

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA PETROLERA**



**PROYECTO DE GRADO**

**“CONTROL DE SEGURIDAD DE TRANSPORTE DE  
COMBUSTIBLES A TRAVÉS DE UN MODELO DINÁMICO  
CONSIDERANDO LA VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL  
FLUIDO EN TANQUES CISTERNAS PARCIALMENTE  
LLENOS”**

**POSTULANTE:**

**UNIV. CANAVIRI CALLE GROVER WENCESLAO**

**TUTOR:**

**M. SC. ING. MARIO DAZA BLANCO**

**LA PAZ - BOLIVIA**

**2024**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## DEDICATORIA

*A toda mi familia, por su apoyo constante y motivación, por su cariño y paciencia, por creer en mí y por estar conmigo en los momentos difíciles y felices de mi vida.*

*A mis queridos padres Julio y Lidia, por su incondicional apoyo y constante impulso para poder culminar satisfactoriamente mi formación profesional.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, quiero agradecer a Dios por haberme dado fortaleza y constancia para alcanzar esta meta; por darme las fuerzas necesarias para no claudicar en el camino.

A mis queridos padres, por todo el apoyo que me brindaron a lo largo de toda mi carrera universitaria, sacrificando gran parte de su vida para mi formación y educación, me siento muy orgulloso de tenerlos como padres, espero algún día recompensar todo su sacrificio incondicional que me brindaron. Que dios les de mucha vida, salud y fortaleza. Gracias por darme la vida y hacerme una persona de bien.

A mis hermanos Ericka, Lilian, Julio y Reyna, que de una u otra manera me apoyaron en todo momento y por estar hay siempre que los necesite; a mis tías Deysi, Juana y Patricia por todos sus valiosos consejos y apoyo para superarme a lo largo de mi vida.

A la Universidad Mayor de San Andrés y mi querida carrera de ingeniería Petrolera, Gas y Procesos, por ser mi casa de estudios y proporcionarme la formación que tengo al día de hoy, siempre estaré agradecido.

A mi tutor M.sc. Ing. Mario Daza B., por su tiempo brindado, conocimiento compartido, sus valiosos aportes y sugerencias.

A todos los docentes de la carrera de Ingeniería Petrolera, por su conocimiento transmitido y experiencias compartidas. Gracias por todo.

A los gerentes, jefes y operadores de YPFB – AVIACION, especialmente al Ing. Carlos Guzmán, Oscar Mamani, Walter Monroy, Adalid Huarahuara, Marcos Gonzales, Willy Yujra. Gracias por su amistad, enseñanza, constancia y por todos los momentos compartidos durante la pasantía realizada en dicha planta. Siempre les estaré agradecido.

## INDICE

<b>RESÚMEN EJECUTIVO</b> .....	<b>1</b>
<b>1 CAPÍTULO I: GENERALIDADES</b> .....	<b>3</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.2 ANTECEDENTES .....	4
1.2.1 Antecedentes generales.....	4
1.2.2 Antecedentes académicos .....	5
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.3.1 Identificación del problema.....	6
1.3.2 Formulación del problema.....	7
1.4 OBJETIVOS .....	8
1.4.1 Objetivo general .....	8
1.4.2 Objetivos específicos.....	8
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	8
1.5.1 Justificación técnica.....	8
1.5.2 Justificación teórica .....	9
1.5.3 Justificación económica.....	9
1.5.4 Justificación socio-ambiental.....	9
1.6 ALCANCE .....	10
1.6.1 Alcance temático .....	10
1.6.2 Alcance temporal.....	10
1.6.3 Alcance geográfico.....	10
<b>2 CAPÍTULO II: EL PROCESO DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES EN TANQUES CISTERNA</b> .....	<b>12</b>
2.1 CAMIÓN CISTERNA.....	12
2.1.1 Características.....	12
2.1.2 Grado de llenado.....	14
2.1.3 Limpieza.....	14

2.1.4	Mantenimiento de Registros.....	14
2.1.5	Mantenimiento y Cuidado.....	14
2.2	PRINCIPIO DE VACIADO DE TANQUES.....	15
2.3	NORMATIVA DE DISEÑO NFPA 385.....	17
2.3.1	Diseño de tanques.....	18
2.3.1.1	Tanque fijo .....	18
2.3.1.2	Tanque móvil .....	18
2.3.2	Tipo de fluido a transportar.....	19
2.3.2.1	Líquido combustible. ....	19
2.3.2.2	Líquido Clase II .....	19
2.3.2.3	Líquido Clase III .....	19
2.3.3	Fundamentos teóricos para los cálculos .....	19
2.3.3.1	Ecuación de Bernoulli: .....	19
2.3.3.2	Potencia de una bomba: .....	21
2.3.3.3	Presión hidrostática sobre superficies curvas .....	21
2.4	ANÁLISIS DE APLICACIÓN DE FUERZAS DE INERCIA .....	22
2.4.1	Cargas que soporta un tanque cisterna.....	22
2.4.2	Fuerzas esenciales que se presentan en el transporte de líquidos en un tanque cisterna .....	23
2.4.2.1	Fuerza de inercia .....	23
2.4.2.2	Carga (Fp).....	24
2.4.2.3	Fuerza de rozamiento .....	24
2.4.2.4	Fuerza de sujeción.....	25
2.4.3	Efectos de la carga.....	25
2.4.3.1	El efecto ola .....	25
2.5	CARACTERÍSTICAS DEL AREA DE ALMACENAMIENTO DENTRO DE LA PLANTA DE PALMASOLA.....	27
2.5.1	Características de capacidad de almacenamiento .....	27

2.6	DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CARGA Y DESCARGA DE LOS TANQUES CISTERNA .....	28
2.6.1	Inspector de planta .....	28
2.6.2	Inspección Precarga.....	29
2.6.2.1	Inspector SSHDV (Seguridad, salud e higiene para distribución y ventas).....	29
2.6.2.2	Proceso de carga .....	30
2.6.2.3	Proceso de descarga .....	30
2.7	PROCESO ACTUAL DE CONTROL DE LA SEGURIDAD EN EL TANQUE CISTERNA SEGÚN YPFB .....	33
2.7.1	Requisitos Talento Humano: .....	33
2.7.1.1	Personal de seguridad y vigilancia.....	33
2.7.2	Requisitos Seguridad industrial, Medio Ambiente y Salud: .....	33
2.7.3	Requisitos Camión cisterna .....	34
2.7.4	Distrito comercial amazónico.....	35
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO III: MODELO DINÁMICO DE LA VARIACIÓN DE VELOCIDAD DEL FLUIDO EN TANQUES CISTERNA .....</b>	<b>36</b>
3.1	PRINCIPIO DE INERCIA Y ESTABILIDAD DE UN LÍQUIDO EN UN TANQUE.....	36
3.1.1	Principio de inercia .....	36
3.1.2	Estabilidad del líquido en el tanque .....	37
3.2	MODELO DINÁMICO DE VELOCIDAD PARA TANQUES CISTERNA PARCIALMENTE LLENOS.....	40
3.2.1	Modelo de superficie libre de líquido .....	41
3.2.2	Desplazamiento de carga líquida y momentos de masa .....	44
3.3	MODELO TRIDIMENSIONAL DINÁMICO VARIABLE .....	46
3.3.1	Sistemas de coordenadas .....	47
3.3.2	Definición matemática del sistema de coordenadas fijo .....	47

3.3.3	Ecuaciones de movimiento.....	49
<b>4</b>	<b>CAPITULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA.....</b>	<b>50</b>
4.1	ANÁLISIS DE LAS CONFIGURACIONES DE TANQUE UTILIZADAS ACTUALMENTE.....	50
4.1.1	Datos generales del tanque cisterna: .....	50
4.1.2	Cálculo del momento de inercia para tanque de sección transversal elíptica 51	
4.2	VARIACIÓN DE LA INERCIA DENTRO DEL TANQUE CISTERNA	55
4.2.1	Análisis cuantitativo de desplazamiento de carga líquida y momentos de masa .....	55
4.2.2	Simulación de la variación con 15 m <sup>3</sup> de combustible.....	58
4.2.3	Simulación de la variación con 20 m <sup>3</sup> de combustible.....	60
4.2.4	Simulación de la variación con 30 m <sup>3</sup> de combustible.....	62
4.2.5	Simulación de la variación con 40 m <sup>3</sup> de combustible.....	63
4.2.6	Análisis de resultados general.....	65
4.3	VARIACIÓN LA VELOCIDAD EN FUNCIÓN DE LA COORDENADA DE INCLINACIÓN FINAL DEL TANQUE.....	66
4.4	PROCEDIMIENTO PROPUESTO DE MANEJO OPERATIVO EN TANQUES CISTERNAS CON DATOS ÓPTIMOS PARA EL TRANSPORTE DE Diesel Oil .....	74
4.4.1	Objetivo del manual.....	75
4.4.2	Diagrama de flujo de manejo óptimo del tanque .....	75
4.4.3	Alcance del manual .....	76
4.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	77
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO V: ANÁLISIS ECONÓMICO.....</b>	<b>78</b>
5.1	FUNDAMENTOS.....	78
5.2	COSTOS FIJOS.....	79
5.3	COSTOS VARIABLES .....	79

5.4	DEPRECIACIÓN DEL PROYECTO .....	80
5.5	INVERSIÓN INICIAL .....	81
5.6	ANÁLISIS DE COSTO Y BENEFICIO .....	81
<b>6</b>	<b>CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>83</b>
6.1	CONCLUSIONES.....	83
6.2	RECOMENDACIONES .....	84
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>88</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

### **Capítulo I:**

Figura 1. 1: Accidente de tanque cisterna de combustible .....	3
Figura 1. 2: Ubicación de Palmasola.....	11
Figura 1. 3: Área de tanques cisterna .....	11

### **Capítulo II:**

Figura 2. 1: Tanque Cisterna Común .....	12
Figura 2. 2 Tanque cisterna con sistema de aspersion.....	13
Figura 2. 3 Principio de vaciado de tanques .....	15
Figura 2. 4 Principio de Bernoulli .....	20
Figura 2. 5 Las diferentes fuerzas que se tiene cuando se analiza superficies curvas .....	22
Figura 2. 6 Posibles cargas a las cuales está sometido el sistema cuando está en reposo .....	23
Figura 2. 7 Dispositivos de sujeción de equipos de trabajo y cargas diversas sobre vehículos de transporte: Seguridad.....	25
Figura 2.8 Vista lateral de tanques cisterna .....	26
Figura 2.9 Movimiento interno de fluido dentro del tanque cisterna .....	26
Figura 2. 10 Movimiento interno.....	31
Figura 2. 11 Proceso de anulación de energía.....	31
Figura 2. 12 Proceso de colocación de PAT .....	32
Figura 2. 13 Proceso de encendido de bombas .....	32
Figura 2. 14 Distrito Comercial Amazónico .....	35

### **Capítulo III:**

Figura 3. 1 Tanque horizontal en el espacio .....	38
Figura 3. 2 Flujo del líquido dentro del tanque .....	39
Figura 3. 3 Análisis de la inercia lateral del tanque .....	40

## **Capítulo IV:**

Figura 4. 1 Tanque cisterna a analizar .....	50
Figura 4. 2 Simulación de movimiento de flujo con un 15 m <sup>3</sup> el eje x .....	59
Figura 4. 3 Simulación de movimiento de flujo con un 15 m <sup>3</sup> el eje y .....	59
Figura 4. 4 Simulación de movimiento de flujo con un 15 m <sup>3</sup> el eje z .....	60
Figura 4. 5 Simulación de movimiento de flujo con un 20 m <sup>3</sup> el eje x .....	61
Figura 4. 6 Simulación de movimiento de flujo con un 20 m <sup>3</sup> el eje y .....	61
Figura 4. 7 Simulación de movimiento de flujo con un 20 m <sup>3</sup> el eje z .....	62
Figura 4. 8 Simulación de movimiento de flujo con un 30 m <sup>3</sup> el eje x .....	62
Figura 4. 9 Simulación de movimiento de flujo con un 40 m <sup>3</sup> el eje x .....	63
Figura 4. 10 Simulación de movimiento de flujo con un 40 m <sup>3</sup> el eje y .....	64
Figura 4. 11 Simulación de movimiento de flujo con un 40 m <sup>3</sup> el eje z .....	64
Figura 4. 12 Simulación de variación de la velocidad del líquido dentro del tanque cisterna .....	70
Figura 4. 13 Posición inicial de la coordenada cuando el tanque no está en movimiento.....	72
Figura 4. 14 Variación de la coordenada cuando el tanque está en movimiento a los 5 segundos .....	72
Figura 4. 15 Deformación el volumen del líquido dentro del tanque para n tiempos .....	73
Figura 4. 16 Variación del punto A al punto B dentro del tanque en un tiempo n .....	74
Figura 4. 17 Diagrama de flujo del proceso dentro la normativa propuesta .....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

### **Capítulo II:**

Tabla 2. 1 Capacidad de almacenamiento para distintos productos .....	27
Tabla 2. 2 Planta de almacenaje de Palmasola .....	28

### **Capítulo IV:**

Tabla 4. 1 Datos del Tanque cisterna .....	51
Tabla 4. 2 Variación de la inercia del tanque .....	58
Tabla 4. 3 Variación de la inercia del tanque .....	65
Tabla 4. 4 Variación de la velocidad de líquido del tanque en movimiento .....	69
Tabla 4. 5 Análisis de resultados .....	77

### **Capítulo V:**

Tabla 5. 1 Análisis de costos fijos .....	79
Tabla 5. 2 Costos variables.....	80
Tabla 5. 3 Depreciación anual del proyecto .....	80
Tabla 5. 4 Capital de trabajo .....	81
Tabla 5. 5 Interpretación de Costo y beneficios .....	82

### **Anexos:**

Tabla A. 1: Manual de proceso de manejo óptimo .....	90
--	----

## SIMBOLOGÍA

- $v$  : Velocidad del fluido en la sección considerada.
- $\gamma$  : Densidad del fluido.
- $P$  : Presión a lo largo de la línea de corriente.
- $g$  : Aceleración gravitatoria ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ )
- $z$  : Altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.
- $c_x, c_y, c_z$  : Coeficientes de aceleración
- $\mu$  : Coeficiente de rozamiento, variable en función de la naturaleza de la carga y de la superficie del vehículo.
- $I$  : Momento de inercia
- $m_i$  : Masas individuales
- $d_i$  : Distancias perpendiculares al centro de masa
- $a_{Iy}$  : Aceleración lateral del líquido
- $\theta_{s2}$  : Angulo de balanceo del camión cisterna en la superficie posterior del tanque  $S_2$
- $Z_{l(0)}$  : Altura estática de la carga líquida desde la base del tanque.
- $X_b$  : Coordenada longitudinal del remolque cisterna vacío, con respecto al sistema de coordenadas fijo del cuerpo del tanque (un valor positivo indica que el punto se encuentra por delante del origen del sistema fijo del cuerpo del tanque)
- $Z_b$  : Distancia entre la base del tanque y el centro de gravedad de estructura de remolque de tanque vacío.
- $I_x, I_y, I_z$  : Momentos de inercia del líquido desviado
- $D_{rotación}, D_{cabeceo}, D_{guiñada}$  : Matrices de rotación de alabeo, cabeceo y guiñada
- $\text{Cos}\theta_s, \text{Sen}\theta_s, \text{Cos}\alpha_s, \text{Sen}\alpha_s, \text{Cos}\varphi_s \text{ y } \text{Sen}\varphi_s$  : Ángulos de balanceo, cabeceo y guiñada, respectivamente, de la unidad suspendida.
- EPP** : Equipo de protección personal
- SILOG** : Sistema Integrado de Logística (software interno de YPFB Refinación)
- SSHVDV** : Seguridad, Salud e Higiene para Distribución y Ventas

## RESÚMEN EJECUTIVO

La industria petrolera es una de las más importantes del mundo, porque es la principal fuente de energía en la mayoría de los países. Sin embargo, a medida que aumenta el uso de recursos naturales también aumenta la producción, con esto también aumentan los riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores.

La seguridad industrial en Bolivia, se ha vuelto crucial para proteger la vida de los trabajadores y minimizar los riesgos de lesiones o accidentes en el lugar de trabajo. Además, también es esencial para proteger el medio ambiente y los recursos naturales. Pero a pesar de todos estos esfuerzos, hoy en día, aún se siguen presentando accidentes fuera y dentro de la industria petrolera. El objetivo principal de ese proyecto es el de controlar la seguridad de transporte de combustibles a través de un modelo dinámico considerando la variación de la velocidad del fluido en tanques cisternas parcialmente llenos.

En primer lugar, se describen las características básicas de las normas de seguridad industrial en tanques cisternas antes y durante el transporte de combustibles. Posteriormente, se desarrolló el modelo dinámico de velocidad de fluido variable para tanques cisternas parcialmente llenos a partir del principio de inercia y estabilidad.

Seguidamente se pudo predecir eficazmente las velocidades y cantidades de combustible óptimas efectuando los cálculos para con lo cual debe operar un tanque cisterna.

En el estudio económico se obtuvo datos positivos confirmando de que el proyecto es rentable y que se cubren los costos en menos de dos años.

**Palabras clave:** seguridad industrial, modelo dinámico, fluido, tanques cisterna, inercia, estabilidad, velocidad variable.

## **ABSTRACT**

The oil industry is one of the most important in the world, because it is the main source of energy in most countries. However, as the use of natural resources increases, so does production, with this the risks to the health and safety of workers also increase.

Industrial safety in Bolivia has become crucial to protect the lives of workers and minimize the risks of injuries or accidents in the workplace. In addition, it is also essential to protect the environment and natural resources. But despite all these efforts, today, accidents still occur outside and within the oil industry. The main objective of this project is to control the safety of fuel transportation through a dynamic model considering the variation of fluid velocity in partially full tank tanks. Firstly, the basic characteristics of industrial safety standards in cistern tanks before and during fuel transportation are described. Subsequently, the dynamic model of variable fluid velocity for partially filled tank tanks was developed based on the principle of inertia and stability.

Next, it was possible to effectively predict the optimal speeds and quantities of fuel by carrying out the calculations for which a tanker should operate.

In the economic study, positive data was obtained confirming that the project is profitable and that the costs are covered in less than two years.

**Keywords:** industrial safety, dynamic model, fluid, tank tanks, inertia, stability, variable speed.

# CAPÍTULO I: GENERALIDADES

## 1.1 INTRODUCCIÓN.

La seguridad industrial ha desarrollado dos enfoques para analizar las causas de los accidentes que estos producen durante ciertas actividades en el desarrollo de un proceso. Dichos enfoques son cuantitativos y cualitativos, los cuales poseen diferentes técnicas para comprender las causas y consecuencias de un evento inesperado. Lamentablemente estas metodologías no han podido prevenir accidentes al 100% y tienen bastante incertidumbre. En este caso, el transporte mediante cisternas ha sido olvidado en esta carrera y es necesario aplicar una metodología de manera específica para evitar accidentes. Es necesario entonces que el análisis cuantitativo sea detallado comprendiendo que la cisterna tiene riesgos de manera estática y de manera dinámica.

*Figura 1. 1: Accidente de tanque cisterna de combustible*



*Fuente: Opinión frontal.com, 2022*

Según la anterior imagen en mayo de 2022 ocurrió un accidente en Catamarca – Argentina dónde debido a la fuerza en la cisterna explotó dicho tanque y ocasionó un accidente automovilístico. YPF tuvo que remunerar económicamente a los familiares de ese fatal accidente.

Un tanque cisterna parcialmente lleno afecta en la estabilidad del movimiento del vehículo debido a las fuerzas inerciales y es necesario calcular todas estas variables para determinar a qué valor de velocidad segura debe viajar un tanque cisterna y también cuál es la cantidad mínima de combustible que debe contener para evitar futuros accidentes.

Es necesario hacer un análisis de inercia tanto dinámico como estático para poder demostrar que el líquido influye en la estabilidad de la velocidad del camión cisterna debido a fuerzas centrípetas.

## **1.2 ANTECEDENTES**

### **1.2.1 Antecedentes generales**

En 2022, a causa de los pedrones dejados en la carretera ruta Oruro – Cochabamba por los bloqueadores convocados por organizaciones campesinas, durante la jornada del domingo 16 de agosto, se produjo un accidente con daños personales y materiales de un camión cisterna marca Volvo con placa 4526 GPH que transportaba 35.000 litros de gasolina blanca estabilizada. Dicho camión cisterna que transportaba combustibles líquidos desde Yacuiba hasta la Ciudad de La Paz (Planta Senkata), sufrió un accidente producto de la evasión de los pedrones dejados en plena carretera, fruto del hecho, se evidenció a través de videos el lamentable daño material del motorizado y daños personales del conductor como sus acompañantes, quienes fueron trasladados para su auxilio inmediato ([www.anh.gob.bo](http://www.anh.gob.bo), 2023).

La Dirección Distrital de la ANH de Oruro desplegó inmediatamente a su personal hasta el lugar del suceso, para proceder según normativa a la respectiva verificación de los documentos y permisos correspondientes de transporte de combustibles líquidos (www.anh.gob.bo, 2023).

Esto se produjo por la inestabilidad que afectó en el transporte de combustible en el tanque cisterna ocasionado por el desorden en el suelo y género variaciones en la velocidad del mismo.

### **1.2.2 Antecedentes académicos**

Garí (2017) en su trabajo de grado “Diseño de una cisterna para el transporte de combustible en aeropuertos”, determina la geometría y los esfuerzos que deberá soportar partiendo de las normativas vigentes, tanto a nivel nacional como internacional. La cisterna deberá ser compatible con los componentes normalizados necesarios para el cumplimiento de la normativa y análisis que está sujeto a fuerzas centrípetas.

Cáceda (2021) en su proyecto de grado denominado “Modelo dinámico para la gestión de seguridad de la infraestructura de las tecnologías de información y comunicación”, desarrolló un modelo dinámico como herramienta de gestión, basado en las técnicas de dinámica de sistemas con la finalidad de mejorar la toma de decisiones estratégicas en seguridad de las organizaciones. Este modelo permitió gestionar las vulnerabilidades y prevenir ataques bajo diversos escenarios, determinando a través de indicadores de alertas, ataques y vulnerabilidades, si la aplicación del modelo favorece los procesos y protección de los activos de las TIC.

Gennari (2015), en su trabajo para la obtención de licenciatura en Ingeniería de Seguridad industrial denominado: “Evaluación y control de riesgos del puesto de trabajo: Supervisor de Operaciones de una Terminal de carga de combustibles líquidos livianos”, gestiona el almacenamiento de los combustibles en los tanques y

controla y supervisa las maniobras y acciones a seguir para el despacho del combustible a las unidades de transporte (camiones cisterna). Durante la realización de todas las tareas que demanda su puesto de trabajo, se afirma que se está expuesto a peligros que generan riesgos para su integridad física y mental. El trabajo es cualitativo y con un simple análisis cuantitativo estadístico, pero no considera el comportamiento físico de la inercia en dichos análisis.

Moreno & Flórez (2022) en su trabajo de investigación denominado como “Estabilidad de camiones cisterna utilizando el método de Davies”, afirma que la estabilidad de los vehículos pesados es un tema que se ha trabajado en los últimos tiempos. En este trabajo se han desarrollado varios modelos que permiten determinar qué tan propenso es un vehículo a volcarse. Sin embargo, la mayoría de estos modelos utilizan cargas fijas para tomar sus medidas sin incluir cargas móviles que en ciertos casos disminuyen la estabilidad de los vehículos. Con esto en mente, este artículo propuso un modelo cinemático bidimensional para determinar esta inestabilidad utilizando el Método de Davies como herramienta de análisis, determinando la influencia de la carga en la reducción de la estabilidad del vehículo.

