

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA**

**DE**

**QUERÉTARO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO**

**ÁREA DE ELECTROMECAÁNICA**

**T E S I S**

**MODELADO TEÓRICO EXPERIMENTAL DEL  
UMBRAL ESTÁTICO DE VOLCADURA DE  
AUTOTANQUES**

**Que para obtener el título de:**

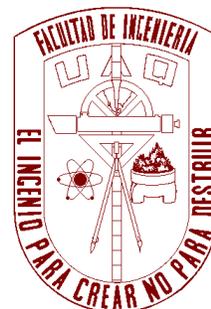
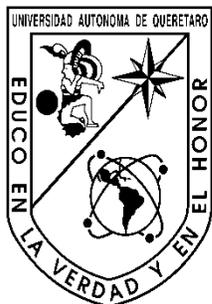
**INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**PRESENTA:**

**SERGIO ARTURO HERRERA RÍOS**

**DIRECTOR: JOSÉ ANTONIO ROMERO NAVARRETE**

*San Juan del Río, Qro., Mayo de 2011*



Universidad Autónoma de Querétaro  
EDUCO EN LA VERDAD Y EN EL HONOR

# Presentación

---

Esta tesis se enmarca en las actividades relacionadas con el transporte en general y en particular con la Seguridad Carretera. La motivación para este trabajo se deriva del interés del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ).

Estos trabajos se enmarcan asimismo en el desarrollo de la materia “Proyecto y Diseño”, correspondiente al octavo semestre de la carrera. El Profesor titular de este curso es el Dr. Aurelio Domínguez González, apoyado por el Dr. Carlos Santiago López Cajun y el Dr. Miguel Trejo Hernández.

## Resumen

---

Los vehículos tipo autotank son propensos a sufrir accidentes del tipo volcadura, como resultado de la alta posición de su centro de gravedad, combinado con el efecto potencial del oleaje del líquido contenido cuando tales vehículos viajan parcialmente llenos. Sin embargo, el corrimiento del centro de gravedad sugiere que para niveles parciales de llenado se tendrían una mayor propensión a sufrir una volcadura. Siendo el umbral estático de volcadura la propiedad más importante para analizar la tendencia a la volcadura de los vehículos, en esta tesis se propuso realizar un desarrollo teórico experimental que proporcionará alguna luz sobre el efecto del nivel de llenado sobre este umbral estático de volcadura. En forma paralela al diseño y construcción de un banco de pruebas para este fin, se revisaron las formulaciones existentes para modelar teóricamente el corrimiento del centro de gravedad por efecto de un campo de aceleración lateral. Se empleó una formulación original para determinar la posición del centro de gravedad de un tanque elíptico parcialmente lleno, en función del nivel de llenado. De manera complementaria a este desarrollo se diseñó y realizó un circuito electrónico con objeto de sensar el punto de volcadura inminente del tanque. Diferentes situaciones tuvieron que ser enfrentadas, en la medida de que el modelo tendría que aproximarse a la realidad.

La formulación existente para determinar la posición del centro de gravedad de un tanque elíptico parcialmente lleno, se adaptó para tomar en cuenta la flexibilidad de la suspensión. Mientras que el modelo fue validado al no obtener diferencias mayores al 7% respecto a los valores teóricos, lo más trascendente de los resultados fue que el umbral estático de volcadura no es afectado de manera significativa ni por el nivel de llenado ni por la rigidez de la suspensión. Esto se atribuye a una compensación de los momentos recuperadores y aquellos que tienden a volcar el vehículo.

# Contenido

---

|  |    |
|--|----|
| Resumen                                  | V  |
| Introducción                             | 1  |
| Antecedentes                             | 1  |
| Objetivos y Alcance                      | 7  |
| Metodología y contenido de la tesis      | 7  |
| Capítulo 1    Generalidades              | 9  |
| 1.1 Umbral estático de volcadura         | 9  |
| 1.2 Instrumentación                      | 12 |
| 1.3 Diseño en ingeniería                 | 13 |
| 1.4 LabVIEW                              | 14 |
| 1.5 Modelado experimental y a escala     | 15 |
| Capítulo 2    Revisión de literatura     | 17 |
| 2.1 Modelado teórico                     | 17 |
| 2.2 Métodos de prueba                    | 19 |
| 2.3 Normatividad                         | 20 |
| Capítulo 3    Diseño de equipo de prueba | 22 |
| 3.1 Necesidad                            | 22 |
| 3.2 Módulos                              | 22 |
| 3.3 Principios de operación              | 24 |
| 3.4 Instrumentación                      | 25 |
| 3.5 Sistema de accionamiento             | 29 |
| 3.6 Descripción y pruebas preliminares   | 30 |

|            |                                     |    |
|------------|-------------------------------------|----|
| Capítulo 4 | Modelado teórico                    | 37 |
| 4.1        | Formulación                         | 37 |
| 4.2        | Prueba del modelo                   | 43 |
| Capítulo 5 | Pruebas y discusiones               | 46 |
| 5.1        | Diseño de pruebas                   | 46 |
| 5.2        | Soporte rígido                      | 47 |
| 5.3        | Tanque sobre resortes               | 49 |
| 5.4        | Comparación con el modelo teórico   | 52 |
|            | Conclusiones y recomendaciones.     | 57 |
|            | Referencias.                        | 59 |
|            | Apéndice “A” Programas.             | 60 |
|            | Apéndice “B” Planos de fabricación. | 64 |

# Índice de figuras

---

|   | <i>Página</i> |
|---|---------------|
| Figura 1. Cambio de altura en el centro de gravedad. (a) parcialmente lleno; (b) totalmente lleno.  | 2             |
| Figura 2. Variación del centro de gravedad producto de aceleraciones laterales. (a) en vuelta a la derecha; (b) en vuelta a la izquierda. | 3             |
| Figura 3. Diagrama de fuerzas que actúan sobre un vehículo al negociar una vuelta a la derecha.   | 4             |
| Figura 4. Mesa <i>inclinable</i> . (Billing y Patten, 2005).  | 6             |
| Figura 5. Aseguramiento de llantas y sensor de fuerza. (Billing y Patten, 2005).  | 6             |
| Figura 1.1. Ilustración para la definición del umbral estático de volcadura.  | 9             |
| Figura 1.2. Versión simplificada del umbral estático de volcadura.  | 11            |
| Figura 1.3. Umbral de volcadura en una plataforma inclinable.   | 12            |
| Figura 1.4. Fases del diseño (Shigley, 1999).   | 13            |
| Figura 2.1. Superficie libre de un tanque cilíndrico sometido a un campo constante de aceleración lateral.                                | 18            |
| Figura 2.2. Ensayo en plataforma inclinable (1).  | 20            |
| Figura 3.1. Módulos que componen el modelo experimental.  | 23            |
| Figura 3.2. Típico amplificador operacional: configuración de pines.  | 26            |
| Figura 3.3. Típico amplificador operacional: símbolo del circuito.  | 26            |
| Figura 3.4. Configuración interna del CI 74LS04.  | 27            |
| Figura 3.5. Diagrama de conexión del circuito desarrollado para sensar el punto de volcadura inminente.                                   | 30            |
| Figura 3.6. Imagen del dispositivo de prueba.   | 31            |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.7. Representación esquemática del tanque de prueba.   | 31 |
| Figura 3.8. Vista lateral del banco de pruebas.  | 33 |
| Figura 3.9. Vista isométrica del banco de pruebas.   | 34 |
| Figura 3.10. Vista superior del banco de pruebas.  | 35 |
| Figura 3.11. Arreglo general vista 1, pruebas preliminares.  | 36 |
| Figura 3.12. Arreglo general vista 2, pruebas preliminares.  | 36 |
| Figura 4.1. Superficie libre de un tanque elíptico sometido a un campo constante de aceleración lateral.           | 39 |
| Figura 4.2. Fuerzas de inercia en un recipiente elíptico sobre una mesa inclinable, cargado al 50%.                | 39 |
| Figura 4.3. Diagrama de fuerzas de inercia para un tanque cargado por arriba del 50%.                              | 40 |
| Figura 4.4. Diagrama de fuerzas del tanque sobre soportes flexibles.   | 41 |
| Figura 4.5. Diagrama de fuerzas para determinar la rigidez torsional.  | 42 |
| Figura 4.6. Ilustración del corrimiento lateral asociado al uso de resortes helicoidales.                          | 43 |
| Figura 4.7. Brazo adicional para evitar el corrimiento lateral del tanque soportado.                               | 44 |
| Figura 4.8. Arreglo general del dispositivo de prueba.   | 45 |
| Figura 5.1. Transitorio durante el reposicionamiento horizontal desde un ángulo de 30°.                            | 47 |
| Figura 5.2. Comparación de resultados teóricos experimentales para los tres niveles de llenado – soporte rígido.   | 49 |
| Figura 5.3. Comparación de resultados teóricos experimentales para los tres niveles de llenado – soporte flexible. | 51 |
| Figura 5.4. Efecto del tipo de soporte sobre el valor teórico del ángulo de volcadura.                             | 51 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.5. Efecto del tipo de soporte sobre el valor medido del ángulo de volcadura.  | 52 |
| Figura 5.6. Errores respecto a la medición para el tanque sobre soportes rígidos.  | 53 |
| Figura 5.7. Errores respecto a la medición para el tanque sobre soportes flexibles.  | 53 |
| Figura 5.8. Componentes del circuito electrónico de detección de volcadura inminente.  | 54 |
| Figura 5.9. Operación de los <i>leds</i> en posición de volcadura y no volcadura: (a) punto estable ( <i>led verde</i> ); (b) volcadura inminente ( <i>led rojo</i> ). | 56 |

# Índice de Tablas

---

|  | <i>Página</i> |
|--|---------------|
| Tabla 2.1. Mediciones del Umbral Estático de Volcadura (1).  | 20            |
| Tabla 3.1. Datos generales del circuito CI 74LS04.   | 27            |
| Tabla 3.2. Tabla de verdad CI 74LS04.  | 27            |
| Tabla 3.3. Propiedades de los elementos del módulo Tanque y del sistema LABview de adquisición de datos. | 32            |
| Tabla 5.1. Condiciones para el ensaye con soporte rígido, para los tres diferentes niveles de llenado.   | 48            |
| Tabla 5.2. Resultados de las mediciones y de los cálculos para el soporte rígido.                        | 49            |
| Tabla 5.3. Condiciones para el ensaye con soporte flexible, para los tres diferentes niveles de llenado. | 50            |

# Introducción

---

Se describen los elementos base para el desarrollo de esta tesis, incluyendo los antecedentes, objetivos y alcance, así como la metodología seguida y el contenido de esta tesis.

## Antecedentes

La volcadura de un vehículo siempre es indeseable y más aún cuando se trata de un vehículo pesado que transporte alguna sustancia tóxica o peligrosa. Esta es una de las causas más importantes que dan pie a la investigación del modelado teórico-experimental del umbral de volcadura estático de autotanques. El transporte de líquidos se vuelve peligroso cuando el vehículo pesado cambia su dirección o realiza una maniobra, dando lugar a la oscilación del líquido transportado, cuyas fuerzas de inercia tenderán a volcar al vehículo. Esta oscilación del fluido transportado se denomina *slosh*, y hace referencia al movimiento del líquido libremente en el tanque, el cual origina además, un cambio en la posición transversal del centro de gravedad.

La volcadura de vehículos del tipo autotanque es relativamente frecuente. De un estudio estadístico de percances carreteros en vehículos, se ha conocido que los autotanques que viajan parcial o totalmente cargados tienden a volcarse. Por ejemplo, en Estados Unidos de 30 accidentes 22 fueron en autotanques (73%) (Ervin, et al, 1985). Por otro lado, la incidencia en accidentes señala que la mayoría de éstos para el caso de autotanques, se da en caminos con curvas. Aunque solamente el 4 % de los accidentes estaría relacionado con el oleaje que se produce en el interior del autotanque, las consecuencias de tales accidentes por lo general afectan un a alto número de personas con lesiones, aparte de relativamente cuantiosas pérdidas materiales.

La Figura 1 ilustra dos situaciones en las que se tiene un autotanque parcialmente lleno y otra en la que el tanque está totalmente lleno. Como es posible observar, el tanque parcialmente lleno provee el espacio para que el fluido

contenido se desplace lateralmente, como resultado de las aceleraciones laterales producto de los cambios direccionales.

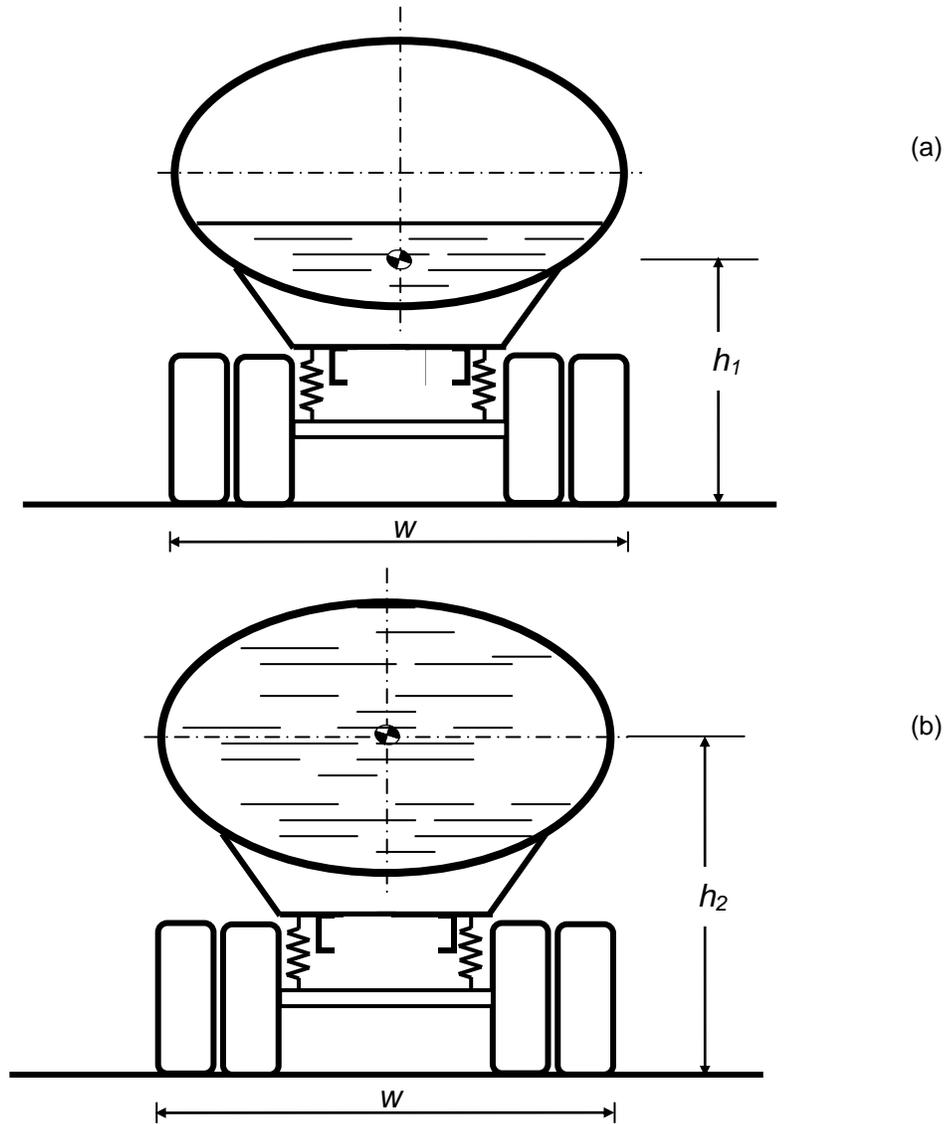


Figura 1. Cambio de altura en el centro de gravedad.(a) parcialmente lleno; (b) totalmente lleno.

El desplazamiento del centro de gravedad del fluido contenido en un tanque parcialmente lleno se muestra en la Fig. 2.

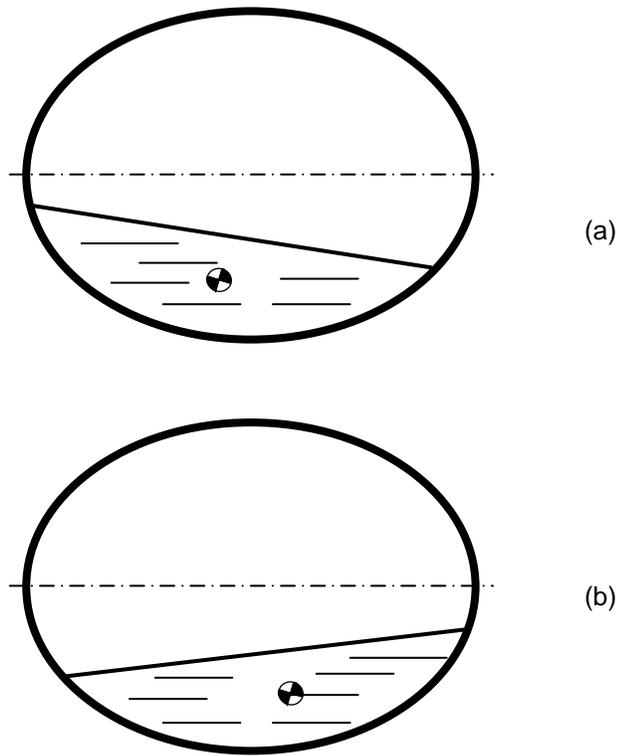


Figura 2. Variación del centro de gravedad producto de aceleraciones laterales. (a) en vuelta a la derecha; (b) en vuelta a la izquierda.

De esta manera, el corrimiento del centro de gravedad del vehículo afecta la estabilidad del vehículo, como se puede observar en la Fig. 3 para el caso de una suspensión rígida. En esta figura se muestran las fuerzas de inercia que actúan sobre el vehículo al negociar una vuelta a la derecha. Se incluyen tanto las fuerzas del líquido como del vehículo, donde  $a_L$  es la aceleración lateral producto de la maniobra direccional, y  $g$  es la aceleración de la gravedad.  $m_L$  y  $m_v$  representan las masas del líquido y del vehículo, respectivamente. Asumiendo que se cuenta con la suficiente fricción en la interfaz llanta pavimento, el vehículo tenderá a volcarse alrededor del pivote  $O$ . Se identifican entonces fuerzas y momentos que tienden a volcar al vehículo y fuerzas y momentos que tienden a estabilizar al vehículo. Como resultado de estos momentos, la fuerza de llanta en

el lado interior ( $F_I$ ) tiende a disminuir. En un punto dado, esta fuerza pudiera ser cero y la volcadura del autotanque podría ser inminente.

