * \sigma * ((T_3 + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_{ext3} \quad 60$$

$$Q_{k3} = \frac{K_3}{e_3} * (T_3 - T_2) * A_{M3} \quad 61$$

$$Q_{conv} = h_{3a} * (T_3 - T_a) * A_{ext3} \quad 62$$

$$\Delta Q_{alm3} = \rho_3 * cp_3 * V_3 * \frac{dT_3}{dt} \quad 63$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_T * A_{ext3} - \varepsilon_{F.C} * \sigma * ((T_3 + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_{ext} - h_{3a} \\ * (T_3 - T_a) * A_{ext3} - \frac{K_3}{e_3} * (T_3 - T_2) * A_{M3} \\ = \rho_3 * cp_3 * V_3 * \frac{dT_3}{dt} \end{aligned} \quad 64$$

Donde:

Q_T : Carga neta de radiación térmica generada por un incendio

A_{ext3} : Área externa perteneciente al material aislante 2

$\varepsilon_{F.C}$: Coeficiente de emisividad térmica del material aislante 2

σ : Coeficiente de Stefan-Boltzmann

T_3 : Temperatura del material aislante 2

T_a : Temperatura ambiente

h_{3a} : Coeficiente de convección natural entre el aire y el material aislante 2

k_3 : Coeficiente de conducción del material aislante 2

e_3 : Espesor del material aislante 2

A_{M3} : Área media del material aislante 2

ρ_3 : Densidad del material aislante 2

c_{p3} : Calor específico del material aislante 2

V_3 : Volumen del material aislante 2

dT_3/dt : Razón de cambio de la temperatura en función del tiempo del material aislante 2

Finalmente, el modelamiento de dicho suceso se visualiza mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_T * A_{ext3} - \varepsilon_{F.C} * \sigma * ((T_3 + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_{ext3} & \quad 65 \\ - h_{3a} * (T_3 - T_a) * A_{ext3} - \frac{K_3}{e_3} * (T_3 - T_2) * A_{M3} \\ = \rho_3 * cp_3 * V_3 * \frac{dT_3}{dt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{K_3}{e_3} * (T_3 - T_2) * A_{M3} - \frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_1) * A_{M2} & \quad 66 \\ = \rho_2 * cp_2 * V_2 * \frac{dT_2}{dt} \end{aligned}$$

$$\frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_1) * A_{M2} - h_v * (T_1 - T_v) * A_{int} = \rho_1 * cp_1 * V_1 * \frac{dT_1}{dt} \quad 67$$

$$h_v * (T_1 - T_v) * A_{int} = \rho_v * cp_v * V_v * \frac{dT_v}{dt} \quad 68$$

Para el desarrollo de las ecuaciones diferenciales, ver ecuaciones 65, 66, 67, 68, se utilizara el método de Euler mostrado en 2.2.15, para el sistema de ecuaciones diferenciales y finalmente se obtendrá las siguientes expresiones:

$$T_3 = T_3(0) + h * \left[\frac{\dot{Q}_T * A_{ext3} - \varepsilon_{F.C} * \sigma * ((T_3 + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_{ext3} - h_{3a} * (T_3 - T_a) * A_{ext3} - \frac{K_3}{e_3} * (T_3 - T_2) * A_{M3}}{\rho_3 * cp_3 * V_3} \right] \quad 69$$

$$T_2 = T_2(0) + h * \left[\frac{\frac{K_3}{e_3} * (T_3 - T_2) * A_{M3} - \frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_1) * A_{M2}}{\rho_2 * cp_2 * V_2} \right] \quad 70$$

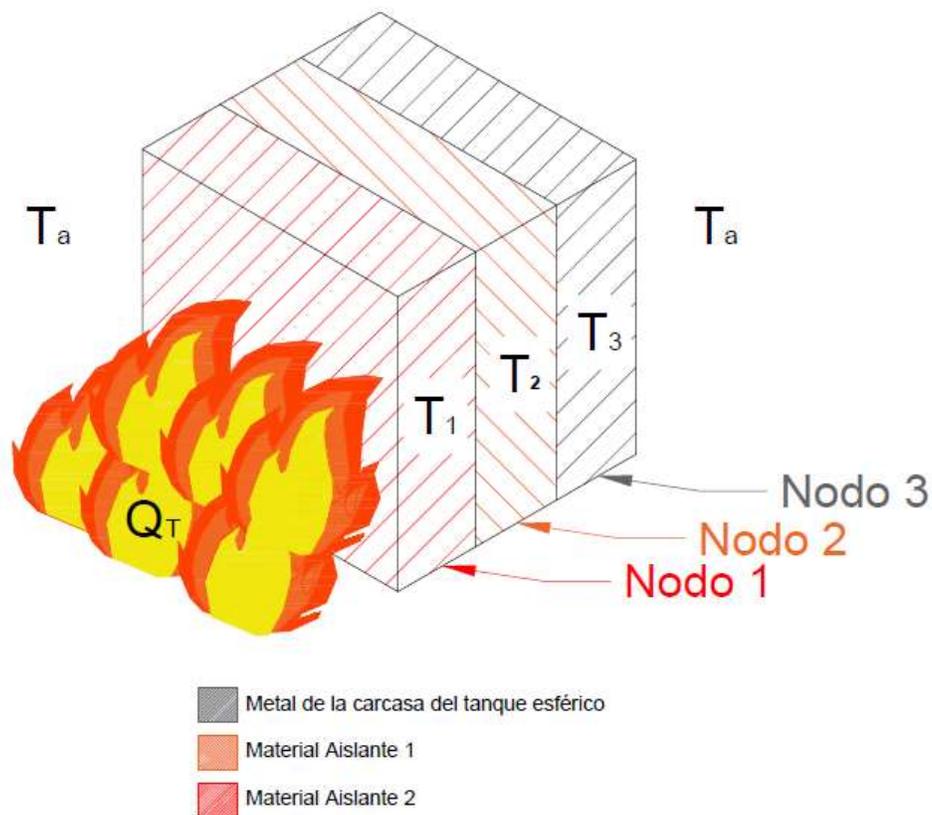
$$T_1 = T_1(0) + h * \left[\frac{\frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_1) * A_{M2} - h_v * (T_1 - T_v) * A_{int}}{\rho_1 * cp_1 * V_1} \right] \quad 71$$

$$T_v = T_v(0) + h * \left[\frac{h_v * (T_1 - T_v) * A_{int}}{\rho_v * cp_v * V_v} \right] \quad 72$$

Según el flujograma presentado en 4.2.1, es necesario el modelamiento de la norma NFPA 290, ello por la obligación normativa de someter a al sistema de aislamiento térmico a esta prueba. La finalidad es contrastar resultados, es decir la misma configuración de aislamientos es modelado en ambas condiciones, las planteadas en este estudio y las dictadas por la norma. Es evidente que los parámetros base del modelamiento considera muchos fenómenos, por lo tanto, es más exigente que la prueba descrita por el estándar NFPA 290.

Para el desarrollo del modelamiento de la prueba especificada en el estándar NFPA 290, se utilizara los mismos criterios que en el modelamiento del tanque esférico de almacenamiento de GLP inmerso en un incendio.

Figura 40 Esquema del modelamiento de la prueba de la NFPA 290

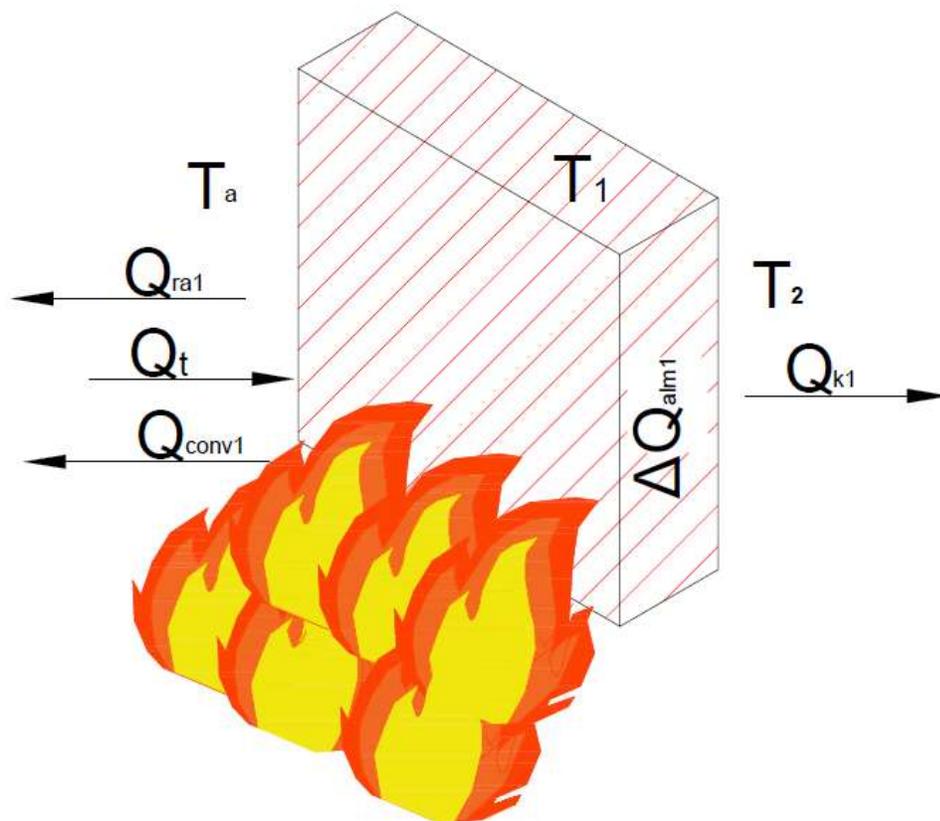


Fuente: Elaboración propia

La Figura 40 representa el modelamiento de la prueba de la NFPA 290, las condiciones son:

- Temperatura de la llama 1200°C (+/-) 60°C .
- El sistema de aislamiento térmico estará sometido a 20 min a una antorcha de propano. Luego se aplicara un chorro de manguera de 205 gpm durante 10 min en paralelo con la antorcha y finalmente se dejara de aplicar el chorro de manguera y se mantendrá la antorcha durante 20 min más, teniendo una duración total de 50 min.
- Para el modelamiento de la prueba no se considera el efecto refrigerante que tendría el chorro de agua sobre el aislamiento, solo se tiene en cuenta que la llama impacta durante 50 min al sistema de aislamiento.

Figura 41 Modelamiento de los mecanismos de transferencia de calor en el material aislante 2



Fuente: Elaboración propia

El esquema presentado en la Figura 41 **Figura 41**, modela la transferencia de calor entre la antorcha de propano, el medio ambiente y el material aislante 2. Los mecanismos de transferencia de calor son:

- La energía que ingresa al nodo 1 se transfiere principalmente mediante radiación, la antorcha de propano.
- La energía que sale del nodo 1 se transfiere mediante 3 mecanismos, convección, radiación y conducción. Siendo la convección natural, considerando velocidad cero (0) en el viento, entre el material aislante 2 y el ambiente. La transferencia de calor por radiación, entre el material aislante 2 y el medio ambiente y finalmente la conducción de calor entre la superficie del material aislante 2 y 1.

La energía almacenada es representada como la diferencia entre la energía que ingresa y sale, provocando el aumento de la temperatura en el nodo 1, de manera proporcional a su calor específico de volumen constante.

El modelamiento es representado mediante la siguiente expresión:

$$Q_T - Q_{ra1} - Q_{conv1} - Q_{k1} = \Delta Q_{alm1} \quad 73$$

Siendo

$$Q_T = Q_T * A_1 \quad 74$$

$$Q_{ra1} = \varepsilon_1 * \sigma * ((T_1 + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_1 \quad 75$$

$$\Delta Q_{alm1} = \rho_1 * cp_1 * V_1 * \frac{dT_1}{dt} \quad 76$$

$$Q_{conv1} = h_{a1} * (T_1 - T_a) * A_1 \quad 77$$

$$Q_{k1} = \frac{k_1}{e_1} * (T_1 - T_2) * A_1 \quad 78$$

$$\dot{Q}_T * A_1 - \varepsilon_1 * \sigma * ((T_1 + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_1 - h_{a1} * (T_1 - T_a) * A_1 - \frac{K_1}{e_1} * (T_1 - T_2) * A_1 = \rho_1 * cp_1 * V_1 * \frac{dT_1}{dt} \quad 79$$

Donde:

ΔQ_{alm1} : Calor almacenado en el material aislante 2

Q_{ra1} : Calor de radiación entre el material aislante 2 y el aire

Q_{conv1} : Calor de convección entre el material aislante 2y el aire

Q_{k1} Calor de conducción entre el material aislante 1 y 2

Q_T : Carga térmica generada por la antorcha

A_1 : Área exterior del material aislante 2

T_1 : Temperatura del material aislante 2

T_2 : Temperatura del material aislante 1

T_a : Temperatura del aire

K_1 : Coeficiente de conductividad térmica del material aislante 2

e_1 : Espesor del material aislante 2

h_{a1} : Coeficiente de convección natural entre el aire y el material aislante 2

ε_1 : Coeficiente de emisividad térmica del material aislante 2

σ : Coeficiente de Stefan-Boltzmann

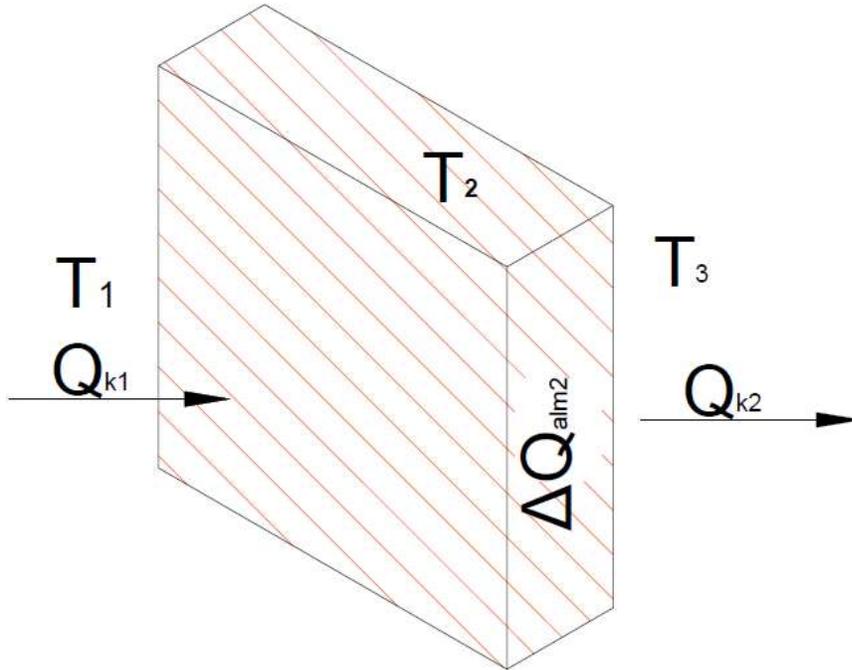
ρ_1 : Densidad del material aislante 2

cp_1 : Calor específico del maerial aislante 2

V_1 : Volumen del material aislante 2

dT_1/dt : Razón de cambio de la temperatura en función del tiempo del material aislante 2.

Figura 42 Modelamiento de los mecanismos de transferencia de calor en el material aislante 1



Fuente: Elaboración propia

El esquema presentado en la Figura 42, modela la transferencia de calor entre el material aislante 2, el material aislante 1 y la carcasa de acero. Los mecanismos de transferencia de calor son:

- La energía que sale del nodo 2 se transfiere mediante conducción, entre la carcasa de metal y el material aislante 1.
- La energía que ingresa en el nodo 2 se transfiere mediante conducción, entre el material aislante 1 y 2.