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

#### **1.3.1 Identificación del problema.**

Según Gibson (2022), “cuando los conductores operan a altas velocidades, el tiempo necesario para detenerse por completo aumenta, y el conductor tiene más probabilidades de colisionar con otro vehículo u obstáculo en la carretera”. Lo cual genera el accidente que se presenta en la introducción y también por el mal control de la velocidad.

Por otra parte, los métodos cuantitativos de causa y efecto ya no se aplican en este tipo de análisis y no sirven; ya que es necesario considerar varias variables en movimiento o variables dinámicas como ser la variación de la velocidad en función de diferentes pesos que tenga la cisterna, si está totalmente lleno o no. Ya que la

inercia influye bastante en este tipo de análisis. Es necesario entonces plantear a partir de estos estudios la actualización de las normas vigentes para que pueda la empresa YPFB evitar todo tipo de accidentes antes y durante el transporte de líquidos en los tanques cisterna.

Las normas de seguridad en tanques ya son bastante antiguas y necesitan renovarse con estos nuevos modelos y estudios cuantitativos que hacen énfasis en el momento de inercia y la dinámica del tanque. No existen estudios modernos que apliquen estas características y es necesario también en el proyecto determinar cómo influye la capacidad del tanque en la velocidad del transporte. Por otra parte, el peso de la carga de un camión cisterna puede modificar el tiempo de parada del camión y la capacidad de realizar giros bruscos y es necesario actualizar las normativas de seguridad industrial respecto a tanques cisterna con esta propuesta planteada.

Por lo tanto, el problema principal es que no existe una nueva normativa para controlar la estabilidad y seguridad evitando explosiones, durante el transporte de combustibles en un tanque cisterna parcialmente lleno, ya que la mayoría de los procedimientos de control son cualitativos y no se enfocan en estos principios dinámicos de la fuerza centrípeta ni de la fuerza por inercia.

### **1.3.2 Formulación del problema.**

En función a la anterior identificación del problema se puede plantear la siguiente pregunta de investigación para llevar a cabo el proyecto de grado:

¿De qué manera se puede controlar la estabilidad y seguridad evitando explosiones, durante el transporte de combustibles en un tanque cisterna parcialmente lleno?

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo general

Controlar la seguridad en el transporte de combustibles a través de un modelo dinámico considerando la variación de la velocidad del fluido en tanques cisternas parcialmente llenos.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Desarrollar el modelo dinámico de velocidad de fluido variable en tanques cisternas parcialmente llenos a partir del principio de inercia y estabilidad.
- Describir las características básicas de las normas de seguridad industrial en tanques cisternas antes y durante el transporte de combustibles.
- Efectuar los cálculos para obtener las velocidades y cantidades de combustible óptimas con lo cual debe operar un tanque cisterna.
- Realizar un estudio de factibilidad técnico y económico del proyecto propuesto.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN.

### 1.5.1 Justificación técnica.

El proyecto ayuda a desarrollar una nueva normativa ya que se enfoca en variables que no se han considerado en anteriores estudios de seguridad industrial sobre todo en tanques cisternas, con lo cual dichas normas establecerán las velocidades máximas y mínimas a diferentes cantidades y otras características que se desarrollan en el estudio para evitar todo tipo de explosiones.

### **1.5.2 Justificación teórica**

Como ingenieros petroleros siempre ha estado implícito que nuestros estudios matemáticos y físicos son limitados en ciertas áreas y no sabemos aplicar otros conceptos. Pero con este estudio se demuestra que también la teoría de la inercia y el cálculo sirven para determinar los modelos inerciales que se puede aplicar en la industria petrolera y también nosotros podemos desarrollarlo cómo profesionales idóneos.

### **1.5.3 Justificación económica.**

Al evitar accidentes es obvio redundar que se evita pérdidas económicas ya que un tanque cisterna cuesta arriba de los cien mil dólares y el negocio de los tanques supera a los 20 millones de dólares anuales. Las pérdidas por explosiones son altas y traen consecuencias gravísimas a la economía del sector tanto privado como público. Existen empresas que alquilan estos tanques y perderían millones en recuperar, aunque tengan seguro el costo en el transporte diario es significativo.

### **1.5.4 Justificación socio-ambiental**

El proyecto es amigable con el medio ambiente ya que el análisis no daña al medio ambiente, cumpliendo normativas medio ambientales, beneficiando al ser humano ya que no produce emisión de gases tóxicos y el control de los accidentes evita que se contamine al medio ambiente. Se aplicarán normas medioambientales y estudio de riesgos para evitar todo daño y evitar explosiones que afectan directamente al medio ambiente.

Por otra parte, el proyecto no solo tiene un enfoque social ni tampoco ambiental, en este caso especial también tiene un enfoque aplicado a la seguridad industrial ya que a partir del análisis numérico se podrá proponer nuevos valores para mejorar el

control y prevención de accidentes antes y durante el transporte de tanques cisterna.

## **1.6 ALCANCE**

### **1.6.1 Alcance temático**

El presente proyecto analiza normas de seguridad industrial en el transporte de combustibles de tanques cisterna, lo cual aplica la materia de seguridad industrial y también el transporte de hidrocarburos. Se aplican otras materias anexas como ser la teoría de la inercia y el cálculo 2 para el desarrollo de modelos de ecuaciones de inercia. Se desarrolla por otra parte el análisis numérico en Excel para interpretar la variable de velocidad y otras que influyen en la estabilidad de los camiones cisterna.

### **1.6.2 Alcance temporal**

Para la realización del presente proyecto se tomará un tiempo de 3 meses a partir de este mes del año 2023 con datos históricos desde enero de 2021 hasta diciembre de 2022.

### **1.6.3 Alcance geográfico.**

El proyecto se desarrolla en el área de los tanques cisterna de la Planta de Palmasola ubicada en Santa Cruz. Al lado de la Refinería Guillermo Elder Bell.

**Figura 1. 2: Ubicación de Palmasola**



**Fuente: YPFB, Transporte, 2022**

A continuación, también se muestra el área de los tanques cisterna:

**Figura 1. 3: Área de tanques cisterna**



**Fuente: YPFB, Transporte, 2022**

## CAPÍTULO II: EL PROCESO DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES EN TANQUES CISTERNA

### 2.1 CAMIÓN CISTERNA

#### 2.1.1 Características

El camión cisterna es una de las muchas variedades de camión que sirve para el transporte de líquidos. Moreno Contreras G., Flórez Serrano E., Ramón B. (2022).

*Figura 2. 1: Tanque Cisterna Común*



*Fuente: Moreno Contreras G., Flórez Serrano E., Ramón B. (2022)*

La mercancía se transporta en estado líquido ya que los fluidos tienen un menor volumen en estado líquido que gaseoso, pudiendo transportar mayor cantidad de este, pero a mayor presión.

Coloquialmente también se le ha llamado “Zeppelin” o “pipa”. Por ejemplo, un camión cisterna que transporta agua a alguna comunidad, es conocido como la “pipa de agua”. Moreno Contreras G., Flórez Serrano E., Ramón B. (2022).

Entre estos se destacan por su mayor uso los de agua para regadío y trasvase, los de transportes de combustibles líquidos como gasolina, diésel oíl, queroseno, gas GLP, jet fuel y otros, o los de productos químicos líquidos, estando el transporte de éstos regulado en casi todo el mundo por su peligrosidad. Estos camiones se regulan a cada momento ya que pueden ser muy peligrosos.

La cisterna es un depósito dedicado al transporte, habitualmente es de sección cilíndrica o más o menos elipsoidal, de eje horizontal, con casquetes o fondos abombados en sus extremos y provisto de valvulería, conducciones y dispositivos de carga y descarga.

**Figura 2. 2 Tanque cisterna con sistema de aspersión**



**Fuente: Moreno Contreras G., Flórez Serrano E., Ramón B. (2022)**

Estas cisternas se encuentran en la zona posterior de la cabeza tractora, es por ello que se conoce como camión cisterna, ya que esta está unida de forma fija al camión. Las cisternas se pueden clasificar en dos:

Remolques: en este tipo de camión la cisterna está ubicada sobre un bastidor que esta sostenido por ejes de ruedas delanteros y traseros, estos a su vez están unidos a una parte tractora o camión cisterna por un enganche.

Semirremolques: estos camiones poseen de 2 a 4 pares de ejes de rueda que se unen a la parte tractora a través de una articulación especial donde queda fijado el pivote de sujeción de 2 pulgadas de diámetro del que va provisto todo el semirremolque.

### **2.1.2 Grado de llenado**

El grado de llenado de estos camiones que están destinados al transporte de líquidos a temperatura ambiente es de mucha importancia, ya que nunca se debe de superar los grados de llenado, por ejemplo, si este transporta materias inflamables si se supera el grado podría ser muy peligroso, se puede correr el riesgo de que haya escape y que se produzca una explosión. (Méndez, 1999)

### **2.1.3 Limpieza**

Los camiones cisterna, así como las bombas y mangueras deben ser debidamente limpiados antes de ser utilizados, después de un mantenimiento mayor y por lo menos cada tres meses. (Méndez, 1999)

### **2.1.4 Mantenimiento de Registros**

Cada camión cisterna deberá estar provistos de un libro para registrar su funcionamiento. Esto le ayudará a la planificación del camión cisterna y para comprobar la eficacia de los camiones y sus conductores. (Méndez, 1999)

### **2.1.5 Mantenimiento y Cuidado**

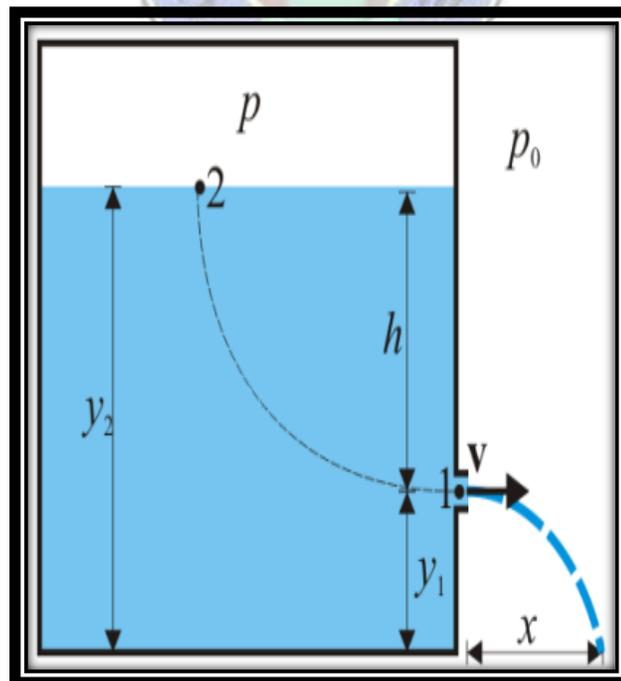
A continuación, se exponen algunos fundamentos básicos para el mantenimiento y cuidado de los tanques cisterna (Méndez, 1999):

- Los usuarios deben estrictamente referirse a las instrucciones de operación para mantener el chasis y la bomba.
- Los usuarios deben correr el agua en vagones antes de su uso de acuerdo a instrucciones de uso.
- Dispositivo antideslizante es requerido para la conducción de larga distancia. Los conductores deben tener 200 mm. de espacio con otros vehículos.
- Los agujeros de salida se deben realizar inspecciones periódicas para asegurar que no obstruya.
- El agua debe ser drenado completamente y escurrida de las tuberías si la cisterna de agua no se ha utilizado durante mucho tiempo.

## 2.2 PRINCIPIO DE VACIADO DE TANQUES

El vaciado de tanques y recipientes es un proceso en régimen no estacionario dado que tenemos una salida de masa del sistema a una velocidad variable que dependerá del nivel de líquido en el mismo.

*Figura 2. 3 Principio de vaciado de tanques*



*Fuente: Cengel, 2012*

Al no haber ingreso de masas al tanque, esta descarga provocará un cambio en el contenido inicial del equipo, de modo que podemos plantear el balance general de masas y energía del sistema de la siguiente forma:

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \Rightarrow V = \sqrt{2gh} \quad (2.1)$$

En condiciones reales, hay que tomar en cuenta la contracción que sufre un chorro de agua en un orificio, por lo que se tendrá:

$$V = c\sqrt{2gh} \quad (2.2)$$

Donde:

$c$  es el coeficiente de descarga<sup>1</sup> comprendido entre 0 y 1 ( $0 < c < 1$ ). Cuando el valor del coeficiente de descarga  $c$  no se indica, se asume que  $c = 1$ .

Según la Ley de Torricelli, la razón con la que el agua sale por el agujero se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{dV}{dt} = -av \quad (2.3)$$

Sustituyendo la velocidad encontrada bajo el teorema de Torricelli tenemos:

$$\frac{dV}{dt} = -ac\sqrt{2gh} \quad (2.4)$$

---

<sup>1</sup> La constante  $C$  depende de la forma del orificio:

Si el orificio es de forma rectangular, la constante  $C = 0,8$ .

Si el orificio es de forma triangular, la constante  $0,65 \leq C \leq 0,75$ .

Si el orificio es de forma circular, la constante  $C = 0,6$ .

Si  $A(h)$  denota el área de la sección transversal horizontal del tanque a la altura  $h$ , aplicando el método del volumen por secciones transversales se obtiene:

$$V = \int_0^h A(h)dh \quad (2.5)$$

Derivando respecto de  $t$  y aplicando el teorema fundamental del cálculo nos queda:

$$\frac{dV}{dt} = A(h) \frac{dh}{dt} \quad (2.6)$$

Igualando las dos ecuaciones que obtuvimos tenemos la ecuación para el vaciado de tanques:

$$A(h) \frac{dh}{dt} = -ac\sqrt{2gh} \quad (2.7)$$

Si, además, hay aporte de líquido al tanque, la ecuación diferencial es:

$$A(h) \frac{dh}{dt} = Q - ac\sqrt{2gh} \quad (2.8)$$

### 2.3 NORMATIVA DE DISEÑO NFPA 385

Esta norma establece los requisitos para el cálculo, diseño, fabricación, ensayo e inspección de tanques de acero soldado, estacionarios o móviles, para el almacenamiento o transportes de gases a baja presión.

Establece también, los requisitos mínimos de los accesorios que deben tener para control y seguridad<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Esta norma se aplica a los tanques fijos o móviles que almacenen o transporten combustibles de hasta 1,73 MPa de presión y mayores a 0,11 m<sup>3</sup> de capacidad.

## **2.3.1 Diseño de tanques**

### **2.3.1.1 Tanque fijo**

El cálculo, diseño, características dimensionales, químicas y mecánicas del acero para la construcción de los tanques para gases a baja presión, se deben determinar de conformidad con lo especificado que se indica a continuación (NFPA 385, 2020):

- La presión de diseño no debe ser inferior a la presión de vapor para el gas específico que va a contener, considerando una temperatura no menor a 50 °C.
- Los tanques deben diseñarse para ser autosoportantes, sin requerir de cables tensores o soportes adicionales, y deben satisfacer los criterios de diseño para nuestro país, tomando en cuenta los esfuerzos que provengan del viento, fuerzas de origen sísmico y cargas hidrostáticas.
- Debe estar apoyado sobre soportes fijos al tanque que permitan el anclaje o sujeción a la estructura donde va a permanecer.

### **2.3.1.2 Tanque móvil**

El diseño del tanque cisterna para vehículo, semirremolque o remolque, debe tomar en cuenta las relaciones estructurales entre el tanque, las estructuras soportantes y los elementos de propulsión y movimiento del vehículo.

Debe cumplir con todas las regulaciones vigentes en el país referentes a dimensiones, cargas máximas, número de ejes, elementos de protección y seguridad. (NFPA 385, 2020)

## **2.3.2 Tipo de fluido a transportar**

### **2.3.2.1 Líquido combustible.**

Cualquier líquido a ser transportado o almacenado debe cumplir ciertas características, dependiendo a la clase que corresponde.

### **2.3.2.2 Líquido Clase II**

Cualquier líquido que tenga un punto de inflamación en o por encima de 100°F (37.8°C) y por debajo de 140°F (60°C). (NFPA 385, 2020)

### **2.3.2.3 Líquido Clase III**

Cualquier líquido que tenga un punto de inflamación en o por encima de 140°F (60°C).

## **2.3.3 Fundamentos teóricos para los cálculos**

### **2.3.3.1 Ecuación de Bernoulli:**

Ecuación de Bernoulli describe el comportamiento de un líquido moviéndose a lo largo de una corriente de agua. Expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. (NFPA 385, 2020)

Figura 2. 4 Principio de Bernoulli

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{cabezal de velocidad} & & \text{altura o carga piezométrica} & & & & \text{Cabezal o Altura hidráulica} \\
 \underbrace{\frac{V^2}{2g}} & + & \underbrace{\frac{P}{\gamma}} & + & z & = & \widehat{H} \\
 & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & & & \\
 & & \text{cabezal de presión} & & & & 
 \end{array}$$

Fuente: Normativa de diseño NFPA 385, 2020

Donde:

V = velocidad del fluido en la sección considerada.

$\gamma$  = densidad del fluido.

P = presión a lo largo de la línea de corriente.

g = aceleración gravitatoria

z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

(Moreno Contreras G., Flórez Serrano E., Ramón B, 2022)

Ecuación de Bernoulli con fricción y trabajo externo: es aplicable a fluidos no viscosos, incompresibles en los que no existe aportación de trabajo exterior, por ejemplo, mediante una bomba, ni extracción de trabajo exterior, por ejemplo, mediante una turbina.

De todas formas, a partir de la conservación de la cantidad de movimiento para fluidos incompresibles se puede escribir una forma más general que tiene en cuenta fricción y trabajo (NFPA 385, 2020):

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 + W = h_f + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 \quad (2.9)$$

Donde:

W: trabajo externo que se le suministra (+) o extrae al fluido (-) por unidad de caudal másico a través del recorrido del fluido.

$h_f$ : Disipación por fricción a través del recorrido del fluido.

$V$  = velocidad del fluido en la sección considerada.

$\gamma$  = densidad del fluido.

$P$  = presión a lo largo de la línea de corriente.

$g$  = aceleración gravitatoria ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ )

$z$  = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

### **2.3.3.2 Potencia de una bomba:**

La potencia teórica de una bomba hidráulica es:

$$P_b = \gamma Q h_b \quad (2.10)$$

En donde:

$P_b$  es la potencia teórica de la bomba (en Vatios;  $1 \text{ Hp} = 745.7 \text{ Vatios}$ )

$\gamma$  es el peso específico del fluido

$Q$  es el caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$h_b$  es la ganancia de carga en la bomba, o, en otros términos, altura dinámica de la bomba (m)

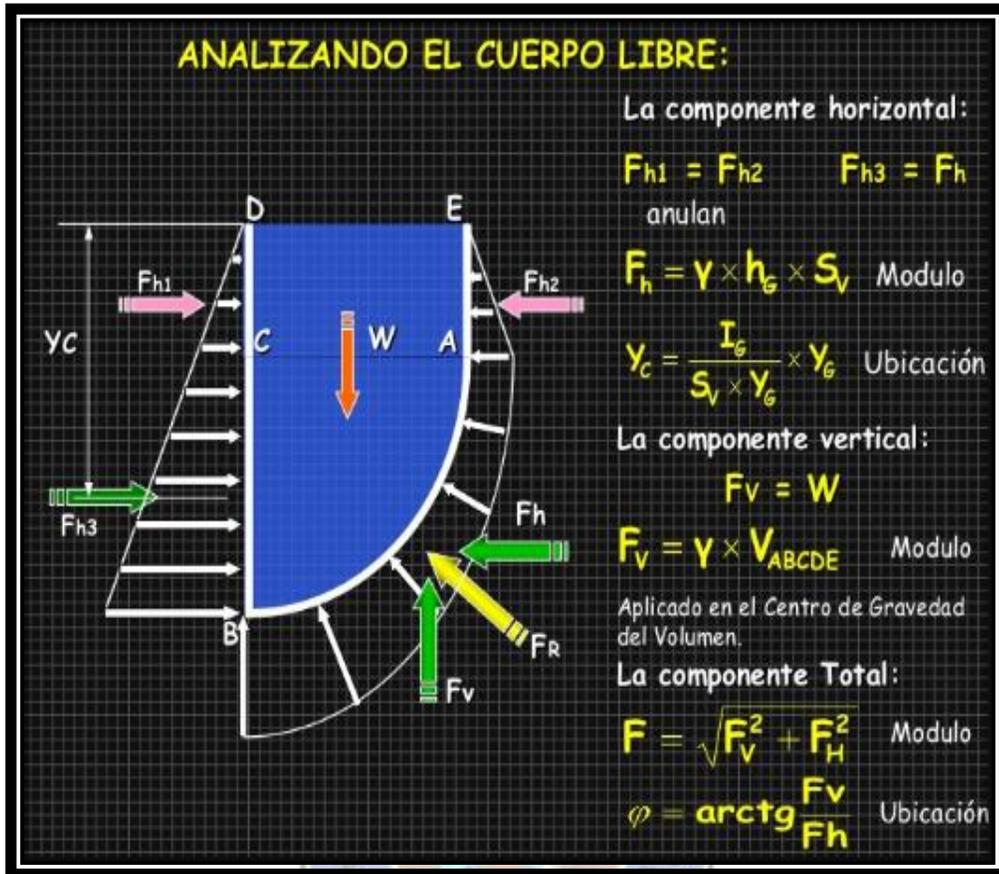
### **2.3.3.3 Presión hidrostática sobre superficies curvas**

En un fluido en reposo no hay esfuerzos cortantes; de aquí que únicamente están presentes los esfuerzos de presión normales. La intensidad de la presión promedio se define como la fuerza ejercida sobre una unidad de área. Si  $F$  representa la fuerza total sobre alguna área finita  $A$ , mientras  $dF$  representa la fuerza sobre un área infinitesimal  $dA$ , la presión es (Çengel, 2009)

$$P = \frac{dF}{dA} \quad (2.11)$$

Las fuerzas son diversas en superficies curvas, ellas son:

Figura 2. 5 Las diferentes fuerzas que se tiene cuando se analiza superficies curvas



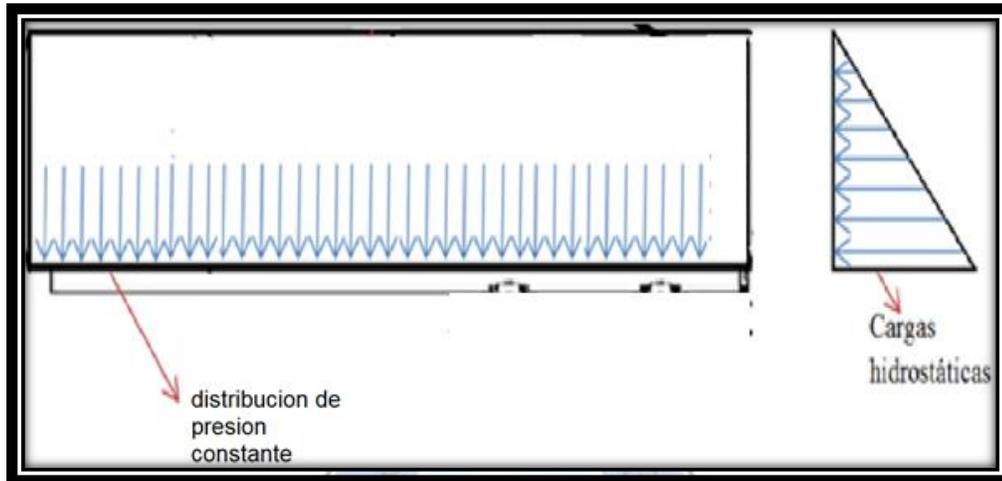
Fuente: Apuntes de auxiliatura de operaciones unitarias I – UMSA, 2014

## 2.4 ANÁLISIS DE APLICACIÓN DE FUERZAS DE INERCIA

### 2.4.1 Cargas que soporta un tanque cisterna

Las cargas a las que se somete el tanque por el peso y el fluido, son aquellas generadas por la aceleración, la desaceleración y cuando el tanque genere un salto por la irregularidad del piso. Se aplican sobre las paredes del tanque, generando cargas longitudinales, laterales y verticales.

