



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

“ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD TIP-OVER EN UN  
MANIPULADOR MÓVIL UTILIZANDO  
EL CRITERIO MNGR”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

**P R E S E N T A:**  
**ZAVALA PACHECO EDUARDO**

**ASESOR:** Dr. José Antonio Souza Jiménez



Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Dedicatorias**

A mi Madre, Elizabeth Pacheco, por darme su eterno apoyo, cariño y guía a lo largo de todo mi trayecto académico y personal, gracias por siempre estar al pendiente y ser el pilar que da sostén a todo mi ser.

A mi Padre, Ernesto Zavala, por enseñarme lo que es el esfuerzo, la paciencia y la calma, valores que rigen mi vida. Gracias por tu amor y por otorgarme las herramientas necesarias para defenderme en la vida.

A mis hermanos Omar y Alexia Zavala por su cariño y apoyo, permitiéndome salir adelante en todo momento.

A mis abuelos, Agripina Damián y Darío Pacheco, porque siempre estuvieron apoyándome desde las primeras etapas de mi vida, gracias por sus consejos, su cuidado y su cariño.

A mi tía Martha Pacheco por haber sido mi segunda madre brindándome su apoyo y su cuidado

A todos, gracias a ustedes soy lo que soy.

## **Agradecimientos**

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT) por el apoyo económico otorgado a través del programa “Jóvenes en la Investigación y Desarrollo Tecnológico 2017” con el proyecto 4234-2017

Al laboratorio de Ingeniería Mecánica del Centro Tecnológico Aragón por facilitar el espacio de trabajo, el equipo de instrumentación virtual y todo el apoyo que brindaron a este proyecto. En especial al Dr. Jacinto Cortés Pérez.

Al Dr. José Antonio Souza Jiménez por su apoyo, consejos y vivencias a lo largo de mi etapa universitaria, así como en la realización de este proyecto.

Al Ingeniero Juan Carlos García Hernández por sus asesorías y apoyo en la realización de los distintos proyectos realizados a lo largo de mi etapa universitaria y en el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros y amigos, Ángel Becerra, Rafael Navarro, Manuel Herrera, Elisa Urzua, Saul Galarza, Oswaldo Olivares y Eduardo Hernández, por su amistad, consejos y por hacer de mi vida universitaria una grata experiencia.

A Aurea Yuriko Ángeles Chang por su amor, sus consejos y su gran amistad, siendo desde siempre mi ejemplo a seguir.

Al Grupo Mecatrónico Wayaks por ser una parte fundamental en mi formación universitaria brindándome herramientas y experiencias que permitieron mi desarrollo personal y profesional.

A la UNAM por alojarme y brindarme los recursos y las herramientas necesarias para forjarme y lograr ser lo que soy.

# INDICE

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Estado del Arte</b> .....	3
<b>Capítulo 1. GENERALIDADES</b> .....	10
1.1.- Objetivos .....	10
1.1.1.- General.....	10
1.1.2.- Especificos .....	10
1.2.- Metodología.....	11
1.3.- Estabilidad Tip-Over .....	12
1.4.- Sistemas Preventivos de Volcadura.....	14
<b>1.4.1.- Elementos Comunes de Seguridad</b> .....	15
<b>1.4.2.- Sistemas Preventivos en Manipuladores Operados</b> .....	16
1.5.- Criterios de Estabilidad en Manipuladores.....	16
<b>1.5.1.- Punto de Momento Cero (Zero Moment Point - ZMP)</b> .....	16
<b>1.5.2.- Estabilidad Momento-Altura (Moment-Height Stability MHS)</b> .....	20
<b>1.5.3.- Estabilidad Fuerza-Ángulo (Force-Angle Stability FA)</b> .....	25
<b>Capítulo 2. MARCO TEÓRICO</b> .....	31
2.1.-El criterio MNGR Reacciones Normales Promedio .....	31
<b>2.1.1- Altura del Centro de Masa</b> .....	32
<b>2.1.2.- Medida de Estabilidad</b> .....	34
2.2.- Caso Particular .....	35
2.3. Instrumentación del manipulador .....	35
<b>Capítulo 3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL</b> .....	38
3.1.- Extensometría Eléctrica.....	39
<b>3.1.1- Mediciones con Galgas Extensométricas.</b> .....	41
3.2 INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL (VI) .....	43
3.3 LabVIEW de National Instruments.....	45
<b>3.3.1. El panel frontal</b> .....	46
<b>3.3.2. Diagrama de bloques</b> .....	47
<b>3.3.3.- Panel de Iconos y conectores</b> .....	49
<b>3.3.4 Entorno de trabajo en LabVIEW</b> .....	50
3.4.- Elaboración del Instrumento Virtual .....	51

3.5.-El chasis cDAQ9191 y La tarjeta NI9237 .....	58
3.6.- Comunicación entre la tarjeta, las galgas y el instrumento virtual .....	59
3.7. Motorreductores EMG30 y Controlador MD25 .....	61
3.8. Servomotores Dynamixel .....	64
3.9.- ESTIMACIÓN DEL CENTRO DE MASA .....	67
3.10. PRUEBAS.....	71
<b>3.10.1.- CASO 1.</b> .....	74
<b>3.10.2.-CASO 2.</b> .....	74
<b>3.10.3.-CASO 3</b> .....	77
<b>3-10.4.- CASO 4</b> .....	79
<b>3.10.5.- CASO 5</b> .....	80
<b>3.10.6.- CASO 6</b> .....	81
<b>Capítulo 4. RESULTADOS</b> .....	82
4.1.-CASO 1 .....	82
4.2.-CASO 2 .....	84
4.3.- CASO 3.....	86
4.4.- CASO 4.....	87
4.5.- CASO 5.....	88
4.6.- CASO 6.....	89
<b>CONCLUSIONES</b> .....	91
<b>REFERENCIAS</b> .....	93

## Introducción

Actualmente, los manipuladores móviles son utilizados cada vez más en distintos campos debido a la gran movilidad que presentan, ya que su versatilidad y funcionalidad permite realizar actividades en situaciones complicadas, de difícil acceso o que pueden poner en riesgo al trabajador y pueden ser clasificados de acuerdo con el medio en el que se desplacen: terrestres, marinos y aéreos [1]93[1].

El término de manipulador móvil se refiere a los sistemas constituidos por una plataforma móvil y un brazo manipulador fijado a ella, sujeta a sus restricciones cinemáticas, y a los grados de libertad del brazo manipulador montado, el cual puede ser autónomo o tele operado.

Debido a su versatilidad se pueden encontrar en diferentes aplicaciones, por ejemplo, en combate de fuego en bosques, desmantelamiento de bombas, limpieza de desechos tóxicos, transportación de materiales nucleares, en hospitales para traslado de instrumental de quirófano, recolección de material e información en el espacio y aplicaciones militares [2,3].

Así mismo, se encuentran los manipuladores móviles que son controlados por operadores humanos como los utilizados en el campo de la minería, la construcción, forestal, o en las ciudades para realizar tareas de mantenimiento en lugares ubicados a ciertas alturas; conocidos como Plataformas Elevadoras Móviles.

Estos sistemas combinan las ventajas de las plataformas móviles y los brazos robóticos, además, reducen sus desventajas, aunque es trascendental como un número considerable de problemas, tales como: la interacción dinámica entre la plataforma y el manipulador, así como la inestabilidad por pérdida del equilibrio (Tip-Over). La pérdida de estabilidad puede suceder de varias formas, ya sea por deslizamiento puro, rotación pura respecto a un punto de frontera (eje Tip-Over) y/o una combinación de deslizamiento y rotación.

Actualmente hay sistemas que evitan la volcadura de los manipuladores móviles, por ejemplo: sistemas que mediante posturas del manipulador móvil aseguran el

equilibrio, llevándolo a una zona segura de trabajo, otros sistemas incorporan elementos mecánicos como estabilizadores que ayudan a mejorar la estabilidad, otros tienen algoritmos complejos de estabilidad, pero tienen el inconveniente de que son difíciles de implementar y además requieren un costo computacional elevado.

Para este trabajo nos centramos en la problemática de los manipuladores presentada como inestabilidad por pérdida del equilibrio (Tip-Over), principalmente cuando se realizan maniobras rápidas, con tareas que involucran grandes fuerzas en su efector final o en el ambiente que los rodea como superficies irregulares o inclinadas teniendo como consecuencia accidentes, misiones fallidas, pérdidas materiales y humanas.

La inestabilidad Tip-Over ocurre cuando un vehículo nominalmente vertical experimenta una rotación la cual resulta en una reducción del número de puntos de contacto con el piso tal que todos los puntos que permanecen caen en una línea singular (eje Tip-Over), el control de movilidad se pierde, finalmente la situación generalmente no es reversible y el vehículo se vuelca. [4]

Es importante aclarar que el término "estabilidad" al que se refiere este trabajo no está referido al área de control, sino a la estabilidad mecánica. Es decir, a la permanencia en un estado de equilibrio (estado de un cuerpo que ocupa una posición en el espacio sin caer) quedando en posición vertical.

La cuantificación de la estabilidad se llevó a cabo a través de un prototipo de manipulador móvil instrumentado, un sistema de adquisición y procesamiento, además de un instrumento virtual. Por medio de este sistema se permitió visualizar la escala de estabilidad del manipulador y los bordes en los que se está propenso a ocurrir una volcadura Tip-Over al realizar diferentes movimientos.

La instrumentación del chasis es una parte fundamental para conocer la estabilidad del manipulador, esto se logró utilizando extensometría eléctrica colocando sensores en la base con el fin de cuantificar las reacciones normales en los puntos de apoyo de la base del manipulador, siendo la base para la obtención de la medida de estabilidad utilizada.



La visualización se realizó por medio de un software con interfaz gráfica que muestra la información en un instrumento virtual el cual está Basado en el criterio de estabilidad de las Reacciones Normales Promedio, MNGR (por sus siglas en Ingles) brindando información inmediata sobre la posición del brazo, el grado de estabilidad de la plataforma y que tan propensa está el manipulador de volcarse.

En el presente trabajo se muestran los resultados de las pruebas realizadas en un manipulador móvil sometido a una fuerza de perturbación en su efector final que provocará que el manipulador tienda a la volcadura mientras se desplaza de un punto a otro sobre una superficie irregular para observar la variación de la estabilidad.

Dicho lo anterior, es importante que el manipulador móvil trabaje establemente no solo para la seguridad de los sistemas, también para la seguridad del operador y del entorno.

## **Estado del Arte**

Los intentos hechos por la comunidad de investigación en robótica, para resolver el problema de planeación de movimientos para manipuladores móviles trasladándose sobre terreno inclinado o ejerciendo grandes fuerzas o momentos sobre el ambiente, dio lugar a varias definiciones de restricción de estabilidad [5,6,7], al considerar el grado al cual una restricción de estabilidad es satisfecha se obtiene una medida del margen de estabilidad, pero las medidas propuestas no son sensibles al tambaleo (el cual es definido como un efecto de oscilación en la base del manipulador, propiciando una posible volcadura) y generalmente sólo consideran la volcadura lateral (sobre los ejes laterales).

Varios investigadores examinaron más directamente la cuestión de cómo se debe definir el margen de estabilidad instantáneo para un manipulador móvil, McGhee propuso el uso de la distancia horizontal más corta entre el c.g y la frontera de apoyo frontal proyectada en el plano horizontal [8,9]. Esta medida fue refinada por Song, aún permanece insensible al tambaleo el cual se considera como una oscilación en

la base del manipulador que podría producir una volcadura siendo la medida solo una aproximación para un sistema en terreno irregular [10].

Screenivasan y Wilcox mejoraron la medida de la distancia mínima al considerar el mínimo de la distancia de cada punto de contacto al vector de fuerza neta, eliminando la necesidad de un plano de proyección y por tanto haciendo la medida exacta [11], sin embargo, esta medida falla en la presencia de cargas angulares y tampoco toma en consideración el tambaleo.

Davidson y Schweitzer también extienden el trabajo de McGhee, esta vez usando mecánica de tornillo para proveer una medida la cual elimina la necesidad de un plano de proyección mientras considera las cargas angulares [12], sin embargo, ellos reconocen que su medida no es sensible a las fuerzas o cargas que actúan en el efector final (top-heaviness).

Sugano, presentó el punto de momento cero (ZMP) por sus siglas en inglés, para la planeación de movimiento de un manipulador redundante [13]. Es un punto en el suelo donde la suma de las fuerzas y momentos actuando sobre el robot pueden ser reemplazados por una sola fuerza, fue utilizado para estabilizar robots bípedos y ha sido aplicado muchas veces a robots móviles.

El ZMP, en su forma original no es sensible a la variación del centro de masa, entonces, para incluir el momento de inercia de masa la formulación del ZMP ha sido modificada [14]. El ZMP basado en el criterio de estabilidad [15] principalmente utiliza la relación entre el ZMP y el polígono de apoyo para evaluar la estabilidad en un manipulador móvil.