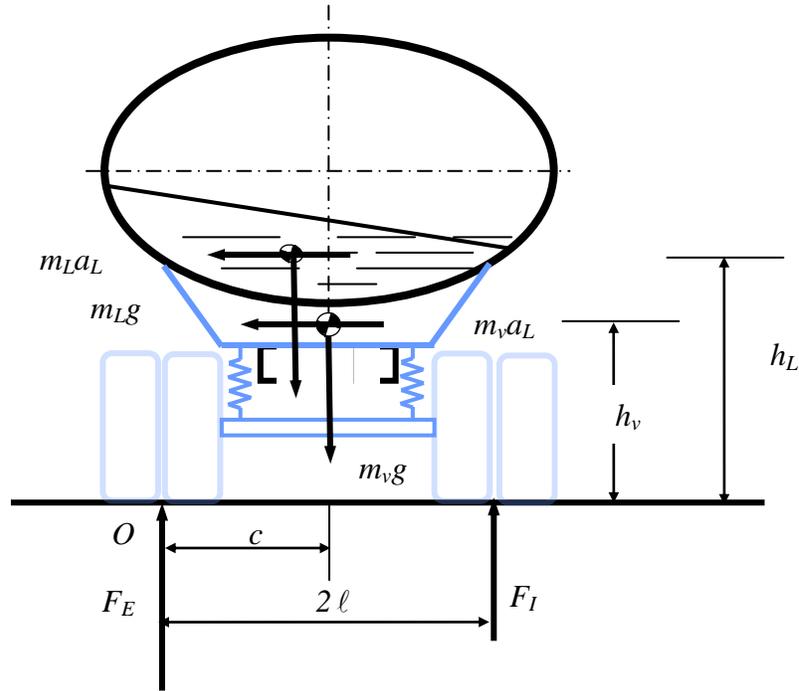


Figura 3. Diagrama de fuerzas que actúan sobre un vehículo al negociar una vuelta a la derecha.

El momento en que  $F_I$  es cero queda determinado cuando el momento desestabilizador es igual al momento estabilizador, esto es:

$$m_L a_L h_L + m_v a_L h_g = m_L g h_L + m_v g l \quad (1)$$

De esta forma, la aceleración  $a_L$  para provocar que la llanta interior pierda contacto con el pavimento, está dada por:

$$a_L = (m_L g h_L + m_v g l) / (m_L h_L - m_v h_g) \quad (2)$$

De esta forma, la tendencia a la volcadura de un vehículo tipo autotanque dependerá de características inerciales y geométricas del conjunto vehículo –

carga líquida. Entre las propiedades geométricas se incluyen la altura de los diferentes centros de gravedad, así como la distancia entre llantas y el corrimiento de la carga líquida ( $c$ ). Estas características geométricas dependerán entonces de la forma del tonel que contiene la carga líquida. Por otro lado, factores no geométricos que influyen en la tendencia en la volcadura incluyen a la rigidez tanto de suspensiones como llantas del vehículo autotanque.

Si bien es cierto que la tendencia a la volcadura es influida entonces por factores dinámicos, como en el caso de las frecuencias naturales de oscilación de los fluidos contenidos (Romero et al., 2006), la característica más importante que afecta la estabilidad lateral de los vehículos, tiene que ver con la aceleración  $a_L$  calculada mediante la ecuación (1) en el caso de un autotanque con la suspensión rígida.

Tomando en cuenta estos diferentes factores que afectan la estabilidad lateral de los vehículos, estudios realizados sobre la tendencia a la volcadura de los vehículos indican que la aceleración lateral crítica de un autotanque al estar éste totalmente cargado es de  $5.4 \text{ m/s}^2$ , mientras que si está al 50% de llenado la aceleración es de tan sólo  $2.4 \text{ m/s}^2$  (Strandberg, 1978). Tal reducción en la aceleración de volcadura es producto directo del corrimiento del centro de gravedad de la carga líquida. Mientras que es posible efectuar estimaciones de la aceleración crítica de volcadura de los vehículos tipo autotanque, es necesario efectuar validaciones de tales aproximaciones teóricas.

Para la determinación experimental de la aceleración crítica de volcadura se tiene una metodología ampliamente aceptada, consistente en someter a una aceleración lateral al vehículo con carga líquida, producto del apoyo del vehículo en una plataforma *inclinable* (*tilt table*). Por ejemplo, en Canadá se realizó el análisis experimental mostrado en la Figura 4 (Billing y Patten, 2005). Estos equipos consisten de una plataforma sobre la cual se instalan los vehículos, y de un sistema de movimiento para inclinar dicha plataforma. La plataforma cuenta

con sensores para la medición del ángulo de inclinación, y para medir las fuerzas de las llantas sobre la plataforma, como se ilustra en la Fig. 5. Mediante este equipo se han efectuado diversas caracterizaciones de los vehículos para obtener los ángulos a los cuales la volcadura del vehículo es inminente. Esta figura muestra el momento preciso en que uno de los duales del eje pierde contacto con el transductor de fuerza. Como se puede observar en esta figura, el sistema cuenta con los dispositivos para evitar la volcadura real del vehículo estudiado.



Figura 4. Mesa *inclinable*. (Billing y Patten, 2005).

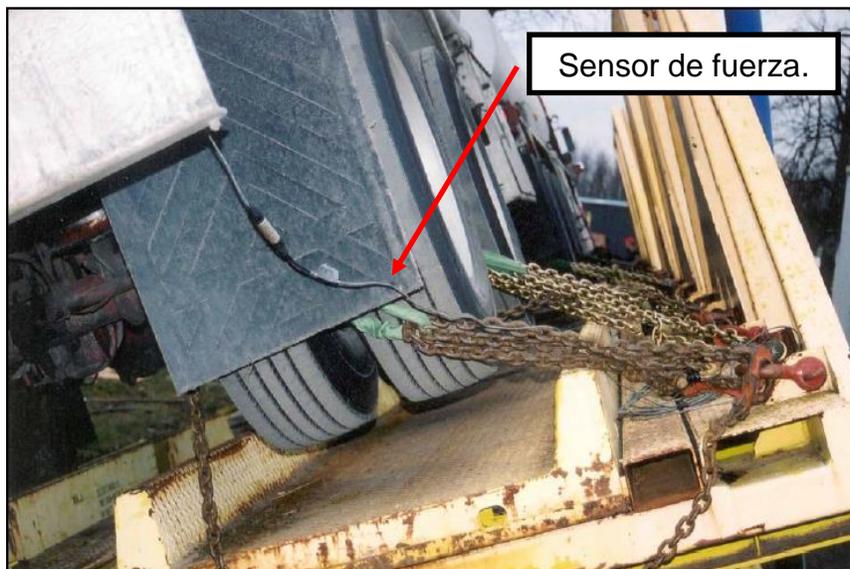


Figura 5. Aseguramiento de llantas y sensor de fuerza. (Billing y Patten, 2005).

Dada la complejidad para el manejo de equipamientos e instrumentos para la realización de pruebas, es conveniente contar con una metodología teórica validada para estimar la aceleración o ángulo de volcadura.

### **Objetivos y alcances**

Es el propósito de esta tesis desarrollar un modelo teórico experimental del umbral estático de volcadura de contenedores del tipo elíptico. Asimismo, contar con un sensor / indicador de la volcadura inminente del modelo experimental ensayado.

Para este desarrollo se partirá de una revisión de metodologías existentes, diseñando y construyendo tanto el desarrollo experimental como el dispositivo sensor de la volcadura.

### **Metodología y contenido de la tesis.**

Como principio general para el desarrollo de los trabajos, se emplearán los principios del Diseño Metódico, que comprende diferentes etapas desde la identificación del problema hasta la discusión de las soluciones y la construcción del prototipo.

El Capítulo 1 presenta algunos tópicos que facilitarán la lectura y comprensión del presente trabajo.

El Capítulo 2 presenta una revisión de la literatura, por cuanto a las aproximaciones diversas, tanto teóricas como experimentales, por cuanto a la medición o estimación del umbral estático de volcadura de los vehículos.

El Capítulo 3 describe el desarrollo de diseño del equipo de pruebas, incluyendo las diferentes etapas y módulos identificados.

El Capítulo 4 describe el desarrollo de las ecuaciones para modelar el umbral estático de volcadura.

El Capítulo 5 muestra el desarrollo de las pruebas, para verificar las aproximaciones teóricas mediante el uso del equipo desarrollado.

Finalmente, se incluye la sección de Conclusiones, que recapitulan el contenido de esta tesis, y exponen un conjunto de observaciones finales. En este capítulo también se presenta una serie de recomendaciones por cuanto a trabajos a futuro.

# Capítulo 1 Generalidades

Con objeto de facilitar la comprensión del presente trabajo, se incluyen en este capítulo algunos conceptos fundamentales empleados en esta tesis, así como describen algunas herramientas empleadas. Se incluyen conceptos de instrumentación y de diseño, así como describen el programa LabVIEW y se explican los fundamentos del diseño experimental.

## 1.1 Umbral estático de volcadura

A partir de lo expuesto en el capítulo introductorio, la Fig. 1.1 ilustra las fuerzas que actúan sobre un tanque soportado por una suspensión rígida.

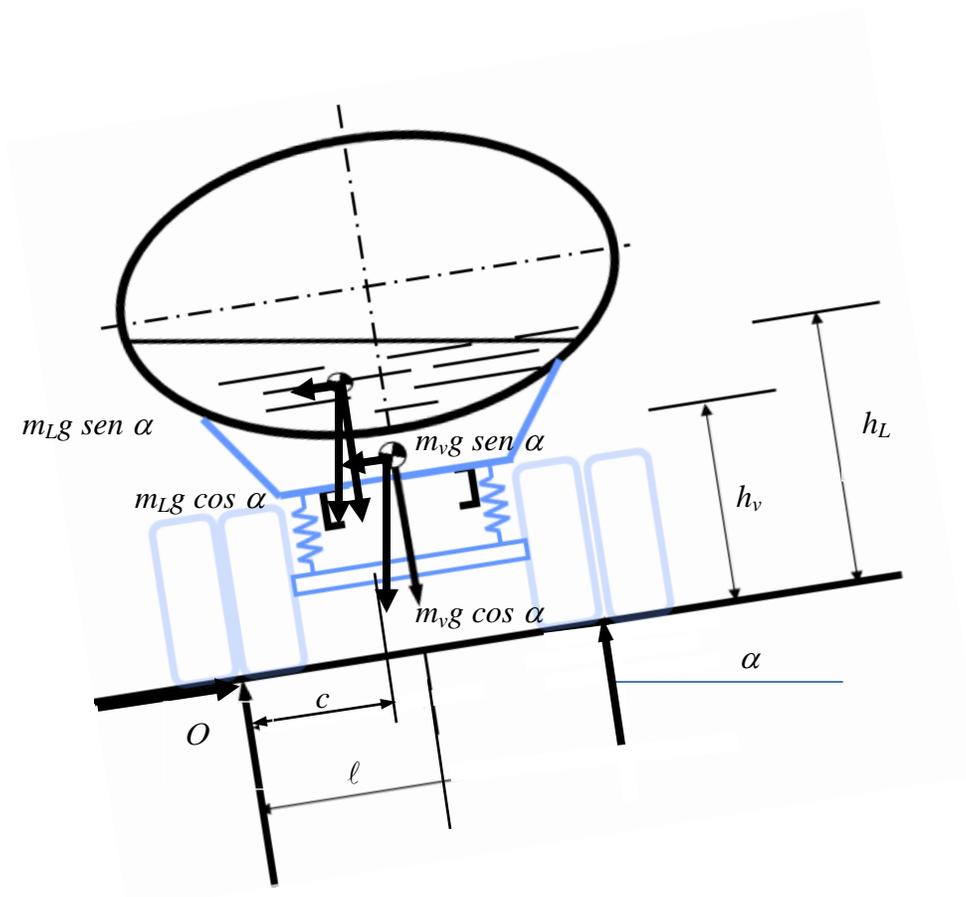


Figura 1.1. Ilustración para la definición del umbral estático de volcadura.

Este ensaye en plano inclinado se emplea como recurso para ensayar de manera sencilla la tendencia a la volcadura de los vehículos. En el caso ilustrado, la suspensión del vehículo se ha considerado como infinitamente rígida, por lo que la deflexión de los resortes se ha asumido despreciable. En el capítulo 4 se describe el modelo teórico propuesto para predecir el umbral de volcadura en función de la rigidez de los resortes de la suspensión.

Para el diagrama ilustrado en la Fig. 1.1, la aceleración para la cual la fuerza exterior es nula, se obtiene haciendo suma de momentos alrededor del punto  $O$ , de la siguiente manera:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{m_L c + m_v \ell}{m_L h_L + m_v h_v} \right) \quad (1.1)$$

donde  $\alpha$  es el ángulo teórico de volcadura. De esta manera, esta propiedad de un vehículo autotank depende de las propiedades geométricas del vehículo y de las alturas de los centros de gravedad de la masa del líquido y del vehículo (tara). La masa del vehículo incluye la masa del tonel y de los otros componentes, tales como ejes, y bastidor.

Este umbral estático de volcadura es una propiedad que se ha llegado a emplear para definir la seguridad de incluso vehículos ligeros, tales como camionetas utilitarias. En esos casos, el umbral estático de volcadura se ha llegado a definir de manera aún más simple, como se muestra en la Fig. 1.2.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\ell}{h} \right) \quad (1.2)$$

De esta manera, una primera aproximación para el umbral estático de volcadura consiste del cociente de las dimensiones de localización del centro de gravedad del vehículo.

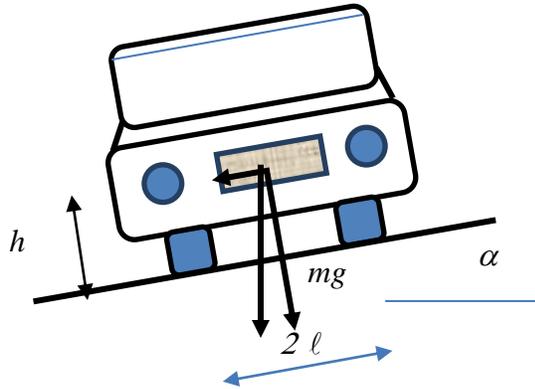


Figura 1.2. Versión simplificada del umbral estático de volcadura.

A pesar de que la ecuación (3) da una idea del concepto detrás del umbral estático de volcadura, este valor desprecia la deflexión de los elementos de la suspensión, aparte del corrimiento lateral de la carrocería del vehículo.

La medición de los umbrales estáticos de volcadura en plataformas o mesas inclinables se presenta en la Fig. 1.3. El punto de volcadura queda definido cuando la dirección del peso del vehículo, coincide con el eje de pivoteo de la mesa, en cuyo caso se presentan las relaciones geométricas mostradas, en donde el momento recuperador ( $mg \cos \alpha c$ ) iguala al momento desequilibrador ( $mg \sin \alpha h$ ) (Winkler y Ervin, 1999):

$$mg \cos \alpha c = mg \sin \alpha h \quad (1.3)$$

pero  $c = h \tan \alpha$

Por lo tanto:

$$mg \cos \alpha h \tan \alpha = mg \sin \alpha h \quad (1.4)$$

o

$$\tan \alpha = mg \sin \alpha / mg \cos \alpha \quad (1.5)$$

Este ángulo  $\alpha$  se toma como la aceleración lateral que es necesario aplicar para alcanzar el punto de volcadura del vehículo en la plataforma inclinable.

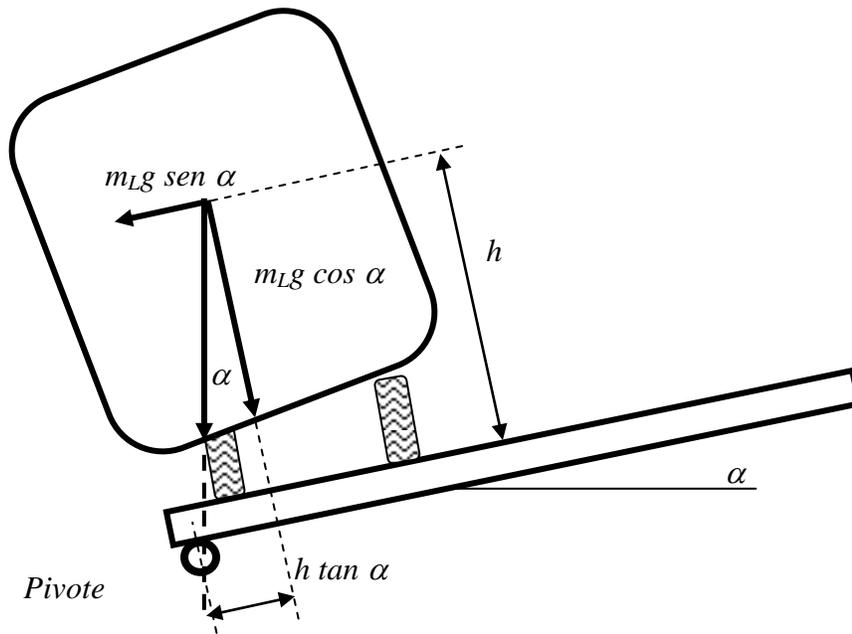


Figura 1.3. Umbral de volcadura en una plataforma inclinable.

## 1.2 Instrumentación

Diferentes elementos constituyen un instrumento, incluyendo los sensores y el sistema de adquisición de las señales producidas en el sensor.

Un sensor es un dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud del exterior y transformarla en otra magnitud, que seamos capaces de cuantificar y manipular. Normalmente estos dispositivos se encuentran realizados mediante la utilización de componentes pasivos (resistencias variables, PTC, NTC, LDR, etc... todos aquellos componentes que varían su magnitud en función de

alguna variable). Dentro de toda la familia de sensores que existen, se cuentan a aquellos que traducen la deformación en una variación de resistencia eléctrica. Estos elementos se conocen como deformímetros, y consisten de alambres muy delgados, que se arreglan en múltiples arreglos para incrementar la variación de su resistencia por efecto de la deformación al cuerpo al cual se adhieren.

### 1.3 Diseño en ingeniería

El diseño mecánico es la configuración de elementos y sistemas de naturaleza mecánica: máquinas, aparatos, estructuras, dispositivos e instrumentos. El diseño mecánico se basa en el uso de las matemáticas, ciencia de materiales y la ciencia mecánica aplicada. Para el diseño mecánico se emplean todas las disciplinas de la ingeniería mecánica, y en otras ocasiones ciencias térmicas y de los fluidos. La naturaleza del proceso es iterativa, como se muestra en la Figura 1.4.

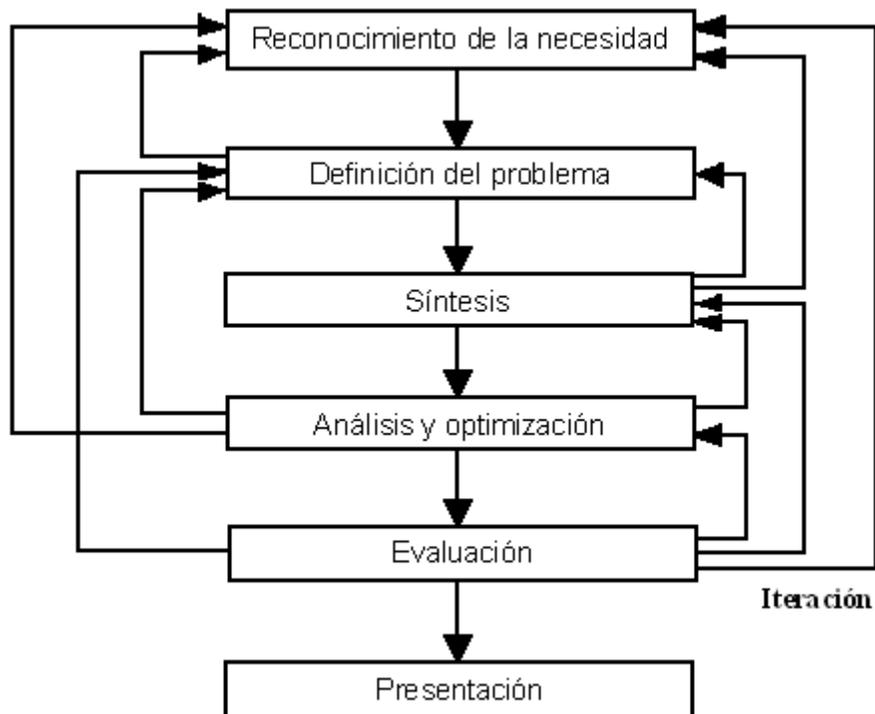


Figura 1.4. Fases del diseño (Shigley, 1999).