**Figura 2. 6 Posibles cargas a las cuales está sometido el sistema cuando está en reposo**



*Fuente: Normativa de diseño NFPA 385, 2020*

## 2.4.2 Fuerzas esenciales que se presentan en el transporte de líquidos en un tanque cisterna

### 2.4.2.1 Fuerza de inercia

La fuerza de inercia se debe a la inercia durante el transporte, que provoca desplazamientos laterales hacia delante o hacia atrás. En caso de que la carga se desplazase, la fuerza provocaría un movimiento que haría que el peso de la carga fuera muy superior a su peso real. Para determinar el peso de la carga en un momento en que la fuerza de inercia esté actuando (un choque, una frenada, una aceleración, etc.) se debe proceder mediante el cálculo:

Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$a = -c_x \cdot c_y \cdot c_z \cdot g \quad (2.12)$$

Siendo:

a = aceleración

$c_x$ ,  $c_y$ ,  $c_z$  = coeficientes de aceleración

g = aceleración gravitatoria ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ )

### 2.4.2.2 Carga (Fp)

Una vez que conocemos la aceleración (a) se debe calcular la fuerza con la que se desplaza la carga (Fp), lo cual se hace multiplicando la aceleración obtenida por su peso. El peso de un objeto es su masa por la gravedad. De esta forma la fuerza Fp será:

$$F_p = a \cdot m \cdot g \quad (2.13)$$

Siendo:

$a$  = aceleración

$m$  = masa

$g$  = aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

Sabiendo la Fp se debe conocer el conjunto de fuerzas que contrarrestan ese movimiento para que se cumpla el principio de que la suma de las fuerzas en cualquier dirección debe ser igual a cero.

### 2.4.2.3 Fuerza de rozamiento

La fuerza de rozamiento Fr, es la resistencia que ofrece un cuerpo al rozar con otro. Su valor se obtiene de la siguiente forma:

$$F_r = m \cdot g \cdot \mu \quad (2.14)$$

siendo:

$m$  = masa de la carga

$g$  = aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$\mu$  = coeficiente de rozamiento, variable en función de la naturaleza de la carga y de la superficie del vehículo.

Figura 2. 7 Dispositivos de sujeción de equipos de trabajo y cargas diversas sobre vehículos de transporte: Seguridad



Fuente: Garí Portoles, (2017)

#### 2.4.2.4 Fuerza de sujeción

La fuerza de sujeción  $F_s$  es la fuerza que hay que aplicar a la carga para mantenerla estable y en posición de reposo de forma que impida el movimiento de la misma durante su transporte.

Su fórmula es:

$$F_s = F_p - F_r \quad (2.15)$$

Se deberá tener en cuenta el factor de rozamiento entre distintos materiales, superficies de apoyo y en situaciones con nieve, hielo y condiciones húmedas.

#### 2.4.3 Efectos de la carga

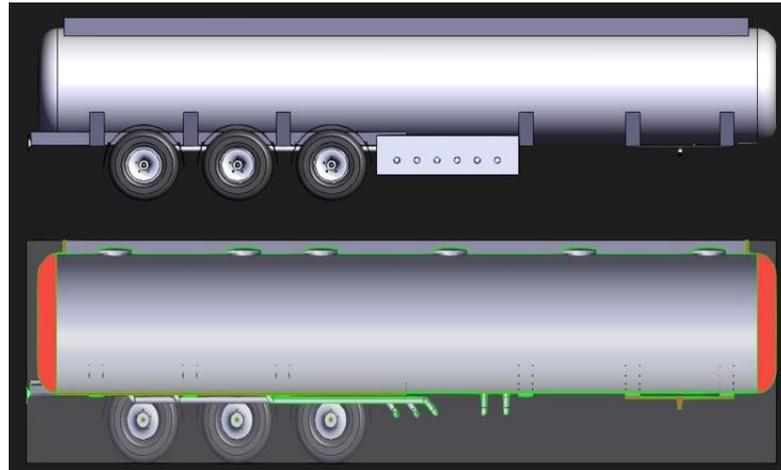
La tipología de la carga que se esté transportando, así como la propia capacidad del vehículo, son dos aspectos a tener muy en cuenta a la hora de aplicar medidas de carácter preventivo para evitar los vuelcos.

##### 2.4.3.1 El efecto ola

Este efecto se produce cuando una cisterna está a medio cargar de líquido, el cual, en los cambios de giro, produce un balanceo (desplazamiento del centro de

gravedad), que puede hacer volcar el vehículo. Por lo tanto, el momento más peligroso es cuando se lleva a media carga, ya que en carga total no se produce este fenómeno, ni cuando está casi vacío<sup>3</sup>.

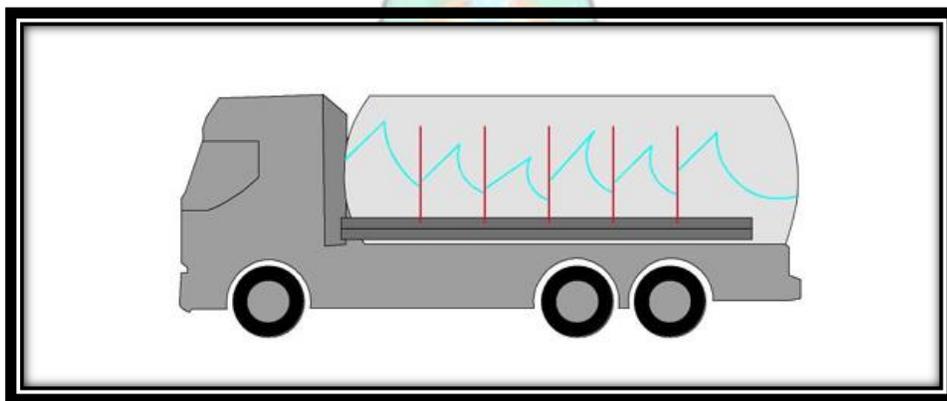
**Figura 2.8 Vista lateral de tanques cisterna**



Fuente: Elaboración propia en base a Solid Works, 2023

Para evitar en parte este riesgo, se deben disponer de compartimentos rompeolas, que evitan que el líquido se acumule y genere movimientos en la carga que puedan desestabilizar el vehículo<sup>4</sup>.

**Figura 2.9 Movimiento interno de fluido dentro del tanque cisterna**



Fuente: Dasgupta, A., 2011

<sup>3</sup> Un efecto aún más peligroso del efecto ola se produce cuando la carretera tiene forma de S, ya que la carga se balancea de un lado hacia otro.

<sup>4</sup> Este efecto se modela en el siguiente capítulo con ecuaciones diferenciales como parte de los modelos dinámicos propuestos.

## 2.5 CARACTERÍSTICAS DEL AREA DE ALMACENAMIENTO DENTRO DE LA PLANTA DE PALMASOLA

### 2.5.1 Características de capacidad de almacenamiento

La planta de almacenamiento o almacenaje de Palmasola, forma parte del conjunto de plantas de almacenaje del DISTRITO COMERCIAL ORIENTE. Las plantas que conforman este distrito son:

- Planta de almacenaje de GLP Refinería Guillermo Elder Bell (YPFB) Planta de Palmasola – Santa Cruz
- Planta de almacenaje de combustibles líquidos refinería Guillermo Elder Bell (YPFB) Palmasola – Santa Cruz

Para la capacidad de almacenamiento para distintos productos:

*Tabla 2. 1 Capacidad de almacenamiento para distintos productos*

PRODUCTO	TK	CAPACIDAD NOMINAL (M3)	CARGA MUERTA (M3)
Petróleo Crudo	TK-10002	16.000	1.500
Petróleo Crudo	TK-2900	16.000	1.500
Petróleo Crudo	TK-2901	16.000	1.500
Crudo Reconstituido (B)	TK-2913	9.000	300
Gasolina Especial	TK-2912	9.000	300
Gasolina Especial	TK-2915	4.000	150
Gasolina Especial	TK-2916	4.000	150
Gasolina Premium	TK-2938	700	20
Jet Fuel	TK-2920	6.000	200
Jet Fuel	TK-2927	1.800	70
Jet Fuel	TK-2928	1.800	70
Diesel Oil	TK-2918	9.000	300
Diesel Oil	TK-2919	9.000	300
Gas Licuado de Petróleo	TK-2934	700	30
Gas Licuado de Petróleo	TK-2947	700	30

*Fuente: YPFB TRANSPORTE, Informe de Trabajo, 2021*

En este proyecto solo analizaremos y aplicaremos el proyecto a la planta de almacenaje de combustibles líquidos de la planta Palmasola (YPFB).

**Tabla 2. 2 Planta de almacenaje de Palmasola**

<b>Nº de tanque</b>	<b>Producto almacenado</b>	<b>Actividad</b>	<b>Tipo tanque (esd, hor, ver)</b>	<b>Capacidad neta (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Carga muerta (m<sup>3</sup>)</b>
2914	Gasolina especial	Almacenaje	Vertical	6010	253.40
2917	Gasolina especial	Almacenaje	Vertical	3231	138.10
2939	Gasolina premium	Transporte	Vertical	801	31.80
2929	Gasolina especial	Transporte	Vertical	1423	53.80
2924	Crudo	Almacenaje	Vertical	6005	170.30
101	Crudo	Almacenaje	Vertical	477	12.55
211	Crudo	Transporte	Vertical	825	32
4	Crudo	Almacenaje	Vertical	474	12.55
2923	Crudo recon	Almacenaje	Vertical	2224	114.60
2926	Diesel oíl	Almacenaje	Vertical	3843	161.30
102	Jet fuel	Transporte	Vertical	476	12.75
2944	Kerosene	Almacenaje	Vertical	84	5.50
2945	Diesel oíl	Transporte	Vertical	6005	170.30

*Fuente: YPFB TRANSPORTE, Informe de Trabajo, 2021*

## **2.6 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CARGA Y DESCARGA DE LOS TANQUES CISTERNA**

### **2.6.1 Inspector de planta**

- Coordina con las partes involucradas para el cumplimiento de los programas de despacho.

- Recibe las nóminas de carga de las empresas de transporte y genera las órdenes de carga y despacho.
- Diariamente revisa los antecedentes de conductores y camiones cisternas en el SILOG.
- Verifica que se encuentren activos en el SILOG y en las plataformas de rastreo.

## **2.6.2 Inspección Precarga**

### **2.6.2.1 Inspector SSHDV (Seguridad, salud e higiene para distribución y ventas)**

- Realiza las inspecciones de SSHDV de Pre-Carga a las unidades de transporte y conductores en los estacionamientos y/o parqueos de las Plantas de Despachos.
- Evalúa los conocimientos, habilidades y experiencias de los conductores de acuerdo al registro.

Al contar con las órdenes de despacho; con el listado de los conductores a evaluar:

- Inspeccionará en las plantas de despacho, cumpliendo los requisitos de calidad, seguridad y medio ambiente.
- Realiza las pruebas de alcoholemia.
- Revisa los antecedentes de: infracciones, salud ocupacional, carnet de SSHDV, certificados de capacitación y experiencia mínima de 2 años (Comprobados) en la conducción de camión cisternas tráiler.

Luego de contar con las órdenes de despacho; con el listado de los camiones cisternas a ser inspeccionados se procede a:

- Verificar los certificados de calibración y mantenimiento vigentes (tanque, tracto y semirremolque).
- Verificar los medios de transporte, equipos e Instrumentos, debiendo todos estar en buen estado de funcionamiento y operación.

### **2.6.2.2 Proceso de carga**

Se sigue los siguientes pasos:

- Ingresa a la zona de carga y/o descarga a una velocidad no superior a 10 Km/h.
- Estaciona el camión cisterna a una distancia que corresponde a las bocas de conexión y/o puntos de carga.
- Detiene el vehículo orientado hacia la salida de la planta.
- Apaga el motor y activa el shuit corta corriente.
- Coloca cuñas (separadas 5 cm aprox. de las ruedas del vehículo).
- Delimita el área con conos de seguridad.
- Conecta la puesta a tierra del camión cisterna con la instalación de la Planta.

### **2.6.2.3 Proceso de descarga**

Se sigue los siguientes pasos:

- Proceder a ingresar el camión a paso de hombre hacia la zona de descarga (previo a esto exigir dispositivos de seguridad y EPP).

**Figura 2. 10 Movimiento interno**



**Fuente: YPFB TRANSPORTE, Informe de Trabajo, 2021**

- Desenergizar el camión

**Figura 2. 11 Proceso de anulación de energía**



**Fuente: YPFB TRANSPORTE, Informe de Trabajo, 2021**

- Colocar calzas
- Colocar PAT

**Figura 2. 12 Proceso de colocación de PAT**



**Fuente: YPFB TRANSPORTE, Informe de Trabajo, 2021**

- Vincular al proceso
- Habilitar válvulas correspondientes
- Poner en marcha bomba correspondiente

**Figura 2. 13 Proceso de encendido de bombas**



**Fuente: YPFB TRANSPORTE, Informe de Trabajo, 2021**

- Verificar anomalías

## **2.7 PROCESO ACTUAL DE CONTROL DE LA SEGURIDAD EN EL TANQUE CISTERNA SEGÚN YPFB**

### **2.7.1 Requisitos Talento Humano:**

#### **2.7.1.1 Personal de seguridad y vigilancia**

Debidamente instruido y capacitado sobre la importancia del cumplimiento con las normas de Seguridad Industrial y Vigilancia durante el ingreso y salida de camiones cisterna.

Con aptitudes de atención y trato al cliente y normas de conducta.

#### **2.7.2 Requisitos Seguridad industrial, Medio Ambiente y Salud:**

El representante, así como los trabajadores de la empresa deben cumplir con las siguientes exigencias:

Contar con el siguiente EPP:

- Contar con cascos de Seguridad de acuerdo a norma.
- Contar con ropa de algodón que cubra brazos y piernas.
- Contar con lentes de Seguridad Transparentes
- Utilizar calzados de Seguridad con punta de acero y planta antideslizante en buen estado.
- Guantes de protección.
- Contar con Examen médico y Examen oftalmológico Anual<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> NOTA: El color del casco para el REPRESENTANTE debe ser color Rojo.

### 2.7.3 Requisitos Camión cisterna

Todos los camiones cisterna, deben contar con la Inspección Semestral realizada por YPFB Logística S.A, registrando la inspección en la Planilla de Inspección de Camiones Cisterna GOPE-RG-PL-TODO-004 Por otra parte, el PERSONAL DE SEGURIDAD Y VIGILANCIA:

- Solicita al REPRESENTANTE que apague su teléfono celular – si es que lo tuviera – y que lo mantenga apagado hasta abandonar la Planta.
- Verifica la ausencia de recipientes dentro del camión y ausencia de materiales u objetos sobre la cisterna, además verificar que los compartimientos de la cisterna se encuentren completamente vacíos y limpios.
- Verifica que el REPRESENTANTE es la única persona que ingresa con el camión cisterna.
- Verifica que el Camión Cisterna cuenta con extintor de 12 Kg., con carga vigente.
- Verifica que el REPRESENTANTE cuente con su respectivo equipo de protección personal (EPP).
- Se debe eliminar la posibilidad de utilizar prendas de seda u otro material a base de fibras artificiales, botas de goma, zapatos con suela de goma o material sintético no conductor.

#### 2.7.4 Distrito comercial amazónico

El Distrito Comercial Amazónico es un sistema que mejora el abastecimiento de combustibles en las ciudades fronterizas de Riberalta, Guayaramerín y Cobija. Con la creación de esta infraestructura se aplica el proceso de descentralización administrativa, operativa y financiera con una autonomía de gestión que garantiza la seguridad energética regional.

*Figura 2. 14 Distrito Comercial Amazónico*



*Fuente: YPFB TRANSPORTE, 2023*

Este distrito vela también por la seguridad de los elementos que intervienen en el proceso de transporte, en este caso la seguridad de los tanques cisternas.

## CAPÍTULO III: MODELO DINÁMICO DE LA VARIACIÓN DE VELOCIDAD DEL FLUIDO EN TANQUES CISTERNA

### 3.1 PRINCIPIO DE INERCIA Y ESTABILIDAD DE UN LÍQUIDO EN UN TANQUE

El transporte de líquidos en camiones siempre ha sido peligroso debido a que el movimiento genera varias fuerzas sobre el líquido que se transporta, llegando a provocar a veces accidentes de gran magnitud.

La causa principal para que se genere vuelcos es la fuerza de inercia que en ocasiones actúa como empuje para provocar el accidente en carreteras mayormente cuando se toman curvas (Rajagounder, R., Mohanasundaram, G. V., Kalakkath, P., 2016). Rajagounder afirma que se debe determinar el porcentaje de llenado del tanque, ya que el movimiento del fluido transportado puede afectar la estabilidad del vehículo dependiendo de la cantidad de transporte.

El momento de inercia es una cantidad escalar que mide la resistencia a la rotación de un cuerpo en rotación (Rajagounder, R., Mohanasundaram, G. V., Kalakkath, P., 2016). Mientras más alto sea el valor del momento de inercia más resistente es el cuerpo a las fuerzas que se genera por movimiento interno o externo generado por otras partículas que forman el total de la masa.

#### 3.1.1 Principio de inercia

El principio de inercia en el tanque cisterna depende de la masa del líquido que lo contenga y el movimiento que genera durante su transporte, que se distribuye en todo su sistema. También estas fuerzas deben estar en equilibrio y concentrarse sobre el centro de masa del tanque para que no ocurran accidentes. El momento de inercia de un sistema puede expresarse como la suma del producto de cada masa

individual por la distancia perpendicular al eje de movimiento elevada al cuadrado. Esto se expresa como:

$$I = \sum_{i=1}^N m_i d_i^2 \quad (3.1)$$

Dónde,

$I$ : es el momento de inercia

$m_i$ : Son las masas individuales

$d_i$ : Son las distancias perpendiculares al centro de masa

### 3.1.2 Estabilidad del líquido en el tanque

Las ecuaciones que describen el movimiento lineal de un fluido incompresible dentro de un tanque de cualquier área seccional sometido a una aceleración uniforme son las ecuaciones de continuidad y la ecuación de conservación del momento (Cengel, 2010) que se presenta en las ecuaciones (3.2) y (3.3):

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (3.2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla P + \rho g + \mu \nabla^2 v \quad (3.3)$$

Donde:

$v$ : es la velocidad del fluido [m/s]

$P$ : es la presión del fluido [Pa]

$\rho$ : es la densidad del fluido [kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$ : es la viscosidad del fluido [Pa.s]

$g$ : es la aceleración debido a la gravedad [m/s<sup>2</sup>].

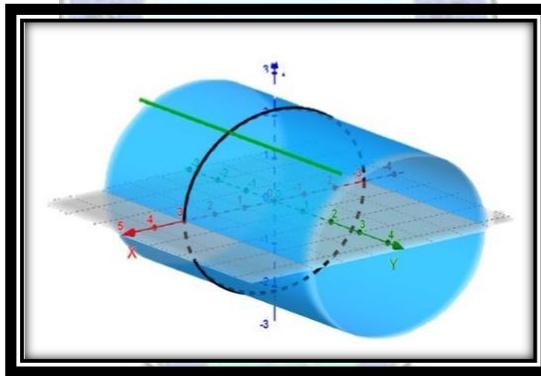
Cuando el fluido está sujeto a una aceleración lateral, cada elemento del fluido en el tanque experimenta la misma aceleración, además, su velocidad  $v$  es función del tiempo, pero no de la posición, la ecuación (3.3) se puede reescribir como:

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla P + \rho g + \mu \nabla^2 v \quad (3.4)$$

Pero la segunda gradiente equivale a cero en este caso ya que representa una pequeña variación y  $\frac{dv}{dt} = a$ , entonces:

$$\rho a = -\nabla P + \rho g \quad (3.5)$$

**Figura 3. 1 Tanque horizontal en el espacio**



**Fuente: Joel Rojas, Gráficas de superficies cuadráticas, 2020**

De manera vectorial, considerando el tanque de la cisterna como un tanque horizontal en el espacio como en la figura (3.1), la ecuación (3.5) expresa como:

$$\left[ \frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y}, \frac{\partial P}{\partial z} \right] = -\rho [a_x, a_y, a_z] + \rho g \quad (3.6)$$

Considerando el movimiento del fluido en el plano y-z, la ecuación anterior se reduce a:

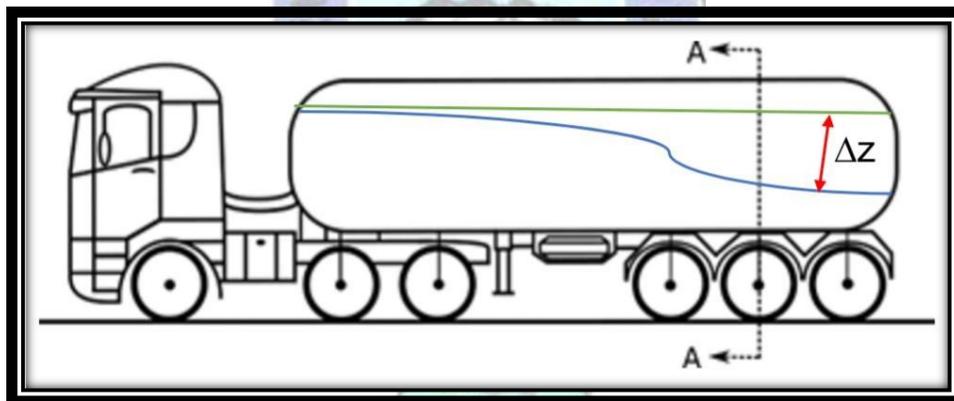
$$dP = -\rho a_y dy - \rho(g + a_z) dz \quad (3.7)$$

Cuando un tanque se acelera uniformemente en la dirección  $y$ , la superficie libre se moverá inicialmente hacia adelante y hacia atrás; después de algún tiempo este movimiento desaparece o estabiliza, pasando de este estado transitorio a un movimiento uniformemente acelerado. Para  $\rho = \text{constante}$ , la diferencia de presión entre dos puntos 1 y 2 en el fluido se determina por integración, de modo que la ecuación (3.7) se convierte en:

$$P_2 - P_1 = -\rho a_y (y_2 - y_1) - \rho (g + a_z) (z_2 - z_1) \quad (3.8)$$

El aumento vertical de la superficie libre en el punto 2 en relación con el punto 1 se puede determinar seleccionando estos puntos en la superficie libre donde  $P_2 = P_1$  ya que ambas presiones se encuentran en el mismo tanque:

**Figura 3. 2 Flujo del líquido dentro del tanque**



**Fuente: Dasgupta, A., 2011**

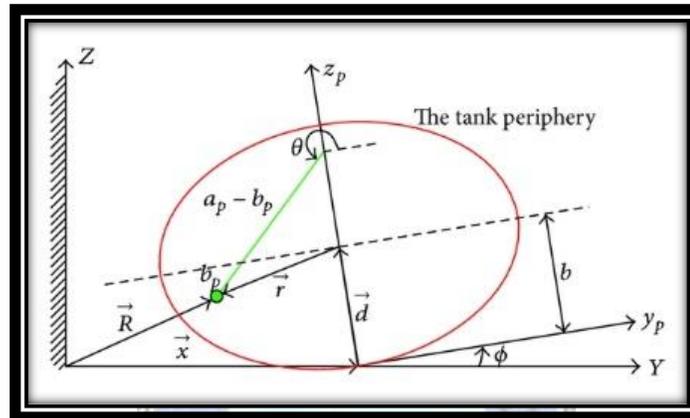
Despejando la variación de alturas de la ecuación (3.8), se tiene:

$$\Delta z = -\frac{a_y}{(g + a_z)} (y_2 - y_1) \quad (3.9)$$

Cuando el vehículo toma una trayectoria curva, las fuerzas inerciales centrípetas hacen que el vehículo, influenciado por la acción de la rigidez de las llantas y la carga puesta en su sistema de suspensión, se inclina en un ángulo  $\theta$ , lo que provoca

el movimiento del centro de gravedad  $p$  alrededor del centro de masa (CM) del vehículo, luego, el líquido transportado toma su posición.