Papadopoulos y Rey han reportado otra medida llamada margen Fuerza-Angulo FA [16], esta medida usa el ángulo mínimo entre la fuerza resultante ejercida a la base y al eje normal Tip-Over sujeto a la consideración de bajas velocidades, este algoritmo mide la estabilidad por el ángulo de la fuerza aplicada en el centro de masa. Los ángulos son referenciados al polígono de apoyo, el cual es un polígono convexo derivado de los puntos de contacto con el suelo del robot.

El margen de estabilidad Fuerza-Angulo (FASM) [17,18,19] es el criterio más común basado en el Fuerza Angulo, es aplicado a sistemas sujetos a fuerzas externas y de inercia, ya en movimiento en terrenos regulares e irregulares, adicionalmente es sensible a las fuerzas o cargas que actúan en el efector final (top-heaviness). Long et al. Mejoraron la medida FA para ser aplicada a un Robot Radial Simétrico [20].

Moosavian desarrolló el algoritmo Estabilidad Momento-Altura (MHS) [21] que considera la inercia del robot sobre cada eje del polígono de apoyo. Incorpora un factor intuitivo escalando los resultados por la altura del centro de masa, es considerada una métrica eficiente ya que no requiere mucho cálculo, la medida presentada es efectiva para manipuladores móviles y para robots con patas.

La métrica propuesta (MHS) está basada en conceptos físicos y es implementado con un coste computacional bajo, en esta medida la rotación pura es de principal interés, incorpora el momento de inercia de la masa de la base del móvil que es un factor importante de la rotación de la base móvil. Alipour y Moosavian presentaron la planeación estable dinámicamente basada en un análisis sistemático para predecir mejor y eliminar la posibilidad de volcadura **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Li y Wang propusieron un método de cómputo para el ángulo de estabilidad de los puntos de contacto. Mientras Li no tomo en consideración la interferencia externa y el momento actuando en el centro de gravedad [23], el método de Wang no fue efectivo [24]. Hatano y Obara presentaron un criterio basado las reacciones normales, pero no considera la variación de la altura del centro de masa. [25]

Shanab y Sepehri [26], presentan el desarrollo de un modelo que puede simular adecuadamente la estabilidad dinámica de manipuladores montados en plataformas móviles, el modelo cuenta con la dinámica de la base que puede balancearse hacia delante y hacia atrás particularmente, el modelo predice los cambios en las velocidades en los enlaces del manipulador y de la base debido al impacto del suelo. Los resultados presentados muestran que, mediante la manipulación apropiada de los brazos, un manipulador móvil puede alcanzar una condición estable e incluso revertir el vuelco. El algoritmo del manipulador móvil, indica si el manipulador móvil se va a volcar y sobre que borde lo hará.

El trabajo de Shanab y Sepehri muestra que, mediante la manipulación apropiada de los vínculos, se puede conseguir una condición estable e incluso revertir situaciones de vuelco, la seguridad la productividad y vida útil de los manipuladores móviles podría ser mejorado por predicción y prevención automática del vuelco. En [27] Shanab y Sepehri, hacen una extensión de su trabajo anterior, en el cual estudian la estabilidad dinámica de manipuladores móviles.

Abo-Shanab, R F. y Sepehri, N. (2005) Presentaron un modelo para estudiar la estabilidad Tip-Over en una maquina hidráulica cargadora de troncos [28]. El modelo tiene en cuenta la dinámica de:

- (i) la base que potencialmente puede balancearse hacia atrás o hacia delante
- (ii) la combinación de la suspensión y el suelo con el neumático
- (iii) la fricción entre los neumáticos y el suelo
- (iv) la función de los actuadores hidráulicos.

Los resultados muestran los efectos de movimientos del manipulador, la flexibilidad de contacto entre la base y el suelo, el sistema hidráulico y las propiedades de fricción entre las ruedas y el suelo sobre la estabilidad de la máquina. En particular se muestra que la flexibilidad de contacto entre la base y el suelo reduce la estabilidad de la máquina, mientras que la flexibilidad de las articulaciones del manipulador por el cumplimiento hidráulico mejora la estabilidad de la máquina.

Li, Y. and Liu, Y. (2005) Analizaron la estabilidad de un manipulador móvil para evaluar la posibilidad de volcadura y establecen un criterio de estabilidad [29]. El criterio está basado en el hecho de que las fuerzas de soporte no pueden ser negativas, se toman en cuenta las aceleraciones de la plataforma móvil para poder considerar las fuerzas de inercia, se define una función potencial artificial que define la situación más estable, también se determina una función para determinar la velocidad para prevenir que el manipulador móvil no se volqué.

Meghdari et al [30], presentan un enfoque basado en una red neuronal para detectar situaciones inestables en manipuladores móviles, este método reduce en mayor parte el tiempo de cálculo y es suficientemente rápido para usar un observador que pueda medir el Tip-Over en tiempo real. El criterio desarrollado toma en cuenta la interacción dinámica del manipulador y la plataforma móvil dando como resultado una fuerza resultante y un momento del manipulador,

En 2006 Li y Liu [31], investigan la redundancia de un manipulador móvil con el fin de evitar la volcadura por medio de ajustar los movimientos utilizando redes neuronales. Takubo et al [32], compensan la estabilidad y la manipulabilidad de un manipulador móvil asistente por medio de una impedancia virtual la cual es designada para trabajar como una región de operación que evita el vuelco.

Mu et al [33], estudian los tipos de impactos que se dan cuando la base de un manipulador móvil tiene un impacto que hace que sus soportes se despeguen del piso, encuentran que la situación de vuelco puede ser revertida si hay una correcta configuración del sistema después de saber que ha ocurrido después del impacto con el suelo.

Qiu et al [34], estudian la estabilidad dinámica y hacen una planeación en línea de movimientos para la lograr estabilidad de un robot de servicio de configuración omnidireccional, incorporan una programación estándar cuadrática para resolver la planeación en línea.

Wang et al [35], analizan la estabilidad de un humanoide con llantas, mencionan que la estabilidad depende de los puntos de contactos de las llantas y de la postura del humanoide.

Haddad et al [36], presentan un esquema estocástico para planear las trayectorias de un manipulador móvil para evitar el vuelco, utilizan el criterio ZMP. Morales et al [37], calculan el centro de gravedad de un manipulador móvil y por medio del control de la posición angular de la base del manipulador proyectan el centro de gravedad dentro del polígono de soporte.

Yang et al. [38], estudian la estabilidad dinámica transitoria de un manipulador móvil con cuerpos flexibles, el criterio de estabilidad dinámica transitoria está basado en la fuerza de reacción y en la fuerza de resistencia de derrape que existe en las llantas, muestran que con la vibración de sus componentes elásticos decrece la estabilidad al vuelco.

Bascarevic et al [39] presentan un humanoide con llantas, por medio del criterio ZMP logran evadir el vuelco y mencionan que las mediciones apropiadas de la plataforma ayudan a evitar el vuelco. Choi et al [40], desarrollan un robot móvil de múltiples grados de libertad, semejante a un péndulo invertido, por medio del criterio ZMP estabilizan el robot ante cualquier velocidad de entrada.

Lee et al [41], proponen una compensación en línea para la prevención del vuelco de un manipulador móvil basado en el cálculo recursivo del gradiente del ZMP. Liang, H [42], desarrolla un algoritmo para evitar el vuelco de un manipulador móvil, controla el centro de masa para balancear las fuerzas que actúan en las llantas. Umemoto, K. y T.

En 2012 M. Juhairi Aziz Safar, Keigo Watanabe, Shoichi Maeyama and Isaku Nagai [43], realizaron predicciones de la estabilidad Tip-Over de un robot móvil Omnidireccional holonómico de transporte utilizando el criterio de FASM (Force Angle Stability Measure) tomando en consideración distintas cargas, así como el centro de gravedad del manipulador.

En 2013 Chioniso Dube realizó validaciones experimentales de un manipulador móvil rastreado para medir la estabilidad Tip-Over aplicando los criterios Moment-Height Stability (MHS), Zero Moment Point (ZMP) y de Force-Angle (FA) [44], siendo este último el que presentó un mejor desempeño, finalmente para determinar el tiempo en que ocurre la volcadura se utilizó un sistema Vicon de captura de movimiento.

En 2014 Khalil Alipour, Arman Hasanpour, and Parisa Daemy Propusieron el criterio de Stability Margin Metric-Increment Function (SMMIF) para mejorar la estabilidad en un manipulador móvil [45] para ello realizaron una comparación entre 2 métodos distintos el Moment-Height Stability (MHS) y el Force-Angle (FA), al realizar las comparaciones lograron comprobar que el criterio propuesto cumplía con lo establecido.

En 2015 Nikhade G.R., Chiddarwar S.S. y Deshpande V.S [46] realizan pruebas con un manipulador omnidireccional móvil utilizando el criterio de Zero Moment Point (ZMP) para conocer el torque necesario en cada una de las uniones para producir volcadura.

En la Feria Mexicana de Ciencias e Ingenierías celebrada en 2014, se presentó el desarrollo de un instrumento virtual que permite visualizar la medida de estabilidad en un manipulador móvil, con este sistema se busca que ahora el manipulador móvil de manera automática se reconfigure para que se encuentre en un mejor estado de equilibrio y por tanto sea menos propenso a volcarse.

En la versión 2015 de la Feria Mexicana se mostraron los resultados de la instrumentación realizada a estabilizadores con distinta geometría, similar a los existentes en plataformas elevadoras comerciales, con el fin de encontrar los puntos adecuados para colocar los sensores y poder tener una media adecuada de la estabilidad.

En el 2016 en el mismo evento en cuestión se presentó un avance más en esta línea de investigación desarrollando un prototipo que es capaz de responder de manera automática a los movimientos del brazo manipulador del sistema, restringiéndolo para evitar la volcadura en caso de llegar a una posición de riesgo. Dicho sistema presentó movilidad únicamente en el brazo mientras la base permanecía estática.

En 2017 José Antonio Souza Jiménez realiza El análisis de Estabilidad de Un Manipulador Híbrido Móvil [47] presenta un criterio de estabilidad que está basado en las reacciones de los puntos de apoyo, para obtener el criterio se calculan las fuerzas y momentos ejercidos por el manipulador sobre la base móvil, estas fuerzas se proyectan a cada uno de los puntos de apoyo.

También, en 2017 [48] Martínez Sánchez Noé Alfredo, José Antonio Souza Jiménez, González Villela Víctor Javier Presentaron la evaluación de la estabilidad de un manipulador ante fuerzas y momentos externos presentes en su efector final. Utilizado el criterio de MNGR (Mean Normal Ground Reactions).

Este trabajo utiliza un criterio simple y eficaz llamado Mean Normal Ground Reactions (MNGR) que es aplicado en un sistema móvil para medir la estabilidad y puede servir como una restricción para controlarlo y llevarlo a la estabilidad.

## Capítulo 1. GENERALIDADES

Existen varias formas en las que ocurre una pérdida de estabilidad, debido al deslizamiento puro, a rotación pura respecto a un punto de frontera o a una combinación de ambas [26], tal es el caso al operar en terrenos irregulares, o con una inclinación pronunciada.

De igual manera cualquier rotación de un sistema es causado por torques o por el efecto rotacional de fuerzas ejercidas tales como momentos [21], un ejemplo claro es cuando se opera con cargas en el efector final que sean mayores a la establecida o se ejerza una fuerza mayor sobre los componentes con los que se esté trabajando.

Medir la estabilidad significa saber que tanta resistencia opone el manipulador para volcarse, respecto a la configuración más estable y que tan lejos está la volcadura de presentarse, para la cual existen distintas propuestas para la resolución de esta problemática, con la incorporación de sistemas automáticos y computacionales, se puede mejorar la seguridad de los manipuladores, así como prevenir accidentes.

Existen distintos criterios de estabilidad, sin embargo, los más utilizados son: MHS (Moment Height Stability); **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Fuerza Angulo (FA) [16], ZMP (Zero Moment Point); **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Reacciones normales en los apoyos, en este trabajo nos enfocaremos en el criterio MNGR (Mean Normal Ground Reactions) [47].

### 1.1.- Objetivos

#### 1.1.1.- General

Estudiar la estabilidad Tip-Over en un manipulador móvil para desarrollar un algoritmo de control de estabilidad que le permita reconfigurarse para evitar perder el equilibrio, esto a través de la retroalimentación de las medidas de la fuerza presente en el efector final y las medidas de las fuerzas de reacción de las llantas

#### 1.1.2.- Especificos



Cuantificar el valor de estabilidad en un manipulador móvil utilizando el criterio MNGR (Mean Normal Ground Reactions)

Monitorear la estabilidad tip-over en un manipulador móvil por medio de extensometría eléctrica en una base móvil con un brazo serial de 3 grados de libertad.

Contribuir al estudio de estabilidad en manipuladores móviles, desarrollando un algoritmo de control de estabilidad que pueda cuantificarla y que sea de menor requerimiento computacional.

Generar conocimiento y tecnología de los manipuladores móviles en materia de estabilidad.