La energía almacenada es representada como la diferencia entre la energía que ingresa y sale, provocando el aumento de la temperatura en el nodo 2, de manera proporcional a su calor específico de volumen constante.

El modelamiento es representado mediante la siguiente expresión:

$$Q_{k2} - Q_{k1} = \Delta Q_{alm2} \quad 80$$

Siendo:

$$Q_{k2} = \frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_3) * A_1 \quad 81$$

$$Q_{k1} = \frac{K_1}{e_1} * (T_1 - T_2) * A_1 \quad 82$$

$$\Delta Q_{alm2} = \rho_2 * cp_2 * V_2 * \frac{dT_2}{dt} \quad 83$$

$$\frac{K_1}{e_1} * (T_1 - T_2) * A_1 - \frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_3) * A_1 = \rho_2 * cp_2 * V_2 * \frac{dT_2}{dt} \quad 84$$

Donde:

ΔQ_{alm2} : Calor almacenado en el material aislante 1

Q_{k2} : Calor de conducción entre el material aislante 1 y el acero

Q_{k1} : Calor de conducción entre el material aislante 1 y 2

A_1 : Área superficial del material aislante 1

T_1 : Temperatura del material aislante 2

T_2 : Temperatura del material aislante 1

T_3 : Temperatura del acero

K_1 : Coeficiente del material aislante 2

k_2 : Coeficiente del material aislante 1

e_1 : Espesor del material aislante 2

e_2 : Espesor del material aislante 1

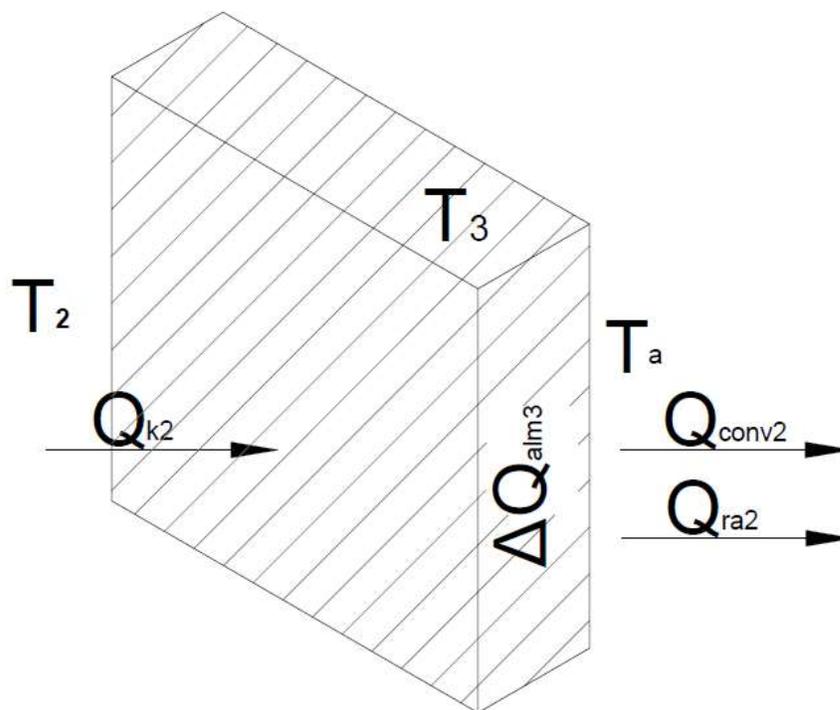
ρ_2 : Densidad del material aislante 1

c_{p2} : Calor específico del material aislante 1

V_2 : Volumen del material aislante 1

dT_1/dt : Razón de cambio de la temperatura en función del tiempo del material aislante 1.

Figura 43 Modelamiento de los mecanismos de transferencia de calor del acero



Fuente: Elaboración propia

El esquema presentado en la Figura 43 modela la transferencia de calor entre el material aislante 1, el material de la carcasa metálica (acero), y el medio ambiente. Los mecanismos de transferencia de calor son:

- La energía que ingresa al nodo tres (03) se transfiere mediante conducción, entre el material aislante 1 y el acero.
- La energía que sale del nodo tres (03) se transfiere mediante dos (02) mecanismos, convección y radiación. Siendo la convección natural,

considerando velocidad cero en el viento, entre el material aislante 1 y el ambiente. La transferencia de calor por radiación, entre el material aislante 1 y el medio ambiente.

La energía almacenada es representada como la diferencia entre la energía que ingresa y sale, provocando el aumento de la temperatura en el nodo 3, de manera proporcional a su calor específico de volumen constante.

El modelamiento es representado mediante la siguiente expresión:

$$Q_{k2} - Q_{ra2} - Q_{conv2} = \Delta Q_{alm3} \quad 85$$

Siendo:

$$Q_{ra2} = \varepsilon_2 * \sigma * ((T_3 + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_1 \quad 86$$

$$Q_{k2} = \frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_3) * A_1 \quad 87$$

$$Q_{conv2} = h_{a2} * (T_3 - T_a) * A_1 \quad 88$$

$$\Delta Q_{alm3} = \rho_3 * cp_3 * V_3 * \frac{dT_3}{dt} \quad 89$$

$$\frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_3) * A_1 - \varepsilon_1 * \sigma * ((T_1 + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_1 - h_{a2} * (T_3 - T_a) * A_1 = \rho_3 * cp_3 * V_3 * \frac{dT_3}{dt} \quad 90$$

Donde:

ΔQ_{alm3} : Calor almacenado en el acero

Q_{ra2} : Calor de radiación entre el acero y el aire

$Q_{\text{conv}2}$: Calor de convección natural entre el acero y el aire

Q_{k2} : Calor de conducción entre el acero y el material aislante 1

A_1 : Área externa de la plancha de acero

T_3 : Temperatura del acero

T_2 : Temperatura del material aislante 1

T_a : temperatura del aire

k_2 : Conductividad térmica del material aislante 1

e_2 : Espesor del material aislante 1

h_{a2} : Coeficiente de convección natural entre el acero y el aire

ε_2 : Emisividad del acero

σ : Coeficiente de Stefan-Boltzmann

ρ_3 : Densidad del acero

cp_3 : Calor específico del acero

V_3 : Volumen del acero

dT_3/dt : Razón de cambio de la temperatura del acero respecto al tiempo

El desarrollo del modelamiento para la prueba del estándar NFPA 290 se visualiza mediante las siguientes expresiones:

$$\dot{Q}_T * A_1 - \varepsilon_1 * \sigma * ((T_1 + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_1 - \quad 79$$

$$h_{a1} * (T_1 - T_a) * A_1 - \frac{K_1}{e_1} * (T_1 - T_2) * A_1 = \rho_1 * cp_1 * V_1 * \frac{dT_1}{dt}$$

$$\frac{dT_1}{dt}$$

$$\frac{K_1}{e_1} * (T_1 - T_2) * A_1 - \frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_3) * A_1 \quad 84$$

$$= \rho_2 * cp_2 * V_2 * \frac{dT_2}{dt}$$

$$\frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_3) * A_1 - \varepsilon_1 * \sigma * ((T_1 + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_1 - \quad 90$$

$$* A_1 - h_{a2} * (T_3 - T_a) * A_1$$

$$= \rho_3 * cp_3 * V_3 * \frac{dT_3}{dt}$$

Para el desarrollo de las ecuaciones diferenciales 79, 84, 90, se utilizara el método de Euler mostrado en 2.2.15, finalmente se obtiene las siguientes expresiones:

$$T_3 = T_3(0) + h * \left[\frac{\frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_3) * A_1 - \varepsilon_1 * \sigma * ((T_1 + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_1 - h_{a2} * (T_3 - T_a) * A_1}{\rho_3 * cp_3 * V_3} \right] \quad 91$$

$$T_2 = T_2(0) + h * \left[\frac{\frac{K_1}{e_1} * (T_1 - T_2) * A_1 - \frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_3) * A_1}{\rho_2 * cp_2 * V_2} \right] \quad 92$$

$$T_1 = T_1(0) + h * \left[\frac{\dot{Q}_T * A_1 - \varepsilon_1 * \sigma * ((T_1 + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_1 - h_{a1} * (T_1 - T_a) * A_1 - \frac{K_1}{e_1} * (T_1 - T_2) * A_1}{\rho_1 * cp_1 * V_1} \right] \quad 93$$

Con el desarrollo de ambos modelamientos se podrá predecir el comportamiento de la carcasa metálica, es decir se obtendrá la relación de la temperatura de este material en función del tiempo.

Pero antes de desarrollar el modelo, el primer paso es seleccionar el tipo de material aislante que reducirá en gran medida la carga térmica que ingresa al sistema. Para ello se tendrá en cuenta las consideraciones planteadas en 2.2.7 y 2.2.9.

Consideraciones para la selección del material aislante

Respecto al material aislante:

- La temperatura de la llama de propano puede alcanzar valores de 1200°C (+/-) 30°C, según la NFPA 290, por lo tanto, el material aislante deberá soportar una temperatura igual o superior.
- Un primer planteamiento es seleccionar un sistema aislante, dos materiales, con la finalidad de aprovechar sus diferentes propiedades térmicas, siendo el que está en contacto con la llama (incendio) el de propiedades refractarias, y el segundo con propiedades aislantes. El primer material aislante disminuirá la temperatura hasta el nivel que el segundo material tolera, caso contrario el segundo material aislante se calcinaría disminuyendo su espesor y cambiando sus propiedades térmicas, es decir ya no actuaría como aislante.
- No debe ser poroso, ello por el lugar donde será instalado, cerca al mar; y la brisa marina arrastra vapor agua el cual atravesaría fácilmente el aislante y se depositaría en el metal base, generando corrosión.
- Deberá estar protegido del medio ambiente, enchaquetado tal y como lo recomiendan otros estándares, como por ejemplo API 2510 A.
- Tener un coeficiente de conductividad bajo, para aprovechar sus propiedades de barrera térmica y disminuir el flujo de energía neto que entrara en contacto con la carcasa de acero.

Los materiales aislantes que se tendrán en cuenta para el desarrollo del diseño serán los siguientes:

Lana de roca mineral/ Fabricante: CALORCOL

La Lana Mineral de Roca posee una muy baja conductividad térmica. La conductividad térmica aumenta al disminuir la densidad, por ello es recomendado que cuando el material este expuesto a temperaturas elevadas se seleccione la lana de roca mineral con densidad elevada.

Tabla 7 Propiedades de la lana de roca mineral

PROPIEDADES	AISLAMIENTO DE LANA DE ROCA MINERAL
Composición química	Fibras de roca basálticas
Estabilidad química	Excelente material inorgánico
Acción del tiempo	100% estable
Transmisión de vapor de agua	≤ a 1.0
Densidad lb/ft ³	Excelente desde 2 a 12
Resistencia a la compresión lb/in ²	4.0 - 6.0 (10% deformación).
(%deformación)	Excelente por su densidad, estructura y organización de las fibras
Temperaturas de aplicación	Desde -300°F (-184°C) Hasta 1382°F (750°C)
Conductividad térmica BTU.in/hr.ft ² °F a 100°F.	0,24
Resistencia al choque térmico	Excelente
Incombustibilidad	100% Incombustible - No propaga llama
Punto de fusión	1600 °C
Vida Útil del aislamiento	Excelente
Humos tóxicos	No emana gases, ni humos tóxicos.
Medio ambiente	Amigable con el medio ambiente, contiene PH neutro, no contiene gasificantes de tipo CFC ni HCFC ni asbesto
Estabilidad dimensional	Excelente, permanece estable en altas temperaturas.
Facilidad de aplicación	Fácil de aplicar
Resistencia Térmica	Resiste la acción directa del fuego durante 240 minutos
Efecto corrosivo	No contribuye ni promueve la corrosión
Pérdidas por transmisión (TL) En espesor 2 in	31.8 dB (A)
Coefficiente de reducción de ruido (NRC) en espesor 2 in	0,92
Resistencia térmica (R) hr.ft ² °F/BTU para 1 1/2 in	6,25

Fuente: Catalogo de CALORCOL, 2019

Figura 44 Lana de Roca Mineral - CALORCOL

CALORCOL
Expertos en Ingeniería de Aislamientos



Fuente: Catalogo de CALORCOL, 2019

La lana de roca mineral fue seleccionada por tener un bajo coeficiente de conductividad térmica, además de presentar una elevada resistencia térmica al fuego, y un bajo coeficiente de transmisión de vapor de agua (no es poroso). Sin embargo su limitante es la temperatura de operación, la cual es de 750°C.

Material compuesto de fibra cerámica/ Fabricante MAXWOOL:

Esta manta de fibra cerámica está compuesta por fibras entretrejidas largas y flexibles, fabricadas a través del proceso “spun”, creando con esto un producto durable, fuerte y ligero. Este material puede usarse para aplicaciones con temperaturas que van desde los 538 °C (1000 °F) hasta los 1425°C (2000°F).

Sus propiedades térmicas y mecánicas se visualizan en la Tabla 8.

Tabla 8 Propiedades de la Fibra cerámica

Propiedades Físicas	LTS	HPS	HTZ
Densidad lb/ft ³ (kg / m ³)	4, 6, 8, 10 (64, 96, 128, 160)	4, 6, 8, 10 (64, 96, 128, 160)	4, 6, 8, 10 (64, 96, 128, 160)
Temperatura de Uso Máxima, °C (°F)	1093 (2000)	1316 (2400)	1425 (2600)
Temperatura de Uso Continuo, °C (°F)	982 (1800)	1200 (2192)	1343 (2450)
Punto de Fusión, °C (°F)	1760 (3200)	1760 (3200)	1760 (3200)
Diametro de Fibras Promedio, micrones	3.0	3.0	3.0
Encogimiento Lineal (%)			
24 Hrs @ 1000 °C (1832°F)	2.0	-	-
24 Hrs @ 1200 °C (2192°F)	-	< 3	-
24 Hrs @ 1300 °C (2372°F)	-	-	2.0
Análisis Químico (%)			
Al ₂ O ₃	42-46	44-50	33-37
SiO ₂	50-60	50-56	47-51
ZrO ₂	-	-	13-19
Otros < 1%			
Conductividad Térmica W/m °K (BTU-in /hr-ft²- °F)			
Temperatura Promedio, 128 kg/m³ (8 lb/ft³)			
@ 260 °C (500 °F)	0.06 (0.41)	0.06 (0.41)	0.06 (0.41)
@ 538 °C (1000 °F)	0.12 (0.83)	0.12 (0.83)	0.12 (0.83)
@ 816 °C (1500 °F)	0.20 (1.38)	0.20 (1.38)	0.20 (1.38)
@ 982 °C (1800 °F)	0.26 (1.77)	0.26 (1.77)	0.26 (1.77)
@ 1093 °C (2000 °F)	0.30 (2.05)	0.30 (2.05)	0.30 (2.05)
Temperatura Promedio, 96 kg/m³ (6 lb/ft³)			
@ 260 °C (500 °F)	0.07 (0.52)	0.07 (0.52)	0.07 (0.52)
@ 538 °C (1000 °F)	0.15 (1.01)	0.15 (1.01)	0.15 (1.01)
@ 816 °C (1500 °F)	0.25 (1.76)	0.25 (1.76)	0.25 (1.76)
@ 982 °C (1800 °F)	0.34 (2.37)	0.34 (2.37)	0.34 (2.37)
@ 1093 °C (2000 °F)	0.41 (2.83)	0.41 (2.83)	0.41 (2.83)
Temperatura Promedio, 64 kg/m³ (4 lb/ft³)			
@ 260 °C (500 °F)	0.10 (0.69)	0.10 (0.69)	0.10 (0.69)
@ 538 °C (1000 °F)	0.19 (1.32)	0.19 (1.32)	0.19 (1.32)
@ 816 °C (1500 °F)	0.33 (2.28)	0.33 (2.28)	0.33 (2.28)
@ 982 °C (1800 °F)	0.43 (2.95)	0.43 (2.95)	0.43 (2.95)
@ 1093 °C (2000 °F)	---	0.50 (3.45)	0.50 (3.45)

Fuente: Catalogo de MAX WOOL, 2019

La fibra cerámica fue seleccionada por resistir elevadas temperaturas, 1425°C; además es muy flexible lo cual facilita su montaje. Por tanto, esta capa aislante estará en contacto directo con el incendio, brindando al sistema una reducción de la carga térmica, para que segunda capa de aislamiento no eleve su temperatura por encima de 750 °C, además de brindar protección contra elevadas temperaturas que se generan en un incendio de GLP, alrededor de 1200 °C.