**Figura 3. 3 Análisis de la inercia lateral del tanque**



**Fuente: Xian Li, 2013**

El ajuste entre estos centros de masa es lo que da el nacimiento del “principio de la estabilidad”, y para que exista estabilidad la variación de esta pendiente  $\theta$  no debe ser muy grande, caso contrario se presentará un accidente.

### **3.2 MODELO DINÁMICO DE VELOCIDAD PARA TANQUES CISTERNA PARCIALMENTE LLENOS**

Las aceleraciones laterales y longitudinales, experimentadas por un camión cisterna en maniobras de dirección y frenado, imponen aceleraciones inerciales iguales y opuestas sobre la carga líquida, provocando el movimiento del líquido tanto en dirección lateral (plano de balanceo) como longitudinal (plano de cabeceo).

Suponiendo condiciones de flujo de fluido no viscoso y en estado estacionario, se considera que todo el volumen líquido dentro de un tanque parcialmente lleno se mueve como un volumen rígido. La ecuación de la superficie libre de líquido puede determinarse así a partir de las variaciones de presión en un fluido estático<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Las coordenadas del líquido a granel c-g., las magnitudes correspondientes del desplazamiento de la carga del líquido a lo largo de los ejes lateral, vertical y longitudinal, y las variaciones en los

### 3.2.1 Modelo de superficie libre de líquido

Las variaciones de presión en el centro de un elemento de la masa líquida en el sistema de coordenadas fijo del tanque (Fig. 3.1), XYZO, se pueden expresar como:

$$dP = \frac{\partial P}{\partial x} dx + \frac{\partial P}{\partial y} dy + \frac{\partial P}{\partial z} dz \quad (3.10)$$

Las fuerzas que actúan sobre el elemento se pueden expresar mediante la siguiente ecuación de equilibrio:

$$F_{Ix} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3.11)$$

$$F_{Iy} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3.12)$$

$$F_{Iz} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3.13)$$

Donde:

$F_{Ix}$ ,  $F_{Iy}$  y  $F_{Iz}$ : representan las fuerzas del cuerpo por unidad de masa del elemento líquido en las direcciones OX, OY y OZ, respectivamente.

$\rho$  es la densidad de masa de la carga líquida.

Volviendo a la ecuación (3.10) y dividiendo entre la densidad se obtiene la expresión diferencial en función de las fuerzas de la siguiente forma:

$$\frac{dP}{\rho} = (F_{Ix} dx + F_{Iy} dy + F_{Iz} dz) \quad (3.14)$$

---

momentos de inercia de la masa del líquido a granel se pueden calcular con base en la ecuación de la superficie libre del líquido.

Dado que el diferencial de presión debido a elemento desaparece en la superficie libre, la ecuación (3.14) se reduce a:

$$F_{Ix}dx + F_{Iy}dy + F_{Iz}dz = 0 \quad (3.15)$$

Aplicando la integral indefinida a cada función diferencial, se tiene:

$$F_{Ix} \int dx + F_{Iy} \int dy + F_{Iz} \int dz = 0 \quad (3.16)$$

$$F_{Ix}x + F_{Iy}y + F_{Iz}z = C_o \quad (3.17)$$

Donde:

$C_o$  es una constante del resultado de la integral indefinida.

La ecuación de la superficie libre de líquido en términos de coordenadas X y Z en el sistema tridimensional del eje del tanque, se puede expresar como:

$$f_s(x, z) = \frac{C_o - F_{Ix}x - F_{Iz}z}{F_{Iy}} \quad (3.18)$$

Cuando la carga líquida experimenta una fuerza de cuerpo lateral pura en el plano de balanceo, como en el caso de giro a velocidad constante, la Ecuación (3.18) se reduce a:

$$f_s(z) = \frac{C_o - F_{Iz}z}{F_{Iy}} \quad (3.19)$$

Por otra parte, el movimiento del plano de balanceo del cuerpo líquido (Fig. 3.3), las fuerzas se definen como:

$$F_{Iy} = a_{Iy}(Cos\theta_{s2} + Sen\theta_{s2}) \quad (3.20)$$

$$F_{Iz} = a_{Iy}(Cos\theta_{s2} - Sen\theta_{s2}) \quad (3.21)$$

Donde:

$a_{ly}$ : representa la aceleración lateral del líquido

$\theta_{s2}$ : es el ángulo de balanceo del camión cisterna en la superficie posterior del tanque  $S_2$

Por lo tanto, la ecuación (3.19) se puede expresar como:

$$f_s(z) = \frac{\text{Tang}\theta_{s2} - 1}{\text{Tang}\theta_{s2} + 1} z + \frac{C_o}{a_{ly}(\text{Cos}\theta_{s2} + \text{Sen}\theta_{s2})} \quad (3.22)$$

Para ángulos de balanceo pequeños, la ecuación (3.22) se reduce a la ecuación de superficie libre de líquido en el plano de balanceo similar a la desarrollada por Rakheja et al:

$$f_s(z) = \frac{\theta_{s2} - 1}{\theta_{s2} + 1} z + h_o \quad (3.23)$$

Donde:

$\theta_{s2}$ : es el ángulo de balanceo del tanque de la superficie posterior del tanque cisterna, y se expresa en radianes.

$h_o = \frac{C_o}{a_{ly} \cdot m \cdot (\text{Cos}\theta_{s2} + \text{Sen}\theta_{s2})}$ : es el término constante que representa la intersección de la superficie libre de líquido con el eje axial.

Bajo la aplicación de la aceleración longitudinal únicamente, como en el caso del frenado en línea recta, la ecuación de la superficie libre en términos de la coordenada  $x, y$ ; tenemos:

$$f_s(x, y) = \frac{C_o - F_{Ix}x - F_y y}{F_{Iz}} \quad (3.24)$$

Luego, se puede deducir el cambio de la Ecuación (3.24), haciendo que  $F_{Ij}=0.$ , tal que:

$$f_s(x) = \frac{C_o - F_{Ix}x}{F_{Iz}} \quad (3.25)$$

Por otra parte, la fuerza en el eje x no depende del ángulo de balanceo, por tanto, se deduce que:

$$F_{Ix} = a_{Ix} \quad (3.26)$$

Se reduce a la ecuación de la superficie del líquido en el plano de paso similar a la anterior desarrollada como:

$$f_s(x) = \frac{a_{Ix}}{a_{Iy}(\text{Sen}\theta_{s2} - \text{Cos}\theta_{s2})}x + h_1 \quad (3.27)$$

Donde:

$h_1 = \frac{C_o}{a_{Iy} \cdot m \cdot (\text{Cos}\theta_{s2} - \text{Sen}\theta_{s2})}$ : es el término constante que representa la intersección del líquido

### 3.2.2 Desplazamiento de carga líquida y momentos de masa

Las coordenadas instantáneas del líquido,  $(X_l, Y_l, Z_l)$ , se evalúan a partir de las siguientes integrales de momento:

$$X_l = \frac{1}{V_f} \iiint x dV \quad (3.28)$$

$$Y_l = \frac{1}{V_f} \iiint y dV \quad (3.29)$$

$$Z_l = \frac{1}{V_f} \iiint z dV \quad (3.30)$$

Sabiendo que el volumen de líquido final  $V_f$  en un punto es igual a:

$$V_f = \int \int \int dV \quad (3.31)$$

Los cambios en las coordenadas del líquido a granel, por ejemplo, causados por aplicaciones de excitación lateral y longitudinal, pueden expresarse como:

$$\Delta X_l = \frac{L}{2} - X_l \quad (3.32)$$

$$\Delta Y_l = Y \quad (3.33)$$

$$\Delta Z_l = Z_l - Z_{l(0)} \quad (3.34)$$

Donde:

$Z_{l(0)}$  es la altura estática de la carga líquida desde la base del tanque.

Las coordenadas del líquido en términos del sistema de coordenadas fijas de la masa suspendida dentro el tanque se expresan como:

$$X_{l(2)} = X_l - X_b \quad (3.35)$$

$$Y_{l(2)} = Y_l \quad (3.36)$$

$$Z_{l(2)} = -(Z_l + Z_b) \quad (3.37)$$

Donde:

$X_b$  denota la coordenada longitudinal del remolque cisterna vacío, con respecto al sistema de coordenadas fijo del cuerpo del tanque (un valor positivo indica que el punto se encuentra por delante del origen del sistema fijo del cuerpo del tanque)

$Z_b$  representa la distancia entre la base del tanque y el centro de gravedad de estructura de remolque de tanque vacío.

Los momentos de inercia de masa del tanque del camión cisterna también varían considerablemente con variaciones en la superficie libre. Los valores instantáneos de los momentos de inercia de la masa del líquido a granel desviado con respecto

al sistema de coordenadas fijo del cuerpo del tanque se calculan a partir de tres integrales de volumen, como se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$I_{X_l} = \rho L_{TNK} \int \int (y^2 + z^2) dydz \quad (3.38)$$

$$I_{Y_l} = \frac{\rho L_{TNK}^3}{3} \int \int dydz + \rho L_{TNK} \int \int z^2 dydz \quad (3.39)$$

$$I_{Z_l} = \frac{\rho L_{TNK}^3}{3} \int \int dydz + \rho L_{TNK} \int \int y^2 dydz \quad (3.40)$$

Los momentos de inercia del líquido desviado con respecto al sistema de coordenadas fijo de la carrocería del remolque cisterna se calculan a partir de las ecuaciones (3.41), (3.42) y (3.43):

$$I_{X_{l(2)}} = I_{X_l} + \frac{W_l}{g} (Z_b^2 + 2Z_b Z_l) \quad (3.41)$$

$$I_{Y_{l(2)}} = I_{Y_l} + \frac{W_l}{g} (X_b^2 - 2X_b X_l + Z_b^2 + 2Z_b Z_l) \quad (3.42)$$

$$I_{Z_{l(2)}} = I_{Z_l} + \frac{W_l}{g} (X_b^2 - 2X_b X_l) \quad (3.43)$$

Dónde:

$I_x, I_y, I_z$ : Son los momentos de inercia del líquido desviado

### 3.3 MODELO TRIDIMENSIONAL DINÁMICO VARIABLE

Las ecuaciones de movimiento del modelo tridimensional de velocidad variable del sistema de vehículo cisterna se derivan de la consideración de la dinámica de varios subsistemas y sus interacciones.

Para interpretar las ecuaciones de movimiento del sistema vehicular, es conveniente definir los sistemas de coordenadas apropiados. La dinámica de los

subsistemas del vehículo se describe así en sistemas de coordenadas ortogonales definidos en la subsección siguiente.

### **3.3.1 Sistemas de coordenadas**

Tres sistemas de coordenadas ortogonales se definen como sigue:

Un sistema de coordenadas inercial: un sistema de coordenadas ortogonales de mano derecha (I, J, K) fijo en el espacio se usa como punto de referencia a partir del cual se definen los movimientos y actitudes del vehículo. El arranque se coloca en la masa suspendida del tractor c-g. al comienzo de la simulación. El sistema de coordenadas inerciales está alineado con el vector de gravedad y la proyección horizontal del eje longitudinal del camión cisterna<sup>7</sup>.

Sistemas de coordenadas fijas del tanque cisterna: se adjunta un sistema de coordenadas fijas del vehículo a cada una de las masas suspendidas, que define la ubicación y actitud del vector de movimiento y la masa con respecto al sistema de coordenadas inercial. Los tres ángulos requeridos para definir la orientación de cada uno de los sistemas de ejes de masas suspendidas con respecto al sistema de coordenadas inercial. En el sistema de ejes, se fija un sistema de ejes y se define la dirección de la masa no suspendida, en relación con la respectiva masa suspendida.

### **3.3.2 Definición matemática del sistema de coordenadas fijo**

El sistema de cada masa está relacionado con el sistema inercial mediante la siguiente transformación:

---

<sup>7</sup> Los ejes se definen de acuerdo con la convención SAE, donde i es el eje horizontal que sale de la parte delantera del vehículo, j es el eje horizontal que sale del lado derecho del vehículo y k es el eje vertical que apunta hacia abajo.

$$\begin{bmatrix} i_n \\ j_n \\ k_n \end{bmatrix} = D_{sf} \begin{bmatrix} i_s \\ j_s \\ k_s \end{bmatrix}_f ; (f = (1,2))$$

Donde la matriz de transformación  $D_{sf}$  se puede deducir utilizando tres pasos secuenciales de rotaciones (alabeo, cabeceo y guiñada).

$$D_{sf} = D_{rotación} \cdot D_{cabeceo} \cdot D_{guiñada}$$

Donde:  $D_{rotación}$ ,  $D_{cabeceo}$ ,  $D_{guiñada}$ , representan matrices de rotación de alabeo, cabeceo y guiñada, respectivamente, y están dadas por:

$$D_{rotación} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_s & -\sin\theta_s \\ 0 & \sin\theta_s & \cos\theta_s \end{bmatrix}$$

$$D_{cabeceo} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_s & 0 & \sin\alpha_s \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha_s & 0 & \cos\alpha_s \end{bmatrix}$$

$$D_{guiñada} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_s & -\sin\varphi_s & 0 \\ \sin\varphi_s & \cos\varphi_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde:

$\cos\theta_s, \sin\theta_s, \cos\alpha_s, \sin\alpha_s, \cos\varphi_s$  y  $\sin\varphi_s$ . Son los ángulos de balanceo, cabeceo y guiñada, respectivamente, de la unidad suspendida.

Para las nivelaciones se sustituyen los valores de los ángulos y posteriormente se procede a multiplicar obteniendo tres coordenadas en tres tiempos determinados<sup>8</sup>.

### 3.3.3 Ecuaciones de movimiento

Se presenta a continuación la matriz para evaluar y predecir, la dinámica de cada masa suspendida, que se describe mediante ecuaciones diferenciales de segundo orden.

Para el vector de aceleración inicial del fluido se tiene:

$$a_f = \{u_f + q_f w_f - r_f v_f\}i + \{v_f + r_f u_f - p_f w_f\}j + \{w_f + p_f v_f - q_f u_f\}k \quad (3.44)$$

Para el punto de aceleración 2 se tiene la siguiente relación:

$$a_{l(2)} = \{a_{lx}\}i + \{a_{ly}\}j + \{a_{lz}\}k \quad (3.45)$$

Reemplazando variables se tiene entonces:

$$\begin{aligned} a_{l(2)} = & \{a_{x(2)} + q_2 Z_{l(2)} - r_2 Y_{l(2)} + q_2(p_2 Y_{l(2)} - q_2 X_{l(2)}) - r_2(r_2 X_{l(2)} - p_2 Z_{l(2)})\}i \\ & + \{a_{y(2)} + r_2 X_{l(2)} - p_2 Y_{l(2)} + r_2(q_2 Z_{l(2)} - r_2 Y_{l(2)}) - p_2(p_2 Y_{l(2)} - q_2 X_{l(2)})\}j \\ & + \{a_{z(2)} + p_2 Y_{l(2)} - q_2 X_{l(2)} + p_2(r_2 Z_{l(2)} - p_2 Y_{l(2)}) - q_2(q_2 Z_{l(2)} \\ & - r_2 Y_{l(2)})\}j \end{aligned} \quad (3.49)$$

<sup>8</sup> Para recordar, la multiplicación de una matriz 3 por 3 e resuelve de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \times b_{11} + a_{12} \times b_{21} + a_{13} \times b_{31} & a_{11} \times b_{12} + a_{12} \times b_{22} + a_{13} \times b_{32} & a_{11} \times b_{13} + a_{12} \times b_{23} + a_{13} \times b_{33} \\ a_{21} \times b_{11} + a_{22} \times b_{21} + a_{23} \times b_{31} & a_{21} \times b_{12} + a_{22} \times b_{22} + a_{23} \times b_{32} & a_{21} \times b_{13} + a_{22} \times b_{23} + a_{23} \times b_{33} \\ a_{31} \times b_{11} + a_{32} \times b_{21} + a_{33} \times b_{31} & a_{31} \times b_{12} + a_{32} \times b_{22} + a_{33} \times b_{32} & a_{31} \times b_{13} + a_{32} \times b_{23} + a_{33} \times b_{33} \end{bmatrix}$$

## CAPITULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA

### 4.1 ANÁLISIS DE LAS CONFIGURACIONES DE TANQUE UTILIZADAS ACTUALMENTE.

#### 4.1.1 Datos generales del tanque cisterna:

Los tanques que alquilan YPFB son elípticos, Por tanto, se realiza el cálculo previo del momento de inercia para la sección transversal.

*Figura 4. 1 Tanque cisterna a analizar*



Fuente: IBMETRO, 2023

Los tanques que utiliza son de la marca China Xiagon y presenta los siguientes datos, cómo se muestra a continuación:

**Tabla 4. 1 Datos del Tanque cisterna**

<b>DIMENSIONES PRINCIPALES</b>	<b>VALOR</b>
Longitud total	11,80 m.
Ancho total	2,50 m.
Altura total	3,60 m.
Capacidad recomendada	40 m <sup>3</sup>
Capacidad total	42 m <sup>3</sup>
Peso con tanque vacío	3600 kg

*Fuente: Xiagon, 2022*

#### 4.1.2 Cálculo del momento de inercia para tanque de sección transversal elíptica

Para simplificar los cálculos, ubiquemos el centro de la elipse en el origen de un sistema de coordenadas cartesianas. Esto nos resulta en la siguiente ecuación canónica:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4.1)$$

Donde a y b son las distancias (positivas) de los semiejes de la elipse.

De acuerdo entonces a la definición de momento de inercia de un área, se tiene:

$$I_x = \int y^2 dA \quad (4.2)$$

$$I_y = \int x^2 dA \quad (4.3)$$

Donde:

dA es un elemento infinitesimal de Área

En coordenadas cartesianas esta integración puede llevarse a cabo de la siguiente manera:

$$x = \frac{a}{b}x'; y = y' \quad (4.4)$$

Este cambio, permite llevar la elipse en el plano x, y a una circunferencia en el plano x', y'. De esta manera se puede proceder a hacer la integración por coordenadas polares.

Cambio de coordenadas:

$$x' = r\cos\theta \quad (4.5)$$

$$y' = r\sin\theta \quad (4.6)$$

$$dA' = r dr d\theta \quad (4.7)$$

Al implementar todos los cambios mencionados se tiene:

$$I_{x'} = \int y'^2 dA' = \int \int (r\sin\theta)^2 r dr d\theta \quad (4.8)$$

$$I_{x'} = \int \int r^3 \sin^2\theta dr d\theta \quad (4.9)$$

Para r, se integra bajo la definición de 0 a b:

$$I_{x'} = \int \frac{1}{4} [r^4]_0^b \sin^2\theta d\theta = \frac{b^4}{4} \int \sin^2\theta d\theta \quad (4.10)$$

Para  $\theta$  se integra desde 0 a  $2\pi$

$$I_{x'} = -\frac{b^4}{4} \cos\theta \Big|_0^{2\pi} = \frac{b^4}{4} (\cos 0 - \cos 2\pi) \quad (4.11)$$

$$I_{x'} = \frac{\pi}{4} b^4 \quad (4.12)$$

Para el eje y:

$$I_{y'} = \int x'^2 dA' = \int \int (r \cos \theta)^2 r dr d\theta \quad (4.13)$$

$$I_{y'} = \int \int r^3 \cos^2 \theta dr d\theta \quad (4.14)$$

Para r, se integra bajo la definición de 0 a b:

$$I_{y'} = \int \frac{1}{4} [r^4]_0^b \cos^2 \theta d\theta = \frac{b^4}{4} \int \cos^2 \theta d\theta \quad (4.15)$$

Para  $\theta$  se integra desde 0 a  $2\pi$

$$I_{y'} = -\frac{b^4}{4} \text{Sen} \theta \Big|_0^{2\pi} = \frac{b^4}{4} (\text{Sen} 2\pi - \text{Sen} 0) \quad (4.16)$$

$$I_{y'} = \frac{\pi}{4} b^4 \quad (4.17)$$

Este resultado se da debido a que en el plano  $x'$ ,  $y'$  la elipse en cuestión es una circunferencia de radio b. Para tener estos resultados con respecto al sistema  $xy$  original es necesario tomar en cuenta lo siguiente:

$$dA' = dx' dy' \quad (4.18)$$

$$dx' = \frac{b}{a} dx ; dy' = dy \quad (4.19)$$

Integrando:

$$x' = \frac{b}{a} x ; dy' = dy \quad (4.20)$$

Realizando entonces relaciones entre momentos de inercia se tiene:

En el eje x:

$$\frac{I_x}{I_{x'}} = \frac{\int y^2 dA}{\int y'^2 dA'} \quad (4.21)$$

$$\frac{I_x}{I_{x'}} = \frac{\int y^2 dx dy}{\frac{b}{a} \int y^2 dx dy} \quad (4.22)$$

$$I_x = \frac{a}{b} I_{x'} \quad (4.23)$$

En el eje y:

$$\frac{I_y}{I_{y'}} = \frac{\int x^2 dA}{\int x'^2 dA'} \quad (4.24)$$

$$\frac{I_y}{I_{y'}} = \frac{\int x^2 dx dy}{\frac{b^3}{a^3} \int x^2 dx dy} \quad (4.25)$$

$$I_y = \frac{a^3}{b^3} I_{y'} \quad (4.26)$$

Finalmente, el momento respectivo para cada eje será:

$$I_x = \frac{\pi}{4} ab^3 ; \quad I_y = \frac{\pi}{4} a^3 b \quad (4.27)$$

Reemplazando los datos del tanque se tiene:

$$I_x = \frac{\pi}{4} \left(\frac{3,6}{2}\right) * \left(\frac{2,5}{2}\right)^3 ; \quad I_y = \frac{\pi}{4} \left(\frac{3,6}{2}\right)^3 * \left(\frac{2,5}{2}\right)$$

$$I_x = 2,7612 m^4 ; \quad I_y = 5,7256 m^4$$

Dónde,

$I_x, I_y, I_z$ : son los momentos de inercia para cada eje de coordenadas

## 4.2 VARIACIÓN DE LA INERCIA DENTRO DEL TANQUE CISTERNA

### 4.2.1 Análisis cuantitativo de desplazamiento de carga líquida y momentos de masa

Se realiza nuevamente el análisis del punto inicial, se considera que el volumen final  $V_f$  es el volumen total de carga en el tanque (nos damos un dato para suponer la simulación). Es decir:

$$V_f = 30 \text{ m}^3 \text{ volumen con el que cuenta el tanque} \quad (4.28)$$

Para el eje x se tiene:

$$X_l = \frac{1}{V_f} \iiint x dV \quad (4.29)$$

$$X_l = \frac{1}{2V_f} x^2 yz$$

$$X_l = \frac{1}{2 \times 30} 1,5^2 m^2 (1,6m)(11m) = 0,66 \text{ m}$$

Para el eje y se tiene:

$$Y_l = \frac{1}{V_f} \iiint y dV \quad (4.30)$$

$$Y_l = \frac{1}{2V_f} y^2 xz$$

$$Y_l = \frac{1}{2 \times 30} 1,6^2 m^2 (1,5m)(11m) = 0,704 m$$

Para el eje z se tiene:

$$Z_l = \frac{1}{V_f} \int \int \int z dV \quad (4.31)$$

$$Z = \frac{1}{2V_f} z^2 xy$$

$$Z_l = \frac{1}{2 \times 30} 11^2 m^2 (1,6m)(1,5m) = 4,86$$

La coordenada dentro del tanque donde empieza el choque de flujo o el movimiento del líquido es:

$$[X_l; Y_l; Z_l] = [0,66; 0,71; 4,86]m$$

Los cambios en las coordenadas del líquido a granel, serán:

$$\Delta Z_l = \frac{L}{2} - Z_l \quad (4.32)$$

$$\Delta Z_l = \frac{11}{2} - 4,86$$

$$\Delta X_l = X \quad (4.33)$$

$$\Delta X_l = 2,6 m$$

$$\Delta Y_l = y_l - y_{l(0)} \quad (4.34)$$

$$\Delta y_l = 3,6 - 0,77 = 2,86 m$$

Las coordenadas del líquido en términos del sistema de coordenadas fijas de la masa serán:

$$X_{l(2)} = X_l - X_b \quad (4.35)$$

$$X_{l(2)} = 0,66 - 0,5 = 0,16 \text{ m}$$

$$Y_{l(2)} = Y_l \quad (4.36)$$

$$Y_{l(2)} = 0,71 \text{ m}$$

$$Z_{l(2)} = -(Z_l + Z_b) \quad (4.37)$$

$$Z_{l(2)} = -(4,86 + 0,5) = -5,36 \text{ m}$$

Para las inercias finales:

$$I_{X_{l(2)}} = I_{X_l} + \frac{W_l}{g} (Z_b^2 + 2Z_b Z_l) \quad (4.38)$$

$$I_{Y_{l(2)}} = I_{Y_l} + \frac{W_l}{g} (X_b^2 - 2X_b X_l + Z_b^2 + 2Z_b Z_l) \quad (4.39)$$

$$I_{Z_{l(2)}} = I_{Z_l} + \frac{W_l}{g} (X_b^2 - 2X_b X_l) \quad (4.40)$$

Dónde:

$I_x, I_y, I_z$ : Son los momentos de inercia del líquido desviado

$X_b$  denota la coordenada longitudinal del remolque cisterna vacío, con respecto al sistema de coordenadas fijo del cuerpo del tanque (un valor positivo indica que el punto se encuentra por delante del origen del sistema fijo del cuerpo del tanque)

$Z_b$  representa la distancia entre la base del tanque y el centro de gravedad de estructura de remolque de tanque vacío.