## 1.4 LabVIEW

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) es un lenguaje de programación gráfico que usa iconos en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones. A diferencia de otros lenguajes de programación, en LabVIEW el orden lo va decretando el flujo de datos.

LabVIEW es llamado Instrumento virtual, por que imita operaciones de instrumentos físicos, tales como osciloscopios y multímetros, este software se compone principalmente de dos pantallas:

- Diagrama a bloques: Contiene los códigos fuente gráficos.
- Panel frontal: Funciona como interface que definen las funciones del instrumento virtual.

El diagrama a bloques es la ventana primaria, la cual es el punto de conexión de las distintas señales, se pueden incorporar filtros, analizadores, amplificadores, multímetros, entre otros.

La conexión de los diversos elementos existentes en el sistema se realiza mediante ligas, muy semejante a SIMULINK. El panel frontal comprende diferentes esquemas para el despliegue de las señales capturadas el cual contiene indicadores y controladores, para la parte de control la componen principalmente perillas, botones, selectores y otros mecanismos de entrada.

Después de haber terminado la conexión de todos los elementos del diagrama a bloques, se compila el programa en el panel frontal donde se encontrarán los iconos de correr y detener la ejecución del programa.

Como LabVIEW es un programa de adquisición de datos, podemos tomar señales de fenómenos físicos reales externos. LabVIEW tomará las señales del fenómeno físico y mandara las señales gráficas en el panel de despliegue, como una función de las funciones programadas en el diagrama a bloques.

## 1.5 Modelado experimental y a escala

Un experimento consiste en un ensaye caracterizado por tener ciertas particularidades. Entre ellas se tiene que debe existir un diseño experimental, aparte de contar con un modelo teórico de los resultados que se esperan. De esta forma, un experimento puede tener diferentes causalidades, que incluyen el validar alguna aproximación teórica o derivar un modelo empírico para describir un fenómeno complicado.

En términos generales, el diseño experimental entonces incluye una serie de elementos que deben ser definidos. Dependiendo de la naturaleza del fenómeno ensayado, y de los fines que se persigan, se tales cantidades de definir incluyen a los factores, a los niveles, así como a los parámetros y réplicas.

Los factores en un experimento son aquellas cantidades sobre las cuales se tiene control; los niveles son la cantidad de valores que pueden ser dados a tales factores. Los parámetros son cantidades que se asume no afectan los resultados del experimento. Finalmente, las réplicas constituyen repeticiones de los experimentos, con objeto de evitar los errores sistemáticos.

En un experimento hipotético, que se planteara como objetivo analizar el efecto del nivel de llenado sobre los umbrales de volcadura de un tanque, se podrían tener diferentes factores y niveles, de acuerdo al alcance del experimento. En este caso particular, los factores o características sobre las cuales se tendría control, incluyen a la forma del tonel y a los niveles de llenado. Por otro lado, los parámetros que podríamos considerar son por ejemplo, la temperatura ambiente. De esta manera quedaría despreciado el efecto de la temperatura ambiente sobre los umbrales estáticos de volcadura. Esa suposición, sin embargo, podría justificarse al observar las pequeñas variaciones de la densidad del fluido con la temperatura. Las réplicas o repeticiones del experimento, son por lo general 3.

El modelado a escala representa una herramienta que facilita el estudio de fenómenos que involucran objetos de grandes o pequeñas dimensiones. Una escala de reducción, en la que el sistema real es mayor que el experimental,

facilita en general el desarrollo de los estudios. En este caso, por ejemplo, el ensaye de un autotankue a escala completa resultaría costoso y a la vez, peligroso. Sin embargo, es menester establecer una relación los resultados del modelo a escala con aquellos que se presentarían en la realidad. Para ello es necesario efectuar un análisis dimensional.

Un grupo adimensional permite determinar factores de escala que relacionen el modelo a escala real con el escalado. Se tienen diversos escalamientos, que incluyen el geométrico, el estático y el dinámico. En esta tesis se ha procedido a establecer un escalamiento geométrico. Un grupo adimensional para este tipo de escalamiento puede consistir entonces del cociente de dos dimensiones características del tonel. Por ejemplo, el largo y el ancho. De esta manera un escalamiento geométrico consiste en reducir las dimensiones del objeto real, en una misma medida.

Así, el escalamiento geométrico obedece en este caso a las limitantes espaciales que se tiene, aparte de las facilidades de manejo de los modelos. En este caso, se trata de un recipiente que contendrá una cantidad de líquido la cual resulte lo suficientemente práctico para llevar a cabo las pruebas de manera rápida.

## Capítulo 2 Revisión de la literatura

---

La adaptación de las ecuaciones a nuestro modelo resulta muy practica, por lo que solo se requieren realizar algunos ajustes y después aplicarlas a nuestro estudio.

Por la parte experimental las estimaciones serán un factor importante, ya que algunos parámetros como la medición de la variación del ángulo será en forma experimental.

### 2.1 Modelado teórico

Diversas aproximaciones para estudiar la tendencia a la volcadura de autotankes han sido desarrolladas. Por la proximidad a lo planteado en esta tesis, se describe un trabajo desarrollado en la Universidad Concordia, en Canadá (Modaressi-Tehrani et al.,2006).

La Fig. 2.1 ilustra una representación de las aceleraciones laterales y normales de una masa de fluido contenida en un contenedor cilíndrico durante una maniobra de vuelta a la derecha (Modaressi-Tehrani et al.,2006). La consideración en este caso es que el centro de gravedad del fluido oscila alrededor de un círculo concéntrico al tanque, y que la tangente en cualquier posición de aceleración lateral, el punto de tangencia con un círculo pasa por el centro del cilindro hasta la posición del centro de gravedad.

En este modelo, el corrimiento de la coordenada lateral del centro de masa ( $CG$ ) de la masa del líquido se calcula a partir del gradiente de la superficie libre del líquido y de la geometría del tanque, de la siguiente manera:

$$x = y_s \operatorname{sen} \alpha = \frac{y_s G_x}{\sqrt{1 + G_x^2}} \quad (2.1)$$

En donde  $x$  es la coordenada lateral instantánea del centro de gravedad  $CG$  de la cara, medida desde el eje vertical de simetría  $OY$ .  $y_s$  es la coordenada vertical

del centro de masa bajo condiciones estáticas, medida a partir de la geometría del tanque,  $\alpha$  es el gradiente de la superficie libre con respecto al eje horizontal, y  $G_x$  es la aceleración lateral normalizada en términos de  $g$ . La coordenada  $y_s$  depende del radio del tanque y del volumen de llenado, y se determina a partir de los momentos de área.

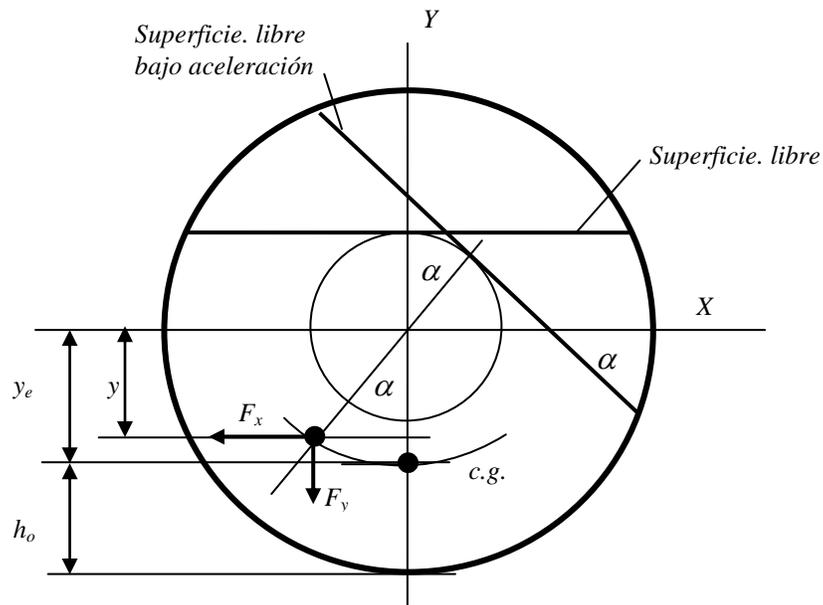


Figura 2.1. Superficie libre de un tanque cilíndrico sometido a un campo constante de aceleración lateral.

La coordenada vertical del CG de la carga también varía en la medida que posición sigue la órbita circular mostrada en la figura. La coordenada vertical instantánea y del centro de masa puede ser encontrada mediante:

$$y = y_s \cos \alpha = \frac{y_s}{\sqrt{1 + G_x^2}} \quad (2.2)$$

El momento de balanceo  $M_z$  alrededor de la base del tanque  $O$ , causado por el corrimiento de la carga dentro del tanque de radio  $R$  bajo la aplicación de la aceleración lateral constante, se expresa de la siguiente manera:

$$M_z = F_x(R - y) + F_y x \quad (2.3)$$

En donde  $F_x = mg_x$  y  $F_y = mg_y$ , son las fuerzas verticales y horizontales, respectivamente, debidas a la aceleración a la que es sometida la masa de fluido a las aceleraciones  $g_x$  y  $g_y$ . Estas ecuaciones se pueden combinar para producir una expresión para el momento de balanceo:

$$M_z = F_x R - \frac{mg_x y_s}{\sqrt{1 + G_x^2}} + \frac{mg_y G_x}{\sqrt{1 + G_x^2}} \quad (2.4)$$

De esta manera, producto de este desarrollo se cuenta con una ecuación simple para evaluar el momento que estaría siendo aplicado al vehículo tipo autotanque, producto del corrimiento de la carga y de las aceleraciones correspondientes. Un desarrollo semejante, para el caso de un recipiente elíptico, se plantea en esta tesis.

## 2.2 Métodos de prueba

Como se ha indicado, el método más empleado para medir el umbral estático de volcadura es la plataforma inclinable, como se muestra en la Fig. 2.2 (1). La Tabla 2.1 lista algunos resultados de estas mediciones, con objeto de tener una idea de los rangos de resultados esperados en este trabajo.



Figura 2.2. Ensayo en plataforma inclinable (Billing y Patten, 2005).

Tabla 2.1. Mediciones del Umbral Estático de Volcadura (1).

| Vehículo              | Carga                 | Tan $\phi$ | $\phi$ (°) |
|-----------------------|-----------------------|------------|------------|
| Tractor-Semirremolque | Nitrógeno líquido     | 0.357      | 19.6       |
| Tractor-Semirremolque | CO2 líquido           | 0.359      | 19.7       |
| Tractor-Semirremolque | Nitrógeno líquido     | 0.365      | 20.0       |
| No articulado 306     | Aceite de calefacción | 0.365      | 20.0       |
| Tractor-Semirremolque | Oxígeno líquido       | 0.367      | 20.1       |
| Tractor-Semirremolque | CO2 líquido           | 0.371      | 20.3       |
| No articulado 406     | Aceite de calefacción | 0.383      | 20.9       |
| Tractor-Semirremolque | Oxígeno líquido       | 0.385      | 21.0       |

Otros métodos de prueba incluyen perturbaciones dinámicas, que han tenido como fin el establecimiento de frecuencias naturales de oscilación (Romero et al., 2006).

### 2.3 Normatividad

Pensando en la seguridad de la población, algunos países han establecido normas que los autotranques deben cumplir. En particular, en la comunidad Europea se han emitido normas para el cálculo del umbral estático de volcadura

*(Regulation 7 No. 111 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE)).*

Esta norma Europea especifica dos posibles métodos para determinar el umbral estático de volcadura. Uno teórico y otro a través de una mesa o plataforma inclinable. Para el caso de la mesa inclinable, se especifica lo siguiente:

*“la estabilidad estática de volcadura del vehículo deberá ser tal que el punto en el cual ocurra la volcadura, no debería ser pasado al alcanzar un ángulo de la mesa de 23°, en ambas direcciones de prueba.”*

Por cuanto al método basado en el cálculo del umbral estático de volcadura, se especifica que el vehículo deberá ser tal que el punto en el cual ocurra la volcadura no pasaría para una aceleración lateral del  $4\text{m/s}^2$ . La metodología de cálculo se basa en una rigidez torsional calculada en términos de las propiedades de rigidez de las suspensiones y de las dimensiones del vehículo. Sin embargo, este método de cálculo toma en cuenta exclusivamente el estado de carga al 100 %.

## Capítulo 3 Diseño de equipo de prueba

---

Se describe el proceso seguido para el diseño y construcción del equipo de prueba, incluyendo la parte mecánica como la parte de instrumentación.

### 3.1 Necesidades

El equipo a desarrollar deberá contar con los medios para inclinar una plataforma sobre la cual se monte el recipiente elíptico por ensayar. De esta manera, se concibe un bastidor para el recipiente y otro para el conjunto todo. La plataforma inclinable deberá contar con los medios para medir las fuerzas de contacto entre las suspensiones del soporte y la plataforma inclinable. El medio para inclinar la mesa deberá ser fácil de operar, basado preferentemente en un medio hidráulico. Por otro lado, el tanque deberá de contar con los medios para recibir el fluido contenido a diferentes niveles de llenado. El fluido deberá ser agua de la llave.

Por cuanto a la instrumentación necesaria, ésta deberá de proveer los medios para alertar de la falta de contacto entre la suspensión derecha y la plataforma inclinable. Con relación al costo de todo el conjunto, éste deberá ser menor a los 5 mil pesos.

### 3.2 Módulos

Se describen los módulos en los cuales se ha subdividido el desarrollo de este trabajo. La Figura 3.1 ilustra esto módulos y sus posibles interacciones. El Módulo de mesa inclinable (MI) cuenta con un instrumentación, asociada a la determinación de las cargas a cada uno de los soportes y la potencial volcadura del tanque suspendido. El módulo tanque (MT) constituye el conjunto de tanque y la suspensión necesaria, incluyendo el sensor para detectar el punto de volcadura. El módulo de accionamiento (MA) representa un sistema mecánico para darle

inclinación al soporte de la mesa inclinable. El conjunto completo se encuentra soportado por un módulo marco general (MG), el cual deberá tener la suficiente rigidez como para no interferir en las mediciones hechas con la mesa inclinable. Se cuenta asimismo con un sistema de adquisición de datos (SAD), que comprende tanto el sensado de la deformación en los soportes de la mesa inclinable, como el sensor de advertencia por volcadura.

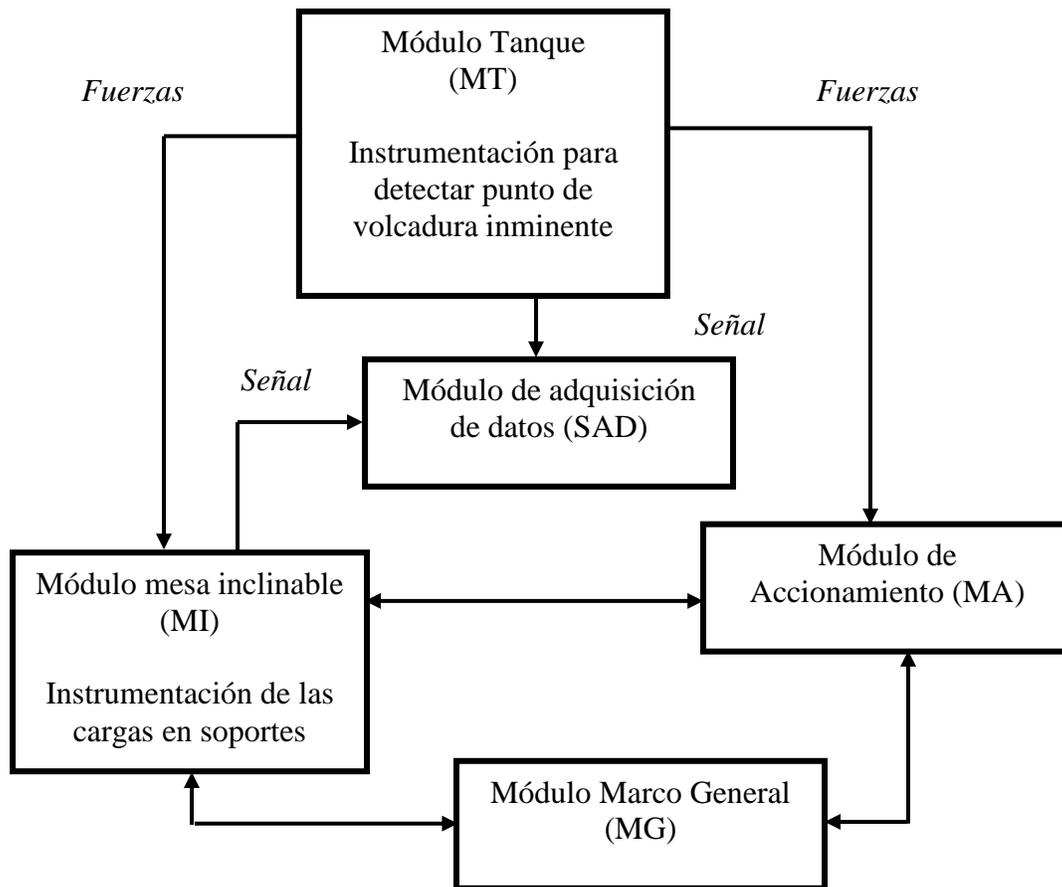


Figura 3.1. Módulos que componen el modelo experimental.

### 3.3 Principios de operación.

Para cada uno de los módulos definidos en el apartado anterior se definen ahora sus principios de operación. Un principio de fabricación común consistió en la utilización en la medida de lo posible, de componentes comerciales.

Para el Módulo Tanque (MT), éste deberá construirse a partir de elementos metálicos con la suficiente rigidez como para no interferir de manera apreciable con las mediciones del umbral de volcadura. En este caso, se cuenta con un tanque hecho de lámina galvanizada y acrílico transparente. De esta manera, se considera necesario definir los principios de operación para el marco soporte y para un sistema auxiliar que proporcione cierta estabilidad lateral a este equipo. Este módulo contará con dos tipos de soportes para efectuar las pruebas: uno rígido y otro flexible. El ensaye conjunto de estos dos tipos de soportes, uno suspendido y otro no suspendido, permitirá analizar el efecto de la suspensión de los vehículos sobre el umbral estático de volcadura.

Por cuanto al Módulo MI, de mesa inclinable, éste deberá ser hecho de material rígido y resistente, por lo que se considera fabricarlo de acero sólido. Este equipo se acoplará tanto al módulo de soporte como al módulo de accionamiento. De esta manera, el equipo deberá contar con un pivote hecho de un rodamiento, ya sea liso o de rodadura. Asimismo, este módulo deberá contar con un eje para la articulación del sistema de accionamiento.