## **1.2.- Metodología**

El presente trabajo estudia la estabilidad Tip-Over en un manipulador móvil utilizando el criterio MNGR (Mean Normal Ground Reactions) por medio de un algoritmo de control de estabilidad, desarrollado en la Institución, simple y de bajo requerimiento computacional.

El manipulador móvil consta de una base móvil instrumentada, un brazo serial de 3 grados de libertad y una fuerza de perturbación que provocará que el manipulador móvil tienda a la volcadura mientras se desplaza de un punto a otro sobre una superficie irregular.

Para realizar el estudio de la estabilidad, la base del manipulador es instrumentada utilizando galgas extensométricas en los apoyos para obtener los valores de las fuerzas normales en cada uno de ellos siendo esto, parte fundamental del criterio de estabilidad.

Posteriormente se desarrolla un instrumento virtual en LabVIEW que muestra los valores de estabilidad en los bordes de la base del manipulador y la estabilidad general del sistema el cual está basado en el criterio MNGR para obtener dicha información se introducen los valores obtenidos con la extensometría eléctrica.

Posteriormente se introduce el control de los motores y del brazo serial en el instrumento virtual con la finalidad de realizar pruebas y lograr así, medir la estabilidad en el manipulador móvil.

Finalmente se muestran los resultados de las pruebas por medio de graficas para conocer el comportamiento y el desempeño del manipulador móvil en conjunto con el criterio de estabilidad.

### **1.3.- Estabilidad Tip-Over**

Una de las condiciones más importantes que se busca en los manipuladores, es su permanencia en el estado de equilibrio ya que la inestabilidad por pérdida del equilibrio es una de las principales problemáticas en los manipuladores móviles y se presenta cuando éste se encuentra en alguno de los casos de pérdida de estabilidad.

La estabilidad máxima en un sistema se alcanza cuando el centro de masa se encuentra lo más bajo posible, condición que es buscada para los manipuladores móviles; en cambio, si se va alejando de este punto, la posibilidad de que sufra una volcadura aumenta; de igual forma, cuando se incrementa el área de la base la estabilidad lo hace de forma proporcional,

Dado que la condición de estabilidad es afectada por el centro de masa (c.m.) y sus posiciones, es importante conocer la proyección que se genera sobre el plano horizontal de la base del manipulador, conociendo los puntos de contacto existentes, se puede delimitar ese plano, el cual se conoce como polígono de apoyo, Figura 1.1.

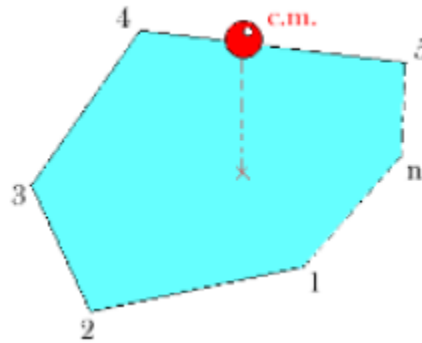


Figura 1.1. Polígono de apoyo formado por “n” puntos de contacto [47]

El Polígono de Apoyo está delimitado a la cantidad de puntos que se encuentren en el manipulador, estos pueden ser, por ejemplo, las ruedas o los estabilizadores, los cuales, al tener el contacto directo en el terreno, generan una superficie de contacto entre cada uno de ellos, Figura 1.2a. La unión que se genera entre cada punto de contacto se le denomina Frontera de Apoyo, Figura 1.2b.

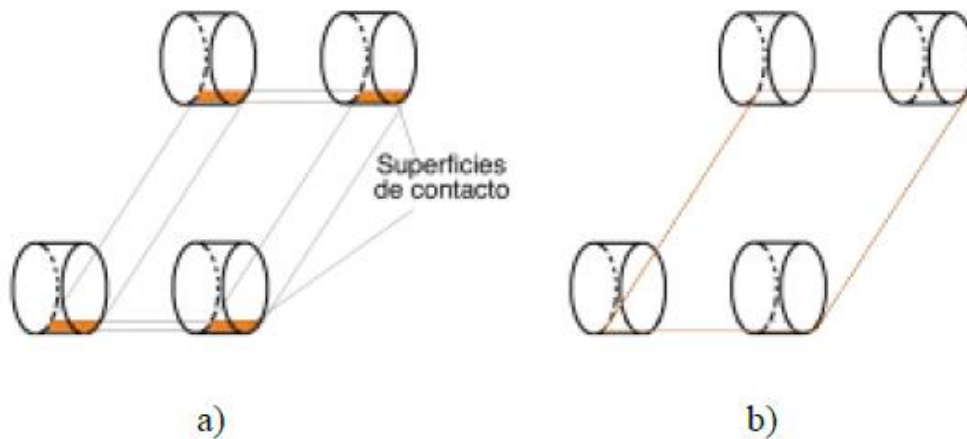


Figura 1.2. Contacto de las ruedas con el piso [69]. a) Proyección de las superficies de contacto; y b) Frontera de apoyo.

La inestabilidad Tip-Over o por pérdida del equilibrio ocurre cuando un vehículo se encuentra en una posición donde presenta contacto directo con el suelo, posteriormente experimenta un giro que resulta en una reducción del número de puntos de contacto con este, tal que todos los puntos que permanecen caen en una línea singular, denominada eje Tip-Over el cual es uno de los bordes de la frontera de apoyo.

Si uno de los apoyos desaparece o se desplaza, la frontera de apoyo se modifica y por tanto es posible que sea más propenso a la volcadura debido a que la distancia mínima del centro de masa al eje de Tip-Over puede disminuir.

La Figura 1.3a muestra una frontera de apoyo formada por cinco superficies de contacto, la cual, se puede alterar si se pierde o se desplaza alguno de los apoyos. En la Figura 1.3b se observa que el centro de masa permanece dentro del polígono de apoyo a pesar de que ha sido alterado, bajo esta condición entonces el móvil es estable.

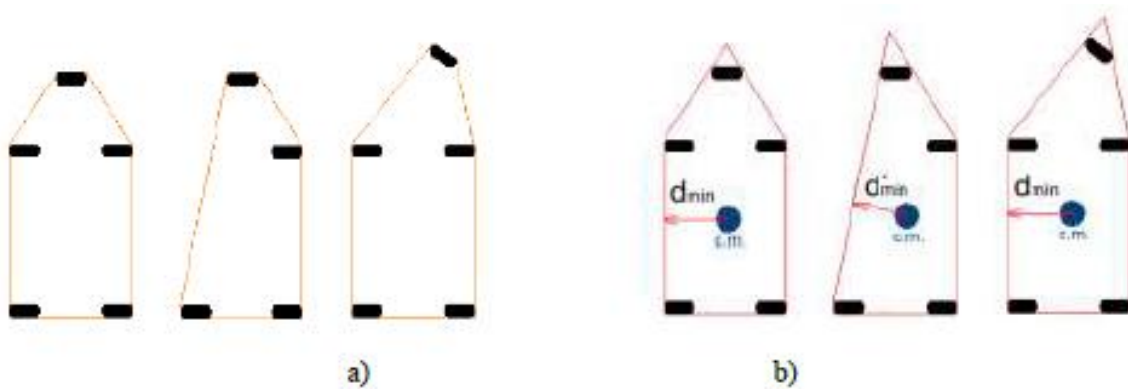


Figura 1.3. a) Modificación de la frontera de apoyo [47]. b) Polígono de apoyo formado por los ejes de Tip-Over

#### 1.4.- Sistemas Preventivos de Volcadura

Debido a que las volcaduras generan pérdidas se han implementado sistemas de seguridad con el fin de prevenir que esto ocurra tanto en los manipuladores operados, como en los autónomos.

Los sistemas de seguridad en manipuladores operados tales como las plataformas elevadoras móviles de personal (PEMP) (Figura 1.4) tienen como fin el evitar, en la medida de lo posible, lesiones en los trabajadores que sean provocadas en el desempeño de su actividad laboral.



Figura 1.4. Plataforma Elevadoras Móvil de Personal (PEMP) con estabilizadores 49.

#### 1.4.1.- Elementos Comunes de Seguridad

Son aquellos elementos, electrónicos o mecánicos, que permiten identificar, prevenir y poder ser accionados cuando la plataforma o manipulador se encuentra en un punto crítico o de riesgo, los cuales permiten realizar una acción preventiva con el fin de evitar algún accidente al operar la plataforma 50,51. Entre ellos se encuentran:

- a) Nivel electrónico: Consiste en un dispositivo mediante el cual se impide que la plataforma elevadora pueda elevarse. Estos actúan al momento de que la plataforma presente algún desnivel en el sistema, es decir, no se encuentre en equilibrio al momento de estar en operación. Las bases de apoyo de los estabilizadores deben estar construidas de forma que puedan adaptarse a suelos que presenten una pendiente o desnivel de al menos 10°.
- b) Frenos Automáticos: Su función es frenar la plataforma en el momento en que se deja de accionar el joystick de traslación de la máquina. Si la máquina quedase averiada o sin combustible se deben de desbloquear los frenos. (Esto lleva al siguiente punto).
- c) Desbloqueador de frenos para maquinas autopropulsadas en general.
- d) Señalizaciones acústicas y luminosas de advertencia: Las plataformas elevadoras dispondrán de unos avisadores acústicos obligatorios que

adviertan de la presencia y funcionamiento de las mismas, estando la señal acústica en la base de la máquina ya que el aviso de movimiento es para los viandantes. En el caso de que la máquina esté trabajando zonas transitadas por vehículos, será necesaria además una señal luminosa rotativa de presencia cuando está estacionada en posición de trabajo.

#### **1.4.2.- Sistemas Preventivos en Manipuladores Operados**

Las plataformas elevadoras comerciales solo cuentan con un sensor de nivel que restringe el funcionamiento del brazo mecánico cuando supera los 14° de inclinación de la superficie así mismo, cuentan con una celda de carga que limita el funcionamiento en caso de exceder la carga permitida por el manipulador.

Estas dos restricciones limitan el uso de las plataformas ya que la estabilidad depende principalmente de la configuración del brazo y no necesariamente pueden ser inestables si se encuentran sobre una inclinación importante.

#### **1.5.- Criterios de Estabilidad en Manipuladores.**

Con la finalidad de conocer que tanta estabilidad posee un manipulador al operar, se han implementado algunos criterios de estabilidad, a continuación, se mencionan brevemente algunos de los criterios de estabilidad más comúnmente utilizados en manipuladores móviles.

##### **1.5.1.- Punto de Momento Cero (Zero Moment Point - ZMP)**

El criterio del Punto de Momento Cero 13,14,15 fue propuesto por Shigeki Sugano, Qiang Huang y Ichiro Kato del Departamento de Mecánica de la Universidad Waseda y considera a un punto en el suelo en donde la suma de todas las fuerzas activas tales el momento de gravedad resultante, las fuerzas inerciales del manipulador y las fuerzas externas son iguales a cero, así mismo, determina regiones zonas estables en donde si el manipulador permanece dentro de ellas, este es estable.

El criterio determina a un manipulador, él y la carga, como un sistema de partículas en la que su base es un plano horizontal rígido que no presenta ningún movimiento generado por fuerzas ni momentos externos como lo muestra la Figura 1.5.

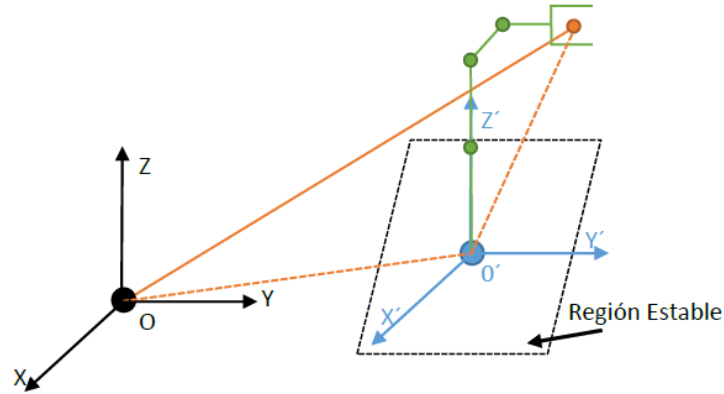


Figura 1.5 Modelo del manipulador y sistemas coordenados.

Siempre y cuando no existiesen fuerzas ni momentos externos la ecuación del ZMP quedaría definida de la siguiente manera:

$$X_{ZMP} = \frac{\sum_i^n m_i(\ddot{z}_i + g)x_i - \sum_i^n m_i \dot{x}_i \dot{z}_i}{\sum_i^n m_i(\ddot{z}_i + g)} \quad (1.1)$$

$$Y_{ZMP} = \frac{\sum_i^n m_i(\ddot{z}_i + g)y_i - \sum_i^n m_i \dot{y}_i \dot{z}_i}{\sum_i^n m_i(\ddot{z}_i + g)} \quad (1.2)$$

Donde:  $m_i$  es la masa de la partícula  $i$ ,  $(X_{ZMP}, Y_{ZMP}, 0)$  es la coordenada del ZMP,  $g$  es la constante de gravitación y  $(x_i, y_i, z_i)$  son las coordenadas de la partícula  $i$  en el plano cartesiano absoluto del sistema O-XYZ.