Luego iterando varias veces se tiene la siguiente tabla de inercias para diferentes tiempos de recorrido del camión cisterna:

**Tabla 4. 2 Variación de la inercia del tanque**

<b>t [min]</b>	<b>Ix (t)</b>	<b>Iy (t)</b>	<b>Iz (t)</b>
0	0,518195296	1,117085768	6,185331119
2	1,206857545	2,677270857	15,14988891
4	2,405851515	5,233723226	29,18333759
6	2,478815516	5,536521889	31,48680162
8	2,530528103	5,407291436	29,73426068
10	2,538797139	5,569269763	31,25215783
12	2,374919318	5,272684175	29,85417925
14	2,570969332	5,582260573	31,08127024
16	2,363255251	5,279115466	30,02582017
18	2,640970631	5,641124848	31,01069209
20	2,460850962	5,393661818	30,24716779
22	2,438829538	5,420018517	30,71116504
24	2,525328856	5,469588117	30,39586274
26	2,412070372	5,385210481	30,6169892
28	2,591878711	5,544973315	30,51998819
30	2,477720973	5,449072311	30,63601738
32	2,432999762	5,382971939	30,40057919
34	2,498280117	5,467282497	30,62436548

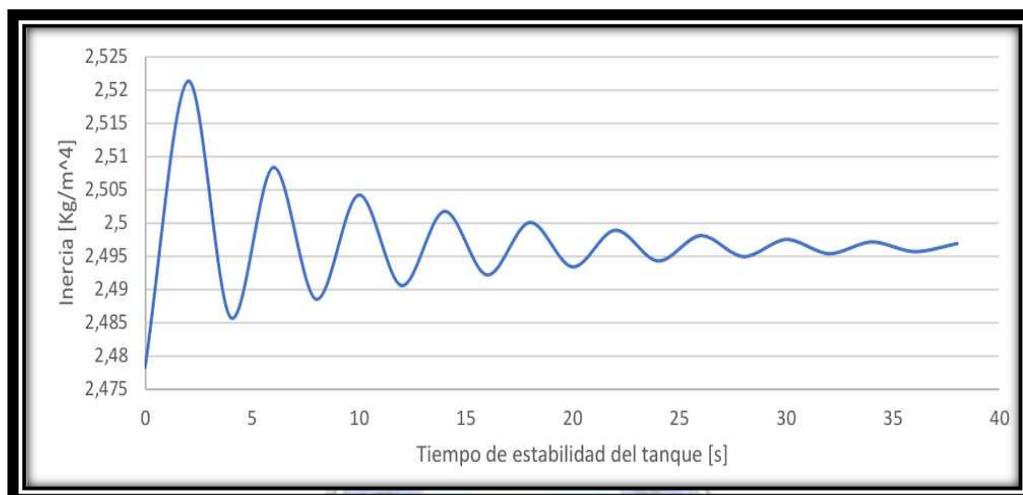
**Fuente:** Elaboración propia en base a simulación en Excel, 2023

Luego se procede a graficar en los siguientes puntos:

#### **4.2.2 Simulación de la variación con 15 m<sup>3</sup> de combustible**

Se obtiene los siguientes resultados para cada eje del movimiento

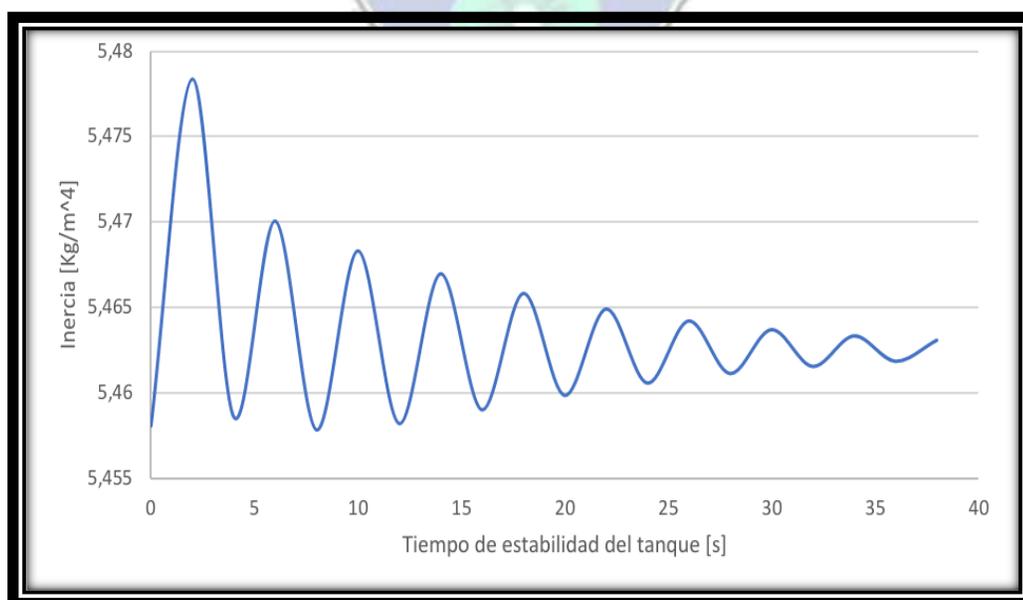
**Figura 4. 2 Simulación de movimiento de flujo con un 15 m<sup>3</sup> el eje x**



**Fuente:** Elaboración propia en base a ecuaciones diferenciales para simulación en Excel, 2023

En la anterior figura se ve que mientras avanza desde un punto de aceleración cero la inercia varía entre 2,48 a 2,523 [Kg\*m<sup>2</sup>], pero no permanece constante lo cual puede empujar al tanque desde el interior y generar accidentes. La inercia alcanza una oscilación promedio entre 2,491 a 2,495 [Kg\*m<sup>2</sup>].

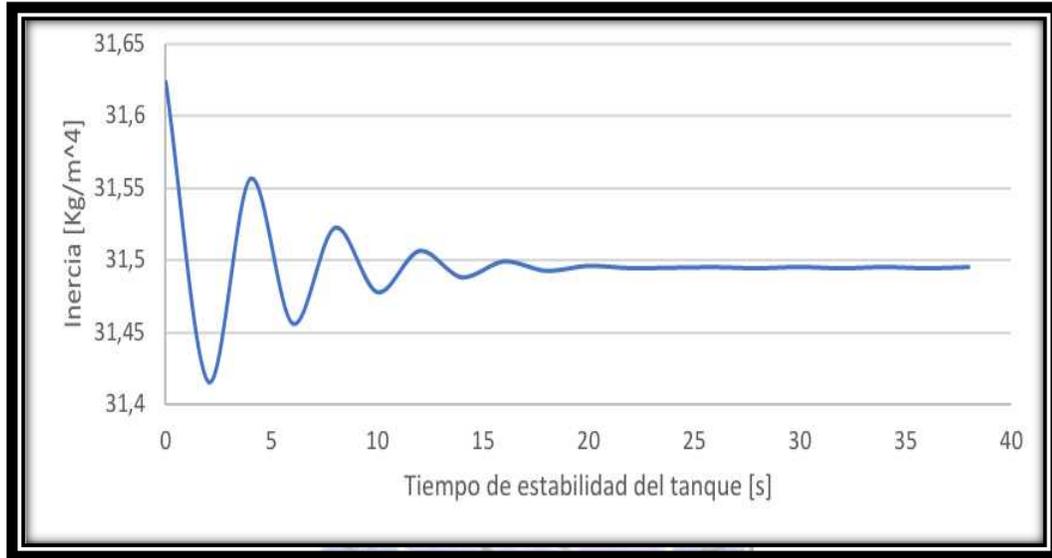
**Figura 4. 3 Simulación de movimiento de flujo con un 15 m<sup>3</sup> el eje y**



**Fuente:** Elaboración propia en base a ecuaciones diferenciales para simulación en Excel, 2023

En la anterior figura se ve que mientras que acelera el tanque en un tiempo cero, la inercia varía entre 5,457 a 5,478 [Kg\*m<sup>2</sup>], pero no permanece constante. La inercia alcanza una oscilación promedio entre 5,461 a 5,463 [Kg\*m<sup>2</sup>].

**Figura 4. 4 Simulación de movimiento de flujo con un 15 m<sup>3</sup> el eje z**



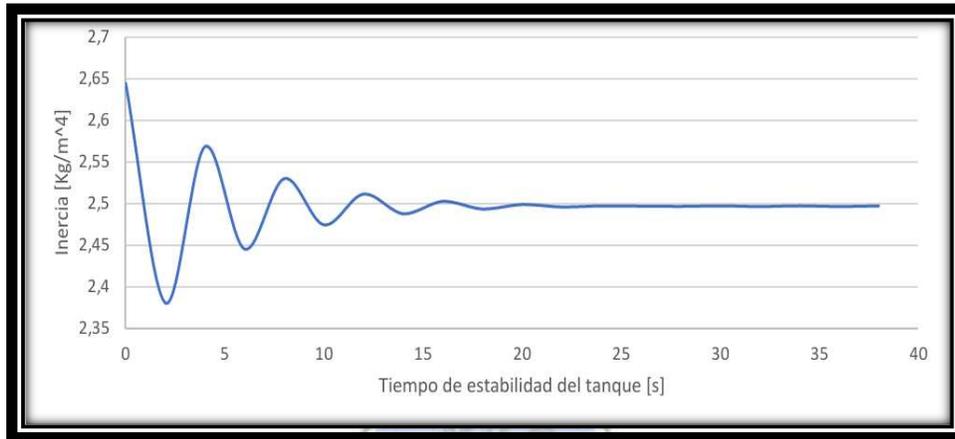
*Fuente: Elaboración propia en base a ecuaciones diferenciales para simulación en Excel, 2023*

En la anterior figura se ve que mientras avanza desde un punto de aceleración cero la inercia varía entre 31,62 a 31,42 [Kg\*m<sup>2</sup>], y permanece constante. La inercia alcanza una oscilación promedio de 31,50 [Kg\*m<sup>2</sup>].

#### **4.2.3 Simulación de la variación con 20 m<sup>3</sup> de combustible**

Se obtiene los siguientes resultados para cada eje del movimiento

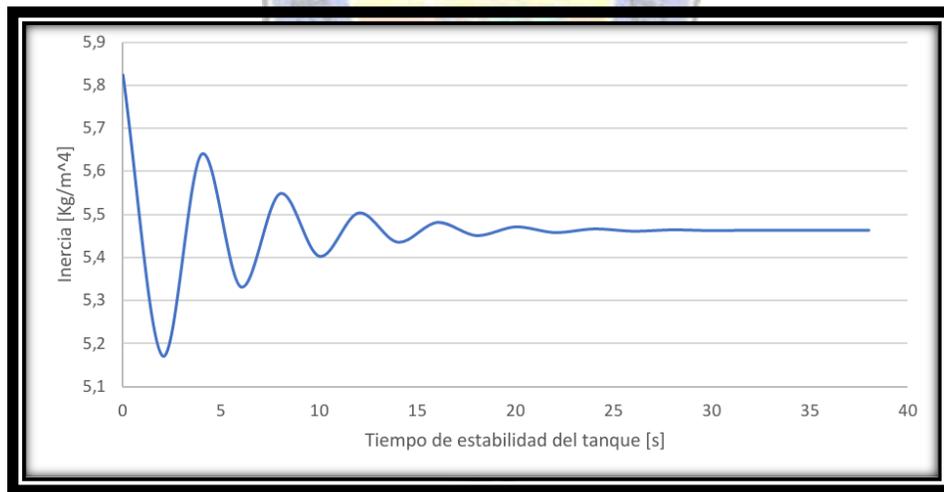
**Figura 4. 5 Simulación de movimiento de flujo con un 20 m<sup>3</sup> el eje x**



**Fuente:** Elaboración propia en base a ecuaciones diferenciales para simulación en Excel, 2023

En la anterior figura se ve que mientras avanza desde un punto de aceleración cero la inercia varía entre 2,65 a 2,38 [Kg\*m<sup>2</sup>], y se mantendrá constante porque se incrementó el volumen. La inercia alcanza una oscilación promedio de 2,50 [Kg\*m<sup>2</sup>].

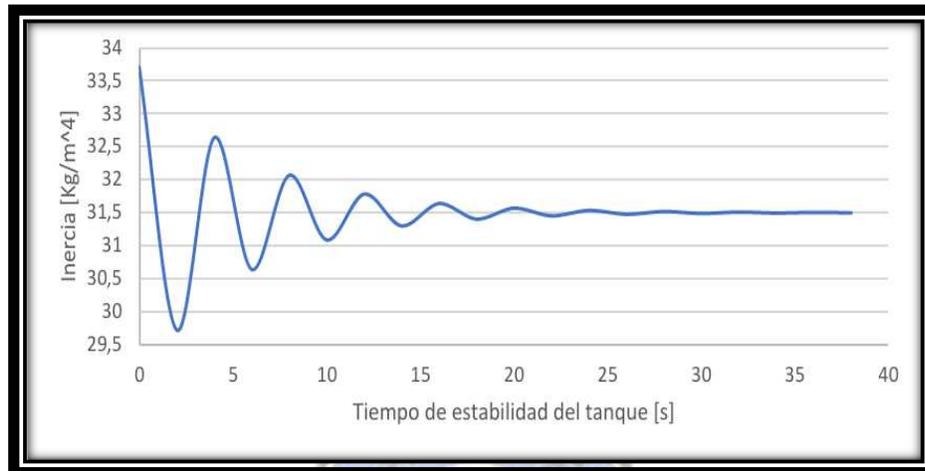
**Figura 4. 6 Simulación de movimiento de flujo con un 20 m<sup>3</sup> el eje y**



**Fuente:** Elaboración propia en base a ecuaciones diferenciales para simulación en Excel, 2023

En la anterior figura se ve que mientras avanza desde un punto de aceleración cero la inercia varía entre 5,81 a 5,18 [Kg\*m<sup>2</sup>]. La inercia alcanza una oscilación promedio de 5,48 [Kg\*m<sup>2</sup>].

**Figura 4. 7 Simulación de movimiento de flujo con un 20 m<sup>3</sup> el eje z**



**Fuente:** Elaboración propia en base a ecuaciones diferenciales para simulación en Excel, 2023

En la anterior figura se ve que mientras avanza desde un punto de aceleración cero la inercia varía entre 33,70 a 29,70 [Kg\*m<sup>2</sup>], pero permanece constante debido al incremento del volumen en el tanque. La inercia alcanza una oscilación promedio de 31,50 [Kg\*m<sup>2</sup>].

#### 4.2.4 Simulación de la variación con 30 m<sup>3</sup> de combustible

Se obtiene los siguientes resultados para cada eje

**Figura 4. 8 Simulación de movimiento de flujo con un 30 m<sup>3</sup> el eje x**



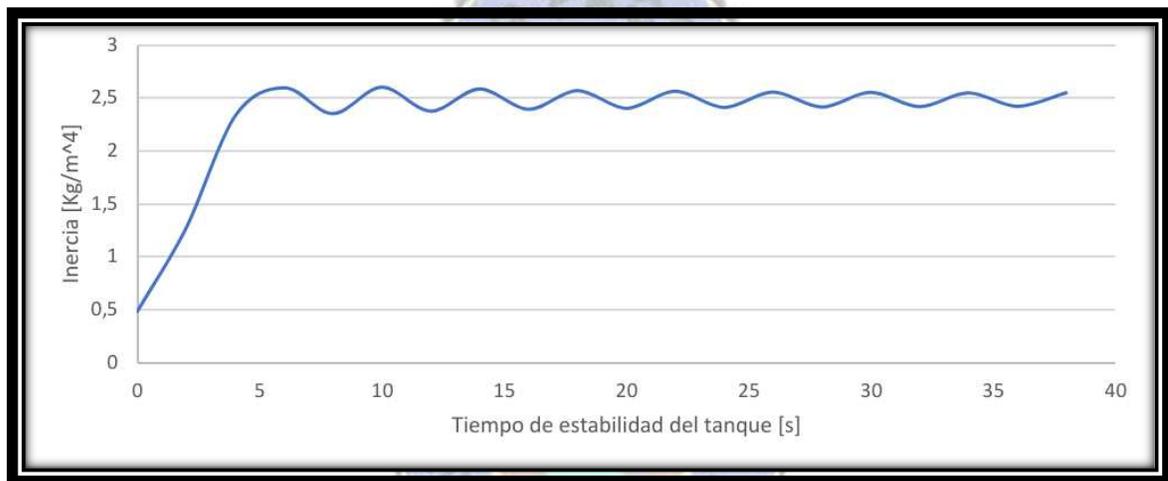
**Fuente:** Elaboración propia en base a ecuaciones diferenciales para simulación en Excel, 2023

En la anterior figura se ve que mientras avanza desde un punto de aceleración cero la inercia varía entre 2,00 a 2,70 [Kg\*m<sup>2</sup>]. La inercia alcanza una oscilación promedio de 2,50 [Kg\*m<sup>2</sup>].

#### 4.2.5 Simulación de la variación con 40 m<sup>3</sup> de combustible

Se obtiene los siguientes resultados para cada eje del movimiento

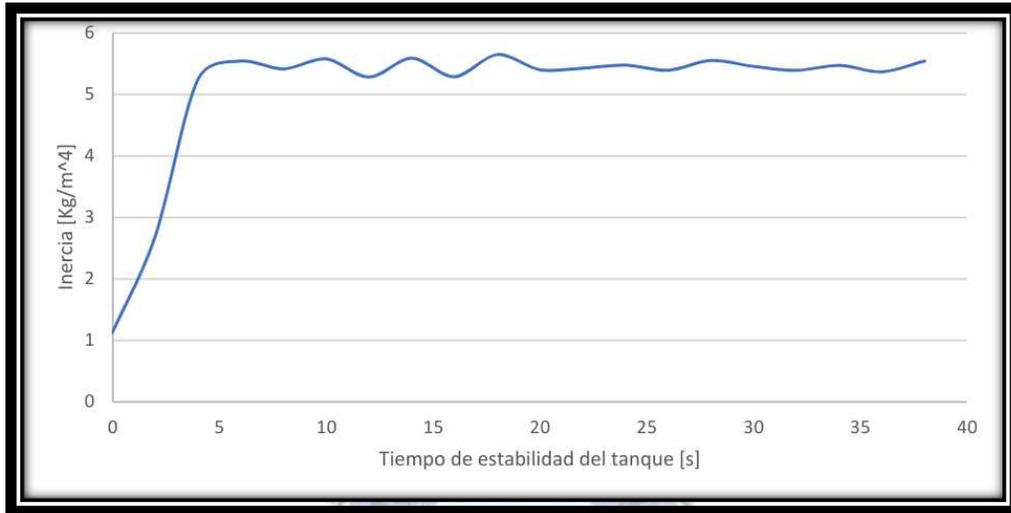
**Figura 4. 9 Simulación de movimiento de flujo con un 40 m<sup>3</sup> el eje x**



**Fuente: Elaboración propia en base a ecuaciones diferenciales para simulación en Excel, 2023**

En la anterior figura se ve que mientras avanza desde un punto de aceleración cero la inercia varía entre 0,50 a 2,60 [Kg\*m<sup>2</sup>], pero no permanece constante lo cual puede empujar al tanque desde el interior y generar accidentes. La inercia alcanza una oscilación promedio entre 2,40 a 2,60 [Kg\*m<sup>2</sup>].

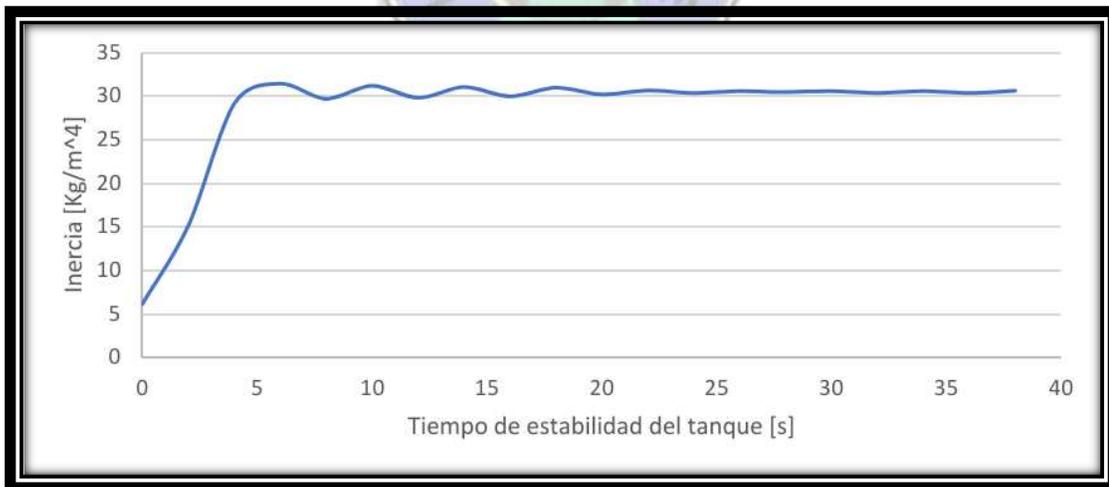
**Figura 4. 10 Simulación de movimiento de flujo con un 40 m<sup>3</sup> el eje y**



**Fuente:** Elaboración propia en base a ecuaciones diferenciales para simulación en Excel, 2023

En la anterior figura se ve que mientras avanza desde un punto de aceleración cero la inercia varía entre 1,20 a 5,50 [Kg\*m<sup>2</sup>], pero no permanece constante lo cual puede empujar al tanque desde el interior y generar accidentes. La inercia alcanza una oscilación promedio entre 5,20 a 5,65 [Kg\*m<sup>2</sup>].