El Módulo de Adquisición de Datos para la medición de las fuerzas a ambos lados de los soportes del módulo tanque, deberá basarse en un sistema LabVIEW existente, para el manejo de galgas extensométricas. Por otro lado, por cuanto a la instrumentación para la detección del punto de volcadura inminente, se desarrollará un sistema propio para la adquisición y acondicionamiento de señales, estando basado de cualquier manera, en la detección de las variaciones de resistencia en una galga extensométrica. Esta galga se instalará en un elemento cuya deformación permita detectar el punto de volcadura inminente. Esto es, el sistema se calibrará de tal suerte que mida una deformación dada baja en el componente sensor.

El módulo de accionamiento se considera apropiado que trabaje mediante un sistema hidráulico, como se describirá más adelante en el párrafo 3.5.

El módulo de Módulo Marco general deberá darle estabilidad al conjunto que soporta. Considerando ahorro por cuanto al peso del conjunto, sin embargo, se considera la posibilidad de construir todo el marco de material tubular. Asimismo, el módulo estará soportado sobre ruedas, con objeto de desplazar con facilidad al conjunto, dado el caso de tenerlo que instalar en los diferentes espacios disponibles para estas pruebas.

### 3.4 Instrumentación

El módulo de adquisición de datos para la detección de la volcadura inminente se basó en un sistema de circuitos integrados, siendo el propósito general el visualizar de forma clara el punto de volcadura del tanque a distintos niveles de llenado, mediante el uso de amplificadores operacionales y compuertas lógicas.

Se describe ahora un amplificador operacional (op amp's), su funcionamiento y su configuración (Alexander y Sadiku). Un amplificador operacional es un elemento de un circuito activo para realizar operaciones matemáticas, como la adición, sustracción, multiplicación, división, diferenciación e integración, que comprende un arreglo complejo de resistores, transistores, capacitores y diodos.

Los op amp's están comercialmente disponibles en circuitos integrados encapsulados de diversas formas. La Figura 3.2 ilustra el arreglo de un LM-741, el cual posee 8 pines, tal como lo muestra la figura, donde la terminal o pin 8 no se usa, las terminales 1 y 5 de igual forma tampoco se conectan y las 5 terminales más importantes son: entrada inversora, pin 2; entrada no inversora, pin 3; Salida, pin 6; Fuente de alimentación positiva  $V^+$ , pin 7; y Fuente de alimentación negativa  $V^-$ , pin 4. La Figura 3.3 ilustra el símbolo de este dispositivo.

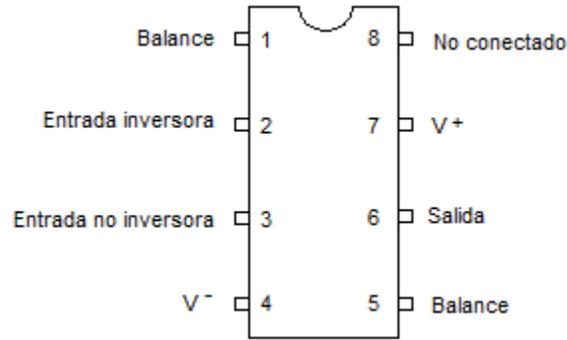


Figura 3.2. Típico amplificador operacional: configuración de pines.

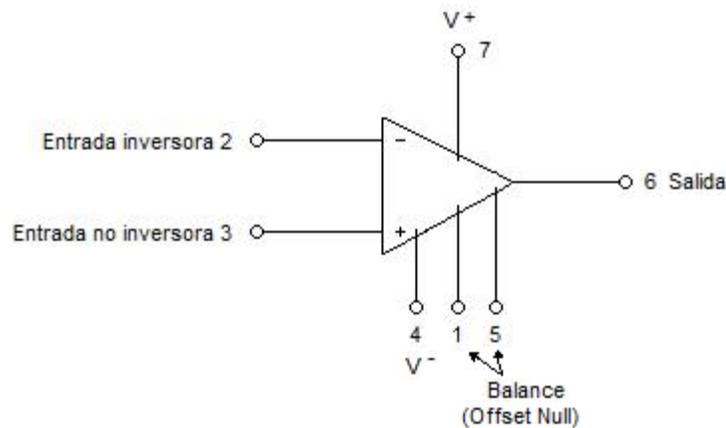


Figura 3.3. Típico amplificador operacional: símbolo del circuito.

Otro componente seleccionado en los principios de operación para el sistema de sensado de la volcadura inminente del tanque ensayado, consiste del circuito integrado 74LS04, el cual es el medio por el cual se puede convertir una señal de voltaje baja a una señal de voltaje alta y viceversa. La Fig. 3.4 ilustra el arreglo de pines de este circuito seleccionado, en particular se muestra la configuración interna de la compuerta lógica. De esta figura se observa lo siguiente: A1, A2, A3, A4, A5 y A6 son las entradas lógicas de voltaje, correspondientes a los pines 1, 3, 5, 9, 11 y 13; Y1, Y2, Y3, Y4, Y5 y Y6 son las salidas lógicas de voltaje, correspondientes a los pines 2, 8, 4, 6, 10 y 12; el pin 7 se conecta a tierra; el pin 14 se conecta al voltaje de alimentación en corriente directa. Por otro lado, la Tabla 3.1 lista las propiedades de este circuito por cuanto al voltaje de alimentación y niveles de entrada.

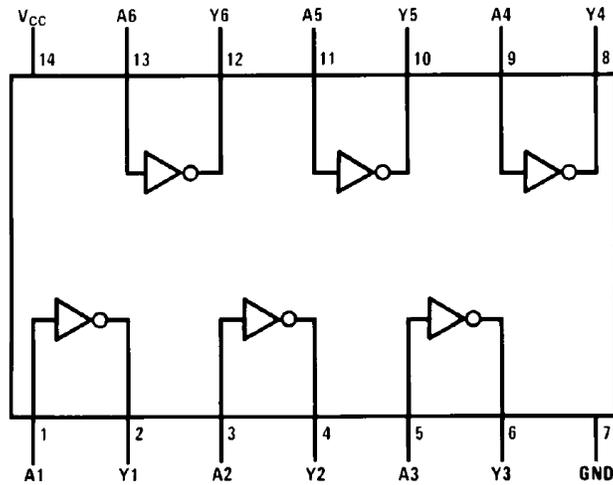


Figura 3.4. Configuración interna del CI 74LS04.

Tabla 3.1. Datos generales del circuito CI 74LS04.

| Parámetro                        | Mínimo | Nominal | Máximo |
|----------------------------------|--------|---------|--------|
| Voltaje de alimentación          | 4.75 V | 5 V     | 5.25 V |
| Nivel alto de entrada de voltaje | 2 V    |         |        |
| Nivel bajo de entrada de voltaje |        |         | 0.8 V  |

El funcionamiento en general de este CI 74LS04 se expresa por la Tabla de verdad 3.2, la cual indica que a una cero lógico como entrada corresponde una salida de un 1 lógico, es decir es un circuito negador, donde  $Y = \overline{A}$

Tabla 3.2. Tabla de verdad CI 74LS04.

| Entrada | Salida |
|---------|--------|
| A       | Y      |
| L       | H      |
| H       | L      |

Por cuanto al elemento sensor de la volcadura inminente, en la perspectiva de sensar la variación de resistencia de una galga extensométrica, se optó por un arreglo de componentes electrónicos que efectuaron básicamente la comparación de dos voltajes, un voltaje de referencia fijo y otro variable, en este caso el voltaje variable corresponde al proveniente de la galga. Al existir una deformación la galga varía su resistencia, traduciéndose dicha variación resistencia en una variación de voltaje del orden de mili volts. Las dos señales de voltaje, una variable y otra fija, se conectan en primera instancia a un circuito integrado denominado LM-741, el cual compara los dos voltajes de entrada (voltaje de la galga y voltaje fijo) y la diferencia entre estos dos voltajes la amplifica 10 veces mediante un arreglo de resistencias. Teniendo ahora un voltaje de salida amplificado 10 veces, es necesario amplificarlo de nueva cuenta otras 10 veces más, para ello se vuelve a hacer uso de otro circuito integrado LM-741.

Con un voltaje de salida ya no en mili volts, sino en volts, este voltaje entra a una compuerta negadora, comercialmente conocida 74LS04, en la cual en una de sus salidas se le coloca un *led* rojo. Tomando ahora esta salida como entrada a otra compuerta negadora obtenemos nuevamente una salida a la cual se le coloca un *led* verde. Ello permitirá anunciar con claridad el momento de la volcadura.

Al respecto, los circuitos integrados 74LS04 convierten un cero lógico en su entrada con un valor mínimo de 0.8 Volts a una salida de un 1 lógico (NS,2009). Para esta aplicación, cuando no está deformada la galga se tiene que la entrada al 74LS04 es de 0.8 Volts, y la salida que se tiene es un uno lógico, a la cual se le asigna un *led* en color rojo, indicando así que el autotanke está volcado. Por otro lado, cuando la galga se deforma, aumenta el voltaje por arriba de los 0.8 Volts, por lo que el circuito integrado lo considerara como un 1 lógico y originará que a la salida nos otorgue un cero lógico, con lo que se apagará el *led* que se mantenía encendido en color rojo. Esta señal se toma ahora como entrada para otro circuito 74LS04 que hará la misma función, con el cero lógico en su entrada, expresará una salida de un 1 lógico e instantáneamente se encenderá el *led* en color verde indicando que el autotanke aún no está en posición de volcadura inminente.

El diseño de detalle descrito del arreglo electrónico desarrollado, contiene por lo tanto los siguientes elementos:

- 1 Tabla Fenólica.
- 2 circuitos integrados LM-741.
- 2 circuitos integrados 74LS04.
- Resistencias de  $1\text{ K}\Omega$ .
- Resistencias de  $1\text{ K}\Omega$ .
- 2 Fuentes digitales de corriente directa.
- 1 Galga Extensométrica.
- 1 Potenciómetro.
- 2 Diodos Emisores de Luz (*Led's*).
- 3 Clemas.

La Figura 3.5 ilustra el diagrama resultante del circuito desarrollado para sensor el punto de volcadura inminente del tanque.

### 3.5 Sistema de accionamiento

Como se ha descrito en el apartado 3.1, el sistema para modificar la inclinación de la mesa inclinable se pensó estuviera basada en un sistema hidráulico. El diseño de detalle de este accionamiento comprendió el posicionamiento del mismo en el marco principal, en el contexto de la inclinación máxima deseada para la mesa. Para ello se consideró la carrera disponible en el cilindro existente, para mediante ello definir el punto de pivoteo en la base, y de articulación con la mesa inclinable.

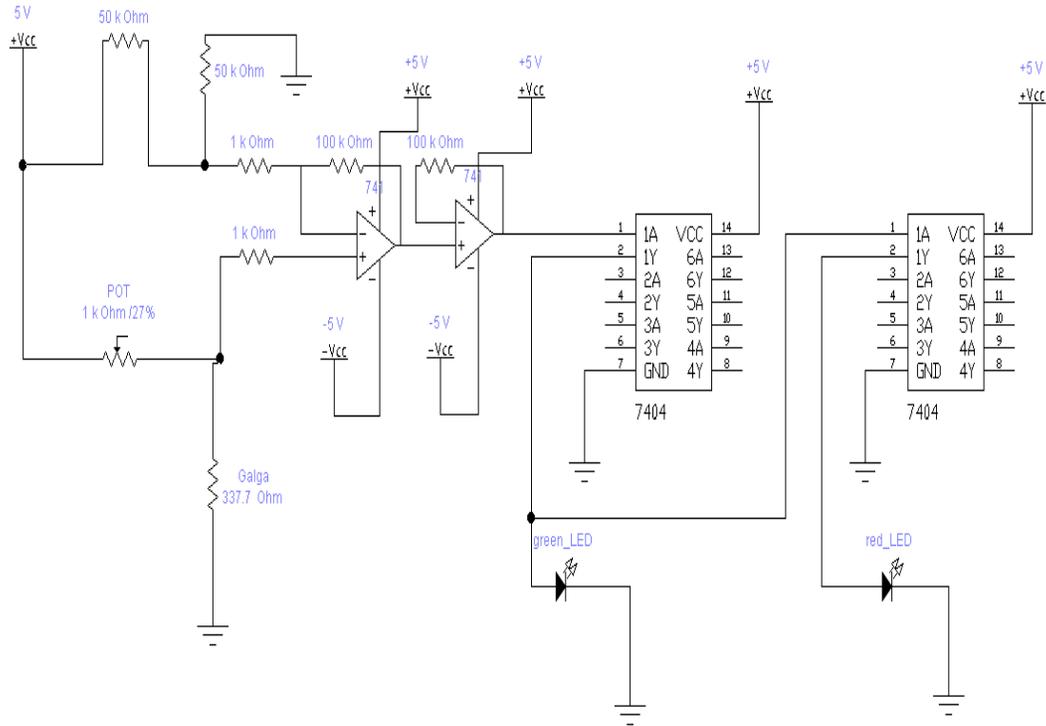


Figura 3.5. Diagrama de conexión del circuito desarrollado para sensar el punto de volcadura inminente.

### 3.6 Descripción y pruebas preliminares

La Figura 3.6 ilustra el arreglo general del equipo de ensayo, consistente de una estructura metálica tubular (hecha de PTR de 25.4 mm de calibre 14), la cual soporta la plataforma inclinable sobre la cual descansa el recipiente ensayado. Como se puede observar en esta imagen, una bomba hidráulica manual fue empleada para proveer la inclinación a la plataforma. En esta imagen se muestra el sistema de adquisición de datos para medir las fuerzas en los soportes del tanque suspendido, el cual se basó en LabVIEW.

Cuatro soportes dan el apoyo al recipiente en la plataforma o mesa inclinable. Tales soportes traducen las fuerzas de apoyo a través de medidores de deformación (*strain gages*) instalados en estas vigas en voladizo, como se muestra en la Figura 3.7.

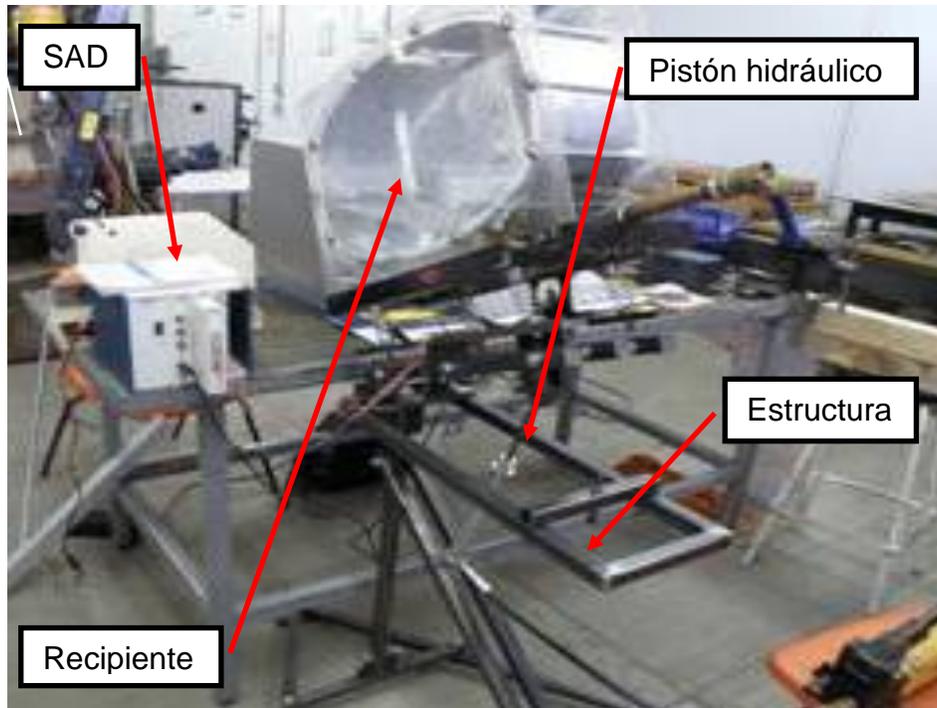


Figura 3.6. Imagen del dispositivo de prueba.

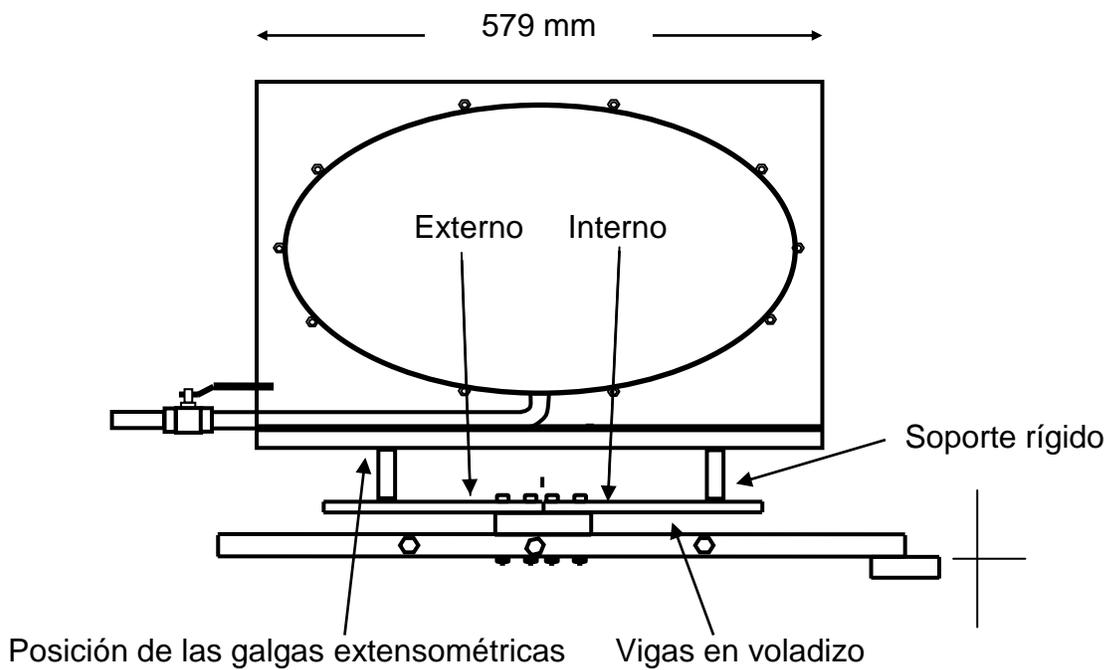


Figura 3.7. Representación esquemática del tanque de prueba

La Tabla 3.3 muestra las propiedades de los componentes principales del equipo de prueba. Se incluyen las propiedades del tanque y de los transductores de la viga en voladizo, así como el sistema de adquisición de datos.

Tabla 3.3. Propiedades de los elementos del módulo Tanque y del sistema LABview de adquisición de datos.

| <b>Parte</b>      | <b>Material</b>  |
|-------------------|--|
| Tanque            | Tapas de acrílico con cuerpo de lámina galvanizada;<br>Masa en vacío: 10.770 kg;<br>Capacidad: 25575 cc;<br>Espesor tapas: 5 mm.       |
| Vigas en voladizo | Acero 1018<br>4 piezas<br>Ancho: 38 mm; Grosor: 12.7 mm; Largo 259 mm<br>Tornillos de sujeción: 2 pernos por cada viga, de 7.9 mm dia. |
| SAD               | NI SCX-1600 // SCXI-1520   |
| Estructura        | PTR 25.4 mm.   |

Por otra parte se elaboraron planos de fabricación del banco de pruebas, dichos planos fueron realizados en el programa de diseño Unigraphics. Cada parte fue ensamblada una a una, realizada en hojas independientes y así llegar hasta el ensamble general del banco de pruebas. Las imágenes de las Figuras 3.8 a 3.9 ilustran el arreglo general del dispositivo de pruebas desarrollado. En el apéndice se incluyen los planos de fabricación básicos considerados en la manufactura.