El criterio de Punto de Momento Zero (ZMP) no expresa las condiciones de un elemento estable en relación con la posición del ZMP y la región estable. Este valor se ve afectado, ya que, si existiesen obstáculos dentro del área de trabajo se desconoce por completo su composición, es necesario que el manipulador tenga un gran elemento estable a comparación de que estas características se conozcan.

El Grado de Estabilidad se define como la medida cuantitativa de un elemento estable para un manipulador de acuerdo a la relación entre la posición del ZMP y la región estable, la cual se establece de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{d}{r_o} \quad (1.3)$$

$$d = \min\{d(ZMP)\} \quad (1.4)$$

$$r_o = \max\{d: d \in A(d)\} \quad (1.5)$$

Donde:  $\alpha$  es el grado de estabilidad,  $d$  es la distancia del ZMP al límite de la región estable,  $d$  es la distancia mínima del ZMP al de la región estable y se asume que si el ZMP está dentro de la región  $d$  es positivo, de lo contrario, si está fuera de la región  $d$  es negativo.  $A(d)$  es la zona estable y  $r_o$  es el máximo de la zona estable en términos de la distancia, mostrado en la Figura 1.6.

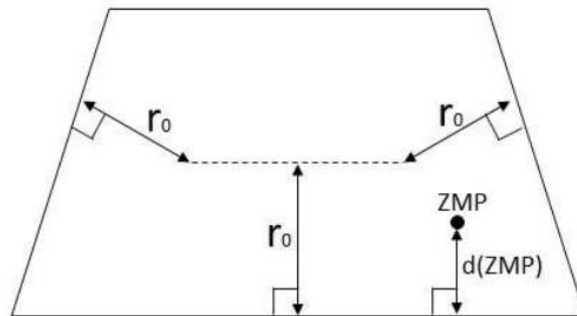


Figura 1.6. Región Estable y Grado de Estabilidad

De esto se tiene que, si el grado de estabilidad es negativo, el manipulador es inestable, si es positivo, es estable. Entre más largo sea este valor, más estable es el manipulador; de igual forma, se puede definir un límite de estabilidad, el cual está dado por lo siguiente:

El límite inestable se define como:

$$\alpha < 0 \quad (1.6)$$

El límite estable es:



$$0 < \alpha \leq 1 \quad (1.7)$$

### 1.5.1.1- Región Válida de Estabilidad.

En el caso de que no existan o no se consideren perturbaciones en alguna tarea con un manipulador, si el ZMP está en la región estable, su valor es positivo y no sufrirá volcadura; si existiesen alteraciones, es necesario considerar la influencia generada por ellas a la estabilidad del sistema.

Sin importar en donde se encuentre ubicado, el grado de estabilidad debe de permanecer siempre positivo bajo cualquier circunstancia, por tal motivo, se define que la cantidad máxima de perturbaciones permitidas depende de las condiciones del manipulador y del medio que lo rodea se le llama Tolerancia a la Perturbación, y se define como la Zona Segura al espacio en donde el grado de estabilidad no se convierte en negativo bajo la tolerancia a la perturbación, matemáticamente se tiene:

$$d_s \geq d_f(zmp) \quad (1.8)$$

donde  $d_s$  es la Zona Segura y  $d_f(zmp)$  es el cambio en la cantidad del ZMP generado por la tolerancia a la perturbación. Este cambio en la cantidad del ZMP se debe al movimiento del manipulador, por lo que no será el mismo valor en cada caso de movimiento que esté presente.

La región válida de estabilidad es la región del ZMP donde se contiene la zona segura, en la cual se tiene:

$$F_{\Omega}(C) \quad (1.9)$$

donde  $\Omega$  es la región válida de estabilidad,  $F_{\Omega}(C)$  es la función principal y C es la curva límite del ZMP donde se ubica la zona segura, tal como se muestra en la Figura 1.7.

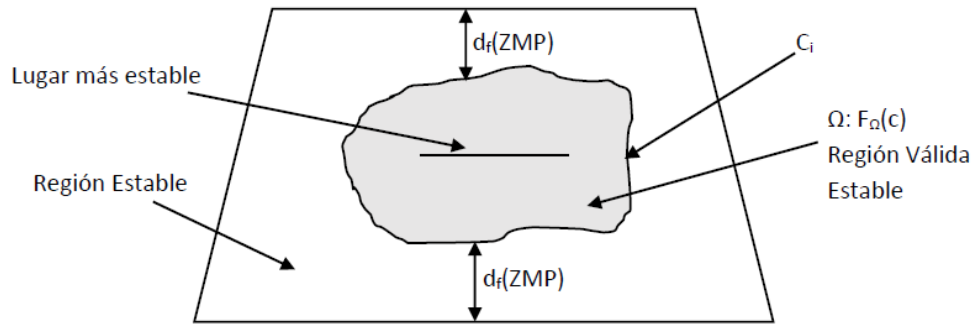


Figura 1.7. Zona segura y Región Válida de Estabilidad

En el caso de que el ZMP quede en la región válida de estabilidad, el manipulador será estable sin importar que se encuentre bajo la tolerancia a la perturbación, por lo cual, se podrá usar para alguna tarea en donde no se requiera considerar la estabilidad del sistema.

Por el contrario, si se encuentra fuera de ella, se presentará inestabilidad bajo la influencia de la tolerancia a la perturbación, por lo que se necesitará controlar el manipulador al momento de realizar esa tarea.

### 1.5.2.- Estabilidad Momento-Altura (Moment-Height Stability MHS)

El criterio de Momento-Altura 21,22 fue propuesto por S. Ali. Moosavian y Khalil Alipour del departamento de Ingeniería Mecánica de Universidad Tecnológica K.N. Toosi y considera que todas las fuerzas y momentos presentes en el manipulador generan una resultante a lo largo de los bordes del mismo, Figura 1.8, los cuales ocasionan que en el polígono de apoyo, esa resultante presente los siguientes comportamientos; si su valor es mayor a cero, presentará la mejor estabilidad en el sistema, si este es igual a cero, se encontrará en un caso crítico, y si es menor que cero, el manipulador presentará inestabilidad.

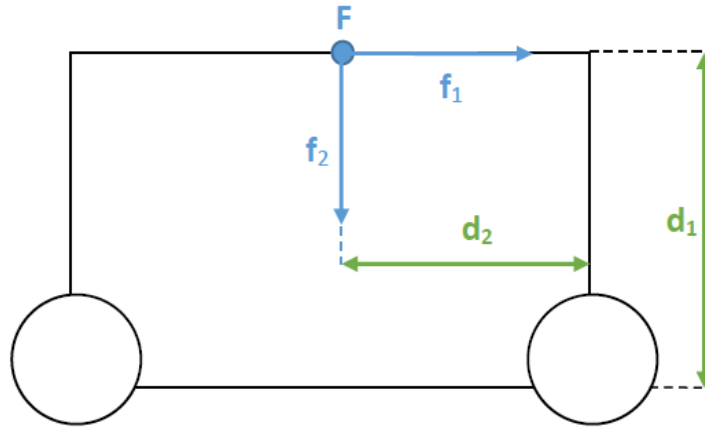


Figura 1.8. Vehículo Influenciado por fuerzas externas

Para aplicar el criterio, se requieren realizar los siguientes pasos:

1. Dividir el sistema en dos subsistemas, por ejemplo, la plataforma los brazos, Figura 1.9. Esto se realiza ya que el criterio mide la concentración básica de los elementos que producen movilidad, como puede ser una fuerza  $R_1$  o un momento  $M_1$ ; tal es el caso de la base del manipulador.

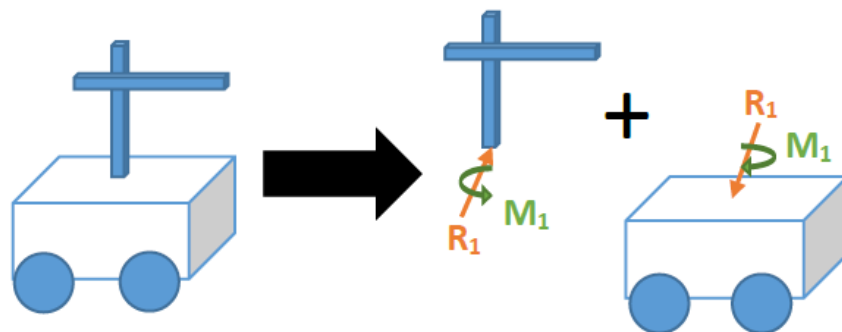


Figura 1.9. Separación del sistema en dos subsistemas.

2. Se considera a la plataforma como el Eslabón Cero y se calculan las componentes de aceleración de un punto en común entre la base y el brazo del manipulador.

Estas componentes se describen como coordenadas  $x_0$   $y_0$   $z_0$ , con respecto del sistema cartesiano de la base del manipulador con origen en el punto donde se presenten las fuerzas o momentos, Figura 1.10. Las componentes

de velocidad angular y aceleración relacionadas con la base también se calculan y se describen en ella.

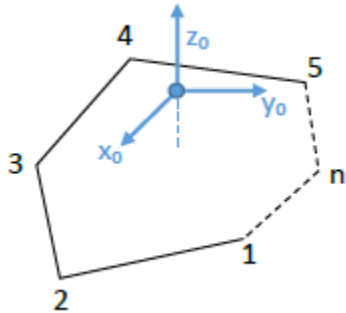


Figura 1.10. Frontera de Apoyo sistema de coordenadas unido a la base

3. Se resuelve la cinemática de los brazos del manipulador, así como las fuerzas inerciales presentes en cada eslabón. Se relacionan los resultados con base en las coordenadas del manipulador (eslabón cero).
  
4. Para cada borde del polígono de apoyo, se le define un vector unitario  $\mathbf{a}$  de tal manera que formen un ciclo, Figura 1.11. Si a cada punto de apoyo se le representa como coordenadas de los puntos de contacto en el suelo ( $p_1, p_2, \dots, p_n$ ), entonces los vectores unitarios de cada frontera de apoyo se calculan de la siguiente manera:

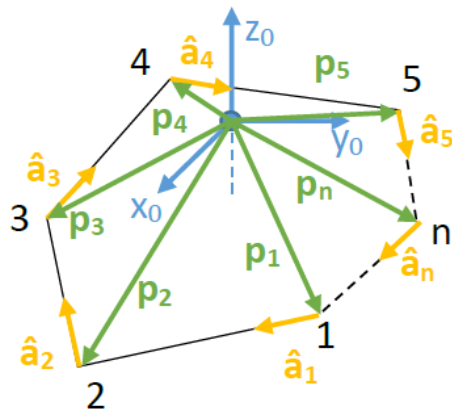


Figura 1.11. Vectores del Polígono de Apoyo

$$\hat{a}_i = \frac{p_{i+1} - p_i}{\|p_{i+1} - p_i\|} \quad i = \{1, 2, \dots, n - 1\} \quad (1.10)$$

$$\hat{a}_i = \frac{p_{i+1} - p_i}{\|p_{i+1} - p_i\|} \quad (1.11)$$

5. Se calculan las resultantes de las fuerzas y de los momentos externos que sufre la base del manipulador generando las proyecciones hacia cada uno de los bordes de apoyo, los cuales son nombrados como  $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_n$ .
6. Finalmente, la medida dinámica del MHS  $\alpha$  se define de la siguiente forma:

$$\alpha = \min(\alpha_i) \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1.12)$$

donde  $\alpha_i$  denota el margen de estabilidad dinámica respecto al  $i$ -ésimo borde de apoyo, el cual se expresa de la siguiente forma:

$$\alpha_i = (I_{vi})^{\sigma_i} (M_i \cdot \hat{a}_i) \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1.13)$$

donde  $I_{vi}$  es el momento de inercia base respecto al  $i$ -ésimo borde de la frontera límite teniendo lo siguiente:

$$\sigma_i = \begin{cases} +1 & ; \text{si } (M_i \cdot \hat{a}_i) > 0 \\ -1 & ; \text{cualquier caso} \end{cases} \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1.14)$$

El criterio de MHS incorpora el momento de inercia de la base  $I_{vi}$  ya que es un factor importante si existe rotación en ella. En un caso estable, entre mayor sea el momento de inercia, la estabilidad será más segura; dentro del mismo caso, si se presenta inestabilidad, entre más grande sea el valor del momento de inercia, causa la lenta aparición de inestabilidad Tip-Over, dando la posibilidad a que exista una compensación.

El producto entre los momentos  $\mathbf{M}_i$  y vectores unitarios  $\mathbf{a}_i$  implica que, si el momento respecto a un borde se encuentra estabilizado, el valor de  $\alpha_i$  será positivo, y si se encuentra desestabilizándolo, será negativo. Cuando el valor mínimo de todos los

márgenes de estabilidad es igual a la medida del MHS, su valor es positivo y el sistema es estable: si se registran valores negativos, representa que el sistema está entrando en inestabilidad y si hay valores igual a cero, esto representa una estabilidad crítica.