**Figura 4. 11 Simulación de movimiento de flujo con un 40 m<sup>3</sup> el eje z**



**Fuente:** Elaboración propia en base a ecuaciones diferenciales para simulación en Excel, 2023

En la anterior figura se ve que mientras avanza desde un punto de aceleración cero la inercia varía entre 7,00 a 32,00 [Kg\*m<sup>2</sup>], pero no permanece constante lo cual

puede empujar al tanque desde el interior y generar accidentes. La inercia alcanza una oscilación promedio de 30,00 [Kg\*m<sup>2</sup>].

#### 4.2.6 Análisis de resultados general

Se presentan los anteriores resultados en la siguiente tabla:

*Tabla 4. 3 Variación de la inercia del tanque*

Volumen	Referencia	Inercia min. [Kg*m <sup>2</sup> ]	Inercia máx. [Kg*m <sup>2</sup> ]
Para un tanque con 15 m <sup>3</sup> de combustible	Eje x	2,491	2,495
	Eje y	2,461	2,463
	Eje z	31,50	31,50
Para un tanque con 20 m <sup>3</sup> de combustible	Eje x	2,50	2,50
	Eje y	5,48	5,48
	Eje z	31,50	31,50
Para un tanque con 30 m <sup>3</sup> de combustible	Eje x	2,00	2,70
	Eje y	3,00	3,70
	Eje z	32,00	32,70
Para un tanque con 40 m <sup>3</sup> de combustible	Eje x	2,40	2,60
	Eje y	5,20	5,65
	Eje z	30,00	30,00

*Fuente: Elaboración propia en base a ecuaciones diferenciales para simulación en Excel, 2023*

Según las anteriores simulaciones de la variación de la inercia se puede afirmar que mientras más cargado está el tanque existe menos empuje y menos variación del momento de inercia, pero también es inestable por causa del peso. Pero existe más vibración cuando la carga está entre 20 a 30 metros cúbicos dentro el tanque cisterna.

Para reiteración simplemente se utilizó Excel, para la representación gráfica en 3D se utilizará GeoGebra.

### 4.3 VARIACIÓN LA VELOCIDAD EN FUNCIÓN DE LA COORDENADA DE INCLINACIÓN FINAL DEL TANQUE

Debemos calcular si el tanque llega a inclinarse en función de las coordenadas<sup>9</sup>. Se usa entonces las ecuaciones deducidas en el anterior capítulo:

$$D_{sf} = D_{rotación} \cdot D_{cabeceo} \cdot D_{guiñada}$$

Pero calculamos los ángulos iniciales respecto a la vista transversal y lateral.

Plano X-Y

$$\theta_s = \text{ArcTg} \left( \frac{Y_l}{X_l} \right)$$

$$\theta_s = \text{ArcTg} \left( \frac{0,71}{2,6} \right)$$

$$\theta_s = 16,97^\circ$$

Plano Y-Z

$$\alpha_s = \text{ArcTg} \left( \frac{Y_l}{Z_l} \right)$$

$$\alpha_s = \text{ArcTg} \left( \frac{2,6}{4,8} \right)$$

$$\alpha_s = 31,60^\circ$$

<sup>9</sup> El punto de origen es:  $P_0 = \left[ \frac{x_0}{2}, \frac{y_0}{2}, z_0 \right]$

Plano X-Z:

$$\varphi_s = \text{ArcTg} \left( \frac{X_l}{Z_l} \right)$$

$$\varphi_s = \text{ArcTg} \left( \frac{1,5}{4,8} \right)$$

$$\varphi_s = 19,28^\circ$$

Para la rotación de alabeo:

$$D_{\text{rotación}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Cos}\theta_s & -\text{Sen}\theta_s \\ 0 & \text{Sen}\theta_s & \text{Cos}\theta_s \end{bmatrix}$$

$$D_{\text{rotación}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Cos}16,97 & -\text{Sen}16,97 \\ 0 & \text{Sen}16,97 & \text{Cos}16,97 \end{bmatrix}$$

$$D_{\text{rotación}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,96 & -0,26 \\ 0 & 0,26 & 0,96 \end{bmatrix}$$

Para la rotación de cabeceo:

$$D_{\text{cabeceo}} = \begin{bmatrix} \text{Cos}\alpha_s & 0 & \text{Sen}\alpha_s \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{Sen}\alpha_s & 0 & \text{Cos}\alpha_s \end{bmatrix}$$

$$D_{\text{cabeceo}} = \begin{bmatrix} \text{Cos}31,60 & 0 & \text{Sen}31,60 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{Sen}31,60 & 0 & \text{Cos}31,60 \end{bmatrix}$$

$$D_{\text{cabeceo}} = \begin{bmatrix} 0,88 & 0 & 0,48 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,48 & 0 & 0,88 \end{bmatrix}$$

Para la rotación de guiñada:

$$D_{guiñada} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_s & -\sin\varphi_s & 0 \\ \sin\varphi_s & \cos\varphi_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{guiñada} = \begin{bmatrix} \cos 19,28 & -\sin 19,28 & 0 \\ \sin 19,28 & \cos 19,28 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{guiñada} = \begin{bmatrix} 0,95 & -0,30 & 0 \\ 0,30 & 0,95 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Luego la matriz de cambio se da por:

$$D_{sf} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,96 & -0,26 \\ 0 & 0,26 & 0,96 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,88 & 0 & 0,48 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,48 & 0 & 0,88 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,95 & -0,30 & 0 \\ 0,30 & 0,95 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{sf} = \begin{bmatrix} 0,836 & -0,264 & 0,48 \\ 0,169 & 0,949 & -0,229 \\ 0,516 & 0,109 & 0,845 \end{bmatrix}$$

Para el cálculo de la variación de la velocidad del líquido del tanque con una velocidad inicial de 5 m/s para cada eje se tiene el transcurso de un tiempo de un segundo:

$$v_f = [5; 5; 5] \begin{bmatrix} 0,836 & -0,264 & 0,48 \\ 0,169 & 0,949 & -0,229 \\ 0,516 & 0,109 & 0,845 \end{bmatrix}$$

$$v_f = [7,606; 3,971; 5,48]$$

Nuevamente para el segundo vector obtenido:

$$v_f(2) = [7,606; 3,971; 5,48] \begin{bmatrix} 0,836 & -0,264 & 0,48 \\ 0,169 & 0,949 & -0,229 \\ 0,516 & 0,109 & 0,845 \end{bmatrix}$$

$$v_f = [9,351; 2,357; 7,371]$$

Iterando 5 veces se tiene la variación de la velocidad del tanque para una velocidad inicial del camión de 5 m/s.

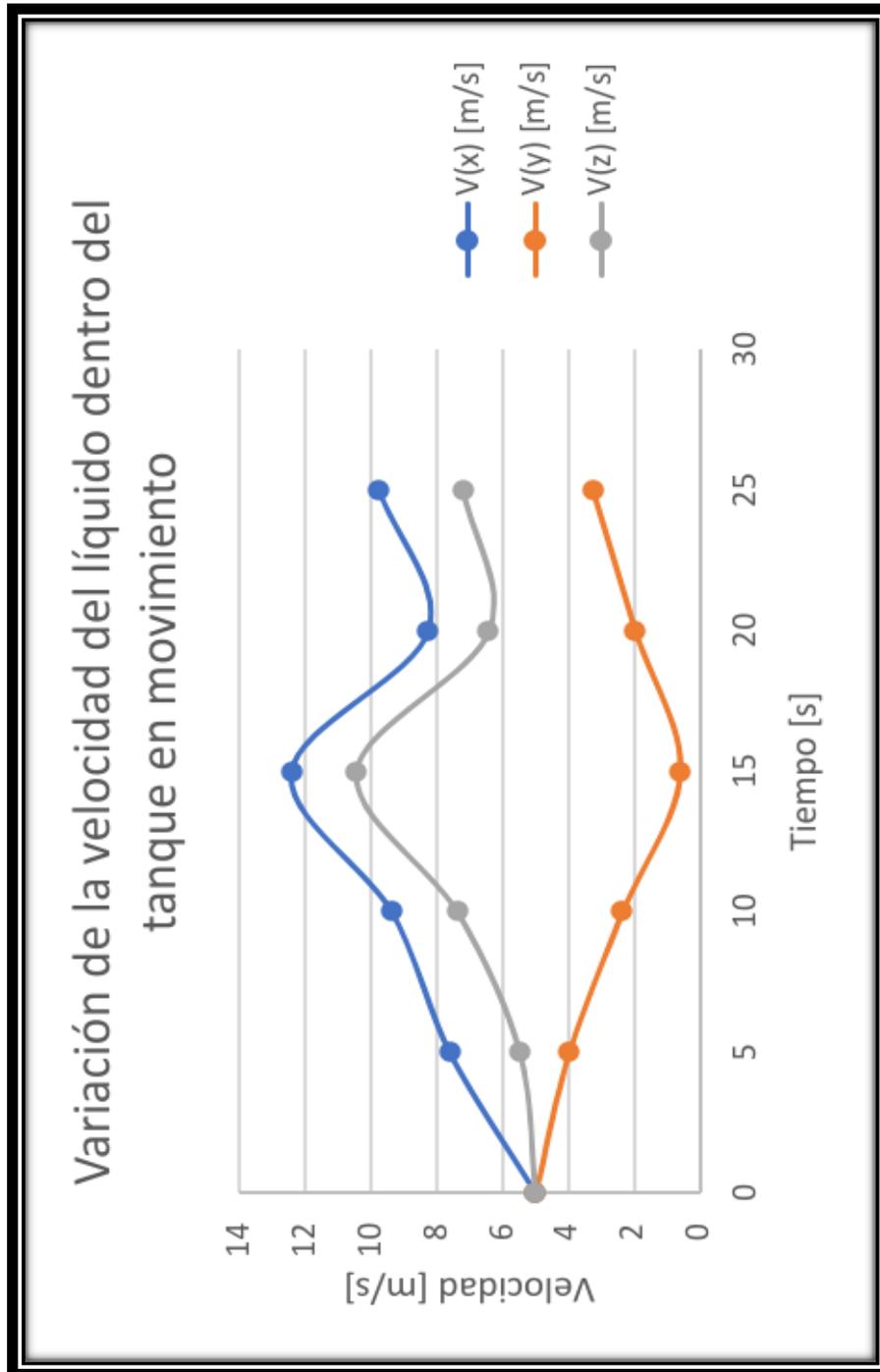
**Tabla 4. 4 Variación de la velocidad de líquido del tanque en movimiento**

Tiempo [s]	V(x) [m/s]	V(y) [m/s]	V(z) [m/s]
0	5	5	5
5	7,606	3,971	5,48
10	9,351	2,351	7,371
15	12,41	0,582	10,45
20	8,26	1,95	6,417
25	9,748	3,25	7,198

**Fuente:** Elaboración propia en base a simulación en Excel, 2023

Se puede observar que la tabla parece una simple lista de datos, pero obtener es complicado se puede utilizar software más avanzado para la obtención de multiplicación de matrices o el uso de calculadora científicas avanzadas. Lo bueno es que este sistema es solo es de tres variables y aquí solo existen esos componentes en el espacio.

Figura 4. 12 Simulación de variación de la velocidad del líquido dentro del tanque cisterna



Fuente: Elaboración propia en base a ecuaciones diferenciales para simulación en Excel, 2023

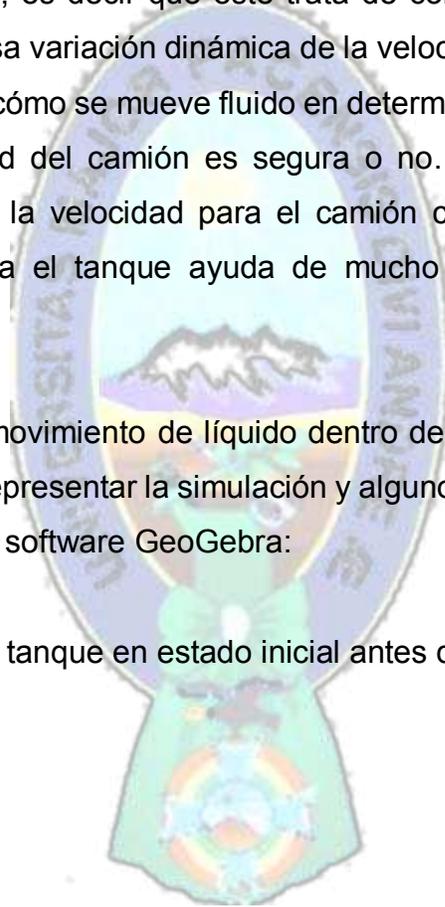
Se puede observar que en el eje y, tiende a disminuir la velocidad debido a que en la carretera no existe mucho movimiento, en este solo de adelante hacia atrás que

sería el eje z, y de izquierda a derecha que sería el eje x. Lo que el modelo demuestra en el movimiento real y se puede verificar con la gráfica.

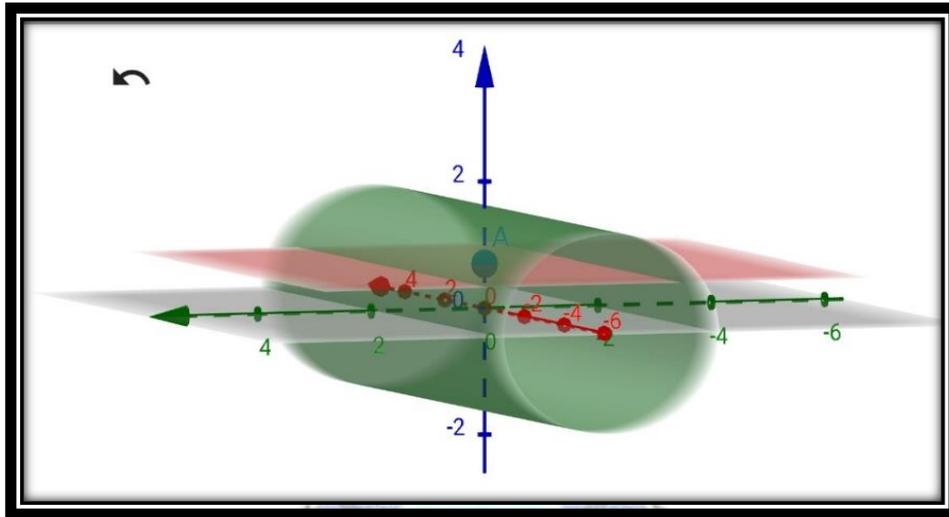
Se puede entender también de que el líquido acelera y desacelera cambiando su velocidad dentro del tanque a su manera debido a la inercia. También se puede generar una velocidad muy distinta dentro del tanque que es la del camión en movimiento por eso ve que se incrementa y disminuye debido a que el líquido trata de llegar a la estabilidad, es decir que este trata de conservarse en el centro de masa. Por tanto, se da esa variación dinámica de la velocidad. Este análisis es muy potente para determinar cómo se mueve fluido en determinados periodos de tiempo y predecir si la velocidad del camión es segura o no. Un análisis de riesgos y proponer parámetros en la velocidad para el camión cisterna en función de los volúmenes que contenga el tanque ayuda de mucho para evitar todo tipo de accidentes.

Para entender mejor el movimiento de líquido dentro del tanque en función de las coordenadas podemos representar la simulación y algunos datos con las siguientes gráficas obtenidas con el software GeoGebra:

Para el líquido dentro del tanque en estado inicial antes del movimiento:



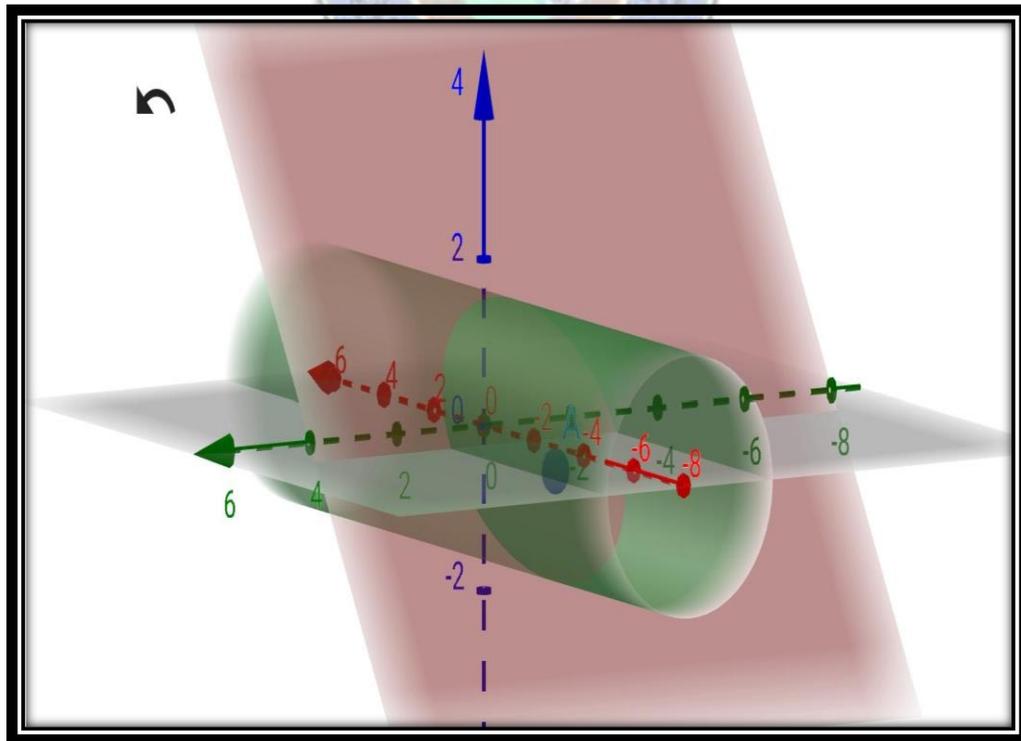
**Figura 4. 13** Posición inicial de la coordenada cuando el tanque no está en movimiento



*Fuente: Elaboración propia en base al Software GeoGebra, 2023*

El plano rosado que se puede ver es el nivel del tanque antes de que comience el movimiento y el punto al Medio es la referencia o ubicación de la coordenada. Una vez que comienza el movimiento los 5 segundos se puede ver la transposición de la coordenada dentro el tanque con el líquido:

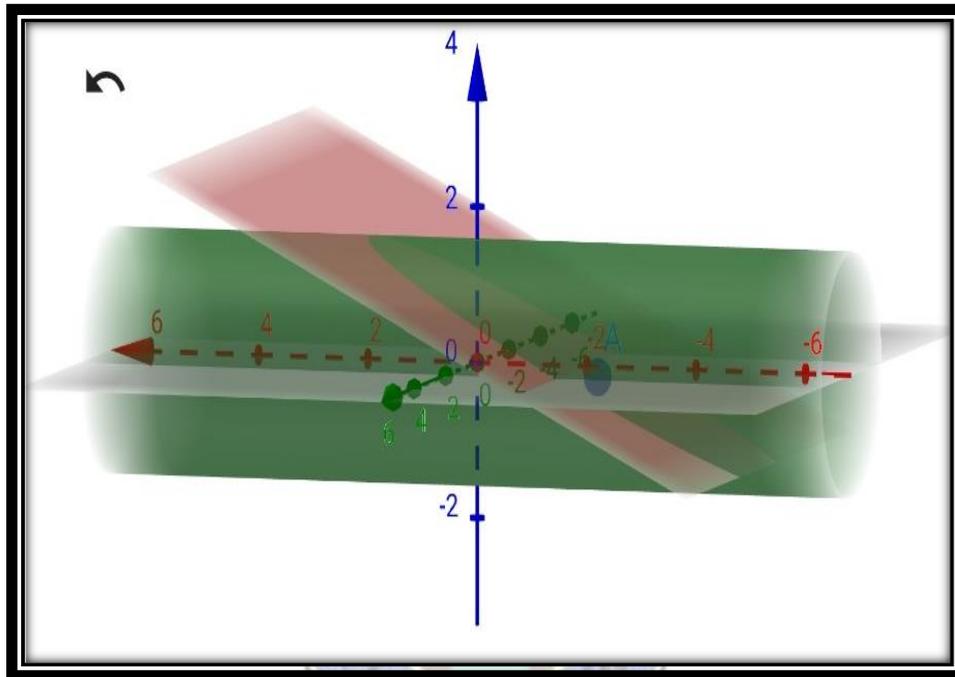
**Figura 4. 14** Variación de la coordenada cuando el tanque está en movimiento a los 5 segundos



*Fuente: Elaboración propia en base al Software GeoGebra, 2023*

Se puede observar entonces en la anterior figura, el movimiento de la coordenada y para entender mejor esta va acompañada del movimiento de un plano el cual es el corte de líquido dentro del tanque. Este plano es el que genera el empuje para que exista un desequilibrio y posteriormente un accidente.

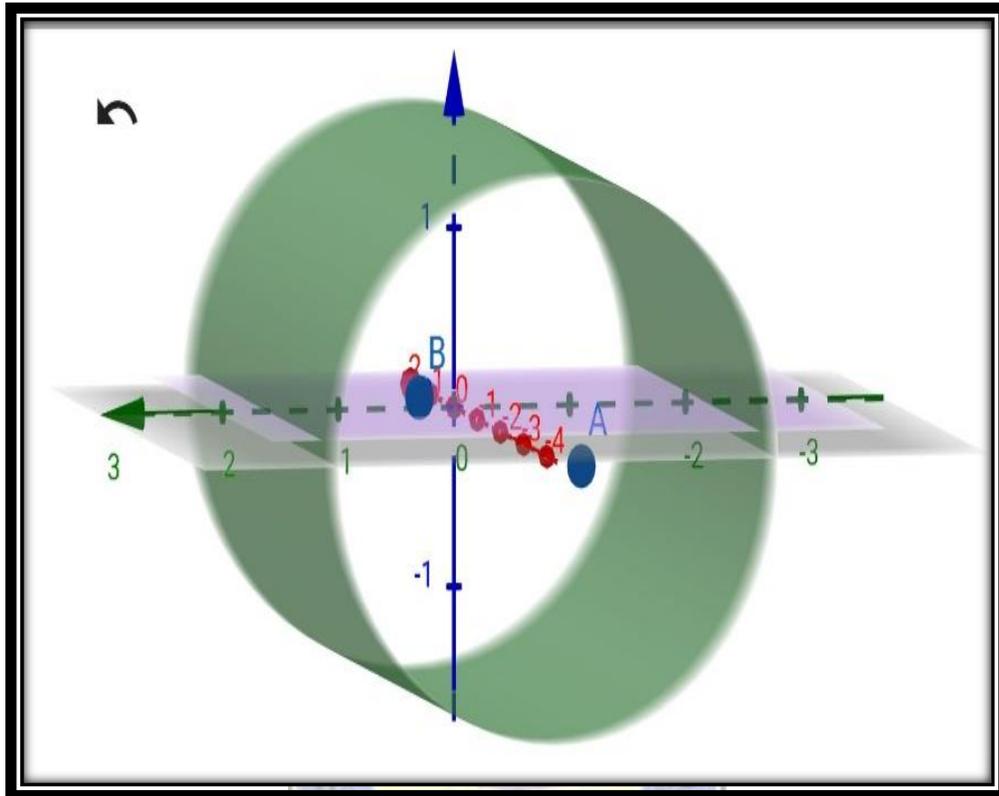
**Figura 4. 15 Deformación el volumen del líquido dentro del tanque para n tiempos**



*Fuente: Elaboración propia en base al Software GeoGebra, 2023*

De esta forma se puede entender entonces la deformación de líquido dentro del tanque para varios tiempos enésimos. Mientras más rápido se mueva este plano más inestable es el movimiento y genera accidentes.