Ambos materiales fueron seleccionados por sus propiedades térmicas, pero para completar el proceso del diseño es necesario saber el espesor de cada uno de ellos.

Para el cálculo de los espesores se utilizara los parámetros mencionados en el punto 2.2.10 y el modelamiento desarrollado en esta sección.

Debido a la enorme cantidad de variables que ingresan en el cálculo del espesor, además de ser un sistema de ecuaciones diferenciales, se desarrolló una hoja de cálculo en Excel, con la finalidad de agilizar el proceso de cálculo.

La hoja de cálculo en Excel, permitirá iterar diferentes tipos de espesores para calcular las temperaturas en cada nodo de manera eficiente.

Los resultados que se obtendrán de la hoja de cálculo permitan seleccionar la mejor combinación de espesores, que garantizaran la protección del tanque esférico de almacenamiento de GLP.

Desarrollo del modelamiento

En las ecuaciones 69, 70, 71, 72 se visualizan las expresiones finales de las ecuaciones diferenciales, al emplear el método de Euler.

1. Parámetros base:

- Temperatura de cada nodo al iniciar el fenómeno, $T_1(0)$, $T_2(0)$, $T_3(0)$ y $T_v(0)$ igual a 20°C .
- Temperatura ambiente $T_a = 20^\circ\text{C}$.
- El área que estará en contacto con el incendio será estimada la siguiente manera:

El tipo de incendio más probable de ocurrir sobre el tanque es el Jet Fire, (Villa, 2019).

Experiencias de incendios en instalaciones similares muestran que nunca se ha desarrollado un incendio que envuelva toda la superficie del tanque, además el Jet Fire más probable que puede existir en esta zona, tal y como lo indica Villa en su estudio técnico (2019), impactara en un área reducida del tanque. Por tal motivo y como criterio base de diseño el área que se considerara, como espacio donde impactara la llama, el 50 % de toda la superficie del tanque; siendo conservador con la finalidad de brindar un grado de seguridad en el diseño.

- La carga térmica que se utilizara en diseño es un parámetro crítico, por tal motivo para su selección se utilizara los criterios mencionados en 2.2.7
La cantidad máxima de flujo calorífica mencionado en este punto es de 200 W/mK .

Sin embargo, también se realizará un cálculo para estimar dicha cantidad, se procede de la siguiente manera:

$$Q_T = \varepsilon_{LLAMA} * \sigma * ((T_{LLAMA} + 273)^4) * \tau$$

94

Siendo:

Q_T : Carga térmica generada por el incendio

ε_{LLAMA} : Emisividad de la llama

σ : Coeficiente de Stefan-Boltzmann

T_{LLAMA} : Temperatura de la llama en °C

T : Transmisitividad atmosférica

Reemplazando valores:

Considerando que la llama es un cuerpo negro, entonces la emisividad es igual a 1. Según Joaquim Casal la transmisitividad se calculará de la siguiente manera:

$$T = 2.02 * (P_w * X)^{-0.09}$$

95

Donde:

P_w : Presión parcial del vapor de agua

X : Distancia entre la fuente y el receptor

Donde X , generalmente tomara el valor de 9. Y la presión parcial del vapor de agua:

$$P_w = 101325 * (HR) * e^{14.4114 - \frac{5328}{T_a + 273.5}}$$

96

La HR es alrededor de 85% y la temperatura ambiente considerada en el cálculo es de 20°C.

Por lo tanto:

$$P_w = 101325 * (0.85) * e^{14.4114 - \frac{5328}{20+273.5}}$$

$$P_w = 2685.91$$

$$T = 2.02 * (2685.91 * x)^{-0.09}$$

Donde x tendra un valor aproximadamente de 9 :

Siendo:

$$T = 0.81$$

Remplazando en (94) :

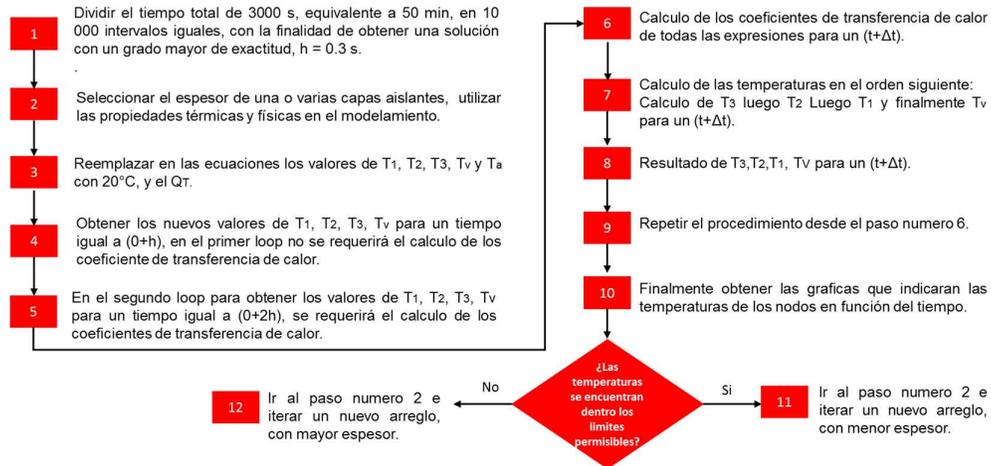
$$Q_T = 1 * 5.67 * (10^{-8}) * (1200 + 273)^4 * 0.81$$

$$Q_T = 216.2 \text{ KW/m}^2$$

Por lo tanto se utilizara el valor de 216.2 kw/m² como carga termica generada en el incendio, por ser mayor que 200 kw/m² (de las tablas referenciadas en 2.2.7) y 71.8 kw/m², del estudio realizado por Villa (2018) ver anexo 1.

2. Desarrollo de las ecuaciones diferenciales:

Acontinuacion se mostrata un flujograma donde se indica, como se desarrollara las ecuaciones diferenciales mostradas 69, 70, 71 y 72 en la hoja de calculo en Excel. Para el modelamiento del tanque esferico de almacenamiento de GLP.



Fuente: Elaboración propia

Resolviendo el sistema de ecuaciones diferenciales haciendo uso del flujograma:

1. Dividir el tiempo total de 3000 s en 10 000 intervalos iguales, con la finalidad de obtener una solución mas exacta, $h = 0.3$ s.
2. El espesor para la primera iteracion sera de $\frac{1}{2}$ " de fibra ceramica y 3.5 "de lana de roca mineral.

La densidad y calor especifico de ambos materiales aislantes estan indicados en el data sheet del fabricante, ver Tabla 7 y Tabla 8. La carcasa metalica es SA -516 - Gr 70, sus propiedades termicas estan señaladas en el codigo ASME Seccion II, el espesor sera de 1.38" (35.052 mm) ello porque en un posible incendio las llamas impactarian en la parte baja del tanque²¹.

L.ROCA MINERAL	Espesor (m)	0.0127	Conductividad Térmica (J/(m.K))	0.03	Calor Especifico (J/(kg.K))	840	Densidad (kg/m3)	144.17
FIBRA CERAMICA	Espesor (m)	0.0889	Conductividad Térmica (J/(m.K))	0.3	Calor Especifico (J/(kg.K))	920	Densidad (kg/m3)	100

²¹ El material y el espesor de la carcasa metálica del tanque esférico de almacenamiento de GLP, fueron obtenidos del Estudio de Riesgos realizados en la planta.

3. Reemplazar en las ecuaciones los valores de T_1 , T_2 , T_3 , T_v y T_a con 20°C y el Q_T .

Siendo:

$T_1, T_2, T_3, T_v(0) = 20^\circ\text{C}$; en (69); para un $t = 0+0.3$

Para T_3 :

$$T_3 = T_3(0) + h$$

$$* \left[\frac{\dot{Q}_T * A_{ext3} - \epsilon_{F.C} * \sigma * ((T_3(0) + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_{ext3} - h_{3a} * (T_3(0) - T_a) * A_{ext3} - \frac{K_z}{e_z} * (T_3(0) - T_z(0)) * A_{Mz}}{\rho_3 * cp_3 * V_3} \right]$$

Donde:

$$T_3(0.3) = T_3(0) + h * \left[\frac{\dot{Q}_T * A_{ext3}}{\rho_3 * cp_3 * V_3} \right]$$

Reemplazando:

$$T_3(0.3) = 20 + 0.3 * \left[\frac{216.2 * 0.5 * A_{exta}}{100 * 920 * V_3} \right]$$

Siendo el diámetro del tanque esférico 20 m, entonces el área:

$$A_{exta} = 4 * \pi * R_3^2 \quad 97$$

Reemplazando: $A_{exta} = 4 * \pi * 10^2 = 1256.64$ y $V_3 = \frac{4 * \pi}{3} * (R_3^3 - R_2^3) = 110.72$

Entonces:

$$T_3(0.3) = 20 + 0.03 * \left[\frac{216.2 * 0.5 * 1256.64}{100 * 920 * 110.72} \right]$$

$$T_3(0.3) = 24.00005$$

Luego para T_2 :

$$T_2(0.3) = 20 + 0.3 * \left[\frac{\frac{K_3}{e_3} * (T_3 - T_2) * A_{M3} - \frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_1) * A_{M2}}{\rho_2 * cp_2 * V_2} \right]$$

$$T_2(0.3) = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para T1:

$$T_1(0.3) = 20 + 0.3 * \left[\frac{\frac{K_2}{e_2} * (T_2 - T_1) * A_{M2} - h_v * (T_1 - T_v) * A_{int}}{\rho_1 * cp_1 * V_1} \right]$$

$$T_1 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para T_v:

$$T_v(0.3) = 20 + h * \left[\frac{h_v * (T_1 - T_v) * A_{int}}{\rho_v * cp_v * V_v} \right]$$

$$T_v(0.3) = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4. Obtener los nuevos valores de T₁, T₂, T₃, T_v para un tiempo igual a (0+h), en el primer loop no se requerirá el cálculo de los coeficiente de transferencia de calor.

Tabla 9 Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min

Temperatura en t= 0+0.3	
T ₃	24.00005
T ₂	20
T ₁	20
T _v	20

Fuente: Elaboración propia

5. El siguiente paso es calcular las temperatura de los nodos para un tiempo igual a (0+2h), en este punto será necesario calcular los coeficientes de transferencia para poder desarrollar las ecuaciones del modelamiento.

6. Calculo de los coeficientes de transferencia de calor de todas las expresiones para un (t+Δt).

7. Calculo de las temperaturas en el orden siguiente:

Calculo de T3 luego T2 Luego T1 y finalmente Tv para un (t+Δt).

En un t = 0 +0.6

Para T₃:

$$T_3 = T_3(0) + 0.6$$

$$* \left[\frac{\dot{Q}_T * A_{ext3} - \epsilon_{F.C} * \sigma * ((T_3(0.3) + 273)^4 - (T_a + 273)^4) * A_{ext3} - h_{3a} * (T_3(0.3) - T_a) * A_{ext3} - \frac{K_3}{e_3} * (T_3(0.3) - T_2(0.3)) * A_{M3}}{\rho_3 * c_{p3} * V_3} \right]$$

Primero se calculará los coeficientes de transferencia de calor, tal y como se indica en 5:

h_{3a}: Coeficiente de transferencia de calor por convección natural entre la superficie esférica y el ambiente.

Según (J.Kumana, 1982), para el área exterior de una superficie esférica, el coeficiente de convección natural se calcula:

$$h_{3a} = \frac{N_u * K_{aire}}{D} \quad 98$$

$$N_u(T_s) = 2 + \frac{0.589 * R_a^{0.25}}{\left(1 + \left(\frac{0.469}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}} \quad 99$$

El número de Prant y Raylight se calcularán según lo indicado en 2.2.13

$$P_r(T_s) = \frac{C_{p_{aire}}(T_s) * \mu(T_s)}{k_{aire}(T_s)} \quad 101$$

$$R_a(T_s) = \frac{g * B(T_s) * (T_s - T_a) * D^3}{\nu_{aire}(T_s) * \alpha_{aire}(T_s)} \quad 102$$

Siendo Ts, la temperatura del sustrato y se define de la siguiente manera:

$$T_s = \frac{T_3 + T_a}{2}$$

103

Para el cálculo de las propiedades del aire se utilizarán los valores presentados en (Incropera, 1993), para poder predecir su comportamiento en función de la temperatura se utilizará las siguientes correlaciones (para ambas el T_s está en grados kelvin) :

$$v_{aire}(T_s) = (4 * 10^{-9} * (T_s)^3 + 6 * 10^{-5} * (T_s)^2 + 0.0673 * (T_s) - 8.6901) * 10^{-6}$$

Siendo las unidades de la viscosidad cinemática de m^2/s

$$\alpha_{aire}(T_s) = (2 * 10^{-11} * (T_s)^4 - 9 * (T_s)^{-8} * (T_s)^3 + 0.0002 * (T_s)^2 + 0.00109 * T_s + 1.1524) * 10^{-6}$$

Siendo las unidades de la difusividad térmica m^2/s

$$K_{aire}(T_s) = 3 * 10^{-18} * (T_s)^6 - 10 * 10^{-1} * (T_s)^5 - 5 * 10^{-1} * (T_s)^4 + 8 * 10^{-8} * (T_s)^3 - 0.0001 * (T_s)^2 + 0.1352 * (T_s) - 3.9899 * 10^{-3}$$

Siendo las unidades de la conductividad térmica $W.m^{-1}.K^{-1}$

Entonces reemplazando valores tenemos

$$T_s = \frac{24.00005 + 20}{2} = 22.000025 \text{ } ^\circ C$$

Siendo:

$$v_{aire}(22.000025 + 273) = 1.65 * 10^{-5}$$

$$\alpha_{aire}(22.000025 + 273) = 1.96 * 10^{-5}$$

$$K_{aire}(22.000025 + 273) = 0.029217$$

El valor de Ra y Pr será:

$$Ra(T_s) = \frac{9.82 * \frac{1}{22.000025 + 273} * (22.000025 - 20) * 20^3}{1.65 * 10^{-5} * 1.96 * 10^{-5}} = 1.6469 * 10^{12}$$

$$P_r(T_s) = \frac{v_{aire}(T_s)}{\alpha_{aire}(T_s)}$$

104

$$P_r(T_s) = \frac{4 * 10^{-9} * (T_s)^3 + 6 * 10^{-5} * (T_s)^2 + 0.0673 * (T_s) - 8.6901}{2 * 10^{-11} * (T_s)^4 - 9 * (T_s)^{-8} * (T_s)^3 + 0.0002 * (T_s)^2 + 0.00109 * T_s + 1.1524}$$

Donde:

$$P_r(T_s + 273) = \frac{1.65 * 10^{-5}}{1.96 * 10^{-5}} = 0.84$$

Para el Nu:

$$Nu(T_s + 273) = 2 + \frac{0.589 * (1.6469 * 10^{12})^{0.25}}{\left(1 + \left(\frac{0.469}{0.84}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}} = 526.26$$

$$h_3 = \frac{Nu * K_{aire}}{D} = \frac{526.26 * 0.029217}{20} = 0.77$$

El A_{ext} considerada será 628.32 m².