La medida del MHS se puede mejorar, ya que no muestra sensibilidad a la altura del centro de masa  $h_{c.m.}$  del manipulador, tal como lo muestra la Figura 1.12., por ejemplo, si se aplica una perturbación a un c.m. que está a una altura mayor, tenderá a volcarse fácilmente.

Por lo que, a la medida obtenida anteriormente, se le incorpora el c.m., teniendo lo siguiente:

$$\alpha = (h_{c.m.})^\lambda \min(\alpha_i) \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1.15)$$

$$\lambda = \begin{cases} +1 & ; \text{si } \min(\alpha_i) > 0 \\ -1 & ; \text{cualquier caso} \end{cases} \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1.16)$$

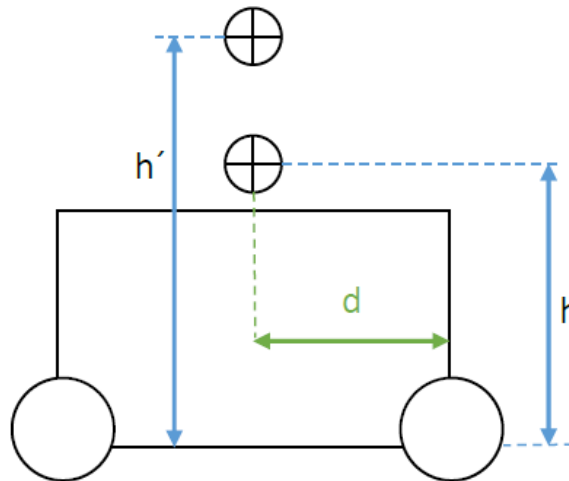


Figura 1.12. Insensibilidad al cambio en la altura del centro de masa.

El valor del MHS puede ser normalizado de la siguiente manera:

$$\hat{\alpha} = \frac{(h_{c.m.})^\lambda (\min(\alpha_i))}{((h_{c.m.})_{nom})^{\lambda_{nom}} (\min(\alpha_i))_{nom}} \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1.15)$$

donde  $\hat{a}$  es el margen dinámico de estabilidad normalizado referido al valor nominal (nom).

Con el fin de poder realizar una comparación del sistema, normalizar el procedimiento beneficia a obtener resultados reales y significativos.

En resumen, para conocer el valor del MHS se necesita:

- a) Todos los ángulos de articulación, velocidades y aceleraciones para calcular la relación entre el manipulador plataforma (eslabón cero).
- b) La velocidad lineal y angular, así como la aceleración de la base móvil.
- c) Conocer todas las fuerzas y momentos externos del sistema.

### 1.5.3.- Estabilidad Fuerza-Ángulo (Force-Angle Stability FA)

El criterio de Fuerza-Ángulo 16,17,18,19 fue propuesto por Evangelos G. Papadopoulus Daniel A. Rey del Departamento de Ingeniería Mecánica y el Centro para Máquinas Inteligentes de la Universidad McGill el cual considera que la suma de fuerzas que actúan en el manipulador genera dos ejes de volcadura con respecto al centro de masa y la superficie de contacto; entre éstas dos existen dos ángulos que delimitan la estabilidad del sistema de la siguiente forma:

Si la resultante, conformada por las fuerzas externas e inerciales, se ubica entre los ejes, el sistema se encuentra estable, si cae sobre los bordes o sale de ellos. se presentará volcadura en el manipulador.

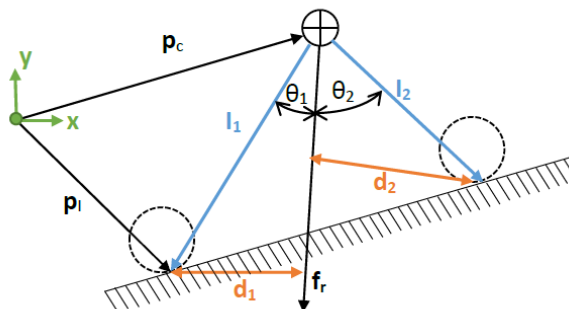


Figura 1.13. Medida del criterio FA en un caso plano.

En la Figura 1.13. se puede observar la representación del criterio, en donde se tiene el centro de masa (c.m.) y se encuentra sujeto a una fuerza resultante  $f_r$ , que es la suma de las fuerzas que actúan en el vehículo. Esta fuerza subtiende dos ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$ , con los ejes de volcadura denominados  $l_1$  e  $l_2$ .

El método de FA es dado como el mínimo de los dos ángulos, denotado por la magnitud del vector  $f_r$  para sensibilidad por pesadez. Matemáticamente se tiene:

$$\alpha = \theta_1 \|f_r\| \quad (1.16)$$

El factor crítico de estabilidad se presenta cuando  $\alpha$  tiende a cero, por ejemplo, si algún ángulo  $\theta_i$ , la distancia  $d_i$ , o la fuerza resultante  $f_r$ , se vuelven cero. Esto sucede cuando la resultante  $f_r$  se encuentra dentro del mismo plano que los ejes  $l_1$  o  $l_2$ , ayudando a la aparición de volcadura en alguno de ellos.

Para un vehículo que sea capaz de ajustar la altura del c.m. o que contenga carga variable, Figura 1.14. es importante que el margen de estabilidad sea ajustable a la reducción de estabilidad asociada con el incremento de su altura a lo largo de la fuerza resultante; si se incrementa esta altura, el valor  $\alpha$  disminuye, así como el ángulo.

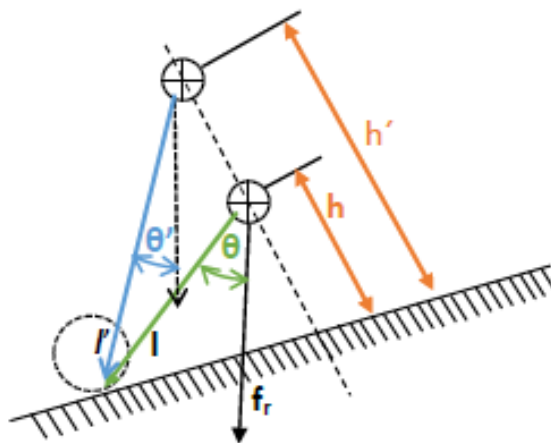


Figura 1.14. Efecto de la altura del Centro de Masa.



El uso del c.m. mejora la medida del FA volviéndolo más sensible a los cambios en su altura, obteniendo con mayor precisión la susceptibilidad de volcadura en todo el sistema.

Para todos los puntos de contacto del manipulador, solamente es necesario considerar aquellos que formen un polígono de apoyo convexo al proyectarlos sobre el plano horizontal. Si para cada uno de ellos se representa su posición como el *i*-ésimo punto de contacto, estos se representan de la siguiente forma:

$$p_i = [p_x p_y p_z]_i^T \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1.17)$$

Las líneas en donde se junte un punto de contacto son candidatas para presentar un eje de volcadura, denominadas  $a_i$  y el conjunto de ellas se le conoce como frontera de apoyo, estas se definen de la siguiente manera:

$$a_i = p_{i+1} - p_i \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1.18)$$

$$a_n = p_1 - p_n \quad (1.19)$$

Con el fin de determinar un orden, se requiere que se enumeren de forma ascendente o por medio de la regla de la mano derecha, esto es, para obtener el conjunto de ejes en donde sus direcciones coincidan con los momentos que mantengan estable al sistema, como se aprecia en la Figura 1.15.

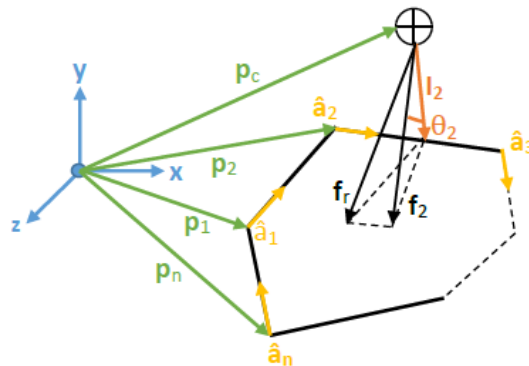


Figura 1.15 Medida del Criterio en 3D.

Cuando se presenta volcadura, ésta se da sobre algún eje debido a algún cambio en el suelo donde opera, determinado por cada vector  $\hat{a}$ . En este caso, el vehículo experimenta una rotación sobre un eje que posee combinaciones lineales del eje de volcadura con el punto de contacto que se encuentra en el suelo.

En este caso en particular, la medición de estabilidad será cero, posteriormente se volverá negativo por cada eje que contribuya a la volcadura, por lo que, no es necesario identificar ese eje, dejando que los ejes normales de volcadura intersecten el c.m. del vehículo, estos se pueden definir lo largo de cada eje restando de ellos  $(p_{i+1} - p_c)$ , por ejemplo:

$$I_i = (\mathbf{1} - \hat{a}_i \hat{a}_i^T)(p_{i+1} - p_c) \quad (1.20)$$

donde  $\mathbf{1}$  es una matriz de 3x3,  $p_c$  es la posición del c.m. y  $p_i$  el punto de contacto de cada punto de contacto del manipulador.

Dado que el criterio se basa en conocer los valores del ángulo entre la fuerza resultante y cada uno de los ejes de volcadura, es necesario determinar si el momento que ejerce sobre el c.m. recae sobre el plano normal; siendo este momento sustituido por un par (o fuerza equivalente), el cual proyecta sobre el plano, Figura 1.16. Si este último pasa por el c.m. del sistema y por alguna de las líneas de los ejes de volcadura, se determina de la siguiente forma:

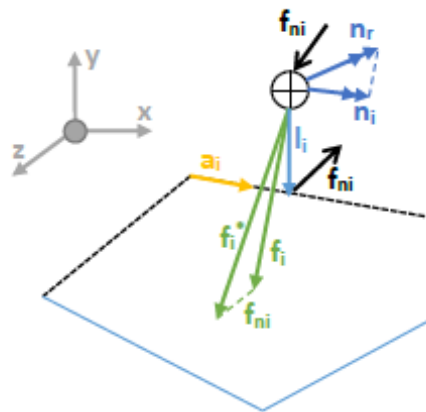


Figura 1.16. Uso de fuerzas equivalentes (par) para reemplazar el momento en el c.m.

$$f_{ni} = \frac{\hat{I}_i x n_i}{\|I_i\|} \quad (1.21)$$

donde  $\hat{I}_i = \frac{I_i}{\|I_i\|}$ . El nuevo vector  $f_i^*$  para el  $i$ -ésimo eje de volcadura se obtiene de la siguiente forma:

$$f_i^* = f_i + \frac{\hat{I}_i x n_i}{\|I_i\|} \quad (1.22)$$

Al tener la fuerza resultante y los ejes de volcadura en su proyección dentro del plano normal, se procede a determinar los ángulos que intervienen en la medición del método, por lo que se tiene:

$$\theta_i = \sigma_i \cos^{-1}(\hat{f}_i^* \cdot \hat{I}_i) \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1.23)$$

donde  $-\pi \leq \theta_i \leq \pi$ . El signo de  $\theta_i$  se determina por  $\sigma_i$  de la siguiente forma:

$$\sigma_i \begin{cases} +1 & ; (\hat{I}_i x \hat{f}_i^*) \hat{a}_i > 0 \\ -1 & ; \text{cualquier caso} \end{cases} \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1.24)$$

El valor escalar determina la medición instantánea de la estabilidad del sistema. La magnitud positiva describe el margen de un sistema estable. La estabilidad crítica del sistema se presenta si  $\alpha = 0$ , y si existiesen valores negativos, éste indica que se está presentando una volcadura. Para conocer el valor de estabilidad, se puede simplificar el valor de la medida de estabilidad con la siguiente expresión:

$$\alpha = \min(\theta_i) \|f_r\| \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1.25)$$

El ángulo mínimo es medido con base en  $\|f_r\|$ , ya que se busca obtener la sensibilidad generada por el peso y no en  $\|f_i\|$  el cual generará discontinuidades en

$\alpha$  cuando el eje de volcadura indexado en  $i$  se asocie con los cambios mínimos de  $\theta_1$ .

Al tener el margen global de estabilidad del sistema conocido con la ec.1.25, es recomendable monitorear este valor en cada uno de los ejes de volcadura, con lo cual se puede simplificar la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$\alpha = \theta_i \|f_r\| \quad (1.26)$$

## Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1.-El criterio MNGR Reacciones Normales Promedio

El criterio de las Reacciones Normales Promedio [47,48,49,52] fue propuesto por Souza et. al, y considera las reacciones normales en los apoyos de la plataforma móvil en pares y no de forma independiente, ya que el eje de Tip-Over se forma entre dos de ellas, Figura 2.1. Cuando el valor del borde en donde la magnitud sea mayor con respecto su contrario, se presentará volcadura sobre el sistema.