En la Fig. 3.10 se puede observar el arreglo en Delta de la base. Ello se realizó para dar estabilidad lateral al conjunto.

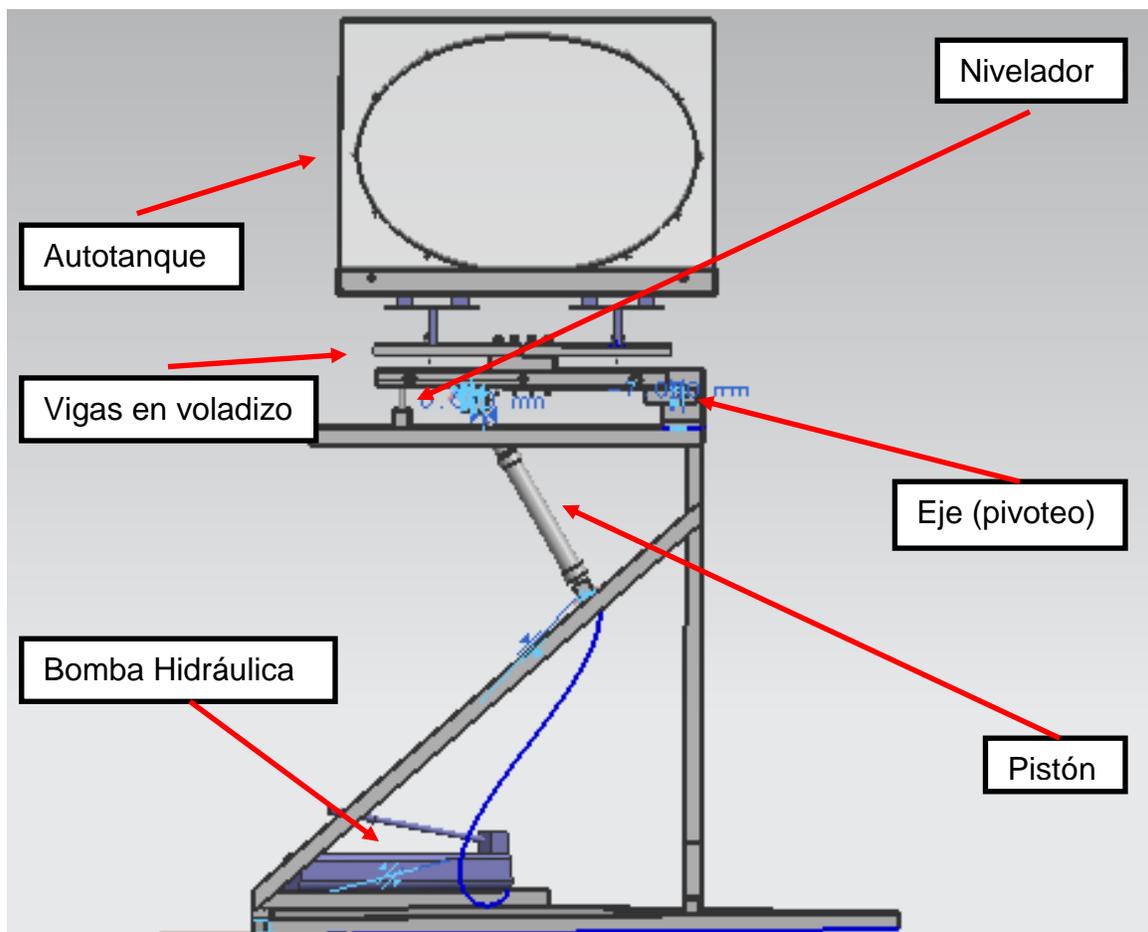


Figura 3.8. Vista lateral del banco de pruebas.

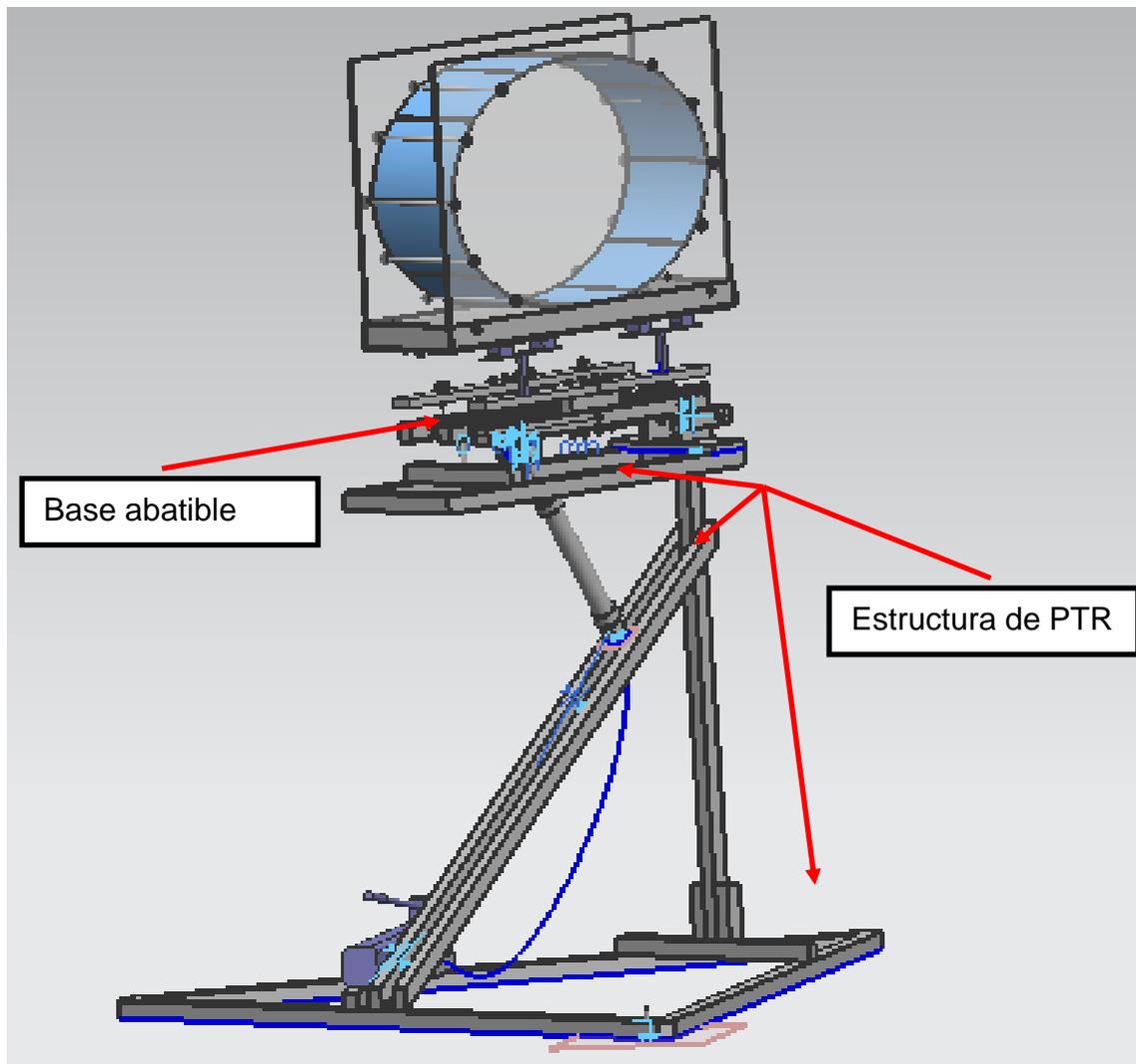


Figura 3.9. Vista isométrica del banco de pruebas.

Algunas pruebas preliminares fueron desarrolladas con objeto de validar los principios de operación propuestos. Las imágenes fotográficas de las figuras 3.11 a 3.12 ilustran la etapa de pruebas preliminares, en las instalaciones del Taller de la FI-SJR, en las cuales se empleó exclusivamente el sistema de adquisición de datos LABview. Como instrumento complementario en el desarrollo de las pruebas se empleó un goniómetro o transportador, con una resolución de 2 grados.

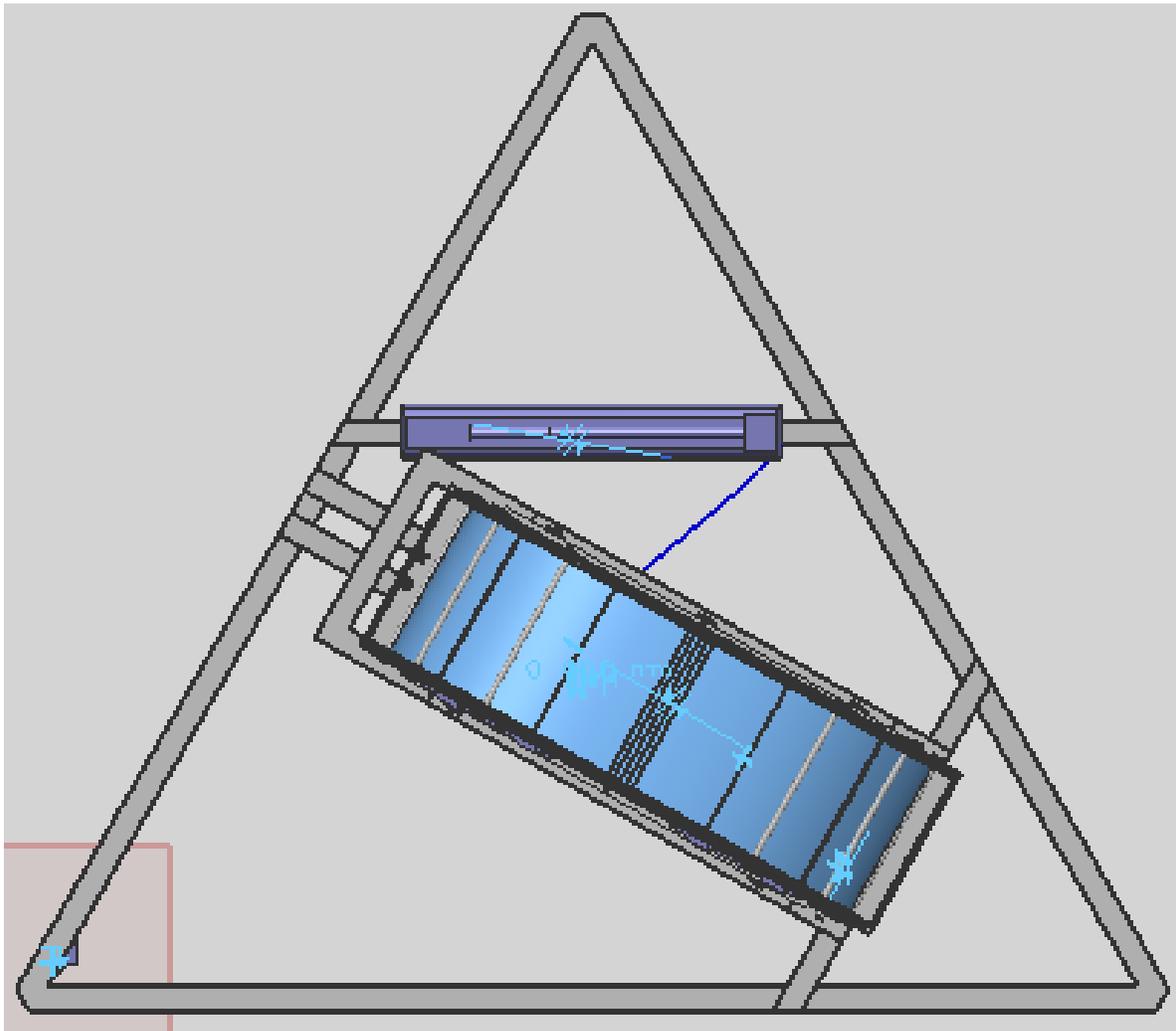


Figura 3.10. Vista superior del banco de pruebas.

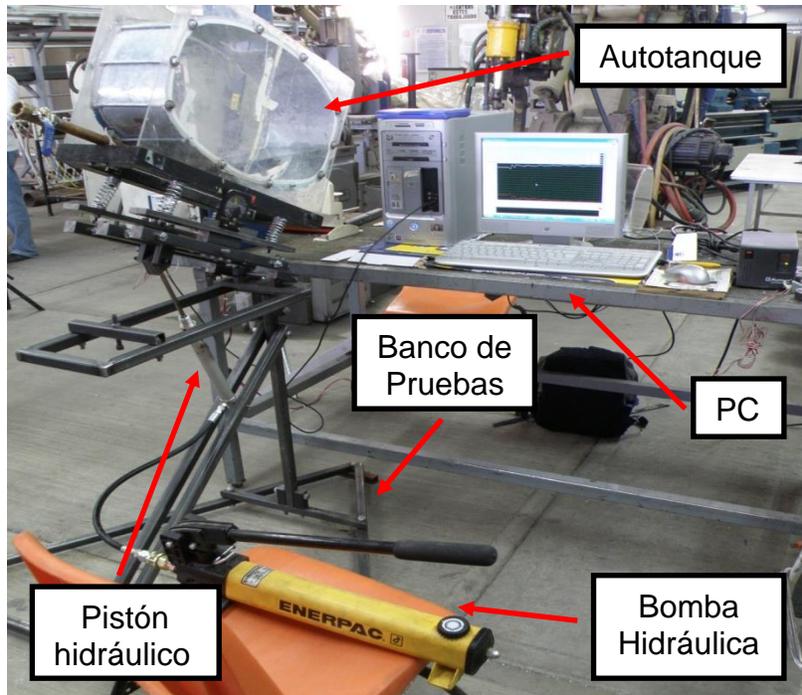


Figura 3.11. Arreglo general vista 1, pruebas preliminares.

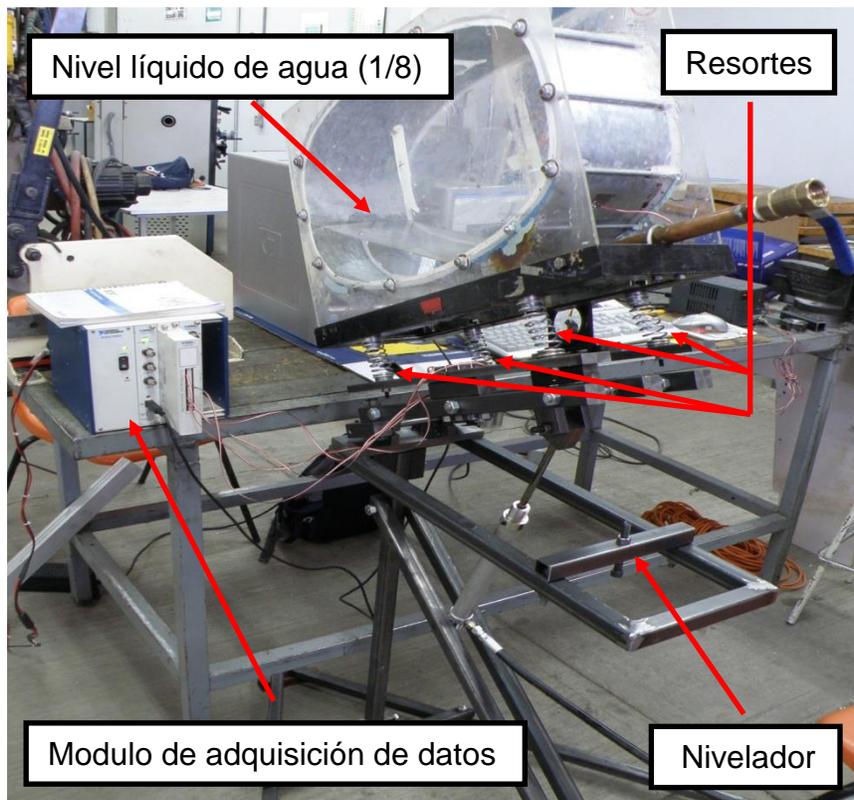


Figura 3.12. Arreglo general vista 2, pruebas preliminares.

## Capítulo 4 Modelado teórico

---

Se presenta la formulación de un modelo matemático para predecir el umbral estático de volcadura, con base al nivel de llenado y a las características geométricas del tanque elíptico (excentricidad). Se tienen una formulación para el tanque soportado de manera rígida y la correspondiente para el tanque suspendido.

### 4.1 Formulación

La formulación se basa de alguna manera en lo descrito en la parte de revisión de literatura, para el momento derivado del corrimiento del centro de masa del fluido contenido de manera parcial en un recipiente. Se presenta inicialmente la formulación para el recipiente cargado al 50%.

La Figura 4.1 muestra un tanque elíptico, llenado al 50 %, al estar sometido a una aceleración lateral (Romero et al., 2007). La pendiente  $\alpha$  representa la aceleración lateral en estado permanente, expresada en términos de la aceleración de la gravedad. El que el centro de gravedad de la carga describa una trayectoria elíptica, paralela al contorno del tanque, ha sido comprobada anteriormente (Romero et al., 2007; Goru, 2007).

Para el nivel de llenado mostrado en la figura, una vez que el centro de gravedad para  $\alpha = 0$  ha sido determinado ( $a_c = 1.333(a_t / \pi)$ ), se puede trazar una elipse con el mismo cociente de  $a_t / b_t$ . Las coordenadas  $x_c$  y  $y_c$  para el centro de gravedad se expresan por:

$$\begin{aligned}x_c &= b_c \cos(\beta) \\y_c &= a_c \sin(\beta)\end{aligned}\tag{4.1}$$

de tal suerte que:

$$\frac{dy_c}{dx_c} = \alpha \quad (4.2)$$

efectuando esta derivada, se tiene:

$$\frac{dy_c}{dx_c} = \frac{d(y_c)/d\beta}{d(x_c)/d\beta} = \frac{a_c \cos(\beta)}{-b_c \sin(\beta)} = -\left(\frac{a_c}{b_c}\right) \left(\frac{1}{\tan(\beta)}\right) = \alpha \quad (4.3)$$

donde:

$$\left(\frac{a_t}{b_t}\right) = \left(\frac{a_c}{b_c}\right) = r \quad (4.4)$$

finalmente:

$$-r \left(\frac{1}{\tan(\beta)}\right) = \alpha \quad (4.5)$$

De esta forma se ha obtenido una relación entre el ángulo de la superficie libre del fluido y el ángulo  $\beta$ , lo cual permitirá determinar la posición del centro de gravedad  $x_c$  y  $y_c$ . Ahora se aplicará esta formulación para determinar el inicio de la volcadura de un tanque parcialmente lleno inclinado. La Figura 4.2 ilustra un tanque soportado rígidamente, cargado al 50% sobre una plataforma a un ángulo  $\alpha$ . Diferentes propiedades geométricas se pueden observar en esta figura, incluyendo la altura de la superficie libre ( $\hat{h}_m$ ), la altura del centro de gravedad de la carga ( $\hat{h}_c$ ), y la altura del centro de gravedad del tanque ( $\hat{h}_t$ ).