La emisividad térmica será de 0.7 la fibra cerámica.

El A_{m3} tendrá un valor de 1275.97m²

La densidad de la fibra cerámica será de 120 kg/m³, según catalogo.

El calor específico de la lana mineral tendrá un valor de 920 J.kg⁻¹.K⁻¹, según catálogo.

Reemplazando en T_3 (0.6) se obtiene que.

$$T_3(0.6) = 28.74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para T_2

$$T_2(0.6) = 20 + 0.6 * \left[\frac{\frac{K_3}{e_3} * (24.00005 - 20) * A_{M3} - \frac{K_z}{e_z} * (20 - 20) * A_{Mz}}{\rho_2 * cp_2 * V_2} \right]$$

Siendo:

$K_3 = 0.26$; según catalogo

$e_3 = 3.5$ " , criterio de diseño

La densidad del material aislante 1, roca mineral será de 144.166 kg/m^3

El valor del calor específico de la roca mineral será de $840 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

El volumen del material aislante 1 tendrá un valor de 0.04 m^3

El valor de A_{m3} de 1275.97 m^2

Reemplazando en $T_2(0.6)$

$$T_2(0.6) = 20 + 0.6 * \left[\frac{\frac{0.3}{0.0889} * (24.00005 - 20) * 1275.97 - \frac{K_z}{e_z} * (20 - 20) * A_{Mz}}{144.166 * 840 * 0.04} \right]$$

$$T_2(0.6) = 22.13 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para T_1 :

$$T_1(0.6) = 20 + 0.6 * \left[\frac{\frac{K_2}{e_2} * (20 - 20) * A_{M2} - h_v * (20 - 20) * A_{int}}{\rho_1 * cp_1 * V_1} \right]$$

$$T_1(0.6) = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para T_v :

$$T_v(0.6) = 20 + 0.6 * \left[\frac{h_v * (20 - 20) * A_{int}}{\rho_v * cp_v * V_v} \right]$$

$$T_v(0.3) = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Es importante mencionar que el cálculo de h_v es el más complicado de realizar, esto debido a su comportamiento como mezcla. Para obtener este valor se hará uso de las correlaciones mostradas en 2.2.10, y el desarrollo de su cálculo para todos los Δt (alrededor de 10000) se completará en la hoja de cálculo de Excel.

8. Resultados de T_3, T_2, T_1, T_v para un $(t+\Delta t)$.

Tabla 10 Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min

Temperatura en $t= 0+0.6$ (s)	
T_3	28.74
T_2	22.13
T_1	20
T_v	20

Fuente: Elaboración propia

9. Repetir el procedimiento desde el paso número 6, debido a la enorme cantidad de data (alrededor de 10000) se mostrarán los demás resultados provenientes de la hoja de cálculo en Excel. Ver Tabla 11.

Para los siguientes parámetros las temperaturas respectivas en cada nodo serán las siguientes:

L.ROCA MINERAL	Espesor (m)	0.0127	Conductividad Térmica (J/(m.K))	0.03	Calor Especifico (J/(kg.K))	840	Densidad (kg/m3)	144.17
FIBRA CERAMICA	Espesor (m)	0.0889	Conductividad Térmica (J/(m.K))	0.3	Calor Especifico (J/(kg.K))	920	Densidad (kg/m3)	100

Tabla 11 Resultados- Hoja de Cálculo en EXCEL

t	Tv(t)	T1(t)	T2(t)	T3(t)
0.0	20	20	20	20
0.3	20	20	20	24.3675746
0.6	20	20	21.1652036	28.7336981
0.9	20	20.0000064	22.968505	33.0984445
1.2	20	20.0000226	25.121092	37.4618413
1.5	20	20.0000506	27.4647154	41.8238832
1.8	20	20.0000914	29.9126597	46.1845466
2.1	20	20.0001457	32.4174022	50.5437972
2.4	20	20.0002136	34.9528936	54.9015955
2.7	20	20.0002954	37.5048491	59.2578983
3.0	20	20.0003911	40.0654299	63.6126609
3.3	20	20.0005009	42.6303287	67.9658369
3.6	20	20.0006246	45.1971729	72.3173794
3.9	20	20.0007625	47.76465	76.6672404
4.2	20	20.0009143	50.3320277	81.0153713
4.5	20	20.0010802	52.8988922	85.3617228
4.8	20	20.0012601	55.4650032	89.7062449
5.1	20	20.0014541	58.0302159	94.0488866
5.4	20	20.0016621	60.5944373	98.3895963
5.7	20.00000001	20.0018841	63.1576027	102.728322
6.0	20.00000001	20.0021202	65.7196627	107.065009
6.3	20.00000001	20.0023702	68.2805759	111.399605
6.6	20.00000001	20.0026343	70.8403053	115.732054
6.9	20.00000001	20.0029124	73.3988157	120.0623
7.2	20.00000001	20.0032044	75.9560732	124.390286
7.5	20.00000002	20.0035105	78.5120438	128.715955
7.8	20.00000002	20.0038305	81.0666934	133.039247
8.1	20.00000002	20.0041645	83.6199878	137.360102
8.4	20.00000003	20.0045124	86.1718921	141.67846
8.7	20.00000003	20.0048743	88.722371	145.994259
9.0	20.00000004	20.0052502	91.2713887	150.307435
9.3	20.00000004	20.00564	93.8189088	154.617925
9.6	20.00000005	20.0060437	96.3648941	158.925665
9.9	20.00000005	20.0064613	98.9093071	163.230587
10.2	20.00000006	20.0068929	101.45211	167.532624
10.5	20.00000006	20.0073384	103.993262	171.831709
10.8	20.00000007	20.0077977	106.532726	176.127772
11.1	20.00000008	20.008271	109.070461	180.420743
11.4	20.00000009	20.0087581	111.606426	184.71055
11.7	20.0000001	20.0092591	114.14058	188.997121
12.0	20.00000011	20.009774	116.67288	193.280381
12.3	20.00000012	20.0103027	119.203284	197.560256
12.6	20.00000013	20.0108452	121.731749	201.836671
12.9	20.00000014	20.0114016	124.25823	206.109547

Fuente: Elaboración propia

La primera columna t, representa el intervalo de tiempo en segundos, la segunda columna la temperatura de la fase vapor de GLP, la tercera, la temperatura en carcasa de acero, la cuarta la temperatura en la lana de roca mineral y el último representa la temperatura en la fibra cerámica.

Dicha tabla es muy extensa y continúa hasta alcanzar el tiempo total que es 3000 segundos, ver tabla Tabla 12.

Tabla 12 Resultados- Hoja de Cálculo en EXCEL

t	Tv(t)	T1(t)	T2(t)	T3(t)
2995.2	21.2262478	50.0664011	610.993855	1000.50542
2995.5	21.22653352	50.069306	610.995053	1000.50543
2995.8	21.22681928	50.0722108	610.99625	1000.50544
2996.1	21.22710508	50.0751157	610.997448	1000.50545
2996.4	21.22739091	50.0780205	610.998646	1000.50546
2996.7	21.22767678	50.0809252	610.999843	1000.50548
2997.0	21.22796268	50.08383	611.001041	1000.50549
2997.3	21.22824863	50.0867347	611.002238	1000.5055
2997.6	21.22853461	50.0896394	611.003436	1000.50551
2997.9	21.22882062	50.092544	611.004633	1000.50552
2998.2	21.22910668	50.0954486	611.005831	1000.50554
2998.5	21.22939277	50.0983532	611.007028	1000.50555
2998.8	21.2296789	50.1012577	611.008226	1000.50556
2999.1	21.22996507	50.1041623	611.009423	1000.50557
2999.4	21.23025127	50.1070667	611.010621	1000.50558
2999.7	21.23053751	50.1099712	611.011818	1000.5056
3000.0	21.23082379	50.1128756	611.013015	1000.50561

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se puede visualizar que las temperaturas en cada nodo en un tiempo de 50 min, será de:

Tabla 13 Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min

Temperatura en t= 0+3000 (s)	
T ₃	1000.51°C
T ₂	611.01°C
T ₁	50.11°C
T _v	21.23°C

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, el conjunto de mantas aislantes seleccionado cumple con los parámetros base de diseño mencionadas en 2.2.10. Además, ningún aislante sobre pasa su temperatura de operación.

Para realizar el contraste con el estándar NFPA 290, se recurrirá nuevamente a la hoja de cálculo en Excel.

Para:

L.ROCA MINERAL	Espesor (m)	0.0127	Conductividad Térmica (J/(m.K))	0.03	Calor Especifico (J/(kg.K))	840	Densidad (kg/m3)	144.17
FIBRA CERAMICA	Espesor (m)	0.0889	Conductividad Térmica (J/(m.K))	0.3	Calor Especifico (J/(kg.K))	920	Densidad (kg/m3)	100

Los resultados en la hoja de cálculo, que simulan las condiciones generadas en la prueba de la NFPA 290, son:

Tabla 14 Resultados NFPA 290- Hoja de Cálculo en EXCEL

t	T1(t)	T2(t)	T3(t)
0.0	20	20	20
0.3	20	20	28.23986068
0.6	20	20.00541527	36.47737544
0.9	20.00000003	20.01623823	44.71249556
1.2	20.00000008	20.03246125	52.94511349
1.5	20.00000022	20.05407667	61.17511334
1.8	20.00000045	20.08107672	69.40237226
2.1	20.00000083	20.1134536	77.62676076
2.4	20.00000137	20.15119942	85.84814273
2.7	20.0000021	20.19430619	94.0663754
3.0	20.00000306	20.24276587	102.2813093
3.3	20.00000427	20.29657029	110.4927879
3.6	20.00000577	20.35571122	118.7006481
3.9	20.00000758	20.42018033	126.9047193
4.2	20.00000973	20.48996916	135.104824
4.5	20.00001225	20.56506916	143.3007773
4.8	20.00001518	20.64547168	151.4923869
5.1	20.00001853	20.73116793	159.679453
5.4	20.00002235	20.82214902	167.861768
5.7	20.00002665	20.91840591	176.0391169
6.0	20.00003146	21.01992946	184.2112765
6.3	20.00003682	21.12671036	192.3780161
6.6	20.00004276	21.23873919	200.5390965
6.9	20.0000493	21.35600635	208.6942708
7.2	20.00005647	21.47850211	216.8432838
7.5	20.0000643	21.60621659	224.9858719
7.8	20.00007282	21.73913973	233.1217632
8.1	20.00008205	21.87726131	241.2506777
8.4	20.00009203	22.02057094	249.3723265

Fuente: Elaboración propia

Donde la primera columna representa el intervalo de tiempo, la segunda la temperatura en plancha de acero, la tercera la temperatura en la roca mineral, el segundo aislante, la cuarta la temperatura en la fibra cerámica que estará en contacto con la antorcha (en la prueba).

Al igual que en el anterior resultado, la tabla es muy extensa y continua hasta alcanzar el tiempo total de 3000 segundos ver Tabla 15.

Tabla 15 Resultados NFPA 290- Hoja de Cálculo en EXCEL

t	T1(t)	T2(t)	T3(t)
2997.0	53.82552609	766.4937395	1267.617992
2997.3	53.8290344	766.4952225	1267.618
2997.6	53.83254266	766.4967054	1267.618009
2997.9	53.83605087	766.4981883	1267.618018
2998.2	53.83955901	766.4996712	1267.618026
2998.5	53.8430671	766.501154	1267.618035
2998.8	53.84657514	766.5026368	1267.618043
2999.1	53.85008312	766.5041196	1267.618052
2999.4	53.85359104	766.5056023	1267.61806
2999.7	53.85709891	766.507085	1267.618069
3000.0	53.86060672	766.5085677	1267.618078

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se puede visualizar que las temperaturas en cada nodo en un tiempo de 50 min, será de:

Tabla 16 Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min

Temperatura en t= 0+3000	
T ₁	1267.62 °C
T ₂	766.5°C
T ₃	53.86°C

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, el conjunto de mantas aislantes seleccionado cumple con los parámetros base de diseño mencionadas en 2.2.10 y con la NFPA 290 ya que el T₃ (temperatura del acero es menor a 427°C). Además, ningún nodo sobre pasa su temperatura de operación.

El sistema de aislamiento sometido a ambos modelamientos, cumple satisfactoriamente con los parámetros mencionados en 2.2.10. Es decir, es una posible configuración para el diseño final.

Se iterarán diferentes espesores y configuraciones de los materiales aislantes mencionados en este capítulo, con la finalidad de escoger al que brinde un adecuado nivel de seguridad y sea económicamente viable, la configuración con el mínimo espesor posible.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados

5.1.1. Resultados descriptivos

Se realizaron diversas iteraciones y combinaciones en la hoja de caculo con los siguientes materiales aislantes:

Lana de roca mineral y Fibra cerámica

De dichas iteraciones, los espesores que podrían utilizarse para brindar protección adecuada a los tanques esféricos, serán los siguientes:

A. Primer arreglo:

Espesor de lana de roca mineral: ½”.

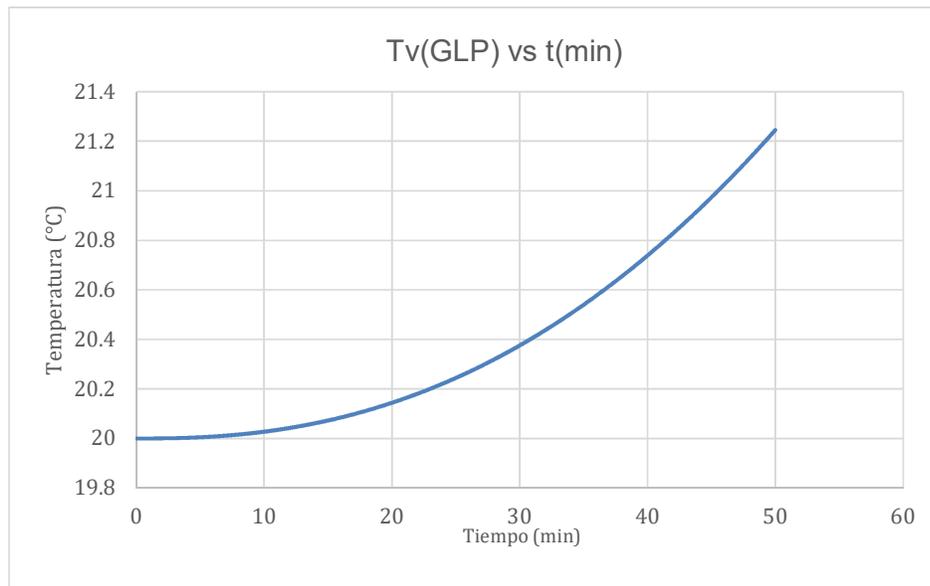
Espesor de fibra cerámica: 3.5 “.