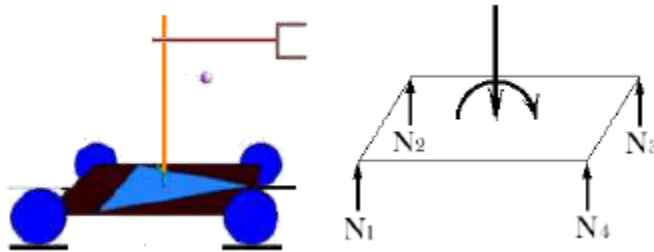


Figura 2.1 Reacciones en los apoyos del manipulador móvil. [48]

El criterio utilizado por [29] sistema puede permanecer en estado estable bajo la siguiente condición:

$$\begin{aligned} N_1 &> 0 \\ N_2 &> 0 \\ N_3 &> 0 \\ N_4 &> 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Sin embargo, el hecho de que una de las reacciones desaparezca no implica que el manipulador se desestabilice, ya que todo depende de la proyección del c.m. sobre el polígono de apoyo, si cae dentro o fuera de éste.

### 2.1.1- Altura del Centro de Masa

Para considerar la influencia de la altura del c.m. en el criterio de Estabilidad es necesario entender cómo afecta al equilibrio. En un caso estático sobre un plano horizontal la variación de la altura del c.m. no se vería reflejada en las reacciones en los apoyos.

Esto se puede ejemplificar en la Figura 2.2, en donde se tienen dos postes que soportan un bloque con un peso  $W$ . Donde las reacciones en la base de los postes son las mismas y se observa que la altura del c.m. no influye en la estabilidad del sistema.

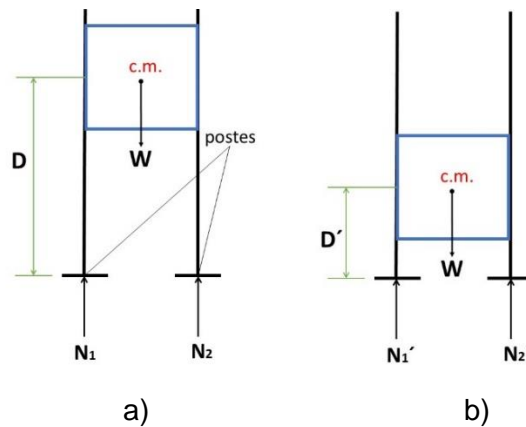


Figura 2.2. Condición en la que no influye la altura del c.m. a) c.m. elevado; y b) c.m. bajo [48]

De forma matemática, la condición de las reacciones en las que no influye el c.m. se expresa de la siguiente forma:

$$N_i = N_i' \quad i = \{1,2\}; i' = \{1',2'\} \quad (2.2)$$

Por lo contrario, si la superficie de apoyo se encuentra inclinada, la componente en  $x'$  del peso  $Wx'$  produce un momento capaz de influir de manera negativa en el equilibrio de la figura el cual es mayor para el bloque que se encuentra más alto, Figura 2.3a, en comparación con el momento producido por el bloque a menor altura, Figura 2.3b.

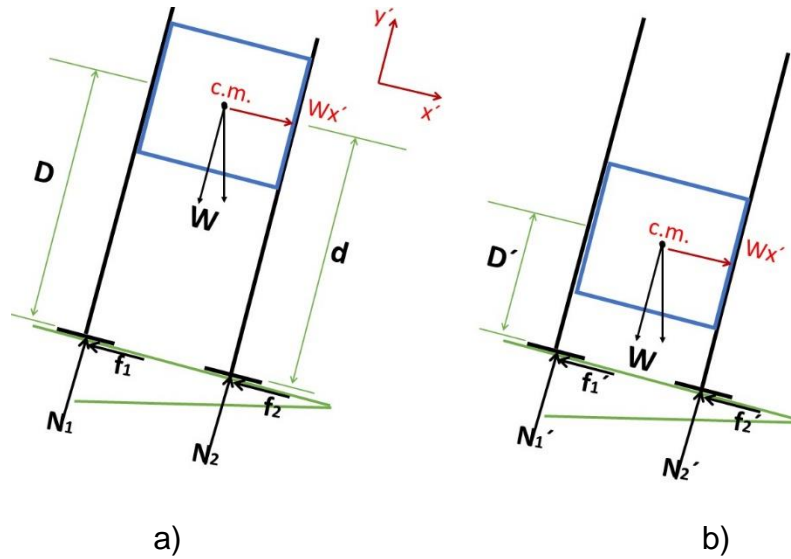


Figura 2.3. Condición en la que si influye la altura del c.m. a) c.m. elevado b) c.m. bajo.  
[48]

Al igual que en la condición anterior, ésta se puede expresar de forma matemática de la siguiente forma:

$$N_i \neq N_i' \quad i = \{1,2\}; \quad i' = \{1',2'\} \quad (2.3)$$

La altura del c.m. afecta de forma inversa la estabilidad del sistema, es decir, entre mayor sea esta, la estabilidad disminuirá.

Debido a la suposición de que a mayor altura se encuentre el c.m. la estabilidad disminuye, entonces la altura  $h$  debe ser insertada en la medida y ser inversamente proporcional a ésta, matemáticamente se tiene:

$$\alpha = \frac{1}{h}K = h^{-1}K \quad (2.4)$$

donde:

$\alpha$  = medida de estabilidad

$h$  = Altura del c.m.

$K$  = Escalar

### 2.1.2.- Medida de Estabilidad.

La medida de la estabilidad sobre cada borde se obtiene de la siguiente forma:

$$a_i = \frac{N_i + N_{i+1}}{2} \quad i = \{1, 2, \dots, n - 1\} \quad (2.5)$$

$$a_n = \frac{N_1 + N_n}{2} \quad (2.6)$$

donde:

n es el número de apoyos del manipulador móvil.

N<sub>i</sub> es la reacción normal en el punto de apoyo de la plataforma móvil sobre el piso.

Las expresiones anteriores no son sensibles a la variación de la altura del centro de masa, por tanto, se deben multiplicar por el término  $(h_{c.m.})^{-1}$

$$a_i = (h_{c.m.})^{-1} * \frac{N_i + N_{i+1}}{2} \quad i = \{1, 2, \dots, n - 1\} \quad (2.7)$$

$$a_n = (h_{c.m.})^{-1} * \frac{N_1 + N_n}{2} \quad (2.8)$$

La medida dinámica del criterio es calculada siguiente manera:

$$\alpha = \min(a_i) \quad (2.9)$$

La medida puede ser normalizada como sigue:

$$\hat{a}_i = \frac{(h_{c.m.})^{-1} * \frac{N_i + N_{i+1}}{2}}{((h_{c.m.})_{nom})^{-1} * \left(\frac{N_i + N_{i+1}}{2}\right)_{nom}} \quad i = \{1, 2, \dots, n - 1\} \quad (2.10)$$



$$\hat{a}_n = \frac{(h_{c.m.})^{-1 * \frac{N_1 + N_n}{2}}}{((h_{c.m.})_{nom})^{-1 * \left(\frac{N_1 + N_n}{2}\right)_{nom}}} \quad (2.11)$$

donde  $\hat{a}$  es el margen de estabilidad normalizada, el subíndice "nom" se refiere al valor nominal. La normalización es conveniente para poder hacer la comparación del comportamiento con otras medidas de estabilidad, así como, también para facilitar la interpretación del operador cuando se realice el monitoreo del margen de estabilidad.

## 2.2.- Caso Particular

El caso de una plataforma móvil con cuatro llantas, y un brazo de 3 GDL sujeta a cargas gravitacionales si el brazo experimenta un giro de base respecto a la plataforma móvil, cada una de las reacciones presentará una variación.

El estudio hasta este punto permitiría predecir la volcadura en el caso de que un par de reacciones adyacentes llegaran ser cero, sin embargo, no podríamos cuantificar que tan estable es el sistema ni tampoco se podría definir sobre que borde de frontera de apoyo se volcaría (eje de Tip-Over)

Los criterios de estabilidad anteriores han sido implementados tanto en manipuladores móviles autónomos como en manipuladores móviles operados por seres humanos, gran parte de la evolución de los algoritmos radica en el requerimiento computacional con el fin de poder tener una mayor velocidad de respuesta del sistema.

El MNGR desarrollado por Souza et. al [48], hasta el momento ha presentado menor requerimiento computacional respecto a los existentes y lo que se busca es implementarlo en cualquier tipo de manipulador móvil, para ello se requieren realizar diversas pruebas que demuestren la efectividad de dicho criterio.

## 2.3. Instrumentación del manipulador

El criterio de estabilidad requiere conocer las reacciones normales  $N_i$  en los apoyos de la plataforma móvil (ruedas o estabilizadores), ello se llevará a cabo a través de la teoría de esfuerzos y deformaciones, por lo cual, es necesario instrumentar a la

plataforma móvil con strain gages en puntos estratégicos que nos permitan medir la deformación en dichos puntos.

Tal como lo establece el criterio de estabilidad, se instrumentó el chasis con strain gages de la serie EA-13-060LZ-120/E de Micro-Measurements Figura 2.4., los sensores son para aluminio ya que todo el prototipo es de este material.



Figura 2.4. Prototipo Instrumentado

Para calcular las reacciones en los apoyos “N<sub>i</sub>” se utilizaron las expresiones de esfuerzo normal en flexión, ecuación 2.12 y la relación esfuerzo-deformación, ecuación. 2.13 de acuerdo al esquema de la Figura 2.5.

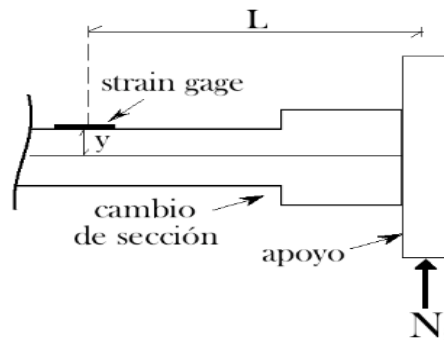


Figura 2.5. Consideraciones geométricas del brazo del chasis instrumentado

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{(LN_i)h/2}{bh^3/12} = \frac{6LN_i}{bh^2} \quad (2.12)$$

$$\sigma = \varepsilon E \quad (2.13)$$

Se igualan la ecuación 2.12 y la ecuación 2.13, y se despeja la reacción normal  $N_i$  del apoyo

$$N_i = \frac{\varepsilon E b h^2}{6L} \quad (2.14)$$

L (m)	y (m)	b (m)	h (m)
0.034	0.0015	0.0256	0.003

**Tabla 2.1.** Parámetros geométricos del brazo del chasis

El módulo elástico del aluminio se determinó aprovechando la colocación de los strain gages en el chasis, en uno de los brazos se fueron colocando pesas, mientras la parte central del bastidor estaba fija, con los puntos obtenidos de la prueba se realizó un ajuste lineal para conocer el valor de la pendiente del diagrama Esfuerzo-Deformación. El módulo resultante fue de 46.4 GPa. el cual difiere de manera importante ya que el valor nominal del material es casi de 70 MPa.

## Capítulo 3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Por medio de la instrumentación de la base del manipulador se pueden obtener las reacciones en los apoyos ya que el criterio de estabilidad se basa en ellas.

Posteriormente, por medio de una tarjeta de adquisición de datos compuesta por un Puente de Wheatstone se obtienen las deformaciones (sin necesidad de acondicionamiento de la señal) en los puntos donde fueron colocados los strain gages.

Con los datos adquiridos, se realiza el procesamiento adecuado de las señales para la medición de la estabilidad de la plataforma para su posterior visualización e interpretación, por medio de un software visual gráfico se despliega la información en un instrumento virtual, que proporciona información inmediata sobre el grado de estabilidad en el que se encuentra la plataforma móvil.

La visualización muestra que tan propensa está la plataforma a volcarse. Una vez instrumentado el prototipo, se realizaron las pruebas de estabilidad moviendo el brazo mecánico buscando que el centro de masa vaya cambiando de posición mientras se va monitoreando en tiempo real la estabilidad del manipulador. Todo el proceso puede ser observado en la Figura 3.1.