Figura 4. 16 Variación del punto A al punto B dentro del tanque en un tiempo  $n$



Fuente: Elaboración propia en base al Software GeoGebra, 2023

Entonces según el análisis Se observa que el movimiento es estable desde un punto A hasta un punto B y para evitar accidentes esa variación de puntos no debe ser muy rápida. En el siguiente punto se propone una normativa para evitar esa inestabilidad de puntos.

#### 4.4 PROCEDIMIENTO PROPUESTO DE MANEJO OPERATIVO EN TANQUES CISTERNAS CON DATOS ÓPTIMOS PARA EL TRANSPORTE DE DIESEL OIL

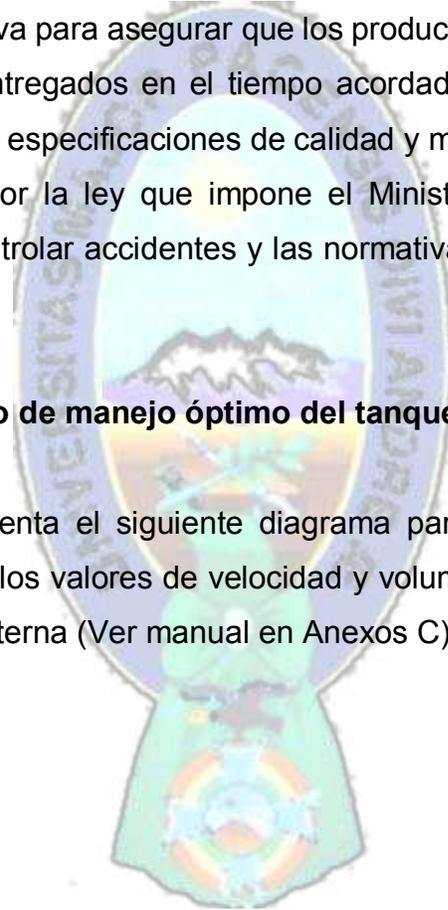
#### 4.4.1 Objetivo del manual

Este procedimiento tiene como objetivo el asegurar que los productos programados para entrega, a los consumidores y clientes sean cargados, transportados y descargados con la eficiencia operacional y la evaluación de riesgos de seguridad de HSE requeridos por YPF B.

Se propone esta normativa para asegurar que los productos ofrecidos a los clientes y consumidores sean entregados en el tiempo acordado, con los requerimientos establecidos en cuanto a especificaciones de calidad y manejo de seguridad de los productos autorizados por la ley que impone el Ministerio de trabajo empleo y previsión social para controlar accidentes y las normativas internas de la empresa YPF B.

#### 4.4.2 Diagrama de flujo de manejo óptimo del tanque

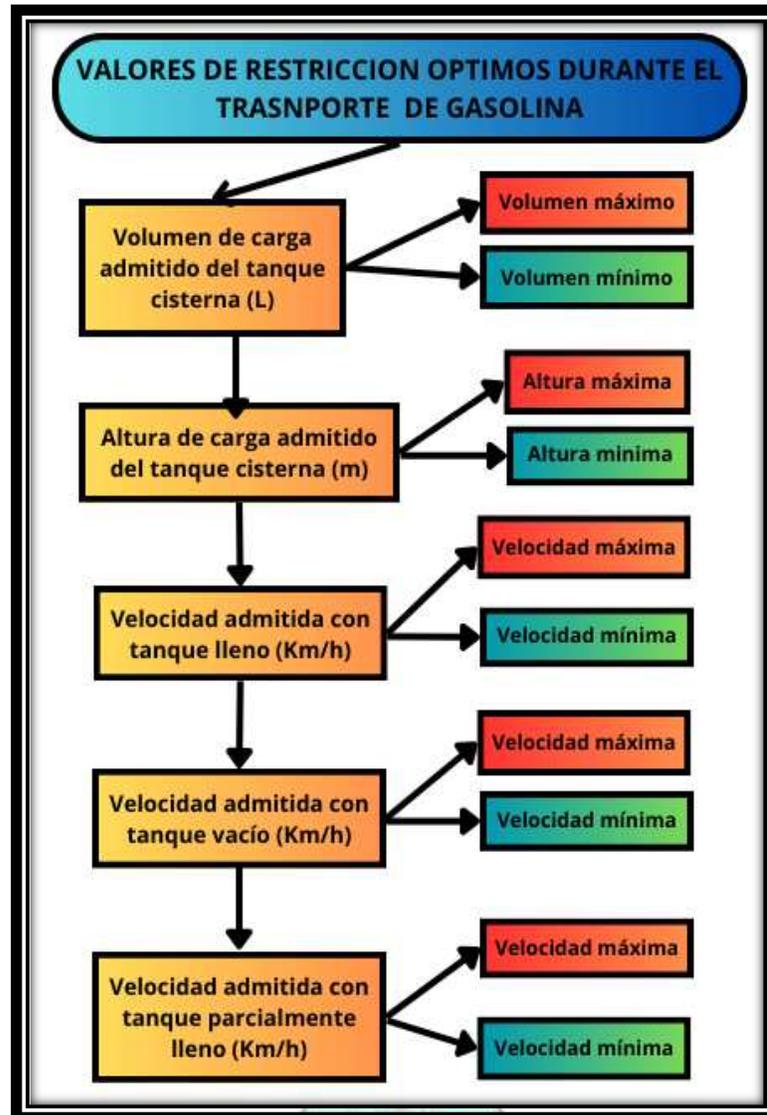
A continuación, se presenta el siguiente diagrama para el proceso de carga y descarga óptima junto a los valores de velocidad y volumen propuestos durante el transporte del tanque cisterna (Ver manual en Anexos C)<sup>10</sup>.



---

<sup>10</sup> Se resume los pasos más importantes en el diagrama de flujo

Figura 4. 17 Diagrama de flujo del proceso dentro la normativa propuesta



Fuente: Elaboración propia, 2023

#### 4.4.3 Alcance del manual

Este manual se propone para los siguientes requisitos:

- Requerimientos previos para el proceso de carga, transporte y descarga – Camiones Cisternas
- Coordinación de retiro de documento de carga en Terminales
- Control durante la carga y descarga de productos
- Carga de productos en Terminales
- Descarga de productos a estaciones

## 4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se llegó a los siguientes resultados:

*Tabla 4. 5 Análisis de resultados*

<b>OBJETIVOS</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>	<b>VALORES</b>
Describir las características básicas de las normas de seguridad industrial en tanques cisternas antes y durante el transporte de combustibles.	Se describió las normas actuales en el manejo de tanques cisternas de manera resumida.	No se pudo acceder a mayor información en la empresa de YPFB.	Se determina de que el riesgo de transportar un líquido en el tanque cisterna tiene un valor medio
Desarrollar el modelo dinámico de velocidad de fluido variable en tanques cisternas parcialmente llenos a partir del principio de inercia y estabilidad.	Se ha desarrollado precisamente aplicando teoremas de cálculo los modelos dinámicos de velocidad.	Lamentablemente se necesita saber bastante de matrices y cálculo dos para poder entender y realizar el proceso iterativo de la resolución.	Obtiene valores de velocidad de fluido máxima de 12 m/s
Efectuar los cálculos para obtener las velocidades y cantidades de combustible óptimas con lo cual debe operar un tanque cisterna.	Se logró calcular todas las características que piden los modelos desde los puntos de coordenadas hasta las velocidades.	Lamentablemente se necesita de softwares avanzados para iterar en este caso se utilizó Excel ya que se necesita de gráficas para poder entender el comportamiento del fluido dentro del tanque.	La cantidad óptima que se recomienda transportar es mayor al 65 % ya que no habrá mucha inestabilidad durante el transporte

*Fuente: Elaboración propia, 2023*

## CAPÍTULO V: ANÁLISIS ECONÓMICO

### 5.1 FUNDAMENTOS

Se realizará el estudio de costos del levantamiento del estudio de simulación y la nueva propuesta de control de seguridad industrial para el manejo de tanques cisternas. Se utiliza el 5 % de los ingresos de la planta, para proyectos y contratos de consultoría en seguridad industrial, mantenimiento y control ambiental.

Según la agencia boliviana de información (abi.bo, 2022), la planta tiene una capacidad de entrega de 25000 m<sup>3</sup> anual. Por otra parte, el precio del diésel oíl es de 3,72 Bs por litro (<https://www.anh.gob.bo/preciosfinalesalconsumidor>, 2023). Realizando las conversiones correspondientes se puede obtener entonces el ingreso destinado para proyectos que sería igual a:

$$I_{proyectos} = 0,05 * 25.000 \frac{m^3}{año} * \frac{1.000 L}{1 m^3} * \frac{3,72 Bs}{1 L}$$

$$I_{proyectos} = 4,650 MM Bs$$

Por otra parte, se supone que otros proyectos también se desarrollan a la vez y queda disponible un 20 % del presupuesto anual, entonces.

$$I_{disp} = 0,20 * 4,650 MM Bs$$

$$I_{disp} = 930.000 Bs al año$$

## 5.2 COSTOS FIJOS

A continuación, se presentan los costos fijos considerando los costos de simulación y los costos de los equipos de los tanques cisterna:

*Tabla 5. 1 Análisis de costos fijos*

<b>COSTOS FIJOS EN BOLIVIANOS</b>		
<b>COSTOS FIJOS</b>	<b>Mensual</b>	<b>Tipo</b>
SERVICIOS BÁSICOS	5.000	adm
SOFTWARE	15.000	Operativo
MANO DE OBRA INDIRECTA (MOI)	10.000	adm
SEGURIDAD INDUSTRIAL	12.500	adm
MANTENIMIENTO DE TANQUES	30.000	Operativo
GASTOS GENERALES DE LEVANTAMIENTO DE DATOS	5.000	Operativo
IMPUESTOS	7.800	Financiero
<b>TOTAL COSTO FIJO MES</b>	<b>107.800</b>	

*Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de tanques cisterna, 2023*

El costo fijo de levantamiento del proyecto para el mantenimiento y prevención de accidentes en tanques cisterna es de 122.800 Bolivianos mensual. Pero el trabajo se lo realizará en un plazo de tres meses por tanto el costo fijo anual es de 368.400 Bolivianos.

## 5.3 COSTOS VARIABLES

A continuación, se presentan los costos variables considerando la simulación de los tanques cisterna:

Tabla 5. 2 Costos variables

<b>COSTOS VARIABLES EN BOLIVIANOS</b>			
<b>COSTOS VARIABLES</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Mensual</b>
Accesorios y material de escritorio	10	200,00	2.000
Equipos de seguridad	8	1.000,00	8.000
Equipos electrónicos	6	4.000	24.000
<b>TOTAL COSTO VARIABLE MES</b>			<b>34.000</b>

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de tanques cisterna, 2023

El costo variable de levantamiento del proyecto para el mantenimiento y prevención de accidentes en tanques cisterna es de 34.000 Bolivianos.

#### 5.4 DEPRECIACIÓN DEL PROYECTO

Para la depreciación del proyecto se cuenta con la siguiente tabla:

Tabla 5. 3 Depreciación anual del proyecto

<b>PROPIEDAD</b>	<b>Valor</b>	<b>Vida Útil/ Años</b>	<b>Depreciación Anual</b>
Tanques nuevos	1.400.000	8	175.000
Computadora	3.800	4	950
Accesorios y material de escritorio	445	10	44,5
Software	15.000	10	1.689,52
Vehículo	140.000	5	28.000
Impresoras	1.000	5	200
<b>Total</b>	<b>1.560.245</b>		<b>205.884,82</b>

Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de tanques cisterna, 2023

La depreciación anual del proyecto es de 205.884,82 Bolivianos

## 5.5 INVERSIÓN INICIAL

Se tiene la siguiente tabla donde se describe la inversión total del proyecto, considerando que solo los costos se aplicarán para tres meses ya que ese es el tiempo de levantamiento de datos y estudio:

*Tabla 5. 4 Capital de trabajo*

COSTOS FIJOS AL MES	107.800,00
COSTOS VARIABLES AL MES	34.000,00
TRES MESES DE COSTOS Y GASTOS	141.800,00
DEPRECIACIÓN UN AÑO	205.884,82
SOFTWARE	15.000,00
10 TANQUES CISTERNA NUEVOS	1.400.000,00
<b>TOTAL INVERSION INICIAL</b>	<b>1.762.684,82</b>

*Fuente: Elaboración propia en base en el análisis de tanques cisterna, 2023*

La inversión inicial del levantamiento de datos, la simulación, la compra de nuevos tanques y la instalación de un software de control es de 1.762.684,82 Bolivianos, lo que aproximadamente se iguala al presupuesto calculado.

## 5.6 ANÁLISIS DE COSTO Y BENEFICIO

La siguiente tabla puede usarse como indicador para determinar si los costos de medida de seguridad en el tanque superan sus beneficios:

**Tabla 5. 5 Interpretación de Costo y beneficios**

<b>CRITERIO</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>SIGNIFICADO</b>
B/C > 1	Los ingresos son mayores que los egresos	El proyecto es aconsejable
B/C = 1	Los ingresos son iguales que los egresos	El proyecto es indiferente
B/C < 1	Los ingresos son menores que los egresos	El proyecto no es aconsejable

**Fuente: Elaboración propia**

Por lo tanto, usando la ecuación:

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Beneficios}}{\text{Inversion inicial}}$$

Para los dos años de financiamiento:

$$\frac{B}{C} = \frac{[(930.000 - 1.556.830) + 930.000]Bs}{1.762.684,82 Bs}$$

$$\frac{B}{C} = 1,25$$

Sobra el 5 % del presupuesto planteado, por lo tanto, el proyecto es factible ya que sobrar  dinero después del levantamiento de datos. Se recomienda incrementar el ahorro para el presupuesto en elaboración de nuevos proyectos para la empresa.

## CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

Se llegaron a las siguientes conclusiones una vez realizada las simulaciones y el análisis económico:

- Se logró describir las características básicas de las normas de seguridad industrial en tanques cisternas antes y durante el transporte de combustibles.
- Se desarrolló el modelo dinámico de velocidad de fluido variable para tanques cisternas parcialmente llenos a partir del principio de inercia y estabilidad. Las variaciones de los momentos de inercia simulados varían entre 2 a 30 Kg\*m<sup>2</sup>.
- Se han obtenido eficazmente las velocidades entre 2 a 4,5 m/s y cantidades de combustible de  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{3}{4}$  de volumen efectuando los cálculos para con lo cual debe operar un tanque cisterna de la Planta Palmasola.
- En el marco propositivo se pudo diseñar una nueva normativa partir de los anteriores datos de simulación. En estos datos se establece que el volumen mínimo de carga no debe ser menor de tres cuartos de la altura del tanque o mayor de un cuarto para que no existan accidentes.
- Se realizó el estudio económico obteniendo datos positivos confirmando que la relación de costo y beneficio es del 1,25 lo que significa que se genera un ingreso mayor a los costos y el proyecto se recupera en el tiempo propuesto.
- Se pudo controlar la seguridad en el transporte de combustibles a través de un modelo dinámico considerando la variación de la velocidad del fluido en tanques cisternas parcialmente llenos.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Se considera llegar a las siguientes recomendaciones para el área de tanques cisternas dentro de la planta de Palmasola de YPF:

- Se debe capacitar al personal en proyectos de simulación y análisis de datos que se enfoque en el manejo de velocidades de fluido variable para tanques cisternas parcialmente llenos teniendo una base de datos de los valores máximos y mínimos para evitar accidentes.
- Se aconseja seguir los valores de las velocidades máximas calculadas y cantidades de combustible óptimas para operar un tanque cisterna de la Planta Palmasola.
- Se recomienda seguir e implementar la nueva normativa partir de los anteriores datos de simulación y adjuntar en el plan de seguridad industrial de la planta.
- Presupuestar el 5 % de los ingresos para llevar a cabo estudios y proyectos de levantamiento de datos para el control de seguridad industrial ya que el proyecto es rentable y se financia en menos de dos años.

## BIBLIOGRAFÍA

Agencia boliviana de información (abi.bo, 2022)

Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH, 2023), <https://www.anh.gob.bo/w2019/>

Cengel Yunus, A., Cimbala John, M. (2010). Fluid Mechanics Fundamentals and Applications. Editorial McGrawHill.

Dasgupta, A. (2011). Effect of tank cross-section and longitudinal baffles on transient liquid slosh in partly-filled road tankers. Doctoral dissertation, Concordia University.

Fancher, P. S., Directional Dynamics Considerations for Multi-Axle Tractor-Trailer, Mirrored Axle Heavy Vehicles, SAE Paper No. 892499, 1989 El-Gindy, M., Directional Response of a Tractor Trailer to a Semi-trailer; Int. J. of Vehicle Design, Vol. 10, No. 2, pp. 210-226, 1989

Garí Portoles (2017), DISEÑO DE UNA CISTERNA PARA EL TRANSPORTE DE COMBUSTIBLE EN AEROPUERTOS, Memoria – Presupuesto- Pliego de Condiciones, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Gennari (2015), Evaluación y control de riesgos del puesto de trabajo: Supervisor de Operaciones de una Terminal de carga de combustibles líquidos livianos. UNIVERSIDAD DE LA FRATERNIDAD DE AGRUPACIONES SANTO TOMÁS DE AQUINO, Bogotá.

Gibson M. (2022), Los peligros de los accidentes de camiones cisterna. Extraído de <https://autojusticeattorney.com/es/tanker-truck-accident-dangers/>

Instituto Boliviano de Metrología (IBMETRO, 2023), <https://www.ibmetro.gob.bo/>

MacAdam, C. C. and Fancher, P. S., A (2012), Study of the Closed-Loop Directional Stability of Various Commercial Vehicle Configurations, Proceedings of 9th IAVSD Symposium held in Linköping University, Linköping, Sweden, June 24-28, pp. 367-382.

Méndez (1999), NTP 356: Condiciones de seguridad en la carga y descarga de camiones cisterna: líquidos inflamables (I), Ministerio de trabajo y asuntos sociales, Instituto Nacional de higiene en el trabajo, Madrid

Moreno Contreras G., Flórez Serrano E., Ramón B. (2022) STABILITY OF TANKER TRUCKS USING THE DAVIES METHOD, Journal of Applied Engineering Science, 20(2), 602 – 609, DOI:10.5937/jaes0-33364

Norma NFPA 385, 2020

Rajagounder, R., Mohanasundaram, G. V., Kalakkath, P. (2016). A study of liquid sloshing in an automotive fuel tank under uniform acceleration. Engineering Journal, vol. 20, no. 1, 71-85, DOI: 10.4186/ej.2016.20.1.71

Rakheja, S., Vallurupalli, R. K. and Woodroffe, I., Influence of Articulation on the Yaw and Lateral Dynamic Response of the Vehicle. Heavy Vehicle Systems, Int. J. of Vehicle Design, Vol. 2, No. 2, 1995

Rojas, Joel, Sueros Jonathan (2020), Unidad 1: Gráfica de superficies cuadráticas incompletas – cilindro circular. Extraído de <https://www.youtube.com/watch?v=v3xw-WAR7bs>

Vallurupalli, R. K., Directional Dynamic Analysis of an Articulated Vehicle with Articulation Dampers and Forced-Steering, Master Thesis, Concordia University, Canada, 1993

Yacimientos. Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB). Memoria 1978. La Paz. YPFB

Xian-sheng Li, Xue-lian Zheng, Yuan-yuan Ren, Yu-ning Wang, Zhu-qing Cheng, (2013), "Study on Driving Stability of Tank Trucks Based on Equivalent Trammel Pendulum for Liquid Sloshing", Discrete Dynamics in Nature and Society, vol. 2013, Article ID 659873, 15 pages.



## ANEXOS

### Anexos A: Fundamento de la investigación



**Fuerzas que afectan al camión cisterna**

## Anexos B: Fundamento del problema



### **CISTERNA SUFRE ACCIDENTE PRODUCTO DE EVASIÓN DE LOS PEDRONES DEJADOS EN LAS RUTAS POR LOS BLOQUEADORES**

Publicada en fecha: 2020-08-16



Foto de foto: Sistema de Noticias

**ANH Noticias** : Prensa – ANH – Producto de los pedrones dejados en la carretera ruta Oruro - Cochabamba por los bloqueadores convocados por organizaciones campesinas, durante la jornada de hoy domingo 16 de agosto se produjo un accidente con daños personales y materiales de un camión cisterna marca Volvo con placa 4524 GPH que transportaba 35.000 lt. de Gasolina Blanca Estabilizada.

Una vez levantados los bloqueos convocados por la COB y organizaciones campesinas, los camiones de alto tonelaje que estuvieron varados durante más de diez días en las principales carreteras del país reanuncian su recorrido hasta sus destinos, al respecto un camión cisterna que transportaba combustibles líquidos desde Yacuba hasta la Ciudad de La Paz (Planta Benicafé), sufrió un accidente producto de la evasión de los pedrones dejados en plena carretera, fruto del hecho, se ha evidenciado a través de videos el considerable daño material del motorizado y daños personales del conductor como sus acompañantes, quienes fueron trasladados para su quehacer inmediato.

Al respecto una vez analizada del hecho, la Dirección Distrital de la ANH de Oruro desplegó inmediatamente a su personal hasta el lugar del suceso, para proceder según normativa a la respectiva verificación de los documentos y permisos correspondientes de transporte de combustibles líquidos. Se espera que en las próximas horas la Dirección Distrital de Oruro emita el informe correspondiente.