Las propiedades de los aislantes son:

L.ROCA MINERAL	Espesor (pulg)	0.5	Conductividad Térmica (J/(m.K))	0.03	Calor Especifico (J/(kg.K))	840	Densidad (kg/m3)	144.166
FIBRA CERAMICA	Espesor (pulg)	3.5	Conductividad Térmica (J/(m.K))	0.3	Calor Especifico (J/(kg.K))	920	Densidad (kg/m3)	100

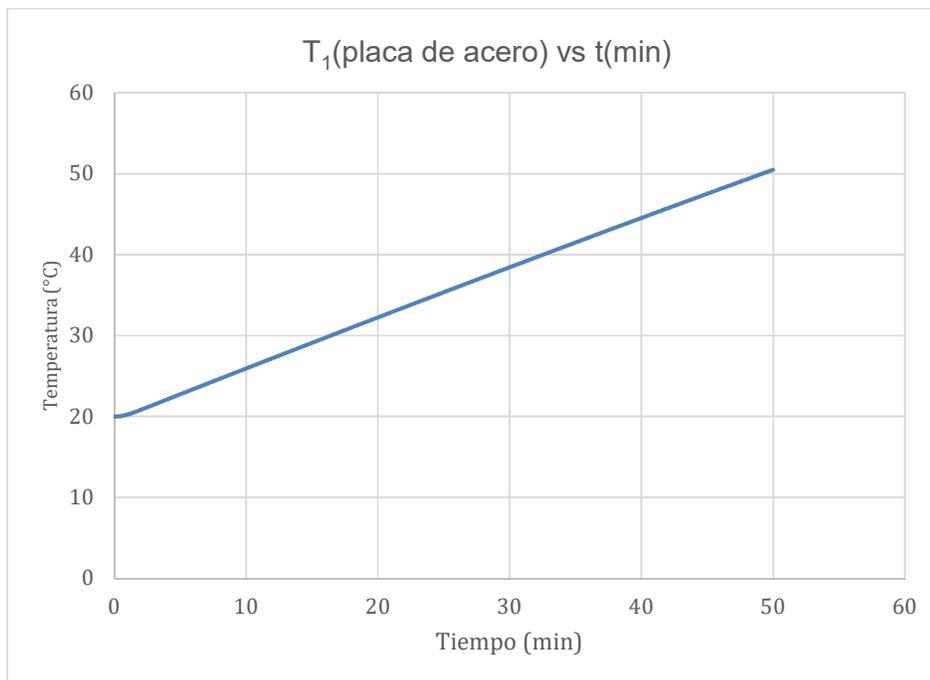
Los resultados para el modelamiento de un incendio en los tanques esféricos de almacenamiento de GLP, presentan las siguientes graficas:

Figura 45 Temperatura de vapor de GLP en función del tiempo



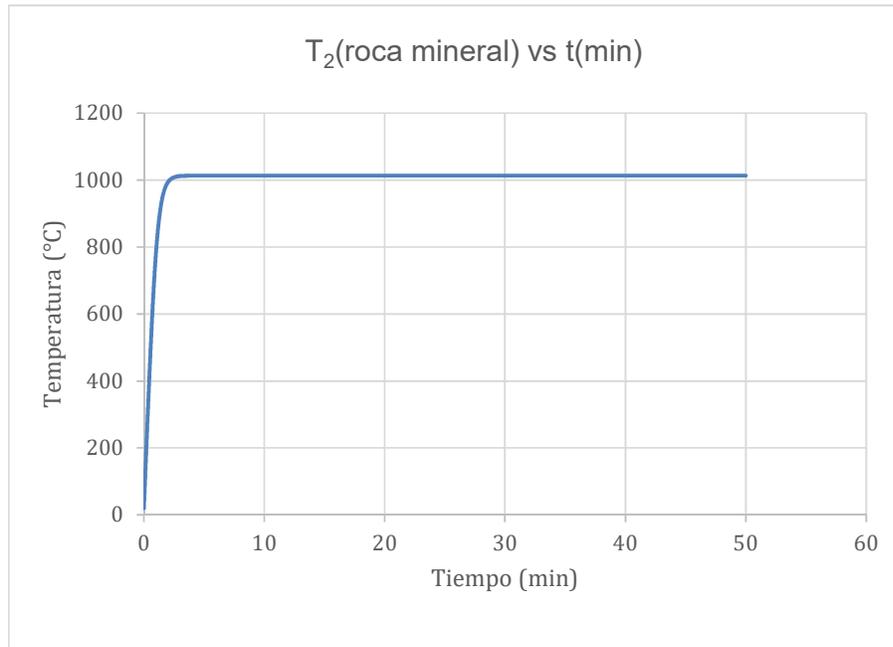
Fuente: Elaboración propia

Figura 46 Temperatura del acero en función del tiempo



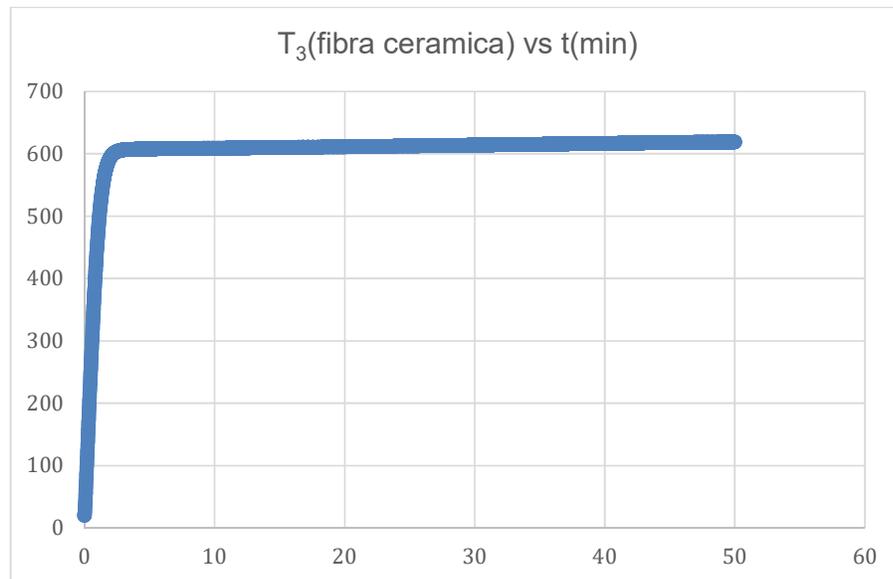
Fuente: Elaboración propia

Figura 47 Temperatura de la fibra ceramica en función al tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 48 Temperatura de la lana de roca mineral en función al tiempo



Fuente: Elaboración propia

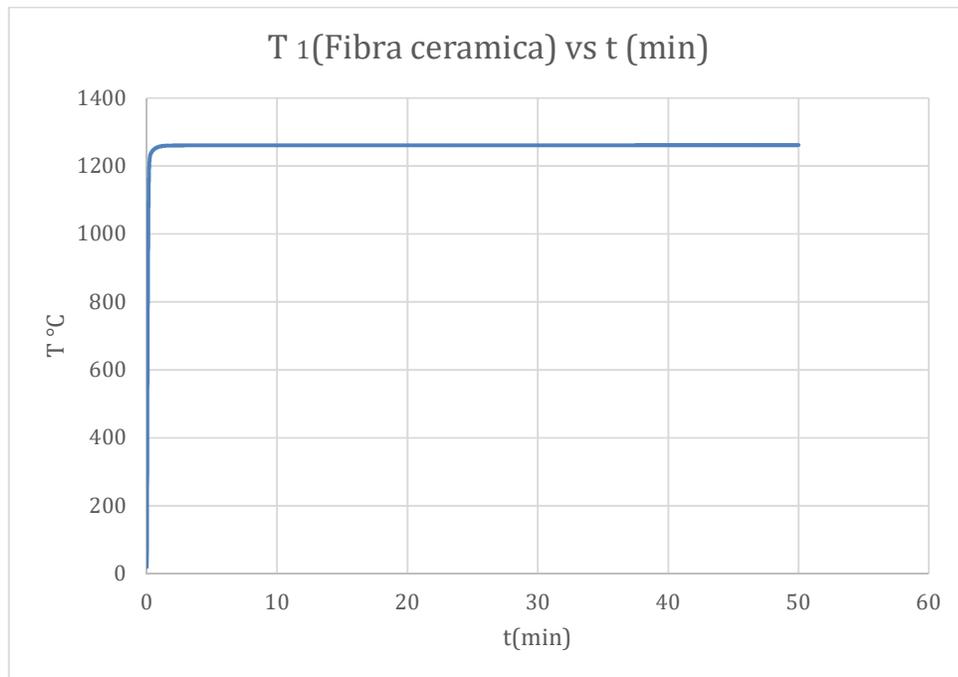
Tabla 17 Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min

Temperatura en t= 0+3000 (s)	
T ₃	1000.51°C
T ₂	611.01°C
T ₁	50.11°C
T _v	21.23°C

Fuente: Elaboración propia

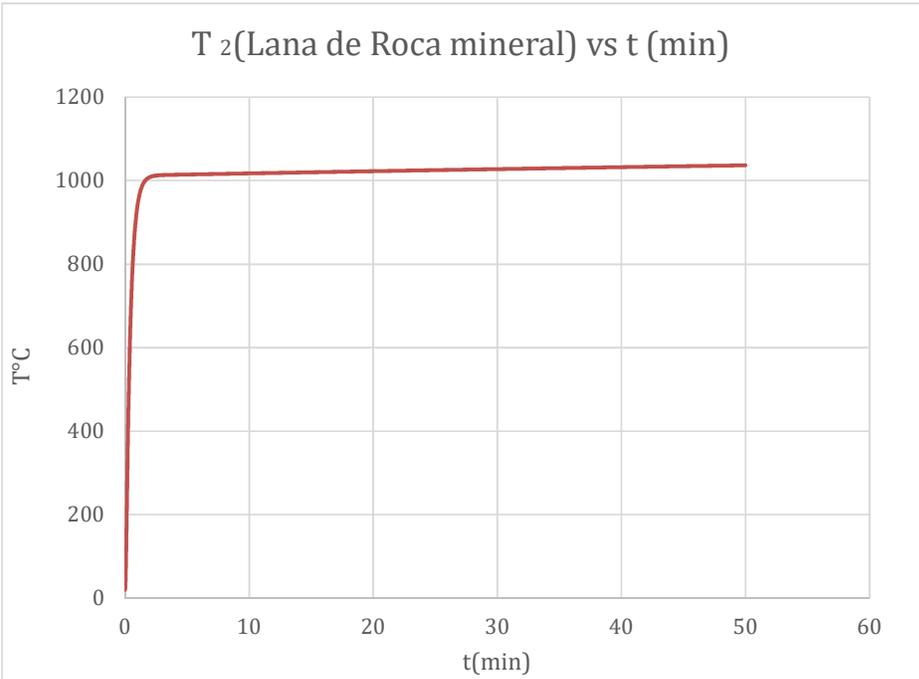
Los resultados para el modelamiento de la prueba de la NFPA 290 son:

Figura 49 Temperatura de la fibra cerámica en función al tiempo



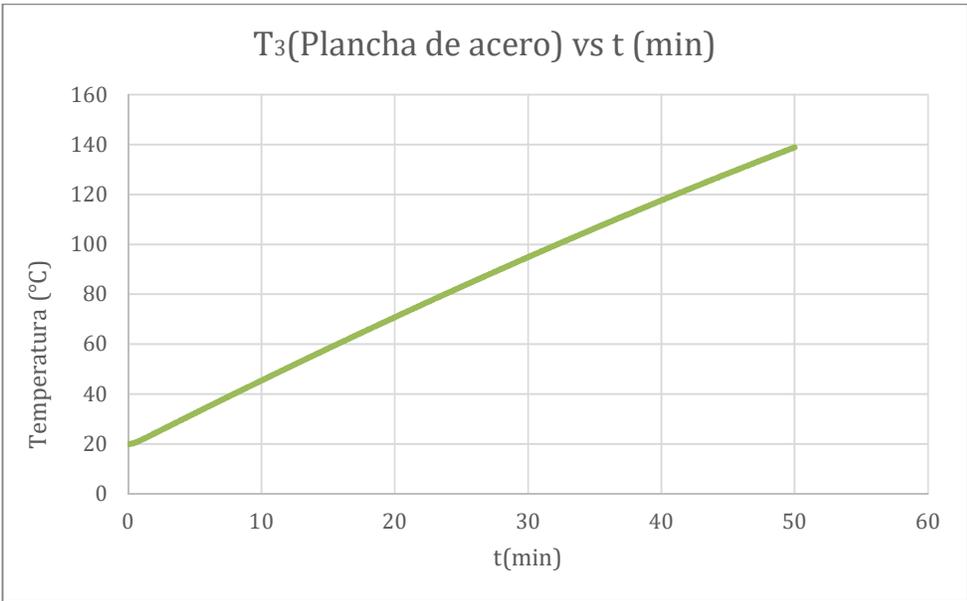
Fuente: Elaboración propia

Figura 50 Temperatura de la roca de mineral en función al tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 51 Temperatura del acero en función del tiempo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 18 Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min

Temperatura en t= 0+3000 (s)	
T ₁	1267.62 °C
T ₂	766.5°C
T ₃	53.86°C

Fuente: Elaboración propia

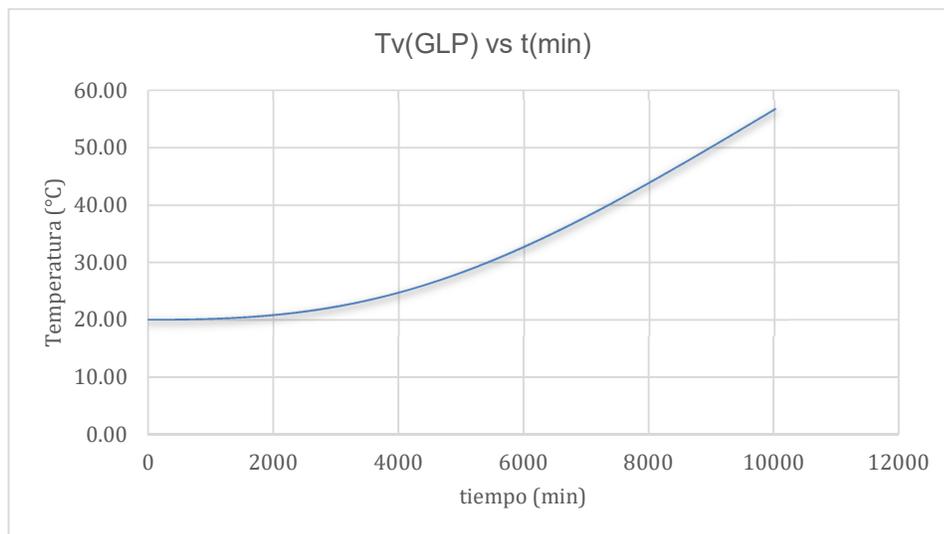
B. Segundo arreglo:

Para este arreglo se consideró solo al aislante de fibra cerámica, dando que, según diversas iteraciones al disminuir el espesor de la roca mineral, el diseño todavía garantizaba el cumplimiento de los parámetros base de diseño.

➤ Espesor de fibra cerámica: 0.01778 mm

FIBRA CERAMICA	Espesor (m)	0.01778	Conductividad Térmica (J/(m.K))	0.3	Calor Especifico (J/(kg.K))	920	Densidad (kg/m3)	100
-----------------------	--------------------	---------	--	-----	------------------------------------	-----	-------------------------	-----

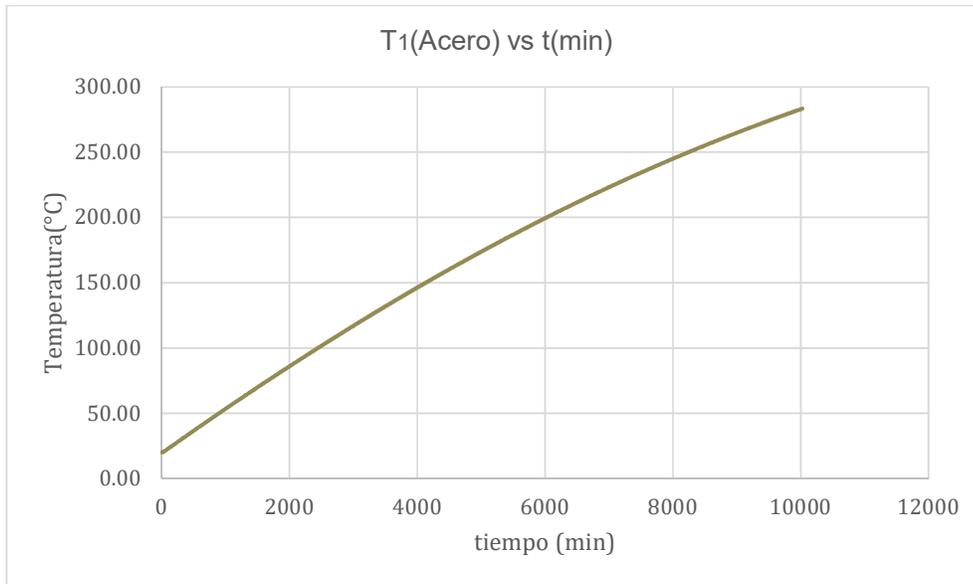
Figura 52 Temperatura de vapor de GLP en función del tiempo



Fuente: Elaboración propia

Variación de la temperatura del GLP en fase vapor en función del tiempo.