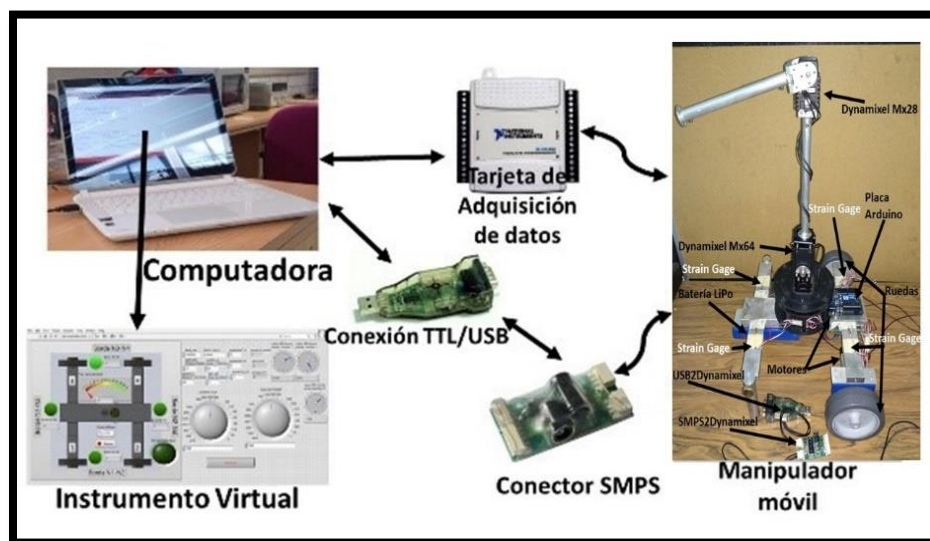


Figura 3.1. Esquema del Sistema de Medición de Estabilidad

### 3.1.- Extensometría Eléctrica.

La instrumentación es la parte de la electrónica, principalmente analógica, que se encarga del diseño y manejo de los aparatos electrónicos y eléctricos, sobre todo para su uso en mediciones. Se aplica en el censado y procesamiento de la información proveniente de variables físicas y químicas; a partir de las cuales realiza el monitoreo y control de procesos, empleando dispositivos electrónicos, siendo el sensor un elemento imprescindible para la toma de medidas

Para analizar el comportamiento mecánico de un material, es necesario someterlo a una carga y medir las deformaciones, para este caso, se recurre al uso de extensómetros o galgas extensométricas (strain gages) el cual es un accesorio de medición que se utiliza para determinar las deformaciones de una probeta sujeta a una carga utilizando la ley de Hooke.

No solo es usado para medir deformaciones, también es utilizado para medir presión, carga, torque, posición etc.

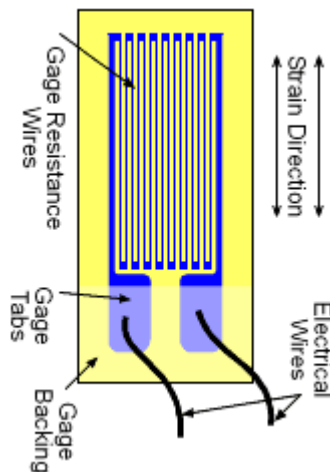


Figura 3.2 Esquema de un Extensómetro con terminales. [53]

Consiste en un cable muy fino dispuesto en forma de red o cuadrícula, la cual maximiza la cantidad de metal sujeto al esfuerzo en dirección paralela. Se encuentra pegada a un fino respaldo o soporte llamado "carrier", el cual está sujeto directamente a la pieza bajo medida; por lo tanto, el esfuerzo experimentado por la pieza es transferido directamente al extensómetro, el cual responde con cambios lineales de resistencia eléctrica.

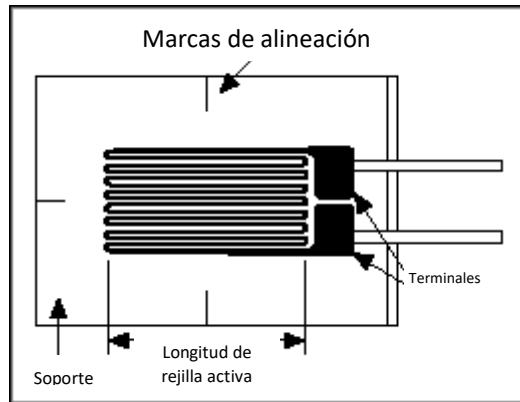


Figura 3.3 Galga Extensométrica. [54]

Se entiende por deformación a la variación del desplazamiento que adquiere un cuerpo debido a la fuerza aplicada sobre él. Si se pone en términos matemáticos, la deformación ( $\epsilon$ ) se define como la fracción de cambio en longitud, como se muestra en la figura siguiente:

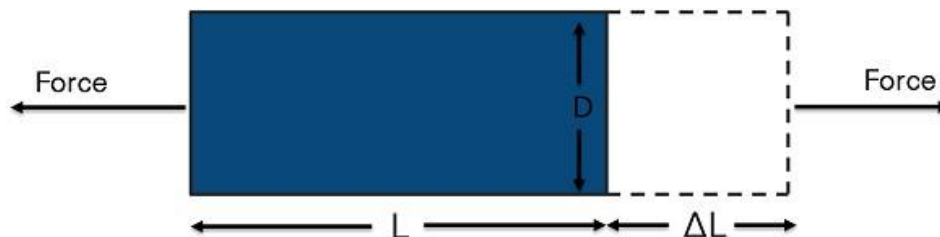


Figura 3.4 Definición de Deformación Unitaria [55]

El signo de la deformación es determinado por la dirección ya sea tensión (positivo "+") o compresión (Negativo "-") y es adimensional. En la práctica, al realizar mediciones con strain gages, la sensibilidad mínima de la galga es de  $1 \times 10^{-6}$  micro deformaciones ( $\mu\epsilon$ ).

Se basa en el cambio de resistencia que se obtiene al someter la probeta a tensión o compresión. El método utilizado es el método puntual, mediante un extensómetro, dispositivo cuya resistencia eléctrica varía de forma proporcional al esfuerzo a que éste es sometido.

Un parámetro fundamental de los extensómetros es la sensibilidad al esfuerzo, expresado cuantitativamente como Factor de Galga. El Factor de Galga de un extensómetro es dado por el fabricante, el cual se denomina factor de calibración, en inglés "Gage Factor" que se debe conocer para ingresarlo en el equipo de medición. Es definido como la relación de variación fraccional de resistencia eléctrica y la variación fraccional de longitud.

### 3.1.1- Mediciones con Galgas Extensométricas.

En la práctica, las mediciones con extensómetros raramente involucran cantidades mayores que unas pocas micro deformaciones ( $\mu\epsilon$ ), por lo tanto, para medir las deformaciones y posteriormente aplicar la Ley de Hooke se requiere de máxima precisión sobre pequeños cambios de resistencia.

El factor de galga es la calibración que proporciona el fabricante de las galgas. Suponiendo que una pieza de prueba sufre una deformación de  $500 \mu\epsilon$ , un extensómetro con un factor de galga de 2 mostrará un cambio en su resistencia eléctrica de  $2 \cdot (500 \cdot 10^{-6}) = 0.1\%$ . Para una galga de  $120 \Omega$ , es un cambio solo de  $0.12 \Omega$ . Para medir cambios tan pequeños de resistencia y compensar la sensibilidad térmica, los extensómetros son medibles mediante una configuración de resistencias conocida como Puente de Wheatstone.

El circuito general del puente de Wheatstone (Figura 3.4), consiste en cuatro brazos resistivos con una excitación de voltaje,  $V_{EX}$ , que se aplica a través del puente. El voltaje de salida del puente,  $V_0$ , es igual a la siguiente ecuación (3.1):

$$V_0 \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_3} \right) * V_{EX} \quad (3.1)$$

Donde:

$R_1$  = Resistencia 1

$R_2$  = Resistencia 2

$R_3$  = Resistencia 3

$R_4$  = Resistencia 4

C = Compresión

T = Tensión

$V_{EX}$  = Voltaje Exterior

$V_0$  = Voltaje 0

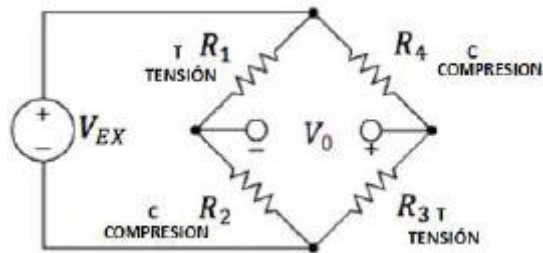


Figura 3.4. Esquema del puente de Wheatstone [54]

De la ecuación anterior, cuando se da que  $R_1/R_2=R_4/R_3$ , el voltaje de salida  $V_0$  es nulo. Bajo estas condiciones, se dice que el puente se encuentra balanceado. Cualquier cambio de resistencia sobre cualquier brazo del puente, resulta en una salida del voltaje no nula. Por lo que, si se reemplaza  $R_4$  con un extensómetro activo, cualquier cambio en la resistencia del extensómetro causará el desbalance del puente y producirá una salida no nula proporcional al voltaje producido por la carga aplicada.

Para realizar las mediciones de la deformación experimentada por cada extensómetro, se utilizó un indicador de deformaciones portátil P-3. La conexión de cada extensómetro al dispositivo de medición fue en un arreglo de cuarto de puente (Figura 3.5) debido a que nos interesaba seguir la evolución de la deformación en cada uno de ellos.

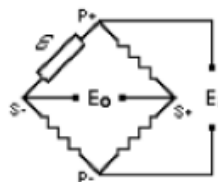


Figura 3.5. Arreglo de resistencias en  $\frac{1}{4}$  de puente. [54]



### **3.2 INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL (VI)**

En la mayoría de las veces, al momento de realizar una medición se requiere la utilización de diferentes instrumentos. Al conjunto de instrumentos que realizan mediciones o generan algún estímulo sobre lo que se necesite se le llama Sistema de Instrumentación.

Sus componentes esenciales son los instrumentos, su forma de conexión y un controlador que gestiona el funcionamiento de todo el sistema y permite ejercer las ordenes necesarias para su correcto funcionamiento.

El concepto de instrumentación virtual (VI) nace a partir del uso de las computadoras, ya que permite a los usuarios reemplazar el equipo físico existente por uno que no es real, permitiéndole realizar las mismas acciones como si estuviera trabajando con el equipo, sólo que mediante un software que se ejecuta con el ordenador. Involucra la sustitución de estos instrumentos por software integrado en un programa, el cual, se comunica con los dispositivos para configurarlos y poder leer las medidas del medio externo [78].

Para llevar a cabo estas funciones, se necesita que estos sistemas tengan una adquisición de datos, procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de los mismos, Figura 3.6; para que, a su vez, al momento de que tenga esa información esta pueda ser llevada a una interfaz hombre-máquina, se pueden visualizar y realizar las acciones necesarias con ella.

En la mayor parte de los casos, el usuario final, solo podrá observar la representación gráfica de los elementos virtuales presentados por el programa.

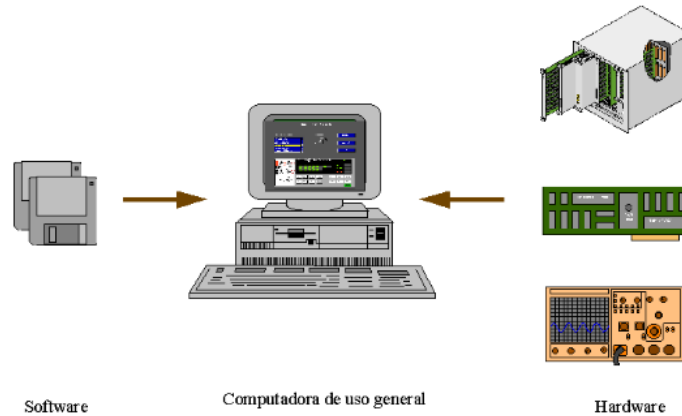


Figura 3.6. Esquema General de un Sistema de Instrumentación Virtual [56]

A diferencia de los instrumentos tradicionales, este sistema permite que el usuario diseñe de acuerdo con sus necesidades y sus funciones pueden ser cambiadas modificando el programa, todo esto gracias a que es altamente flexible. Estas características convierten a los Instrumentos Virtuales en una herramienta didáctica muy importante para el aprendizaje de estos sistemas [57].

Para este trabajo en particular se realizó la instrumentación tomando como base el software NI LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) y tarjetas de adquisición de datos NI DAQ (Data Aquisition) de la compañía National Instruments.

La instrumentación virtual se compone de la siguiente manera:

- Medio físico a medir: Se constituye de los diferentes prototipos que están previamente instrumentados mediante strain gages, los cuales proporcionarían la medida de deformación presente.
- El sistema de Adquisición de Datos: Lo conforma la tarjeta de adquisición NI 9237 con sus diferentes accesorios para realizar su conexión entre el medio físico y la computadora, entre los cuales, para este modelo en específico se tiene:

- Chasis NI DAQ-9991 para la habilitación de las conexiones de forma inalámbrica (WiFi) entre los componentes.
  - Adaptador NI 9949 de conexión R50 para la conexión de 1/4 de puente de los strain gages
  - Cable de conexión RJ50 para la comunicación entre el adaptador y la tarjeta.
- La computadora y el software: Este es el equipo en donde se trabajó el sistema, así como el uso del programa NI LabVIEW, en donde se realizó la programación del VI para la Medición de Estabilidad.

### **3.3 LabVIEW de National Instruments**

LabVIEW es un programa de lenguaje gráfico que utiliza iconos o imágenes en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones al contrario que los lenguajes de programación basados en textos donde las instrucciones determina la ejecución del programa LabVIEW utiliza una programación donde la información fluye y determina cómo se Ejecutan estos programas [58]

El objetivo principal de utilizar LabVIEW es porque una de sus funciones principales es para poder obtener una gran cantidad de datos, esto es, gracias a una tarjeta de adquisición de datos de la misma marca (National instruments) la cual, nos permite obtener información de la deformación que se genera en uno o en ciertos puntos por medio de sensores los cuales son galgas extensométricas.