## Anexos C

Tabla A. 1: Manual de proceso de manejo óptimo

<b>PROCESO DE CARGA</b>	
<b>Carga de Productos en Terminales</b>	
NOTA	El conductor deberá estar alerta en todo momento a cualquier condición de seguridad que ponga en peligro las personas, instalaciones y su vehículo en la operación de carga.
El conductor deberá seguir las siguientes indicaciones como normas generales de seguridad en la carga:	
COLUMNA 1	COLUMNA 2
<ul style="list-style-type: none"> <li>• No sobrepasar los 15 km/hora en las instalaciones de carga.</li> <li>• El conductor no debe abandonar el vehículo en las instalaciones de carga. Si por alguna razón debe retirarse de la zona, hágalo con el vehículo.</li> <li>• Está prohibido fumar durante la carga. El incumplimiento de esta norma se considera falta grave, inhabilitando al infractor a operar posteriormente en la instalación.</li> <li>• En caso de derrame, avise al Supervisor a cargo y suspenda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es obligatorio el uso de uniforme y equipo de seguridad (guantes, botas, casco de seguridad, arnés, etc.), durante las operaciones.</li> <li>• Mantenga disciplina durante la carga, atienda solo a su vehículo, evite gritos y expresiones que entorpezcan la operación.</li> <li>• El camión cisterna debe ingresar vacío a cargar. Toda devolución del producto debe coordinarse previamente antes de ingreso con el supervisor de planta para que se verifique y documente evitando así reclamos.</li> </ul>

<p>toda operación hasta que se limpie el área.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los accidentes deben ser informados por el afectado, el causante o un testigo presencial al Ingeniero de Operaciones de PLANTA PALMASOLA YPFB – ÁREA DE CISTERNAS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El conductor seguirá los procedimientos y políticas de la terminal.</li> </ul>
--	---

**Carga por arriba**

Se debe cumplir los siguientes procedimientos

<b>COLUMNA 1</b>	<b>COLUMNA 2</b>
------------------	------------------

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estacione en la isla de despacho, apague el motor y los equipos eléctricos, desconecte el interruptor principal o master switch, deje los vehículos en un cambio, ponga el freno de mano y las cuñas de seguridad para evitar desplazamiento.</li> <li>• Verifique que las válvulas de fondo de cada compartimiento y las de descarga se encuentren cerradas y sin fuga. Conecte el cable a tierra en el lugar designado en el camión y planta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Al finalizar el llenado, levante el brazo de llenado con precaución para evitar derrames y verifique que la cantidad del combustible coincide con lo indicado en la documentación, verificar que el producto esté a nivel de los platillos, aditivado de ser el caso y libre de agua, luego llame al supervisor, quien dará el visto bueno y le extenderá el documento de salida.</li> <li>• El exceso de combustible en un compartimiento debe ser retirado del cisterna por la válvula de descarga antes de salir de la instalación de carga. Está prohibido transferir el exceso de</li> </ul>
---	--

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indicar la ubicación / distribución de los productos de acuerdo al plan de descarga.</li> <li>• Antes de cargar un compartimiento, asegúrese que el compartimiento y su línea de descarga estén vacíos.</li> <li>• El conductor se pondrá el arnés de seguridad, apoyándose en la línea de vida del rack de llenado cuando esté sobre el vehículo, para evitar una caída del mismo. Cuando este donde el cliente en la descarga se pondrá el arnés de seguridad, apoyándose en la línea de vida del sistema cuando este sobre el vehículo verificando sellos y niveles antes de la descarga.</li> <li>• Coloque el brazo de carga hasta el fondo dentro del compartimiento para evitar evaporación, salpicaduras o acumulación de corriente estática. Inicie la carga a media velocidad y aumente al máximo cuando el nivel de producto</li> </ul>	<p>una cisterna a otro, excepto que lo indique un supervisor de carga.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si el producto cargado no coincide con lo indicado en la orden de carga o ha sido contaminado con otro de especificaciones distintas o tiene agua debe avisar al supervisor inmediatamente.</li> <li>• Cierre todas las tapas de los manholes de carga.</li> <li>• Verificar la colocación correcta de los sellos enumerados en manholes y válvulas de descarga.</li> <li>• No desconecte el cable a tierra antes de finalizar la carga, pero no olvide hacerlo cuando haya terminado.</li> <li>• Está prohibido levantar el capot del vehículo en plena carga y efectuar reparaciones mecánicas o eléctricas.</li> <li>• Retire el vehículo de la isla y siga las indicaciones para la salida del vehículo.</li> </ul>
---	---

<p>alcance la boca del embudo o brazo de carga.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durante el llenado, debe permanecer sobre el rack de llenado, controlando la operación. La cabina del conductor no debe ser ocupada durante la carga.</li> <li>• En caso de derrame, toda operación o movimiento del vehículo debe ser detenido. Use el kit para derrames, arena, arcilla o tierra para absorber el derrame. Reporte el derrame inmediatamente. Ver proceso Derrame en Tierra.</li> </ul>	
--	--

**PROCESO DE DESCARGA DE PRODUCTOS**

<p>NOTA:</p>	<p>El administrador o encargado del local del cliente es responsable por la seguridad de las instalaciones. Sin embargo, durante la descarga el conductor es responsable por la seguridad del vehículo y de todas las actividades relacionadas con la operación.</p>
--------------	--

**Descarga de productos a tanques soterrado**

Se debe cumplir los siguientes pasos:

<p>COLUMNA 1</p>	<p>COLUMNA 2</p>
------------------	------------------

<ul style="list-style-type: none"> <li>• El conductor y el cliente deberán utilizar equipo de seguridad apropiado para esta operación (Guantes, calzado de seguridad, casco, uniforme o ropa apropiada, linterna a prueba de explosión o explosión Prof.), Hoja de Especificaciones y Seguridad de Productos.</li> <li>• El conductor estaciona el camión cisterna en el área asignada de descarga del cliente de modo que cause la mínima interferencia a las actividades que se realiza en el sitio. El camión cisterna lo estacionará en dirección hacia la salida, en el área plana y nivelada, apague el motor y desconecte el interruptor principal o master switch, los equipos eléctricos, deje el vehículo en un cambio, ponga el freno de mano y cuñas de seguridad para evitar desplazamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El conductor cierra el área de descarga con vallas o burros de seguridad del cliente o con los conos y triángulos de seguridad del camión cisterna para evitar la circulación de personas y vehículos en el sitio de operación que pongan en peligro la operación de descarga, mantenga siempre la salida despejada.</li> <li>• El conductor coloca el extintor cerca del camión y alejado de las bocas de los tanques donde tenga fácil acceso, de manera que pueda ser usado con el viento a su favor en caso de una chispa o incendio, debe estar colocado antes de iniciar la descarga y durante la misma.</li> <li>• El conductor antes de realizar la operación de descarga, le entrega la factura al cliente para que verifique las cantidades y productos a recibir. El conductor le solicita al cliente, el cheque de pago del producto si la factura es al contado, si todo está en regla procede con el cliente</li> </ul>
--	--

	(Administración o persona autorizada), la verificación física de los compartimientos y sellos del cisterna.
El conductor deberá verificar en el cheque los siguientes datos para garantizar que el mismo está de acuerdo a la factura del producto:	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nombre de la compañía, como esta en la factura del producto.</li> <li>2. El valor en números y en letra del cheque debe ser igual al valor de la factura.</li> <li>3. La fecha debe ser la correcta al día de facturación, no se aceptan cheques posfechados.</li> <li>4. Si la instrucción del programador es un cheque certificado, no se deberá realizar la descarga de producto, se comunicará inmediatamente con el programador para recibir instrucciones.</li> <li>5. No se acepta dinero en efectivo, no se deberá realizar la descarga de producto, se comunicará inmediatamente con el programador para recibir instrucciones.</li> <li>6. Al finalizar las entregas, el conductor entregará todos los documentos y los pagos en el sobre asignado en garita y lo depositará en la chuta de la misma.</li> </ol>	
COLUMNA 1	COLUMNA 2
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si el cliente no tiene el cheque de acuerdo a las instrucciones recibidas, el conductor se comunicará inmediatamente con el programador para informarle la situación y espera nuevas instrucciones. El programador se comunicará inmediatamente con el centro de servicio al cliente para que</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El conductor verifica con el cliente el Safety Check List. Descarga de producto, Formato de Verificación antes de la descarga de productos en sitios de descarga de clientes o estaciones de servicio.</li> <li>• El cliente es responsable de medir los tanques de</li> </ul>

<p>evalúe la situación e instruya al programador. Si él CSC determina que entregue el producto, el programador dará la instrucción al conductor de proceder. Procedimiento de Desvío de Producto hasta recibir nuevas instrucciones<sup>11</sup>.</p>	<p>almacenamiento<sup>12</sup> antes de iniciar la descarga para determinar si hay capacidad suficiente para recibir la cantidad de producto solicitada.</p>
<p>Para el peso de control se tiene las siguientes normas:</p>	
<p><b>COLUMNA 1</b></p>	<p><b>COLUMNA 2</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si la medida de los tanques del cliente se determina que no hay espacio suficiente para la descarga de las cantidades de productos del compartimiento, no se deberá en ningún momento romper los sellos de los manholes de los compartimientos y de la válvula de descarga. El cliente será responsable de pagar el flete muerto por este producto no descargado, entonces el programador procederá con el proceso PC-A40-025-001 –</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El conductor abre las válvulas del Tanque Cisterna e inicia la descarga de cada producto según las indicaciones del cliente en los respectivos tanques de almacenamiento.</li> <li>• Debido a la naturaleza de alto riesgo de seguridad en la operación de descarga de combustibles. Está prohibido despachar productos a cualquier vehículo o persona que tenga un recipiente certificado. Esta</li> </ul>

<sup>11</sup> Nota: La administración de Estaciones de Servicios deberá tomar adicionalmente las medidas necesarias para mantener un nivel de existencia de producto 1 ½ día de venta como reserva para evitar cualquier imprevisto que se presente en los puntos de abastecimiento, carreteras, huelgas, etc. Este margen se debe tomar en cuenta en su pedido para evitar quedarse seco o con suficiente espacio para recibir el camión cisterna.

<sup>12</sup> Nota: Si por alguna razón no se determina correctamente el espacio vacío y ocurre algún derrame de producto, PLANTA PALMASOLA YPF – ÁREA DE CISTERNAS no se hace responsable del producto derramado, el cliente pagará todos los cargos correspondientes por esta situación. Si esto ocurriera se pondrá en ejecución el procedimiento Derrame en Tierra.

<p>Procedimiento de Desvío de Producto hasta recibir nuevas instrucciones del CSC.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si todo está en orden, el conductor junto con el cliente verificará solamente las tapas de los manholes superiores de los compartimientos y las válvulas de descarga de los productos que le corresponden y que estén debidamente selladas.</li> <li>• Verificará los sellos enumerados contra documentos, rompe los sellos y abre la tapa superior de los compartimientos a descargar y verifica que el producto esté rozando el indicador de nivel.</li> <li>• El cliente introduce en los compartimientos la vara de medir con pasta detector de agua, para asegurarse que el producto no contenga agua, visualmente verificará que el producto tiene buena apariencia y que no está turbio o contaminado. El conductor le</li> </ul>	<p>disposición es una reglamentación regulada por el negocio y por la autoridad local – oficina de seguridad del cuerpo de bomberos de Panamá.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El conductor y el cliente (administrador o persona autorizada), deben monitorear en todo momento la operación de descarga, sin retirarse del área para evitar situaciones de peligro como personas y vehículos transitando, fumando, usando equipo electrónico, celulares, materiales inflamables o fuentes de ignición dentro de un área de 15 metros de la descarga.</li> <li>• El conductor debe estar cerca de la válvula de emergencia para tener rápido acceso por cualquier emergencia que se presente. En caso de fuga, detenga la descarga y repare el desperfecto.</li> <li>• El conductor en caso de necesitar contener un derrame utilice un kit de derrames.</li> </ul>
--	--

<p>indicará qué producto hay en cada compartimiento.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El cliente es responsable de indicar al conductor en qué tanque de almacenamiento se debe descargar el producto de los compartimientos previamente revisados. La tapa del manhole de descarga del tanque de almacenamiento del cliente debe estar debidamente identificado para evitar contaminación por error<sup>13</sup>.</li> <li>• Si el conductor por experiencia, tuviera dudas de la identificación de los productos en los tanques de almacenamiento del cliente o por cualquier situación que comprometa la seguridad de la operación de descarga; Cambio de Administrador o persona responsable, contaminación, seguridad de las personas, instalaciones del cliente, del camión cisterna o medio ambiente tiene la autoridad de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El conductor una vez terminado la operación, cierra las válvulas de fondo y de descarga, drena el producto de la manguera al tanque del cliente para evitar derrames.</li> <li>• El conductor y el cliente se aseguran que los compartimientos descargados estén vacíos y cierran las tapas de los manholes. El cliente firma la factura de conformidad por el recibo a satisfacción del producto recibido.</li> <li>• El cliente mide los tanques de almacenamiento después de la descarga, para comparar la cantidad recibida. La medida de la vara es una indicación aproximada de la cantidad descargada. Cierra las tapas de descarga con los candados correspondientes.</li> <li>• El conductor desconecte las mangueras y las guarda en su lugar en el camión, guarda</li> </ul>
--	--

<sup>13</sup> Nota: El cliente es el único responsable de que el producto sea descargado en el tanque correspondiente. En caso de contaminación los gastos incurridos correrán por cuenta del cliente.

<p>suspender inmediatamente la operación de descarga e inmediatamente se comunicará con el ingeniero de operaciones para recibir instrucciones precisas sobre las condiciones presentadas en el sitio.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si las condiciones son adecuadas para proceder con la operación de descarga, el conductor procede a conectar la manguera con el codo de descarga inicialmente al tanque del cliente y luego el otro extremo de la manguera a la salida del tanque cisterna sin haber quitado la tapa. Esto producirá que se igualen los potenciales y la carga estática pase a tierra. Se asegura que la longitud de la manguera le permita ajustar adecuadamente al codo de descarga al acople en la boca del tanque del cliente<sup>14</sup>.</li> </ul> <p>La manguera no debe formar curvas cerradas o dobladas que</p>	<p>extintor, se retira del sitio con la cooperación del cliente para el control del tráfico en el área.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El cliente es responsable de conocer y aceptar este procedimiento descrito de descarga de productos de combustibles, para asegurarse que se están cumpliendo con todos los requerimientos de la Legislación Local y de PLANTA PALMASOLA YPFB – ÁREA DE CISTERNAS en cuanto a seguridad, calidad y manejo de productos.</li> </ul> <p>PLANTA PALMASOLA YPFB – ÁREA DE CISTERNAS no acepta ningún reclamo si no se han efectuado los controles y verificaciones detalladas en este procedimiento. Si el vehículo estaba sellado debidamente y fue descargado completamente la cantidad a usted, puede tener la plena seguridad que recibió la cantidad facturada.</p>
---	--

<sup>14</sup> Nota: Se deberá realizar pruebas a las mangueras por continuidad de descarga de electricidad a tierra cada 6 meses o cuando su condición así lo requiera.

<p>provoquen presión o esfuerzo y daños a la misma. Se deben apretar con las llaves adecuadas y no martillar el acoplamiento. No las arrastre ni deje caer los acoplamientos porque se dañan<sup>15</sup>.</p> <p>El acople a los tanques de descarga de los clientes debe hacerse a través del codo de descarga y no conectando la manguera<sup>16</sup>. No se permite el uso de embudos o descargas abiertas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En caso de derrame de producto, si este es pequeño debe rociarse con arena el área afectada. Si el derrame es grande, proceda a cubrir el área afectada con arena o cualquier material absorbente, llame inmediatamente.<sup>17</sup></li> </ul>
--	---

### INFORME DE RENDIMIENTO DIARIO

El informe de rendimiento diario debe reflejar el itinerario real que se lleva durante una jornada de trabajo. Es una relación entre tiempo y operación. La forma de llenarlo es la siguiente:

<b>Compañía contratista:</b>	Es el nombre de la compañía que representa el conductor
<b>Placa:</b>	Es el número de matrícula del camión
<b>Marca:</b>	Es la marca que distingue el camión (ejemplo: Mack, International).
<b>Tanque:</b>	Se debe anotar el modelo y marca del tanque
<b>Capacidad:</b>	Es el galonaje total de transporte

<sup>15</sup> Nota: Se deberán realizar pruebas a las mangueras de presión de hermeticidad de 1 ½ de presión de trabajo cada 6 meses o cuando su condición así lo requiera.

<sup>16</sup> Nota: El codo de descarga deberá ser revisado y certificado por personal calificado cada 6 meses para garantizar que sus partes estén en condiciones adecuadas de funcionalidad para la seguridad de su acoplamiento hermético y así evitar desconexión o derrame de producto.

<sup>17</sup> No se debe permitir el acceso de personas curiosas y vehículos por lo menos 15 metros del área del derrame, proceda con el plan de contingencia

<b>Hora de inicio del viaje:</b>	Es la hora en que se inicia físicamente el viaje.
<b>Hora y duración de primera parada:</b>	El conductor debe detenerse luego de haber conducido máximo 4.5 horas durante 45 minutos o en tres ocasiones de 15 minutos. Se debe anotar la hora en que esto sucede y el tiempo que toma la parada.
<b>Hora y duración de segunda parada (tercera parada también):</b>	Igual a la primera parada.
<b>Hora de llegada a cargar:</b>	Es la hora en que se llega al sitio donde se carga el camión
<b>Volumen cargado:</b>	Es el total (en galones) cargado. Normalmente es la misma cifra que se describió anteriormente como “capacidad” del tanque.
<b>Hora de salida de las instalaciones:</b>	Es la hora en que se sale de las instalaciones donde cargó.
<b>Destino:</b>	Se debe anotar el lugar (cliente o depósito), hacia donde se dirigen.
<b>Hora de llegada:</b>	Es la hora en que llegamos al “destino” que describimos anteriormente.
<b>Volumen descargado:</b>	Se refiere al volumen que se deposita en el cliente al que se ha llegado.
<b>Hora de salida:</b>	Es la hora en que se sale de las instalaciones del cliente.
<p>Las siguientes tres combinaciones de “destino, hora de llegada, volumen descargado y hora de salida”, se utilizan cuando tenemos que descargar un viaje en varios lugares. Se utiliza el mismo procedimiento descrito anteriormente. El cuadro nos permite describir la información de un viaje con cuatro entregas diferentes.</p>	

<b>Inicio de turno:</b>	Es la hora en que comenzamos a trabajar ese día, es decir la hora en que nos reportamos a trabajar.
<b>Terminación de turno:</b>	Es la hora en que nos retiremos o concluimos nuestra jornada.
<b>Total trabajado:</b>	Es el tiempo utilizado en la jornada, en otras palabras, la diferencia entre la hora de terminación de turno y la hora de inicio de turno.

### VALORES DE RESTRICCIÓN OPTIMOS DURANTE EL TRANSPORTE DE GLP

Según la simulación realizada anteriormente se plantean los siguientes valores durante el transporte de un tanque cisterna para evitar accidentes ya que ninguna Norma establece valores máximos y mínimos.

<b>VOLUMEN DE CARGA ADMITIDO DEL TANQUE CISTERNA [L]</b>	<b>Volumen Máximo</b>	<b>Volumen Mínimo</b>
	52000	47500
<b>ALTURA DE CARGA ADMITIDA DEL TANQUE CISTERNA [m]</b>	<b>Altura Máxima</b>	<b>Altura Mínima</b>
	0,85 H	0,25 H
<b>VELOCIDAD ADMITIDA CON TANQUE LLENO [km/h]</b>	<b>Vel. Máxima</b>	<b>Vel. Mínima</b>
	67,45	55,86
<b>VELOCIDAD ADMITIDA CON TANQUE VACÍO [km/h]</b>	<b>Vel. Máxima</b>	<b>Vel. Mínima</b>
	75,45	65,75
<b>VELOCIDAD ADMITIDA CON TANQUE PARCIALMENTE LLENO</b>	<b>Vel. Máxima</b>	<b>Vel. Mínima</b>
	60	50

### RESUMEN RECORRIDO

Se debe seguir los siguientes pasos el control del recorrido del tanque

<b>Final:</b>	Se anota el kilometraje que registra el medidor del camión al terminar la jornada
<b>Inicial:</b>	Se anota el kilometraje que registra el medidor del camión al iniciar la jornada.
<b>Km. Recorrido:</b>	Se resta el kilometraje final menos el kilometraje inicial. Esta cifra nos indica el recorrido total durante el viaje realizado.
<b>Observaciones:</b>	En esta sección se deben anotar las irregularidades presentadas durante el viaje (daños, incidentes, etc.), o casos especiales como paradas por descanso
<b>Firma del conductor:</b>	La persona que realizó el viaje debe firmar en este espacio.
<b>Revisado:</b>	La persona que verifica lo descrito en este formulario por el conductor debe firmar en este espacio.
<b>Estadística</b>	Se debe realizar una estadística de los kilómetros diarios y velocidades durante un mes y verificar si no se excedieron de los valores óptimos
<b>Construcción de funciones</b>	Los especialistas en control de seguridad deben obtener polinomios de velocidades y kilometrajes para un mejor control y obtener una base de datos
<b>Base de datos óptimos</b>	Con la simulación realizada y la construcción de funciones se procede a obtener una base de datos mensual y armarlo por un año y con esto se debe evitar accidentes.

*Fuente: Elaboración propia en base a datos de simulación, 2023*



**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS**  
**RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-1055/2024**  
**La Paz, 05 de abril de 2024**

**VISTOS:**

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **01 de abril de 2024**, por **GROVER WENCESLAO CANAVIRI CALLE** con **C.I. N° 9144036 LP**, con número de trámite **DA 564/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: "**CONTROL DE SEGURIDAD DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES A TRAVÉS DE UN MODELO DINAMICO CONSIDERANDO LA VARIACION DE LA VELOCIDAD DEL FLUIDO EN TANQUES CISTERNAS PARCIALMENTE LLENOS**", cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

**CONSIDERANDO:**

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "*Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración*".

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece "*Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión*". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "*la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios*"

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "*...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial*"

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: "*... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena*



Oficina Central - La Paz  
Av. Montes, N° 515,  
entre Esq. Uruguay y  
C. Batallón Illimani.  
Telfs.: 2115700  
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz  
Av. Uruguay, Calle  
prolongación Quijarro,  
N° 29, Edif. Bicentenario.  
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba  
Calle Bolívar, N° 737,  
entre 16 de Julio y Antezana.  
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto  
Av. Juan Pablo II, N° 2560  
Edif. Multicentro El Ceibo  
Ltda. Piso 2, Of. 5B,  
Zona 16 de Julio.  
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca  
Calle Kilómetro 7, N° 366  
casí esq. Urriolagoitia,  
Zona Parque Bolívar.  
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija  
Av. La Paz, entre  
Calles Ciro Trigo y Avaroa  
Edif. Santa Clara, N° 243.  
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro  
Calle 6 de Octubre, N° 5837,  
entre Ayacucho  
y Junín, Galería Central,  
Of. 14.  
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí  
Av. Villazón entre calles  
Wenceslao Alba y San Alberto,  
Edif. AM. Salinas N° 242,  
Primer Piso, Of. 17.  
Telf.: 72018160

[www.senapi.gob.bo](http://www.senapi.gob.bo)

fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

**POR TANTO:**

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

**RESUELVE:**

**INSCRIBIR** en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: "**CONTROL DE SEGURIDAD DE TRANSPORTE DE COMBUSTIBLES A TRAVES DE UN MODELO DINAMICO CONSIDERANDO LA VARIACION DE LA VELOCIDAD DEL FLUIDO EN TANQUES CISTERNAS PARCIALMENTE LLENOS**" a favor del autor y titular: **GROVER WENCESLAO CANAVIRI CALLE** con **C.I. N° 9144036 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/Im

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI

**CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO**

**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS**

LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



5D0qg5Kk7Fh96j

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB [www.senapi.gob.bo/verificacion](http://www.senapi.gob.bo/verificacion) Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz  
Av. Montes, N° 515,  
entre Esq. Uruguay y  
C. Batallón Illimani.  
Telfs.: 2115700  
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz  
Av. Uruguay, Calle  
prolongación Quijarro,  
N° 29, Edif. Bicentenario.  
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba  
Calle Bolívar, N° 737,  
entre 16 de Julio y Antezana.  
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto  
Av. Juan Pablo II, N° 2560  
Edif. Multicentro El Ceibo  
Ltda. Piso 2, Of. 5B,  
Zona 16 de Julio.  
Telfs.: 2141001 - 72043029

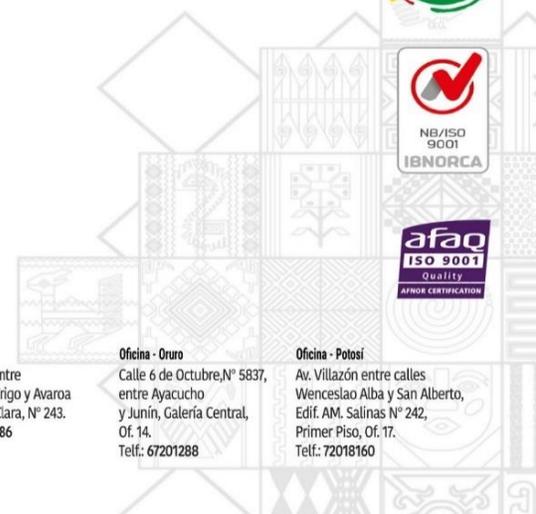
Oficina - Chuquisaca  
Calle Kilómetro 7, N° 366  
casi esq. Urriolagoitia,  
Zona Parque Bolívar.  
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija  
Av. La Paz, entre  
Calles Ciro Trigo y Avaroa  
Edif. Santa Clara, N° 243.  
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro  
Calle 6 de Octubre, N° 5837,  
entre Ayacucho  
y Junín, Galería Central,  
Of. 14.  
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí  
Av. Villazón entre calles  
Wenceslao Alba y San Alberto,  
Edif. AM. Salinas N° 242,  
Primer Piso, Of. 17.  
Telf.: 72018160

[www.senapi.gob.bo](http://www.senapi.gob.bo)



**Autor:**

Univ. Canaviri Calle Grover Wenceslao

**Correo:** [wences07@gmail.com](mailto:wences07@gmail.com)

**Celular:** 65131415