Figura 53 Temperatura del acero en función del tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 54 Temperatura de la fibra cerámica en función al tiempo



Fuente: Elaboración propia

Variación de la temperatura de la fibra cerámica en función del tiempo.

Tabla 19 Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min

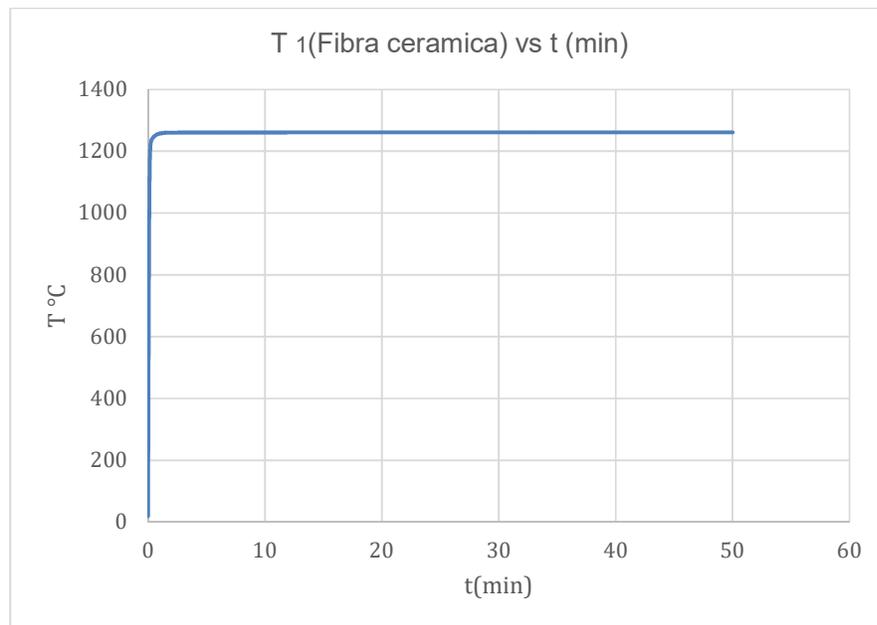
Temperatura en t= 0+3000	
T_2	984.13 °C
T_1	283.37 °C
T_v	56.75 °C

Fuente: Elaboración propia

Debido a que el cálculo de todas las temperaturas en función tiempo de manera manual sería un trabajo muy arduo, se presentara todos estos valores en el anexo 4, que son el resultado del modelamiento automatizado en la hoja de cálculo de Excel.

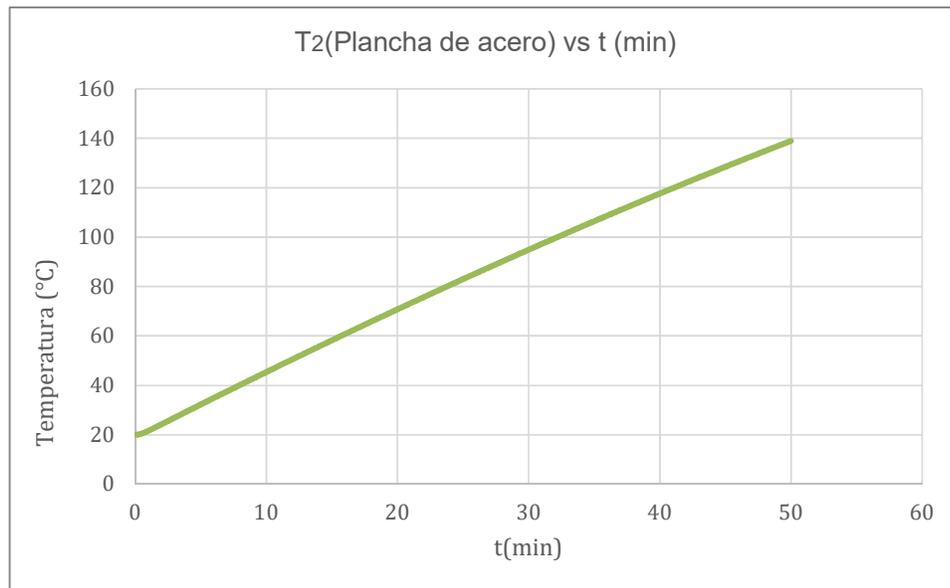
Los resultados para el modelamiento de la prueba de la NFPA 290 son:

Figura 55 Temperatura de la fibra cerámica en función al tiempo



Fuente: Elaboración propia

Figura 56 Temperatura del acero en función del tiempo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 20 Temperatura en cada nodo para un tiempo de 50 min

Temperatura en t= 0+3000	
T ₁	1246.97 °C
T ₂	328.4 °C

Fuente: Elaboración propia

- ❖ Se realizaron diversas iteraciones con diferentes espesores, para configuraciones de uno y dos aislamientos, (fibra cerámica y lana de roca mineral).
- ❖ Ambos resultados son aceptables pero el más eficiente, en términos económicos, es donde solo se plantea utilizar fibra cerámica, ya que con 0.01778 m de espesor cumple con los parámetros base del diseño; siendo más importante el que limita la temperatura del acero hasta un valor de 300 °C; además de cumplir satisfactoriamente con lo requerido por la NFPA 290, ya que la temperatura en la plancha metálica es de 328.4 °C.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

H1. Hipótesis específica 1

Seleccionando el material aislante adecuadamente entonces resistirá las temperaturas alcanzadas en un incendio ubicado en el patio de tanques esféricos de almacenamiento de GLP.

Resultados:

Con la selección adecuada del material aislante se garantiza que resistirá las temperaturas alcanzadas en un incendio ubicado en el patio de tanques esféricos de almacenamiento de GLP, el cual es $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El material seleccionado fue la Fibra cerámica.

H2. Hipótesis específica 2

Determinando el espesor del sistema de aislamiento térmico entonces los tanques esféricos de almacenamiento de GLP contarán con un adecuado nivel de seguridad.

Resultados:

Con los siguientes resultados, se determinó el espesor del sistema de aislamiento térmico que garantizara un adecuado nivel de seguridad en los tanques esféricos de almacenamiento de GLP.

El espesor determinado fue: 0.01778 m

Pero la fibra cerámica se encuentra en espesores comerciales de $\frac{1}{2}$ " , $\frac{3}{4}$ " , 1". Siendo el inmediato superior seleccionado el de $\frac{3}{4}$ ".

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares

En (Landucci, Molag y Cozzani, 2009) , la carga térmica considerada en el incendio fue de 180 kw/m^2 y fue totalmente envolvente. El material y el espesor del material aislante fueron roca mineral y 40 mm respectivamente, para un tiempo de 100 min. La carga térmica utilizada en la presente investigación fue de $216,2 \text{ kw/m}^2$ y el tipo de material aislante y el espesor fueron Fibra cerámica y 17 mm respectivamente, para un tiempo de 50 min.

En el Informe técnico “Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks” publicado en 1988, se sometió a un tanque horizontal de almacenamiento de GLP a un incendio de tipo Pool Fire. En la tercera prueba, la prueba más crítica, se cubre al tanque con un aislamiento con 100 mm de material aislante (lana mineral) y se somete a un incendio de Pool Fire. Luego de 90 min la temperatura máxima en la carcasa del tanque horizontal fue de 215°C , demostrando de manera experimental que un aislamiento térmico protege adecuadamente a un tanque inmerso en un incendio. El aislamiento térmico utilizado en este estudio fue considerado en las iteraciones de la presente tesis.

En la investigación “Experimental and analytical investigation of thermal coating effectiveness for 3m³ LPG tanks engulfed by fire”, es un estudio teórico experimental el cual consiste en someter a un tanque horizontal de GLP a un incendio del tipo pool fire, dicho tanque está recubierto con una película de material intumescente como aislamiento térmico. Los resultados muestran que este material es efectivo en la protección del tanque, evitando que suceda un BLEVE. En dicha investigación muestran los gradientes de temperatura en la parte metálica y en el arreglo bifásico del GLP. En la presente tesis se utiliza como un documento de partida, en el cual se analiza los puntos críticos según el gradiente de temperatura en cada capa del arreglo: GLP- tanque-aislamiento

7. CONCLUSIONES

1. El diseño del aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio parte realizando diversos cálculos térmicos para diferentes perfiles seleccionados, para cada uno de ellos se obtuvo diversos gráficos que brindaron información sobre la temperatura en cada nodo en función del tiempo, por lo cual se seleccionó el mínimo necesario (en cantidad y espesor) que garantizara una adecuada protección contra incendios.
2. Se logró seleccionar el un material aislante, fibra cerámica, el cual resistirá resistirá las temperaturas alcanzadas en un incendio ubicado en el patio de tanques esféricos de almacenamiento de GLP.
3. Se logró determinar el espesor del material aislante, 0.01905m, el cual brindara un adecuado nivel de seguridad a los tanques esféricos de almacenamiento de GLP, cumpliendo estrictamente con los parámetros de diseño y la NFPA 290.

8. RECOMENDACIONES

1. El diseño del aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio presentado cumple el objetivo pactado el cual es la protección de los tanques esféricos, sin embargo dicho diseño podría mejorar, considerando el agua proveniente de los monitores contra incendios que sirve de ayuda para contener el siniestro, esto porque el agua absorbería parte de la carga térmica generada por el incendio. Por lo tanto, se recomienda para futuras investigaciones considerar la reducción de la carga térmica generada en un incendio por el uso del agua a través de monitores e hidrantes contra incendios.
2. La fibra cerámica no es la única opción para la selección de aislamiento como sistema de protección contra incendio, existen otros tipos de recubrimientos aislantes como, por ejemplo: pintura intumescente. Por lo tanto, es viable seleccionar otro material diferente al planteado, pero se debe tener especial cuidado con los parámetros de diseño tales como: temperatura máxima de operación y conductividad térmica, ya que ellos definirán la resistencia a la temperatura y la reducción de la carga térmica generada en un incendio.
3. El espesor de 0.01778 m, es el mínimo valor que garantiza una protección adecuada para los tanques esféricos de GLP, ello porque el material del aislamiento es fibra cerámica. Sin embargo, si el material o materiales fueran otros, el espesor variaría. Por lo tanto, se recomienda en futuras investigaciones realizar las iteraciones correspondientes para determinar un nuevo espesor en función al nuevo material seleccionado, el cual dependerá en gran medida del coeficiente de conductividad térmica.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Technical Data Book – Petroleum Refining, metric ed., 1997. pp. 1333.

Disponible en:

“http://ajaysingh.in/files/2813/8293/7455/Chemical_Engineering_API_Petroleum_Refining.pdf”

- API 2218, Fireproofing Practices in Petroleum and Petrochemical Processing Plants. Environment, 1999. no. August, pp. 1-73.
- API 2510 A, American Petroleum Institute Information Handling Services, 2000. , 1994. pp. 56.
- ARTURSON, G., Scientific and clinical paper: The tragedy of San Juanico—the most severe LPG disaster in history. Burns, 1987. vol. 13, pp. 87-102. ISSN 0305-4179. DOI: 10.1016/0305-4179(87)90096-9
- AYDEMIR, N.U., MAGAPU, V.K., SOUSA, A.C.M. y VENART, J.E.S., Thermal response analysis of LPG tanks exposed to fire. Journal of Hazardous Materials, 1988. vol. 20, no. C, pp. 239-262. ISSN 03043894. DOI 10.1016/0304-3894(88)87015-8.
- B.DROSTE AND W.SHOEN, FULL SCALE FIRE TESTS WITH UNPROTECTED AND THERMAL INSULATED LPG STORAGE TANKS. Tep. Apx., 1988. vol. 60, no. 8, pp. 27-30.
- BAHADORI, Alireza, 2014. Design and Application of Thermal Insulation [en línea]. S.l.: s.n. ISBN 9780128000106.
Disponible en:
“<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128000106000010>.”
- BEYNON, G. V, COWLEY, L.T., SMALL, L.M., WILLIAMS, I., BOX, P.O. y CHL, Chester, FIRE ENGULFMENT OF LPG TANKS: HEATUP, A PREDICTIYE MODEL. , 1988. vol. 20, pp. 227-238.
- BIRK, A.M., Scale effects with fire exposure of pressure-liquefied gas tanks. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1995. vol. 8,

no. 5, pp. 275-290. ISSN 09504230. DOI 10.1016/0950-4230(95)00028-Y.

- BIRK, A.M. y YOON, K.T., High-temperature stress-rupture data for the analysis of dangerous goods tank-cars exposed to fire. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006. vol. 19, no. 5, pp. 442-451. ISSN 09504230. DOI 10.1016/j.jlp.2005.11.003.
- BUBBICO, Roberto y MAZZAROTTA, Barbara, Dynamic response of a tank containing liquefied gas under pressure exposed to a fire: A simplified model. *Process Safety and Environmental Protection* [en línea], 2018. vol. 113, pp. 242-254. ISSN 09575820.
Disponible en:
“<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2017.10.016>.”
- CALLISTER, William D. y RETHWISCH, David G., *Materials Science and Engineering 9th Edition. Computing in Science & Engineering*, 2014. ISSN 0969-2126. DOI 10.1016/j.str.2011.03.005.
- COTGREAVE, T., 1992. *Passive fire protection: performance requirements and test methods*. 1992. London: Steel Construction Institute for HSE.
- EGOR P POVOP, 2000. *Mecánica de Sólidos. Second*. México: s.n. ISBN 970-17-0398-7.
- ESPINOZA, Ciro. *Metodología de la investigación tecnológica*. Primera ed. Huancayo: s.n. ISBN 9786120002223.
- FRENCH MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, BLEVE in an LPG storage Facility at a refinery Feyzin. , 2008. no. 1, pp. 1-20.
- GONG, Y.W., LIN, W.S., GU, A.Z. y LU, X.S., A simplified model to predict the thermal response of PLG and its influence on BLEVE. *Journal of Hazardous Materials*, 2004. vol. 108, no. 1-2, pp. 21-26. ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2004.01.012.
- HADJISOPHOCLEOUS, G. V., SOUSA, A.C.M. y VENART, J.E.S., A study of the effect of the tank diameter on the thermal stratification in LPG tanks subjected to fire engulfment. *Journal of Hazardous Materials*, 1990.

vol. 25, no. 1-2, pp. 19-31. ISSN 03043894. DOI 10.1016/0304-3894(90)85067-D.

- HANBOOK NFPA 20, 2017. Stationary Fire Pumps Handbook. S.I.: s.n. ISBN 9781455909346.
- HEMMATIAN, Behrouz, PLANAS, Eulàlia y CASAL, Joaquim, Fire as a primary event of accident domino sequences: The case of BLEVE. Reliability Engineering and System Safety [en línea], 2015. vol. 139, pp. 141-148. ISSN 09518320. DOI 10.1016/j.ress.2015.03.021.

Disponible en:

“<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.021>.”