La expresión para la fuerza en el lado externo, que eventualmente se hará cero al iniciarse la volcadura, está dada por:

$$F_{N,I} = \frac{w_c \cos \alpha (\ell - x_c) + w_t \cos \alpha \ell - w_c \sin \alpha \hat{h}_c - w_t \sin \alpha \hat{h}_t}{(2\ell)} \quad (4.6)$$

La fuerza  $F_{N,I}$  se igualará a cero y se resolverá para el ángulo  $\alpha$ .

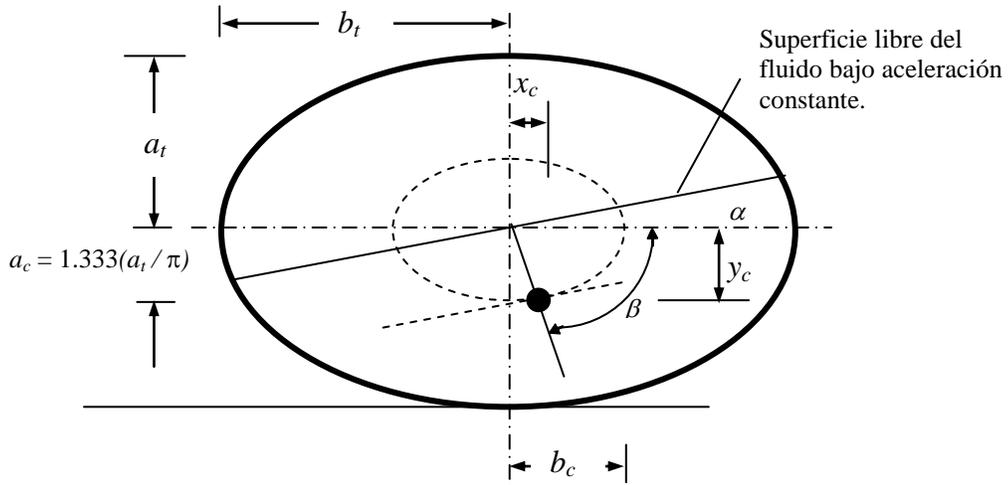


Figura 4.1. Superficie libre de un tanque elíptico sometido a un campo constante de aceleración lateral.

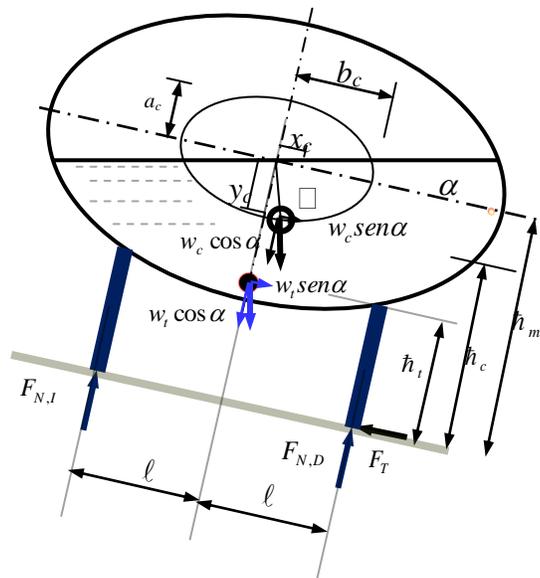


Figura 4.2. Fuerzas de inercia en un recipiente elíptico sobre una mesa inclinable, cargado al 50%.

La Figura 4.3 muestra la situación para un tanque cargado a más del 50%, en donde las ecuaciones derivadas para el caso del 50%, serían aplicables. En este caso, la hipótesis continúa siendo que el centro de gravedad describe una elipse inscrita.

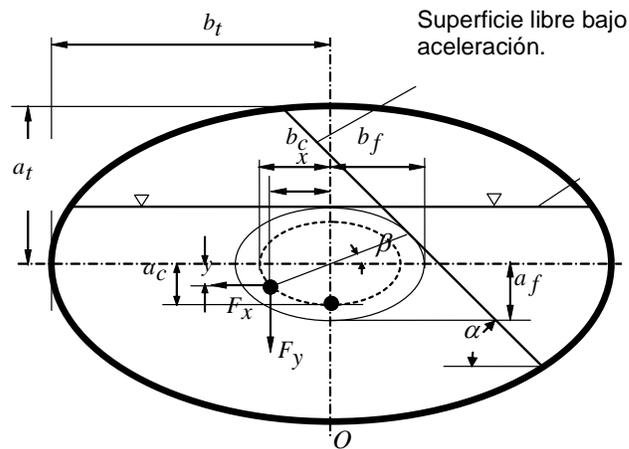


Figura 4.3. Diagrama de fuerzas de inercia para un tanque cargado por arriba del 50%.

Se analizará ahora la situación para cuando el tanque está suspendido en resortes tipo muelle. En la Figura 4.4 ilustra las dos situaciones para el cálculo del ángulo para el cual la fuerza en el lado exterior del soporte, se haría cero. La parte superior de esta figura ilustra al tanque soportado de manera rígida, mientras que la parte inferior ilustra al tanque desplazado de acuerdo con la rigidez de los resortes. Se puede observar en esta figura que los centros de masa del tanque y del líquido, se desplazan hacia abajo y hacia la derecha, en función del ángulo  $\Delta\alpha$ .

El ángulo  $\Delta\alpha$  se calculará de acuerdo a una rigidez torsional equivalente ( $K_{TA}$ ) para el sistema de cuerpo rígido soportado por resortes, como se muestra en la Figura 4.5. Para este diagrama, la relación entre el par aplicado y la deformación angular  $\Delta\alpha$ , está dada como sigue,

$$M = F\ell + F\ell = 2F\ell \tag{4.7}$$

En donde  $F$  es la fuerza en cada soporte, de los cuatro en total (2 anteriores y otros 2 posteriores). Pero, considerando ángulos pequeños  $\Delta\alpha$

$$F = k_L \delta = k_L \ell \Delta \alpha$$

(4.8)

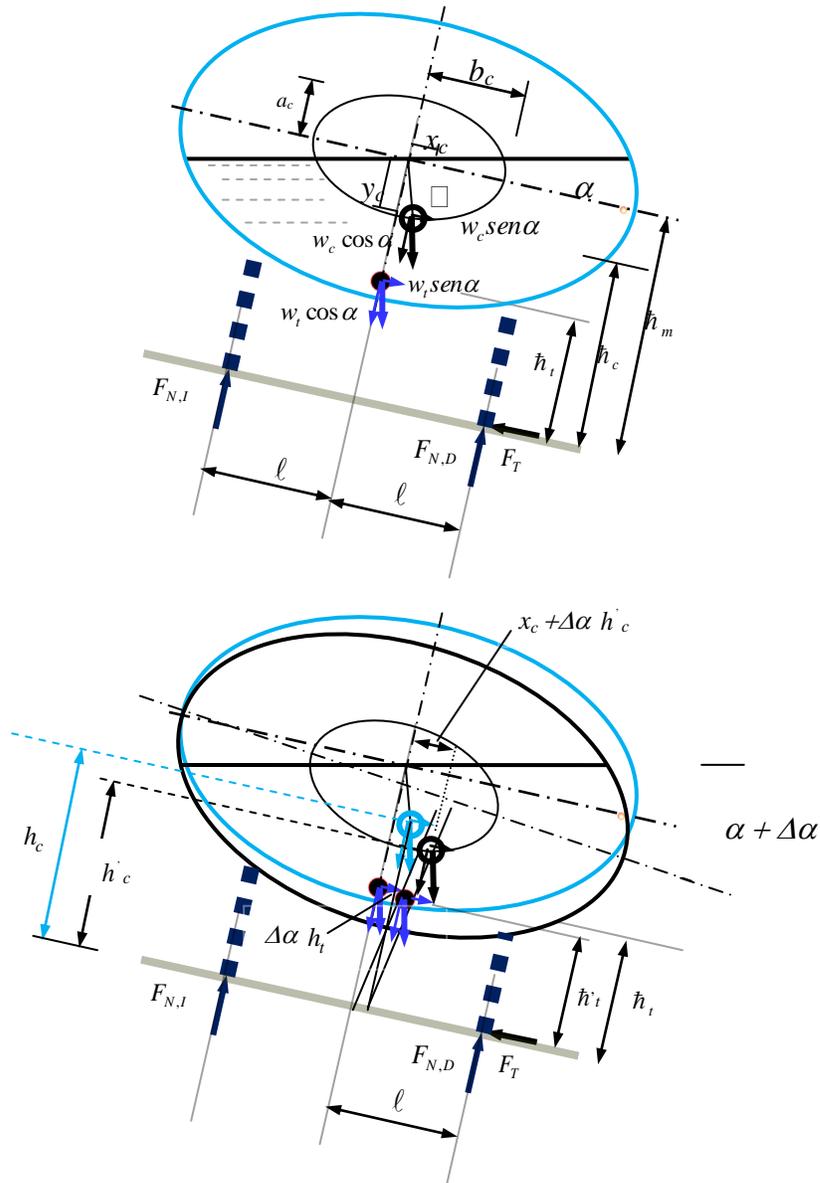


Figura 4.4 Diagrama de fuerzas del tanque sobre soportes flexibles.

Por lo tanto:

$$\frac{M}{\Delta \alpha} = K_{TA} = k_L \delta = 4k_L \ell \Delta \alpha(\ell) = 4k_L \ell^2$$

(4.9)

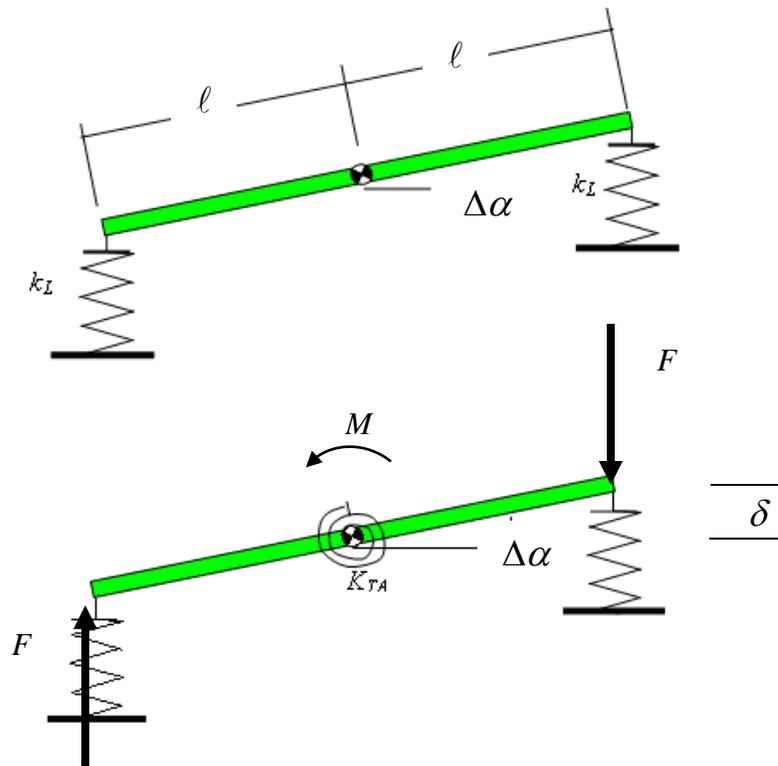


Figura 4.5 Diagrama de fuerzas para determinar la rigidez torsional.

De esta forma, una vez “soltado” al tanque sobre los soportes flexibles, se pueden calcular los corrimientos de los centros de masa tanto del tanque como de la carga ( $\Delta\alpha h_t$  y  $x_c + \Delta\alpha h'_c$  respectivamente). Por cuanto al desplazamiento normal del tanque ( $\dot{h}_t - \dot{h}'_t$ ) como de la carga ( $h_c - \dot{h}'_c$ ), éstos son función del ángulo de inclinación, de las constantes de rigidez de los resortes, y de las componentes normales del peso de ambos cuerpos:

$$\dot{h}_t - \dot{h}'_t = W_t \cos(\alpha + \Delta\alpha) / 4 k_L \quad (4.10)$$

$$h_c - \dot{h}'_c = W_c \cos(\alpha + \Delta\alpha) / 4 k_L \quad (4.11)$$

Estas deflexiones se suman correspondientemente para cada elemento de masa.

## 4.2 Prueba del modelo

Se describe una situación detectada durante las pruebas preliminares. Originalmente se emplearon resortes helicoidales en el caso del tanque soportado sobre soportes flexibles. Sin embargo, la falta de rigidez lateral de estos tipos de resortes, provocó un corrimiento lateral exagerado del tanque, del orden de decenas de milímetros, como es posible observar en la fotografía de la Figura 4.6. Para evitar este corrimiento irrealista del tanque se optó por tomar dos acciones: por un lado se instaló un brazo estabilizador, para limitar de manera efectiva el corrimiento lateral. Este dispositivo se muestra de maneras esquemática en la Figura 4.7, y consiste de un brazo que se articula por un lado a uno de los soportes, y por el otro a la parte inferior del tanque. Con objeto de disminuir el efecto de la masa del brazo sobre la estabilidad del tanque, éste dispositivo se construyó de aluminio, con un peso menor a los 200 gr.



Figura 4.6. Ilustración del corrimiento lateral asociado al uso de resortes helicoidales.

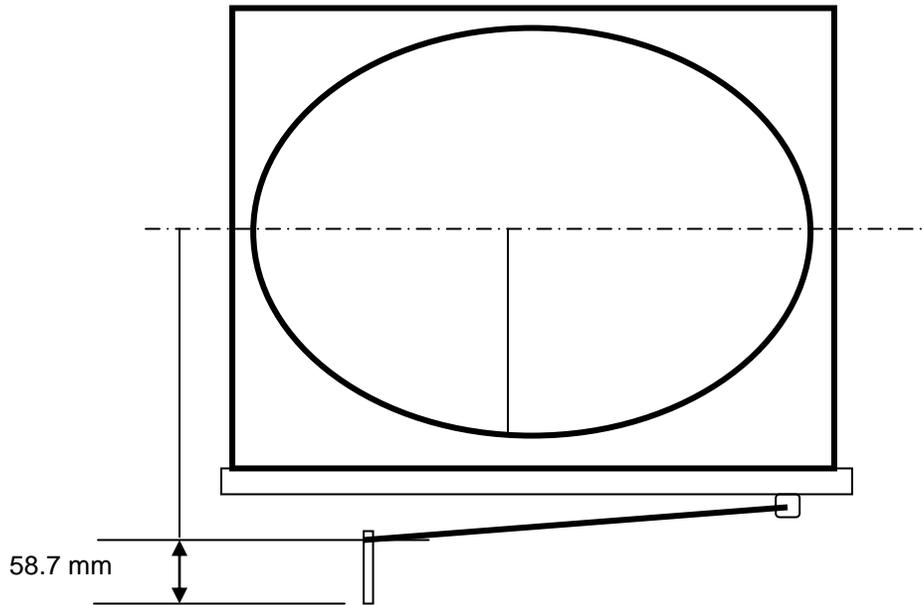


Figura 4.7. Brazo adicional para evitar el corrimiento lateral del tanque soportado.

Este brazo para impedir el corrimiento lateral del tanque, sin embargo, alteraría las alturas para el cálculo de los momentos de volcadura tanto de la masa del tanque como de la carga, en función a la altura del pivote (59.7 mm). De esta forma, las alturas iniciales  $h_c$  y  $h_t$  fueron reducidas en esta cantidad.

Por otro lado, como segunda opción para mejorar el comportamiento general del dispositivo, se optó por sustituir los resortes helicoidales por muelles. Esto representó la ventaja adicional de poder modificar la rigidez del resorte al colocar más o menos soleras para muelles.

La Figura 4.8 muestra los detalles por cuanto al tanque suspendido.

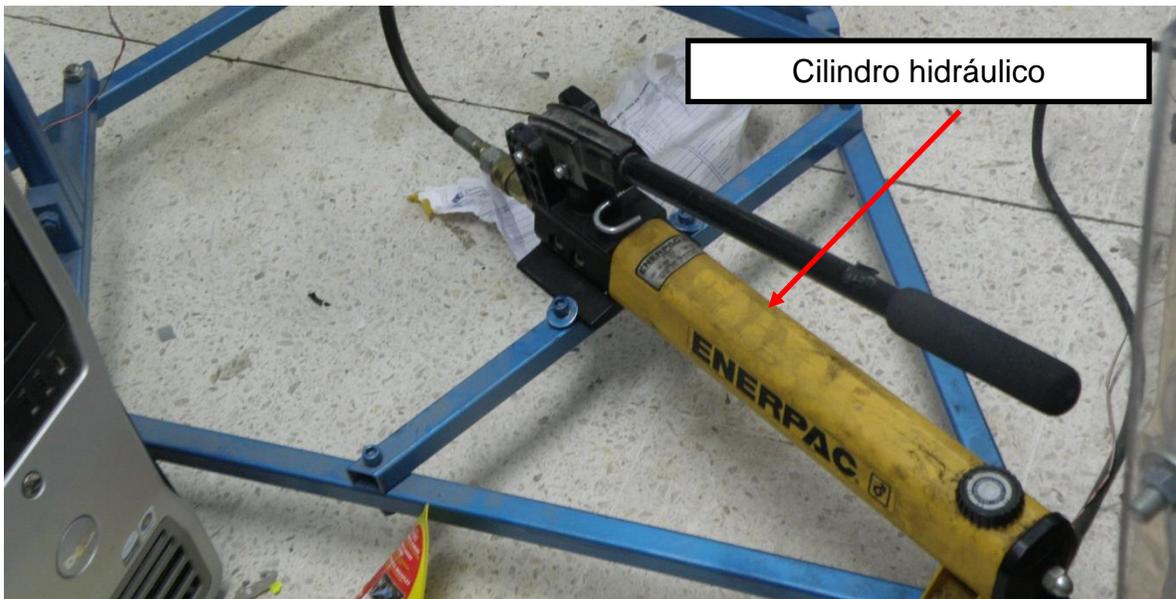
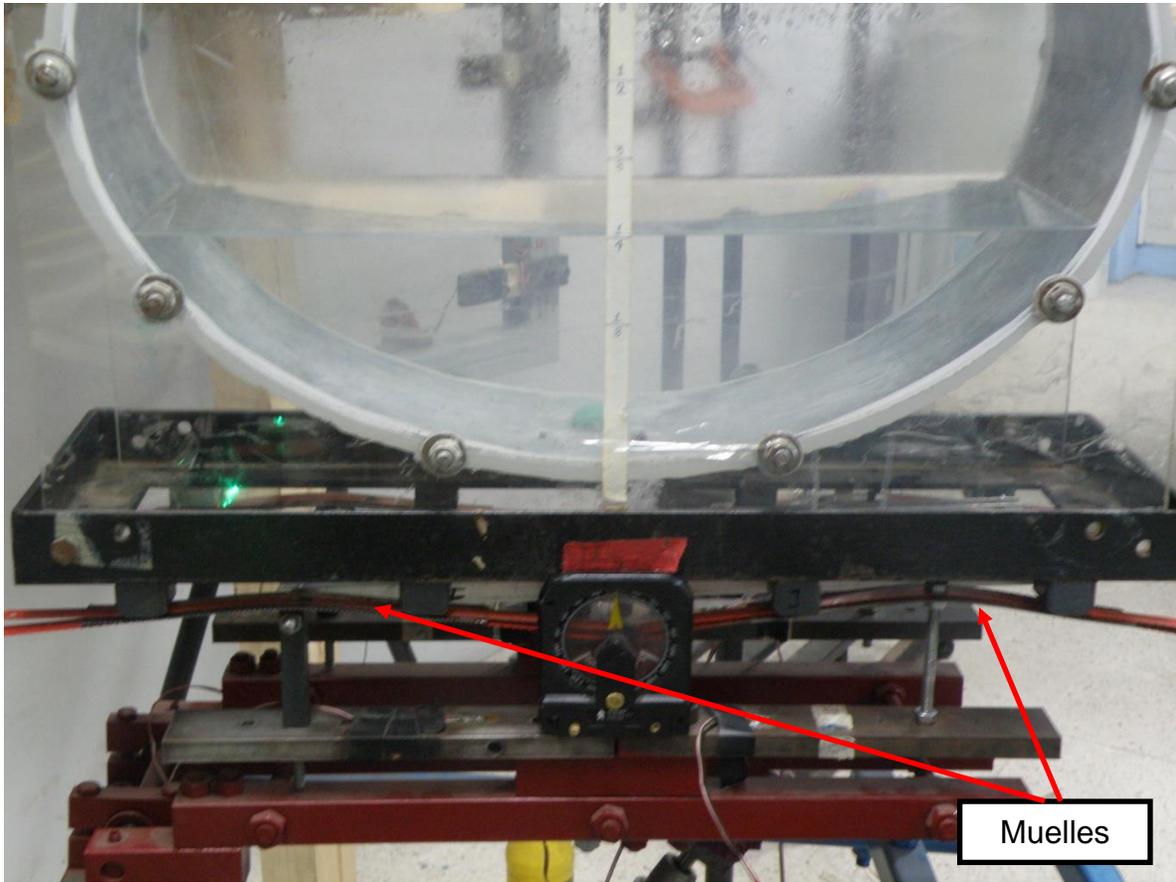


Figura 4.8. Arreglo general del dispositivo de prueba.