- H. SAMPIERI, R., F. COLLADO, C., & B.LUCIO, P. (2014). Metodología de la investigación. México D.F.: McGraw-Hill.
- INCROPERA, Frank, 1993. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. S.I.: s.n. ISBN 9780471457282.
- J. P. HOLMAN, Heat Transfer (10th Edition). The McGraw-Hill Companies, 2010. ISSN 0046-225X. DOI 10.1603/EN11245.
- JOAQUIM CASAL, 2009. Análisis del riesgo en instalaciones industriales. S.I.: s.n. ISBN 8483012278.

Disponible en:

“<https://books.google.com/books?id=U8PRs-nLWqQC&pgis=1>.”

- LANDUCCI, Gabriele, COZZANI, Valerio y BIRK, Michael, 2013. Heat Radiation Effects. S.I.: Elsevier. ISBN 9780444543233.

Disponible en:

“<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-54323-3.00005-1>.”

- LANDUCCI, Gabriele, D'AULISA, Arianna, TUGNOLI, Alessandro, COZZANI, Valerio y BIRK, Albrecht Michael, Modeling heat transfer and pressure build-up in LPG vessels exposed to fires. International Journal of Thermal Sciences, 2016. vol. 104, pp. 228-244. ISSN 12900729. DOI 10.1016/j.ijthermalsci.2016.01.002.

Disponible en:

“<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.01.002>.”

- LANDUCCI, Gabriele, MOLAG, Menso y COZZANI, Valerio, Modeling the performance of coated LPG tanks engulfed in fires. *Journal of Hazardous Materials*, 2009. vol. 172, no. 1, pp. 447-456. ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2009.07.029.
- LANDUCCI, Gabriele, MOLAG, Menso, REINDERS, Johan y COZZANI, Valerio, Experimental and analytical investigation of thermal coating effectiveness for 3 m³ LPG tanks engulfed by fire. *Journal of Hazardous Materials*, 2009. vol. 161, no. 2-3, pp. 1182-1192. ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2008.04.097.
- MALLOY F, 1969. *Thermal Insulation*. New York, NY: s.n.
- MATERIALS, *Passive Protection*, 290, 2018.
- NFPA, 2017. *LP-Gas Code Handbook*. S.l.: s.n. ISBN 9781455912827.
- QIAO, Zhihua, WANG, Zhi, ZHANG, Chenxin, YUAN, Shuangjie, ZHU, Yaqun y WANG, Jixiao, *CFD Modeling of LPG Vessels Under Fire Exposure Conditions*. *AIChE Journal*, 2012. vol. 59, no. 12, pp. 215-228. ISSN 12350621. DOI 10.1002/aic.
- SABINO, Carlos A., *El proceso de investigacion*. , 1996. pp. 92.
- SALZANO, Ernesto, PICOZZI, Bruno, VACCARO, Salvatore y CIAMBELLI, Paolo, *Hazard of pressurized tanks involved in fires*. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2003. vol. 42, no. 8, pp. 1804-1812. ISSN 08885885. DOI 10.1021/ie020606r.
- SERGINGSEG S.A.C., *ZETA GAS ANDINO Elaborado por* : , 2018.
- SFPE, 2015. *SFPE Handbook of Fire Protection Eng*. S.l.: s.n. ISBN 0877654514.
- SMITH, William F., 2006. *Fundamentos de la Ciencia e Ingenieria de Materiales*. Cuarta ed. S.l.: s.n. ISBN 9701056388.
- TNO, *PSG2: Methods for the calculation of physical effects (yellow book)*. *Publication Series on Dangerous Substances*, 2005. no. PSG2, pp. 870.
- TUGNOLI, Alessandro, COZZANI, Valerio, DI PADOVA, Annamaria, BARBARESI, Tiziana y TALLONE, Fabrizio, *Mitigation of fire damage and escalation by fireproofing: A risk-based strategy*. *Reliability Engineering*

and System Safety, 2012. vol. 105, pp. 25-35. ISSN 09518320. DOI 10.1016/j.ress.2011.11.002.

Disponible en:

“<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2011.11.002>.”

- US FEDERAL GOVERNMENT, Code of federal Regulation - CFR 49. , 2012.
- VILLA, Marco, Estudio Técnico sobre Uso de un Sistema de Aislamiento Térmico como Protección Contra Incendios en Esferas que Almacenan GLP. , 2019.
- YI, Hang y WANG, Sam, Evaluation of LPG Pool Fire Heat Flux – A Literature Review FINAL REPORT BY. , 2017. no. March.
- YUNES A CENGEL, 2012. Termodinámica. Séptima ed. S.I.: s.n. ISBN 970-0-07-352932-5.
- YUNUS A. CENGEL Y JOHN M. CIMBALA, 2006. Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones. S.I.: s.n. ISBN 970-10-5612-4.

10.ANEXOS

10.1. ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

10.2. ANEXO 2: ANALISIS DE CONSECUENCIAS

TÍTULO: DISEÑO DE UN AISLAMIENTO TERMICO COMO SISTEMA DE PROTECCION CONTRA INCENDIO PARA LOS TANQUES ESFERICOS DE ALMACENAMIENTO DE GLP EN UNA PLANTA DE ABASTECIMIENTO DE GLP, UBICADA EN EL CALLAO

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN
<p align="center">PROBLEMA GENERAL</p> <p>¿Cómo diseñar un aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio que brinde un adecuado nivel de seguridad a los tanques esféricos de almacenamiento de GLP en una planta de abastecimiento ubicada en el Callao?</p>	<p align="center">OBJETIVO GENERAL</p> <p>Diseñar un aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio que brinde un adecuado nivel de seguridad a los tanques esféricos de almacenamiento de GLP en una planta de abastecimiento de GLP en el Callao.</p>	<p align="center">HIPÓTESIS GENERAL</p> <p>Si se diseña un aislamiento térmico como sistema de protección contra incendio entonces los tanques esféricos de almacenamiento de GLP de una planta de abastecimiento de GLP contarán con un nivel de seguridad adecuado.</p>	<p align="center">VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <p>Diseño de un aislamiento térmico</p>	<p align="center">TIPO DE INVESTIGACIÓN:</p> <p align="center">Tecnológica.</p> <p align="center">NIVEL DE INVESTIGACIÓN:</p> <p align="center">Aplicada.</p> <p align="center">DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:</p> <p align="center">Diseño no experimental</p>
<p align="center">PROBLEMAS ESPECIFICOS</p> <p>PE1. ¿Cómo seleccionar un material aislante que resista las condiciones generadas en un incendio ubicado en el patio de tanques esféricos de almacenamiento de GLP?</p> <p>PE2. ¿Cómo determinar el espesor del aislamiento térmico para que, en caso de un incendio, los tanques esféricos de almacenamiento de GLP cuenten con un adecuado nivel de seguridad?</p>	<p align="center">OBJETIVOS ESPECIFICOS</p> <p>O1. Seleccionar el tipo de material aislante que resista las temperaturas alcanzadas en un incendio ubicado en el patio de tanques esféricos de almacenamiento de GLP.</p> <p>O.2. Determinar el espesor del aislamiento térmico para que, en caso de un incendio, los tanques esféricos de almacenamiento de GLP cuenten con un adecuado nivel de seguridad.</p>	<p align="center">HIPÓTESIS ESPECIFICAS</p> <p>H.1. Seleccionando el material aislante adecuadamente entonces resistirá las temperaturas alcanzadas en un incendio ubicado en el patio de tanques esféricos de almacenamiento de GLP.</p> <p>H.2. Determinando el espesor del sistema de aislamiento térmico entonces los tanques esféricos de almacenamiento de GLP contarán con un adecuado nivel de seguridad</p>	<p align="center">VARIABLE DEPENDIENTE</p> <p>Protección de los tanques esféricos de almacenamiento de GLP.</p>	

Fuente : Elaboración propia

Análisis de consecuencias planteado en el “Estudio Técnico sobre Uso de un Sistema de Aislamiento Térmico como Protección Contra Incendios en Esferas que Almacenan GLP”

Análisis:

Para el análisis de posibles peligros, en el área estanca, donde se encuentran los tanques esféricos de GLP se considera lo siguiente:

- Se asumirá que las fuentes críticas se encontraran en fase líquida, por lo que el análisis estará centrado en las tuberías que transportan GLP líquido.
- Se realizara el análisis de consecuencias en el software Aloha para el cálculo de los posibles riesgos en la planta Z GAS Andino, además se expondrá graficas indicando los niveles de radiación térmica a medida que la distancias desde el centro del Jet Fire disminuyen.
- Para los cálculos de consecuencia de la nube de vapor y Jet fire se supondrá que el tanque esférico almacena Butano y Propano respectivamente.
- Tomando como referencia la mayor carga calorífica resultante en los cálculos de consecuencias y diversas bibliografías; se evaluara cual es más crítico, además se realizara una simulación con un sistema de aislamiento demostrando su efectividad, frente al escenario más crítico, como sistema contra incendio.

Posibles escenarios:

Los posibles escenarios se dividirán en dos; Jet fire y dispersión de nube de vapor.

Figura 57, Posibles escenarios de peligros en la zona estanca de los tanques esféricos de almacenamiento

Tipo de peligro	N° de Escenario	Descripción del Escenario
Escenario Incendio Tipo Jet Fire por fuga de propano en el sistema de purga del tanque esférico	Escenario N° 01	Incendio Tipo Jet Fire producido por una fuga de ¾" de diámetro en la junta soldada de la válvula de purga en la Esfera N°5
	Escenario N° 02	Incendio Tipo Jet Fire producido por una fuga en un orificio de 0.007 m en la empaquetadura de la brida de la válvula de purga en la Esfera N°5
	Escenario N° 03	Incendio Tipo Jet Fire producido por una fuga en un orificio de 0.007 m en la empaquetadura de la brida de la válvula de cierre en la Esfera N°5

Fuente: Elaboracion propia

Escenario N° 01: Incendio Tipo Jet fire Producido por una Fuga de un Orificio de 2" en la junta soldada de la válvula de purga en Esfera N° 05

Descripción del Escenario N° 01

El orificio en la junta soldada de la válvula de purga es de 3/4", dicha junta se encuentra en la parte baja del tanque esférico de almacenamiento, la fuga encuentra un punto de ignición, produciéndose un incendio de tipo Jet fire, para este caso se considera que el tanque esférico contiene solo Propano y se encuentra a una temperatura de 10 °C, con una presión de 74 psi. La humedad relativa es 73% y la dirección del viento es de Suroeste a Noreste.

Simulación del Cálculo de Radiación Térmica para el Escenario N° 01

Las condiciones ingresadas en el Software Aloha para todas las simulaciones son resumidas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

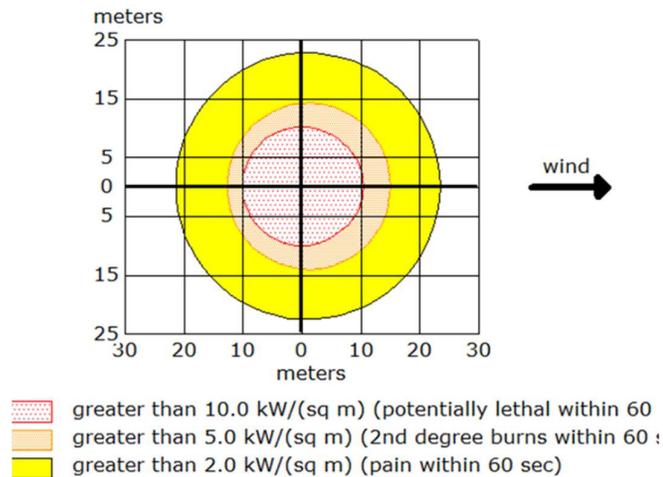
Datos

Velocidad	H.R	T ambiente	T de almacenamiento	Orificio	Diametro equivalente del dique
1.8 m/s	75%	24.2°C	10 °C	0.007 m	31.36 m

Fuente: Elaboracion propia

Resultados obtenidos por el software Aloha

Figura 58, Radiación térmica del Jet Fire, en el escenario N° 01



Fuente: Software Aloha

Figura 59, Alcance de la radiación térmica en un Jet Fire en la planta Z gas, en el escenario N° 01



Fuente: Software Aloha-Google Earth Pro

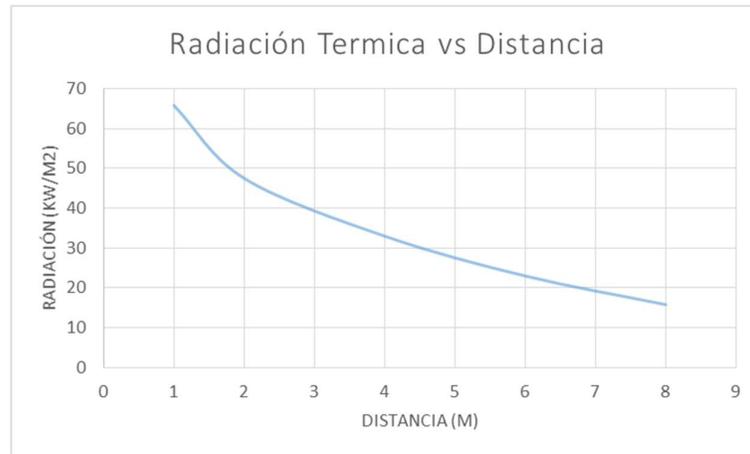
Tabla 21, Cuadro resumen

Escenario N° 01: Incendio Tipo Jet Fire en la Esfera N°05	Diámetro de la fuga (pulg)	Radiación Térmica (Kw/m ²)	Distancia calculada (m)
	3/4	10	10
		5	13
		2	22

Fuente: Elaboración propia

Para distancias menores a 10 metros, la relación entre la radiación y la distancia estará representado en la Figura 60, dicha grafica es el resultado de calcular en el Aloha la radiación térmica a diferentes distancias.

Figura 60, Radiación vs Distancia



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 60, se visualiza cual es el comportamiento de la radiación en función de la distancia, desde el centro del Jet Fire hasta el punto de afectación. Además, la mayor carga térmica registrada en este escenario fue de 65.8Kw/m2.

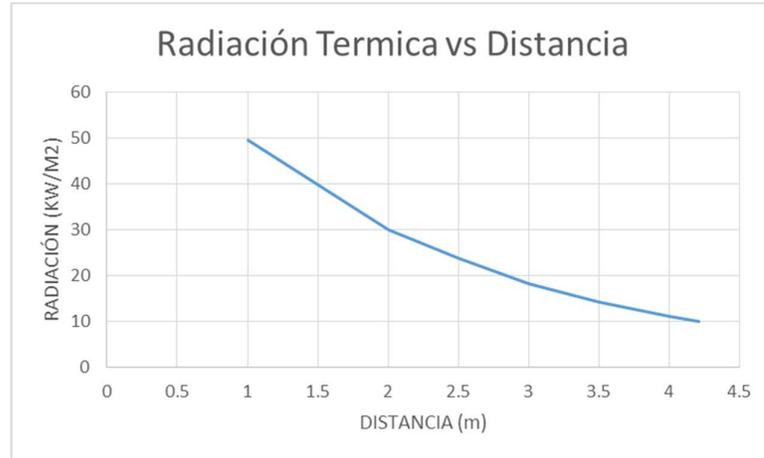
Escenario N° 02: Incendio Tipo Jet Fire Producido por una Fuga de un Orificio de 0.007 m en la empaquetadura de la válvula de purga en la Esfera N° 05

Descripción del Escenario N° 02

El orificio en la empaquetadura de la válvula de purga es de 0.007 m, dicho accesorio se encuentra en la parte baja del tanque esférico de almacenamiento, la fuga encuentra un punto de ignición, produciéndose un incendio de tipo Jet Fire y se depositara en la parte baja del tanque, para este caso se considera que el tanque esférico contiene solo Propano y se encuentra a una temperatura de 10 °C, con una presión de 74 psi. La humedad relativa es 73% y la dirección del viento es de Suroeste a Noreste.

Simulación del Cálculo de Radiación Térmica para el Escenario N° 02.

Figura 61, Radiación térmica del Jet Fire, en el escenario N° 02



Fuente: Software Aloha

En la figura N° 4, se visualiza cual es el comportamiento de la radiación en función de la distancia, desde el centro del Jet Fire hasta el punto de afectación. Asu ves, la mayor carga térmica registrada en este escenario fue de 49.4Kw/m².

Cuadro resumen

Escenario N° 02: Incendio Tipo Pool Fire en la Esfera N°05	Diámetro de la fuga (m)	Radiación Térmica (Kw/m ²)	Distancia calculada (m)
	0.007	10	4.21
		5	5.91
		2	9.05

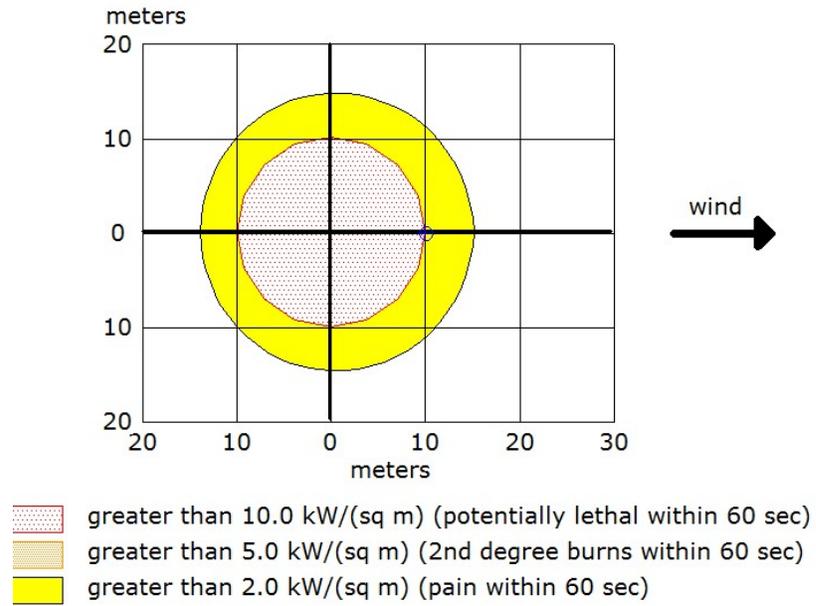
Fuente: Elaboracion propia

Escenario N° 03: Incendio Tipo Jet Fire Producido por una Fuga de un Orificio de 0.007 m en la empaquetadura de la válvula de cierre en la Esfera N° 05

Descripción del Escenario N° 03.

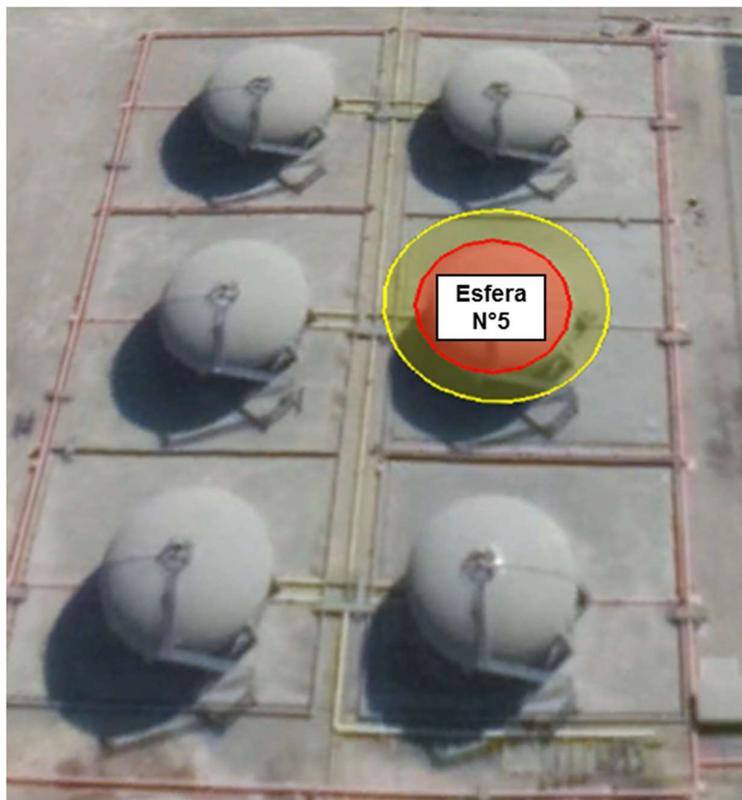
El orificio en la empaquetadura de la válvula de cierre es de 0.007 m, dicho accesorio se encuentra en acometida del tanque esférico de almacenamiento, la fuga encuentra un punto de ignición, produciéndose un incendio de tipo Jet Fire y se depositara en la parte baja del tanque, para este caso se considera que las tuberías contienen solo Propano y se encuentra a una temperatura de 24.2 °C, con una presión de 104 psi. La humedad relativa es 73% y la dirección del viento es de Suroeste a Noreste.

Figura 62, Radiación térmica del Jet Fire, en el escenario N° 03



Fuente: Software Aloha

Figura 63, Alcance de la radiación térmica en un Jet Fire en la planta Z gas, en el escenario N° 03



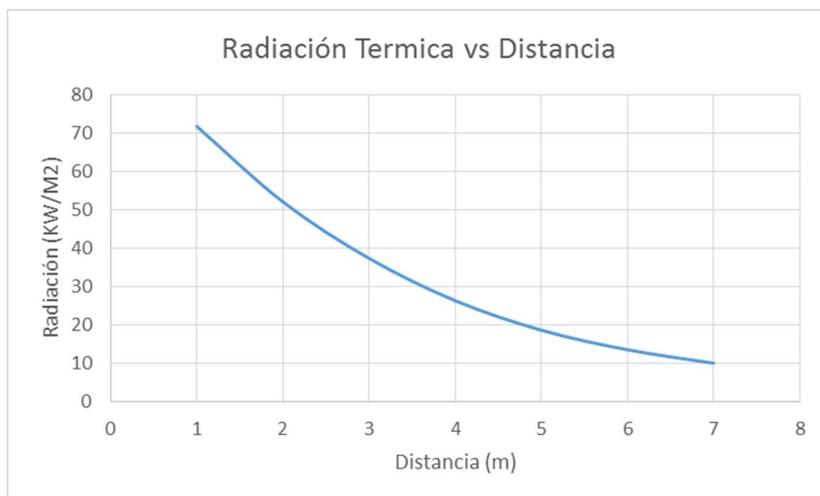
Fuente: Software Aloha-Google Earth Pro

Tabla 22, Cuadro resumen

Escenario N° 03: Incendio Tipo Jet Fire en la Esfera N°05	Diámetro de la fuga (m)	Radiación Térmica (Kw/m ²)	Distancia calculada (m)
	0.007	10	7.04
		5	9.88
		2	15.15

Fuente: Elaboración propia

Figura 64, Radiación térmica del Jet Fire, en el escenario N° 03



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 64, se visualiza cual es el comportamiento de la radiación en función de la distancia, desde el centro del Jet Fire hasta el punto de afectación. La mayor carga térmica registrada en este escenario fue de 71.8Kw/m².

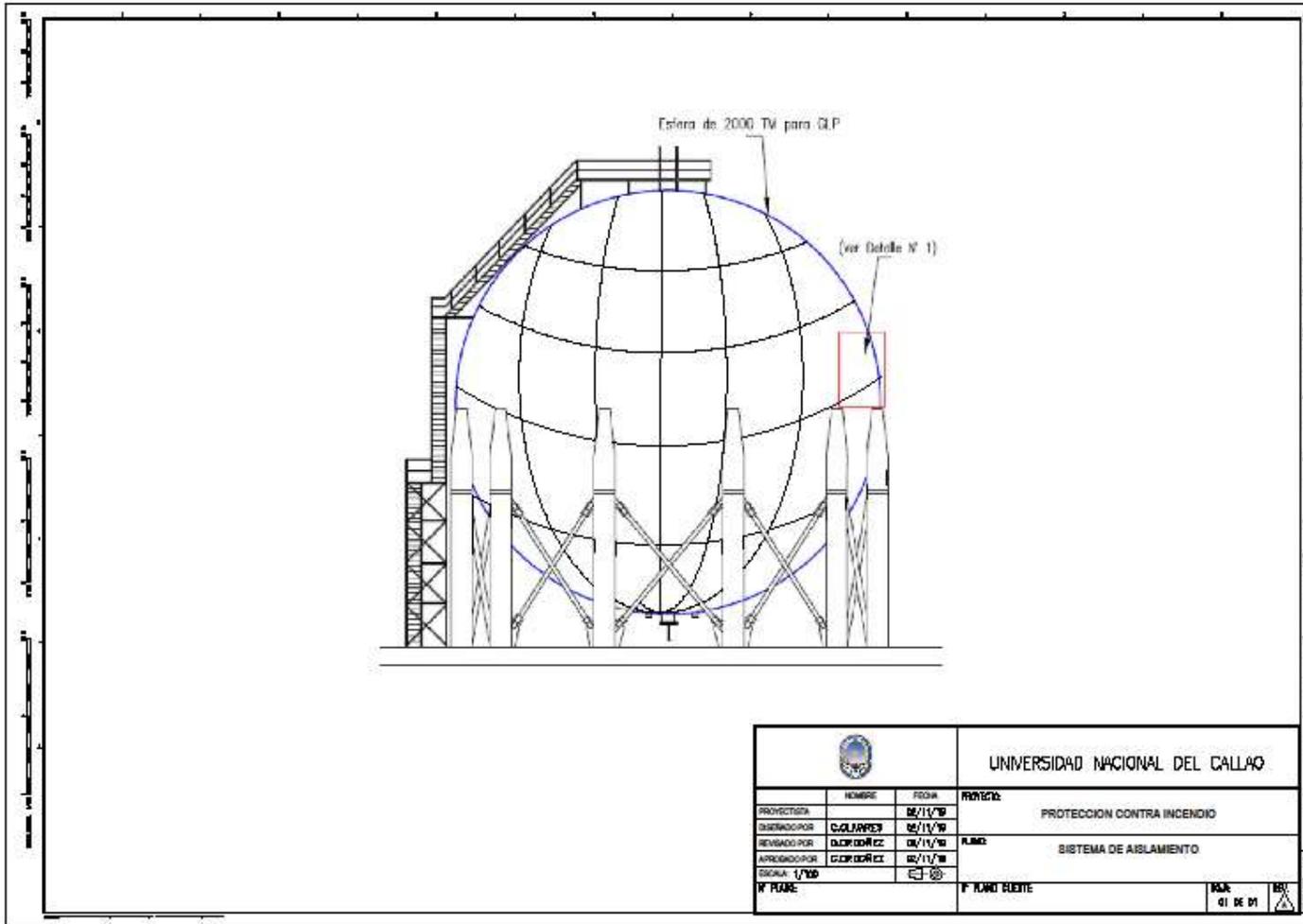
Conclusiones

- Las circunferencias de color rojo presentas tienen un radio de 10 m e indica que a distancias menores a esta la radiación térmica es mayor a 10kw/m².
- **La mayor carga de radiación térmica fue registrado en el escenario N°3, con un valor de 71.8kw/m².**
- Tomando como referencia la mayor carga calorífica resultante en los cálculos de consecuencias y diversas bibliografías; se evaluara cual es más crítico, además se realizara una simulación con un sistema de aislamiento demostrando su efectividad, frente al escenario más crítico, como sistema contra incendio.

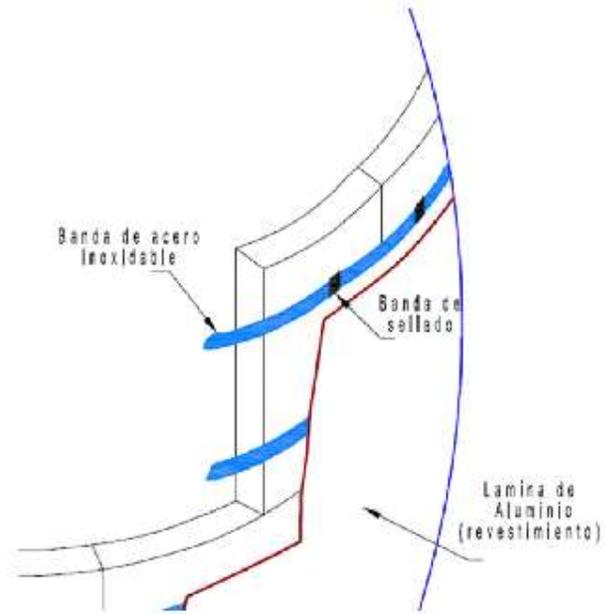
10.3. ANEXO 3: PLANOS DEL AISLAMIENTO TERMICO EN LAS ESFERAS

1. Plano del aislamiento térmico
2. Plano detalle del montaje del aislamiento térmico

10.4. ANEXO 4: TABLA DE RESULTADOS DEL MODELAMIENTO PARA LA FIBRA CERAMICA CON UN ESPESOR DE 0.01778 mm.



		UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO				
PROYECTISTA	NOMBRE	FECHA	PROYECTO			
		02/11/10	PROTECCION CONTRA INCENDIO			
DISEÑADOR POR	C. COLARPEZ	02/11/10	PLANO			
REVISADO POR	C. GONZALES	02/11/10	SISTEMA DE AISLAMIENTO			
APROBADO POR	C. GONZALES	02/11/10				
ESCALA	1/100					
F. PLANO		F. PLANO FUENTE	<table border="1"> <tr> <td>MAK</td> <td>41 DE 01</td> <td></td> </tr> </table>	MAK	41 DE 01	
MAK	41 DE 01					



DETALLE N°1, MONTAJE DEL AISLAMIENTO

		UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO				
PROYECTISTA	NOMBRE	FECHA	PROYECTO			
DISENADO POR	C. GONZALEZ	02/11/10	PROTECCION CONTRA INCENDIO			
REVISADO POR	C. GONZALEZ	02/11/10	PLANO			
APROBADO POR	C. GONZALEZ	02/11/10	SISTEMA DE AISLAMIENTO			
ESCALA	1/100					
N° PLANO		F. PLANO SIEMPRE	<table border="1"> <tr> <td>MAK</td> <td>41 DE 01</td> <td></td> </tr> </table>	MAK	41 DE 01	
MAK	41 DE 01					

Tabla 23 Resultados de la Hoja de cálculo para un aislamiento de Fibra mineral con 0.01778 m de espesor

t	Tv(t)	T1(t)	T2(t)
0	20.00	20	20
0.3	20.00	20	56.15
0.6	20.00	20	92.04
0.9	20.00	20	127.66
1.2	20.00	20.01	162.97
1.5	20.00	20.01	197.94
1.8	20.00	20.02	232.55
2.1	20.00	20.03	266.75
2.4	20.00	20.04	300.5
2.7	20.00	20.05	333.75
3	20.00	20.06	366.46
3.3	20.00	20.07	398.57
3.6	20.00	20.08	430.04
3.9	20.00	20.1	460.79
/			
2996.4	56.67	283.17	984.12
2996.7	56.67	283.19	984.12
2997	56.68	283.2	984.12
2997.3	56.69	283.22	984.12
2997.6	56.69	283.24	984.12
2997.9	56.70	283.25	984.13
2998.2	56.71	283.27	984.13
2998.5	56.71	283.29	984.13
2998.8	56.72	283.31	984.13
2999.1	56.73	283.32	984.13
2999.4	56.73	283.34	984.13
2999.7	56.74	283.36	984.13
3000	56.75	283.37	984.13

Fuente: Elaboración propia

Donde:

t : Tiempo en (s)

Tv: Temperatura del vapor de GLP (°C)

T1: Temperatura de la placa metálica (°C)

T2: Temperatura de la fibra cerámica (°C)