## Capítulo 5 Pruebas y discusiones

---

Se describe ahora el desarrollo de las pruebas, incluyendo los resultados obtenidos para las dos condiciones de prueba: soporte rígido y soporte flexible. Los resultados experimentales se comparan con aquellos del modelo desarrollado.

### 5.1 Diseño de pruebas

El diseño experimental consistió de dos factores y diferentes niveles. Los factores estuvieron representados por la condición de prueba (soporte rígido y soporte flexible), y diferentes niveles físicos de llenado (bajo medio y alto). Estos niveles se tomaron como 25 (1/4), 50 (1/2) y 88 % (7/8). Cada condición de prueba quedó representada entonces por el nivel de llenado y el tipo de soporte. Cada una de estas condiciones de prueba se repitió en al menos tres ocasiones, obteniendo un promedio de las mismas como valor significativo de la condición ensayada. La serie de pruebas se dividió en dos grupos: por un lado se ensayaron las condiciones para validar el modelo teórico propuesto; por otro lado, se efectuaron pruebas específicas para comprobar la operación del sensor desarrollado para detectar el punto de volcadura inminente.

El procedimiento consistió en nivelar el conjunto y la colocación del goniómetro para medir el ángulo de inclinación de la mesa inclinable. El ángulo de inclinación se fue modificando mediante “bombazos” dados al cilindro hidráulico. La variación en la altura mediante este accionamiento permitió una continua variación del ángulo de inclinación, a pesar de ser un accionamiento manual.

Una precaución importante fue la nivelación del tanque en la posición horizontal, tanto lateral como longitudinalmente.

Inicialmente se empleó una instrumentación basada en LabVIEW, consistente de cuatro galgas, una por cada viga en voladizo. A manera de ejemplo

del tipo de señales obtenidas mediante este equipo, la Figura 5.1 muestra la variación en las fuerzas a ambos costados del dispositivo, variando de acuerdo a un transitorio en el que se partió de una posición cercana a la volcadura, y el tanque es retornado a su posición horizontal. Se puede observar una vibración residual en la señal, que eventualmente se amortigua en ambos sensores de deformación. La pequeña diferencia al final entre ambas señales, se atribuye a una ligera falta de horizontalidad en el caso de la corrida específica de esta figura.

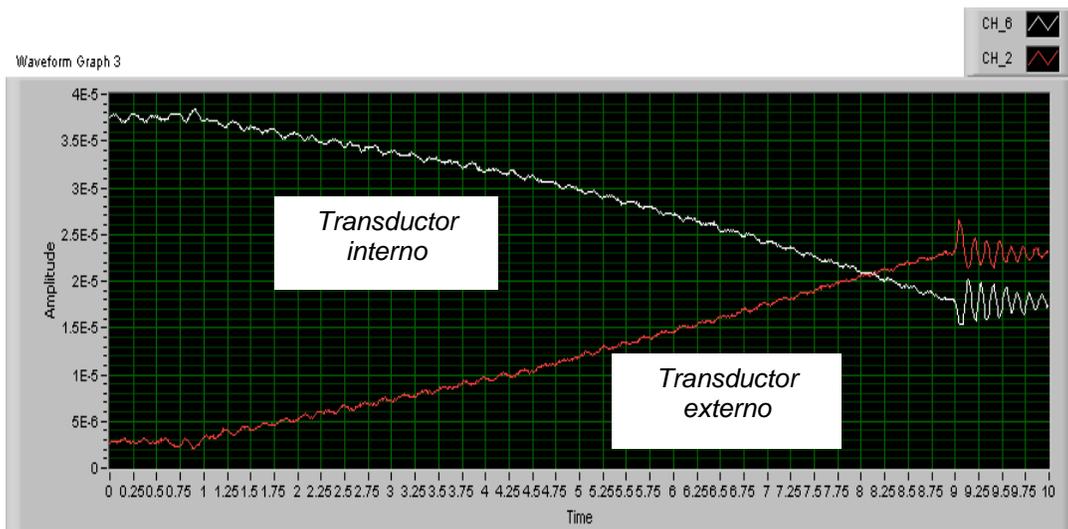


Figura 5.1. Transitorio durante el reposicionamiento horizontal desde un ángulo de 30°.

## 5.2 Soporte rígido

Este conjunto primero de pruebas tuvo como finalidad estudiar inicialmente la formulación para la situación más simple posible, para soportes rígidos.

La Tabla 5.1 lista los parámetros empleados y medidos para el caso del soporte rígido, para los tres niveles de llenado considerados. La altura indicada en esta tabla para el centro de gravedad del tanque se obtuvo a partir de la pesada

del tanque y bastidor, nivelado sobre una báscula. Por cuanto a la posición del centro de gravedad de la carga, ésta se determinó mediante el dibujo en Unigraphics.

Por otro lado, y como se mencionó en la última parte del capítulo anterior, en los cálculos se tomó en cuenta la altura del pivote del brazo *restrictor* del corrimiento lateral, misma que fue restada de las alturas de tales centros de gravedad. La Tabla 5.2 lista los resultados teóricos y experimentales para la condición de soporte rígido. Estos datos se han graficado en la Figura 5.2. Estos resultados guardan una importante correlación, o paralelismo, con ambos resultados siendo los mínimos en el caso del llenado al 50%.

Tabla 5.1. Condiciones para el ensaye con soporte rígido, para los tres diferentes niveles de llenado.

|           | <b>25 % (1/4)</b> | <b>50 % (1/2)</b> | <b>88 % (7/8)</b> |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Propiedad | Valores           | Valores           | Valores           |
| $h_m$     | 0.2717 m          | 0.3465 m          | 0.4638 m          |
| $h_c$     | 0.2262 m          | 0.268 m           | 0.3258 m          |
| $h_t$     | 0.2952 m          | 0.2952 m          | 0.2952 m          |
| $W_t$     | 108 N             | 108 N             | 108 N             |
| $W_c$     | 62.72 N           | 125.44 N          | 219.52 N          |
| $l$       | 0.170 m           | 0.170 m           | 0.170 m           |
| $a_c$     | 0.1203 m          | 0.07856 m         | 0.0207 m          |
| $b_c$     | 0.1627 m          | 0.1062 m          | 0.0280 m          |

Tabla 5.2. Resultados de las mediciones y de los cálculos para el soporte rígido.

| Nivel de llenado | Ángulo Teórico | Ángulo Experimental |
|------------------|----------------|---------------------|
| 25 %             | 27.75 °        | 32.1 °              |
| 50 %             | 27.25 °        | 31.2 °              |
| 88 %             | 27.4 °         | 31.8 °              |

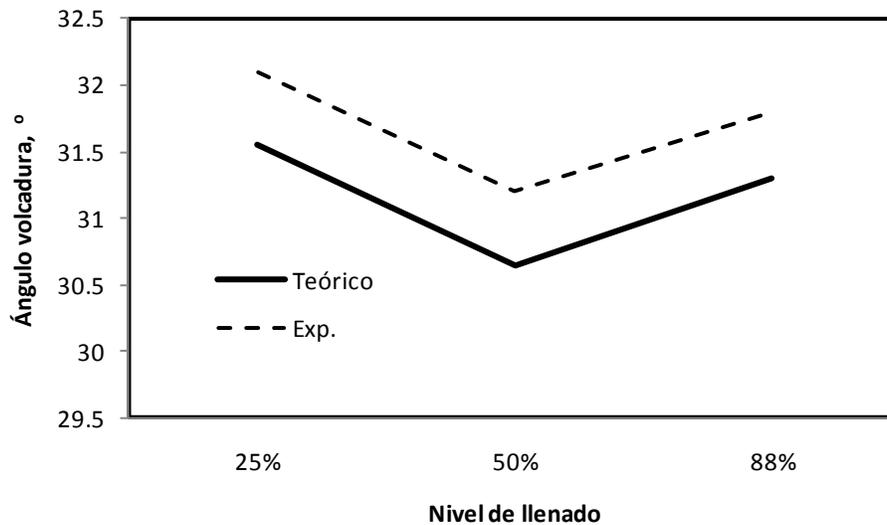


Figura 5.2. Comparación de resultados teóricos experimentales para los tres niveles de llenado – soporte rígido.

### 5.3 Tanque sobre resortes

La Tabla 5.3 lista las propiedades y determinaciones para este grupo de pruebas. La Tabla 5.4, por otro lado, lista los resultados experimentales y teóricos.

La Figura 5.3 grafica los datos en la Tabla 5.5. En este caso, no existe una correlación entre las mediciones experimentales y los resultados de las simulaciones.

Tabla 5.3. Condiciones para el ensaye con soporte flexible, para los tres diferentes niveles de llenado.

|           | 25 % (1/4) | 50 % (1/2) | 88 % (7/8) |
|-----------|------------|------------|------------|
| Propiedad | Valores    | Valores    | Valores    |
| $h_m$     | 0.2569 m   | 0.3262 m   | 0.4385 m   |
| $h_c$     | 0.2114 m   | 0.2477 m   | 0.298 m    |
| $h_t$     | 0.2804 m   | 0.2749 m   | 0.276 m    |
| $W_t$     | 108 N      | 108 N      | 108 N      |
| $W_c$     | 62.72 N    | 125.44 N   | 219.52 N   |
| $l$       | 0.170 m    | 0.170 m    | 0,170 m    |
| $a_c$     | 0.1203 m   | 0.07856 m  | 0.0207 m   |
| $b_c$     | 0.1627 m   | 0.1062 m   | 0.0280 m   |

Tabla 5.4. Resultados de las mediciones y de los cálculos para el soporte flexible.

| Nivel de llenado | Ángulo Teórico | Ángulo Experimental |
|------------------|----------------|---------------------|
| 25 %             | 28.15 °        | 32 °                |
| 50 %             | 27.4 °         | 31.4 °              |
| 88 %             | 29.5 °         | 32.3 °              |

Los resultados en la Figura 5.3 indican que el nivel que los datos divergen con el nivel de llenado, a pesar de tener una tendencia a disminuir entre el 25 y 50% de nivel de llenado.

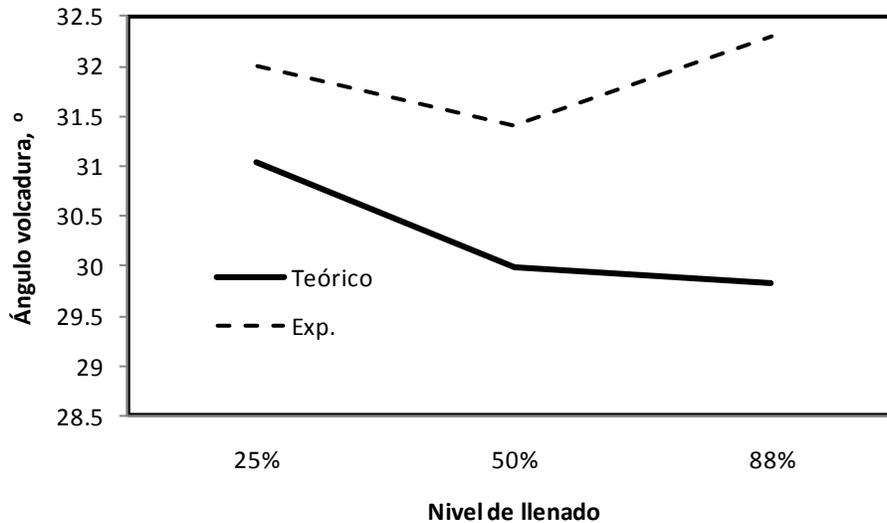


Figura 5.3. Comparación de resultados teóricos experimentales para los tres niveles de llenado – soporte flexible.

Para analizar el efecto del tipo de soporte sobre la tendencia a la volcadura, la Figura 5.4 ilustra los resultados globales teóricos, mientras que la Figura 5.5 muestra la comparación de las mediciones experimentales.

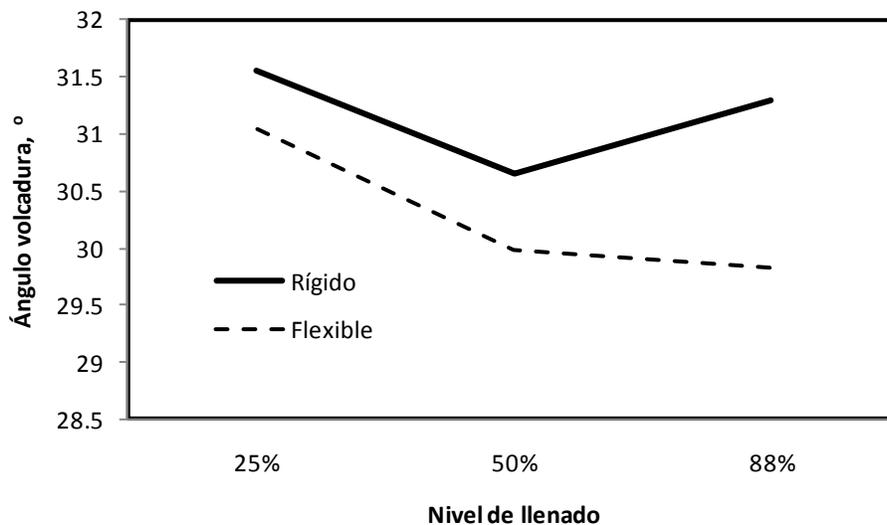


Figura 5.4. Efecto del tipo de soporte sobre el valor teórico del ángulo de volcadura.

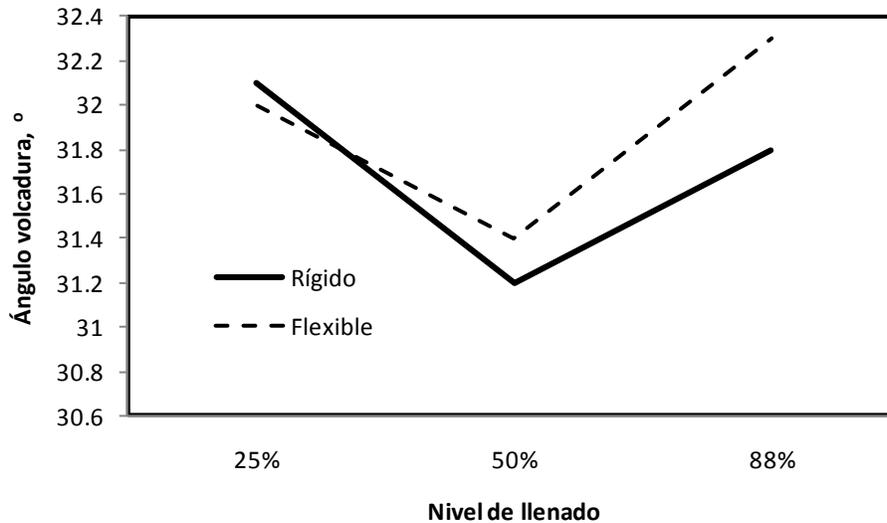


Figura 5.5. Efecto del tipo de soporte sobre el valor medido del ángulo de volcadura.

Los resultados tanto teóricos como medidos revelan que no hay efecto significativo del tipo de soporte. Esto es particularmente notable para los valores medidos y el menor nivel de llenado. Este efecto nulo se explica por una compensación. Esto es, se esperaría que el umbral de volcadura aumentaría al tenerse una suspensión flexible, dado que los centros de gravedad disminuyen por la flexibilidad de la suspensión. Sin embargo este efecto se ve compensado por el corrimiento lateral, hacia el interior, de las fuerzas normales asociadas a las dos masas.

#### 5.4 Comparación con el modelo teórico

La Figura 5.6 ilustra los errores o diferencias porcentuales respecto a los valores medidos en el caso del soporte rígido, mientras que la Fig. 5.7 muestra los valores correspondientes para el caso del soporte flexible. Estos valores se consideran aceptables en el contexto del experimento realizado, y se atribuye en general a las incertidumbres tanto en la medición del ángulo mediante el

goniómetro como en el *sensado* manual del punto de volcadura inminente. Estos errores son en general menores del 5%, que es un número comúnmente aceptado para experimentaciones. El error más grande, mayor del 7% en el caso del soporte flexible al máximo nivel de llenado ameritaría, sin embargo, un análisis posterior con mayor detalle.

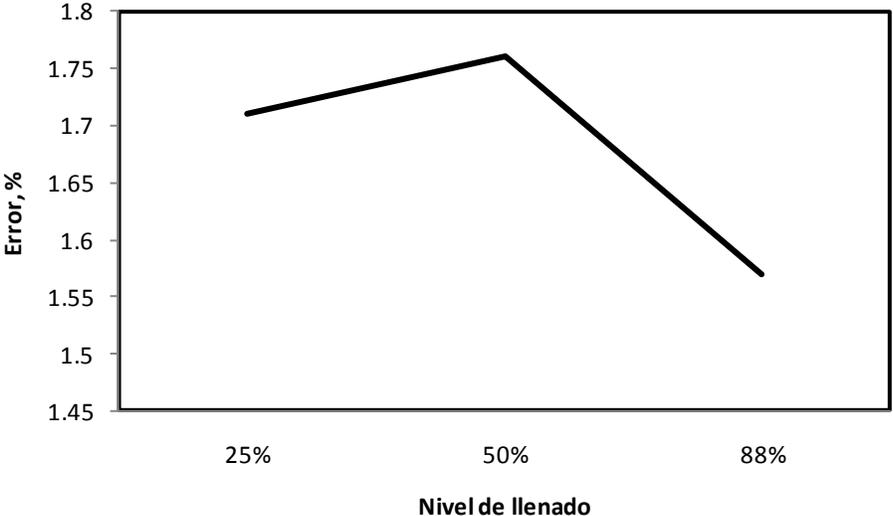


Figura 5.6. Errores respecto a la medición para el tanque sobre soportes rígidos.

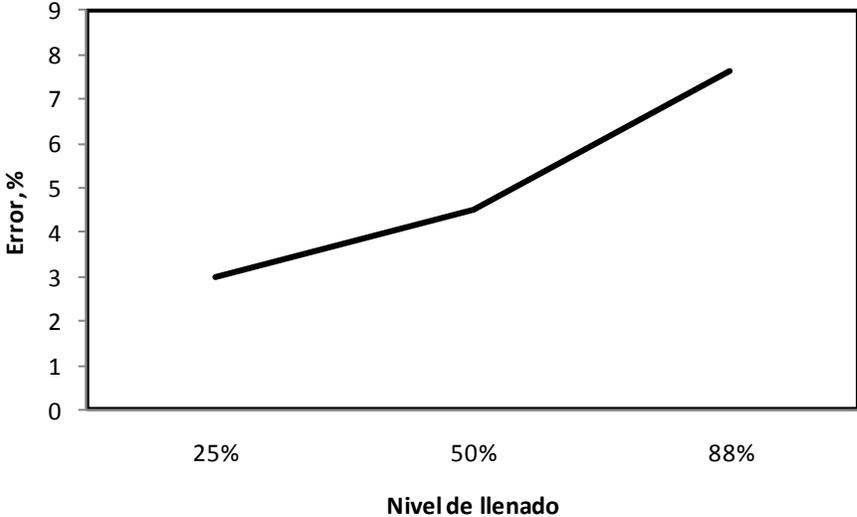


Figura 5.7. Errores respecto a la medición para el tanque sobre soportes flexibles.

## Prueba del dispositivo para detectar la volcadura

La Figura 5.8 ilustra los componentes del dispositivo de detección de volcadura inminente, incluyendo las fuentes de alimentación empleadas para operar el circuito electrónico.

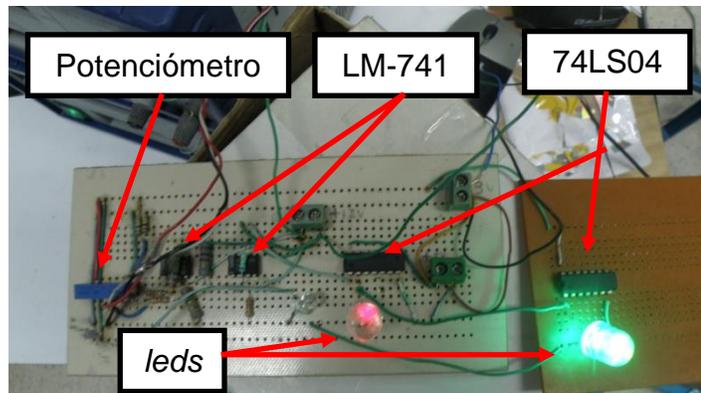
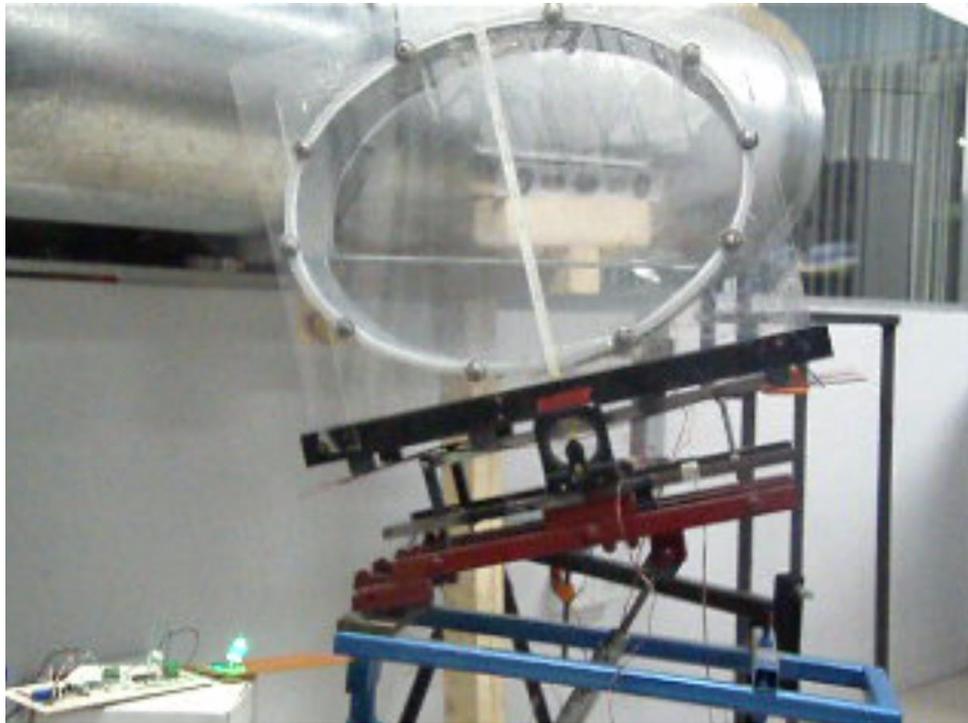


Figura 5.8. Componentes del circuito electrónico de detección de volcadura inminente.

La Figura 5.9 ilustra la operación del dispositivo de detección de volcadura inminente, en las posiciones de estable y volcadura inminente. En la realización de estas pruebas se efectuaron algunos ajustes en el potenciómetro para obtener una señal de salida indicada para cada una de las posiciones (*leds* verde y rojo). El ajuste de este potenciómetro quedó en  $273 \Omega$ .



(a)



(b)

Figura 5.9. Operación de los *leds* en posición de volcadura y no volcadura: (a) punto estable (*led verde*); (b) volcadura inminente (*led rojo*).

# Conclusiones y Recomendaciones

---

Se ha presentado una aproximación teórica-experimental para determinar los umbrales de volcadura de vehículos tipo autotank, parcialmente llenos y de sección transversal elíptica, soportados rígida y flexiblemente. Se ha partido de una formulación existente en el caso de un tanque soportado rígidamente, efectuándose en esta tesis la complementación al modelo para tomar en cuenta la flexibilidad de la suspensión. Asimismo, se desarrolló un circuito electrónico para detectar el punto en el cual la volcadura del tanque es inminente. De desarrolló el diseño conceptual y de detalle de un bastidor para imprimirle a una plataforma inclinable un ángulo continuamente variable.

La formulación aquí propuesta resulta original en tanto no se ha reportado en la literatura un desarrollo semejante. Por otro lado, las aproximaciones teóricas normativas publicadas y vigentes, no toman en cuenta autotankes parcialmente llenos.

Un cúmulo de conocimientos se ha aplicado en el desarrollo de esta tesis, en las diferentes disciplinas de la carrera de Ingeniería Electromecánica. Estas disciplinas incluyen desde el diseño mecánico hasta el diseño electrónico, pasando por materias básicas como la de Procesos de Manufactura. Un aspecto especialmente interesante consistió de la programación de las ecuaciones del modelo matemático.

Al comparar los resultados teóricos con los experimentales se obtuvieron errores menores al 7%, lo cual indica que, sobre todo en el caso del soporte rígido, existió un buen desarrollo experimental, y que las formulaciones aplicadas son válidas para el fenómeno estudiado. Estos resultados sugieren que la flexibilidad de la suspensión no altera significativamente el umbral estático de volcadura, dado que si bien los centros de gravedad bajan al tener una suspensión flexible, con lo que disminuye el momento de balanceo tendiente a volcar al vehículo,

simultáneamente existe un corrimiento hacia el centro de pivoteo de los centros de gravedad, con lo que el momento restaurador también disminuye. El efecto global de la suspensión flexible, por lo tanto, es despreciable si no se toma en cuenta la rigidez lateral del vehículo. Al respecto, fue importante el diseño e instalación de un dispositivo restrictor del corrimiento lateral del tanque.

Los resultados tampoco revelan un efecto del nivel de llenado sobre el umbral de volcadura, lo cual se atribuye a un proceso de compensación entre los momentos tendientes a volcar los vehículos y los momentos restauradores.

Otros trabajos podrían ser desarrollados con objeto de tomar en cuenta otros aspectos no modelados en esta tesis, incluyendo el corrimiento lateral de los centros de masa de la carga y el tanque, producto de la rigidez lateral tanto de las llantas del vehículo como de la suspensión. Un análisis complementario que tomase en cuenta la rigidez lateral de los componentes del vehículo podría servir para estudiar, por ejemplo, el efecto del nivel de carga sobre el umbral estático de volcadura.

De esta forma, los objetivos planteados al inicio del desarrollo de este trabajo, se cumplieron en mayor medida. Y se cuenta con una infraestructura física y conceptual potencialmente útiles en la enseñanza de la ingeniería vehicular.

## Referencias

---

- Alexander, Ch. K., y Sadiku, M. N. O. (2007). Fundamentals of Electric Circuits, Editorial Mac Graw Hill paginas 176-177, third edition , 2007.
- Billing J. R., y Patten J. D. (2005) "An Assessment of Tank Truck Roll Stability", I Centre for surface transportation technology National Research Council of Canada. Reporte TP 14273 E, Marzo de 2005
- Ervin, R D, Barnes, M, y Wolfe, A. (1985) "Liquid Cargo Shifting and the Stability of Cargo Tank-trucks", University of Michigan Transportation Research Institute, UMTRI-85-35/1 (1985).
- Goru, V.G. (2007) "Analysis of the Potential of DynaFlexPro as a Modeling Software by its Application in the Roll Stability of Heavy-Duty Elliptical Tankers using Trammel Pendulum to Simulate Fluid Sloshing", Tesis, Erasmus Mundus Master of mechanical engineering, Comunidad Europea, 92 pp, 2007.
- Modaressi-Tehrani, K., Rakheja, S., y Sedaghati, R. (2006) "Analysis of the overturning moment caused by transient liquid slosh inside a partly filled moving tank", IMechE Vol. 220 Part D: J. Automobile Engineering, pp 289-301.
- NS (2009) National Semiconductor, Data sheet DM74LS04 Hex Inverting Gates, June 2009.
- Romero, J. A., Ramírez, O., Fortanell, J.M., Martínez, M., y Lozano, A. (2006) "Analysis of lateral sloshing forces within road containers with high fill levels" Journal of Automobile Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D. Vol. 220, No. 3, pp. 303-312, 2006.
- Romero, J. A., Lozano, A., y Ortiz, W (2007). "Modelling of liquid cargo-vehicle interaction during turning manoeuvres", 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), June18-21, 2007.
- Shigley, J. (1999) Diseño en Ingeniería Mecánica quinta edición, Mc Graw Hill, 210 pp.
- Winkler, C. B., y Ervin, R.D. (1999) Rollover of Heavy Commercial Vehicles UMTRI-99- 19, Agosto 1999, 57 pp.

# Apéndice “A” Programas

---

En esta sección se presentan los códigos de los programas elaborados en Borland C++, los cuales calculan de forma automática los ángulos de volcadura para soportes rígidos y flexibles.

## A.1 Código para el cálculo de volcadura del tanque sobre soportes rígidos:

```
//
// UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO
// FAC. ING. SAN JUAN DEL RIO
// ABRIL 2011
// PROGRAMA PARA CALCULAR EL UMBRAL ESTÁTICO DE VOLCADURA DE UN TANQUE
// SOPORTADO DE MANERA RIGIDA
//

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

FILE *SAL;

int i;
double H_C, ELE, W_C, W_T, H_T, ALFA, ALFA_RAD, DUMMY_1, DUMMY_2, DUMMY_3,
DUMMY_4, F_E, F_E_ANT;
double X_C, B_C, BETA, R, A_C, LLEN, Y_C;
double H_C_0;

main(){

SAL = fopen("Salida.xls", "w");
H_C_0 = 0.268-.05872; ELE = 0.167; W_C = 125.44; W_T = 108.; H_T = 0.2952-.05872-.01;
LLEN = 50.; B_C = 0.1062; A_C = 0.07856; // 50% de llenado
ALFA = 0.1;
```

```

for(i=1; i<=3000; i++){

    ALFA = ALFA + 0.05;
    ALFA_RAD = ALFA * ( 6.28 / 360. );
    R = 0.7327;
    BETA = atan( - R / ALFA_RAD);
    X_C = B_C * cos(BETA);  Y_C = A_C * sin(BETA);
    H_C = H_C_0 + (A_C + Y_C);
    DUMMY_1 = W_C * cos( ALFA_RAD) * ( ELE - X_C );
    DUMMY_2 = W_T * cos( ALFA_RAD) * ELE;
    DUMMY_3 = - W_C * sin (ALFA_RAD) * H_C;
    DUMMY_4 = - W_T * sin(ALFA_RAD) * H_T;
    F_E = ( DUMMY_1 + DUMMY_2 + DUMMY_3 + DUMMY_4 ) / ( 2. * ELE );
    if( ( F_E_ANT * F_E ) < 0){ i = 3200;
        printf("  F_E  F_E_ANT  ALFA    i  H_C    X_C    LLEN \n");
        printf("  %f %f %f  %d %f %f %f \n", F_E, F_E_ANT,ALFA,i, H_C, X_C, LLEN);}
    F_E_ANT = F_E;

}
}

```

## A.2 Código para el cálculo de volcadura del tanque sobre soportes rígidos:

```

//
// UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO
// FAC. ING. SAN JUAN DEL RIO
// ABRIL 2011
// PROGRAMA PARA CALCULAR EL UMBRAL ESTÁTICO DE VOLCADURA DE UN TANQUE
// SOPORTADO DE MANERA FLEXIBLE
//
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

```

```

#include <math.h>

FILE *DATA, *DATA2, *COLUM_1, *COLUM_2;

FILE *SAL;

int i;

double H_C, ELE, W_C, K, W_T, H_T, ALFA, ALFA_RAD, ALFA_P, EXC, H_C_P, DUMMY_1,
DUMMY_2, DUMMY_3, DUMMY_4, F_E, F_E_ANT;

double X_C, B_C, BETA, R, A_C, LLEN, ALFA_PP, H_T_P, F_E_PP, EXC_PP, Y_C;

double H_C_0, K_TETA;

main(){

SAL = fopen("Salida.xls", "w");

//H_C_0 = 0.268-.05872;      ELE = 0.167; W_C = 125.44;   K = 11510.*1.00000;   W_T   =
108.; H_T = 0.2952-.05872-.01; LLEN = 50.;   B_C = 0.1062; A_C = 0.07856; // 50% de llenado

//H_C_0 = 0.2262-.05872;      ELE = 0.167; W_C = 62.72;   K = 11510.*1.00000;   W_T   =
108.; H_T = 0.2952-.05872-.01; LLEN = 25.;   B_C = 0.1627; A_C = 0.1203; // 25% de llenado

H_C_0 = 0.3258-.05872;      ELE = 0.167; W_C = 219.52;   K = 11510.*1.00000;   W_T   =
108.; H_T = 0.2952-.05872-.01; LLEN = 80.;   B_C = 0.028; A_C = 0.0207; // 88% de llenado

// K Corresponde a un solo resorte, dado que los cuatro resortes, la K fue de 45.95 N/mm, lo que
corresponde a 11.5 en cada resorte

ALFA = 0.1;

fprintf(SAL, " F_E F_E_ANT ALFA i  H_C H_C_P X_C Y_C EXC_PP  LLEN,ALFA_P ALFA_PP
\n");

for(i=1; i<=40000; i++){

    ALFA = ALFA + 0.01;

    ALFA_RAD = ALFA * ( 6.28 / 360. );

    R = 0.7327;

    BETA = atan( - R / ALFA_RAD);

    X_C = B_C * cos(BETA);   Y_C = A_C * sin(BETA);

    H_C = H_C_0 + (A_C + Y_C);

    K_TETA = ( 4. * K * ELE * ELE );

    ALFA_P = ( W_C * sin(ALFA_RAD) * H_C ) / K_TETA;

    ALFA_PP = ( W_T * sin(ALFA_RAD) * H_T ) / K_TETA;

    EXC = ALFA_P * H_C;

```

```

EXC_PP = ALFA_PP * H_T;
H_C_P = H_C - ( ( W_C * cos(ALFA_RAD+ALFA_P+ALFA_PP) ) / ( 4. * K ) ); // ABRIL
2011
H_T_P = H_T - ( ( W_T * cos(ALFA_RAD+ALFA_P+ALFA_PP) ) / ( 4. * K ) ); // ABRIL 2011
DUMMY_1 = W_C * cos( ALFA_RAD+ALFA_P ) * ( ELE - EXC - X_C );
DUMMY_2 = W_T * cos( ALFA_RAD+ALFA_PP ) * (ELE - EXC_PP);
DUMMY_3 = - W_C * sin (ALFA_RAD+ALFA_P) * H_C_P;
DUMMY_4 = - W_T * sin(ALFA_RAD+ALFA_PP) * H_T_P;
F_E = ( DUMMY_1 + DUMMY_2 + DUMMY_3 + DUMMY_4 ) / ( 2. * ELE );
fprintf(SAL," %f %f %f  %d %f %f %f %f %f %f %f %f \n", F_E, F_E_ANT,ALFA,i,
        H_C, H_C_P,X_C,EXC,EXC_PP, LLEN,ALFA_P,ALFA_PP);
if( ( F_E_ANT * F_E ) < 0){ i =40000;
printf("  F_E  F_E_ANT  ALFA    i  H_C   H_C_P  X_C   EXC  EXC_PP
        LLEN  ALFA_P  ALFA_PP\n");
        printf(" %f %f %f  %d %f %f %f %f %f %f %f %f \n", F_E, F_E_ANT,ALFA,i, H_C,
H_C_P,X_C,EXC,EXC_PP, LLEN,ALFA_P,ALFA_PP, LLEN);}
        F_E_ANT = F_E;
    }
}

```

# Apéndice “B” Planos generales

|                  |                  |                  |        |                |                                   |                                     |                                     |   |   |   |   |   |
|------------------|------------------|------------------|--------|----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|---|---|---|---|
| 1                | 2                | 3                | 4      | 5              | 6                                 | 7                                   | A                                   | B | C | D | E | F |
|                  |                  |                  |        |                |                                   |                                     |                                     |   |   |   |   |   |
| A                | B                | C                | D      | E              | F                                 | G                                   |                                     |   |   |   |   |   |
| 1                | 2                | 3                | 4      | 5              | 6                                 | 7                                   |                                     |   |   |   |   |   |
| Rev.             | Fecha            | Aprobó           | Dibujó | Sergio Herrera | Universidad Autónoma de Querétaro | Acabado Esmalte en PTR Cotas en mm. | Descripción.                        |   |   |   |   |   |
| A                | 11/04/2011       | Revisó           | Dibujó | Sergio Herrera | Universidad Autónoma de Querétaro | Esmalte en PTR                      | Vista superior del banco de pruebas |   |   |   |   |   |
| 1                | 2                | 3                | 4      | 5              | 6                                 | 7                                   | Dibujo No. 1                        |   |   |   |   |   |
| Dr. J. A. Romero | Dr. J. A. Romero | Dr. J. A. Romero | 4      | 5              | 6                                 | 7                                   |                                     |   |   |   |   |   |