El entorno principal o la página principal de LabVIEW nos muestra que tiene plantillas conocidas como Instrumentos virtuales o VI (por sus siglas en inglés) porque su apariencia y operación imita la de los instrumentos físicos como los osciloscopios y los multímetros cada instrumento virtual utiliza funciones para manipular la información que obtienen de distintos sensores [58] en el caso particular del presente proyecto se está utilizando la tarjeta de adquisición de datos NI 9237 con la cual podemos medir micro deformaciones.

La estructura de nuestro instrumento virtual contiene tres componentes dentro de ellos podemos encontrar:

- **El panel frontal-** El cual nos sirve para emular la interfaz de usuario
- **El diagrama de bloques-** Contiene los recursos gráficos de código que define la funcionalidad de nuestro instrumento virtual.
- **Panel de iconos y conectores-** Con el que se identifica al instrumento virtual y puede ser utilizado dentro de otro VI creando así subVIs. Un subVI corresponde a una subrutina basada en lenguajes de programación.

### 3.3.1. El panel frontal

Es el espacio en donde se puede emular la interfaz del usuario por medio de una serie de herramientas que posee el programa conocidas como controles e indicadores las cuales son, las terminales de entrada y de salida del Instrumento Virtual, respectivamente.

Los controles simulan a los instrumentos de entrada de los dispositivos además de proporcionar información al diagrama de bloques del Instrumento Virtual, algunos controles son los knobs, botones, dials, entre otros.

Por otra parte, los indicadores simulan a los instrumentos de salida de los dispositivos y muestran los datos que el diagrama de bloques adquiere o genera, mostrándolo en graficas o datos, ciertos de los indicadores más comunes son los generadores de gráficos, LED's, displays con datos, entre otros.

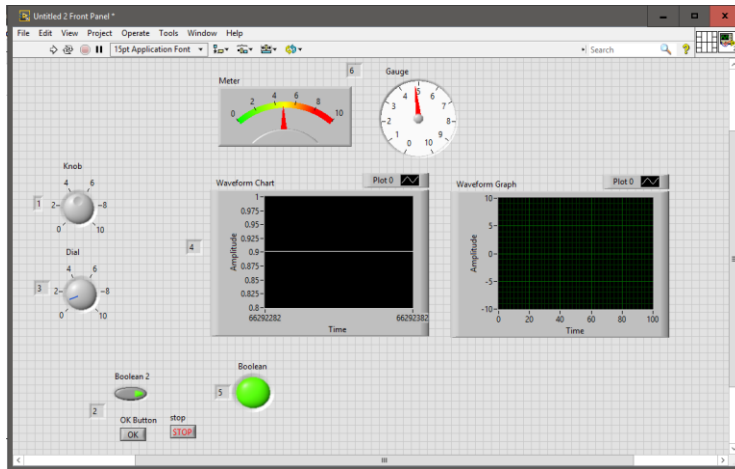


Figura 3.7. 1 y 3) Knobs y dials respectivamente, encargados de proporcionar la entrada de datos al diagrama de bloques. 2) Botones, emulan a los botones físicos de entrada. 4) display con gráficas, simulan las pantallas de los dispositivos. 5) Indicadores LED's.

### 3.3.2. Diagrama de bloques

El diagrama de bloques es el equivalente a la estructura de un programa, que utiliza representación gráfica de funciones para controlar los objetos dentro del panel frontal ya que dentro de éste se encuentra el código de programación en forma gráfica.

Los objetos dentro del panel frontal aparecen en forma de “terminales” dentro del diagrama de bloques como se puede observar en la siguiente figura.

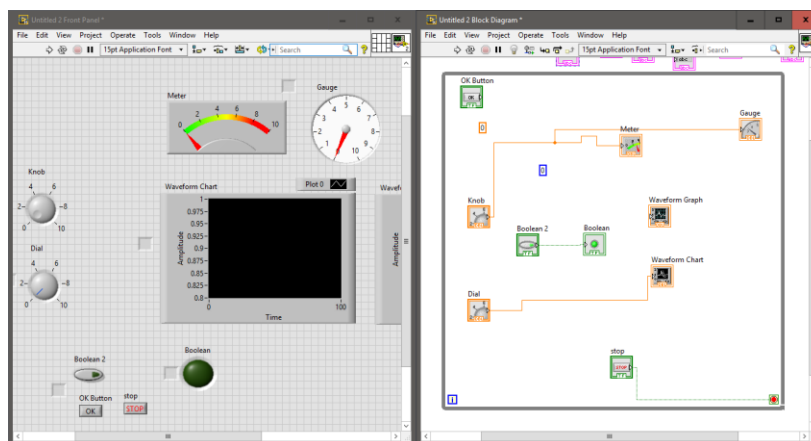


Figura 3.8.- Ejemplo de un Diagrama de Bloques (Derecha) y su correspondiente Panel Frontal (Izquierda)

Dentro del diagrama de bloques se puede encontrar una serie de controles e indicadores que llegan a funcionar como objetos de entrada o salida de datos, los más utilizados son: Las Terminales (Figura 3.9.), Nodos (Figura 3.10.), Conectores o Cables (Wires) (Figura 3.11.) y Estructuras (Figura 3.12.).

Terminales (Fig. 3.9.): Las terminales representan los datos o la información del control o del indicador usado. Sirven como puertos de entrada y de salida que intercambian información entre el panel frontal y el diagrama de bloques.

La información que se introduce en el panel frontal entra al diagrama de bloques a través de los controles de la terminal y entran en las terminales del indicador para salir del diagrama de bloques e ingresar al panel frontal para finalmente aparecer en los paneles de los indicadores, como se puede notar en la figura de arriba. Tanto los controles como los indicadores pueden ser configurados para que aparezcan como iconos o terminales en forma de datos. Por default, los objetos dentro del panel frontal aparecen como terminales en forma de icono Figura 3.9.



Figura 3.9. Icono de terminal

Nodos: Los nodos son objetos dentro del diagrama de bloques que tienen entradas y/o salidas y que pueden realizar operaciones cuando un VI corre. Son análogos a las declaraciones, a los operadores, funciones y subrutinas en lenguajes de programación basada en texto. Las funciones suma y resta (Figura 3.10.) son un ejemplo de nodos.



Figura 3.10. Iconos de Nodo

Conectores (Wires): La forma de transferir datos e información a través del diagrama de bloques es por medio de conectores. Cada uno de ellos posee una única fuente de datos, sin embargo, se pueden realizar tantas conexiones como

sean necesarias para que la información y los datos de cada VI puedan ser transferidos y leídos.

Los conectores poseen diferentes colores, estilos y grosor dependiendo de los tipos de información que transfieran. Si un conector no coincide con los tipos de datos que se pueden transferir o se elimina una terminal del conector aparecerá como roto en forma de una línea de color negro con una cruz roja en medio (Figura 3.11.).

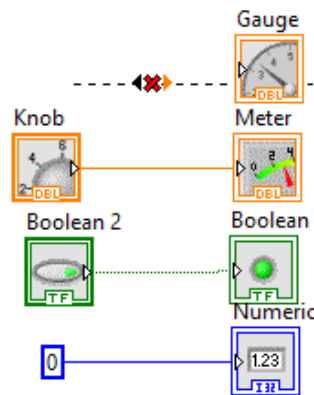


Figura 3.11. Iconos de Conectores

Estructuras (Figura 3.12.): Las estructuras son representaciones gráficas de los bucles o loops y las declaraciones de los lenguajes de programación basados en texto. Al ser usadas en el diagrama de bloques se pueden repetir bloques de código, así como ejecutar el código de forma condicional o en un orden en específico tal como en otros programas.

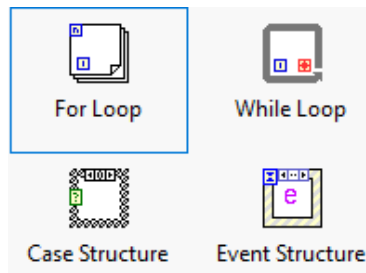


Figura 3.12. Iconos de Estructuras

### 3.3.3.- Panel de Iconos y conectores

Los iconos son representaciones gráficas de un Instrumento Virtual y puede contener textos, imágenes o una combinación de ambos (Figura 3.13). Son generados a partir de Instrumentos Virtuales finalizados y que, en conjunto con el

panel de conectores el Instrumento Virtual puede ser utilizado como un sub-Instrumento Virtual o subVI además que el subVI es capaz de identificar el icono del Instrumento Virtual.

Aparte de la representación gráfica es necesario tener el conjunto de terminales que corresponden a los controles y los indicadores del Instrumento Virtual además de definir las entradas y salidas que puedes conectar del VI al subVI. El encargado de realizar todo es el panel de conectores ya que recibe los datos de las terminales de entrada y la envía al diagrama de bloques a través de los controles del panel frontal resultando en las terminales de salida de los indicadores del panel frontal.

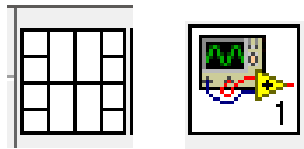


Figura 3.13. Panel de iconos (izquierda) y panel de conectores (derecha)

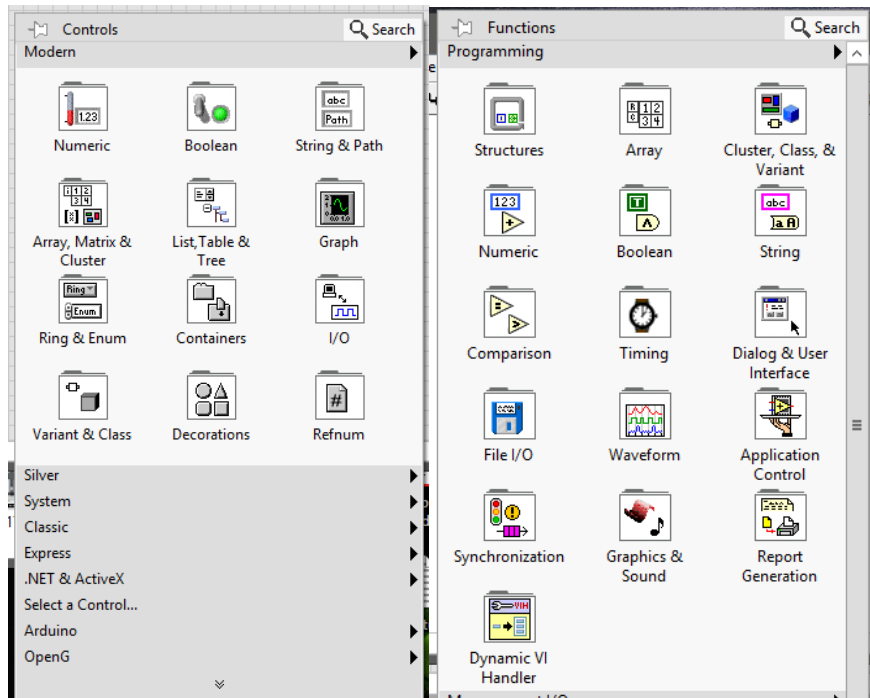
### 3.3.4 Entorno de trabajo en LabVIEW

El ambiente de trabajo de LabVIEW es generado gracias a las paletas de controles, de funciones, así como las barras de herramientas y de menú, ya que, cada una de ellas posee los elementos necesarios para generar un instrumento virtual tanto en el panel frontal como en el diagrama de bloques respectivamente.

Paleta de controles- Dentro de esta paleta se pueden encontrar los controles e indicadores necesarios para crear el panel frontal, cada uno de los controles e indicadores se encuentran en sub-paletas dependiendo del tipo de estas como muestra la Figura 3.14a.

Paleta de funciones- A diferencia de la paleta de controles, esta solo se puede encontrar en el diagrama de bloques y contiene las funciones necesarias para configurar y crear un diagrama de bloques. Los instrumentos virtuales y las funciones se encuentran en sub-paletas dependiendo del tipo de VIs y de funciones como se muestra en la Figura 3.14b.





a)

b)

Figura 3.14. Paletas del entorno de LabVIEW a) Paleta de Controles. b) Paleta de funciones.

### 3.4.- Elaboración del Instrumento Virtual

Para la realización de este trabajo se optó por la creación de un instrumento virtual, ya que el programa nos permite obtener los datos de micro deformaciones por medio de galgas extensométricas las cuales fueron previamente instaladas en los apoyos de la plataforma para obtener los valores se utiliza una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) de National Instruments.

El VI consta de un Panel Frontal con una interfaz sencilla y de fácil interpretación, la cual simplifica la forma en que se visualizará la información que se esté recibiendo y permitirá que se realice la acción correctiva pertinente de acuerdo a lo mostrado. En la Figura 3.15. se presenta el Panel Frontal y a continuación se describe los elementos presentes.

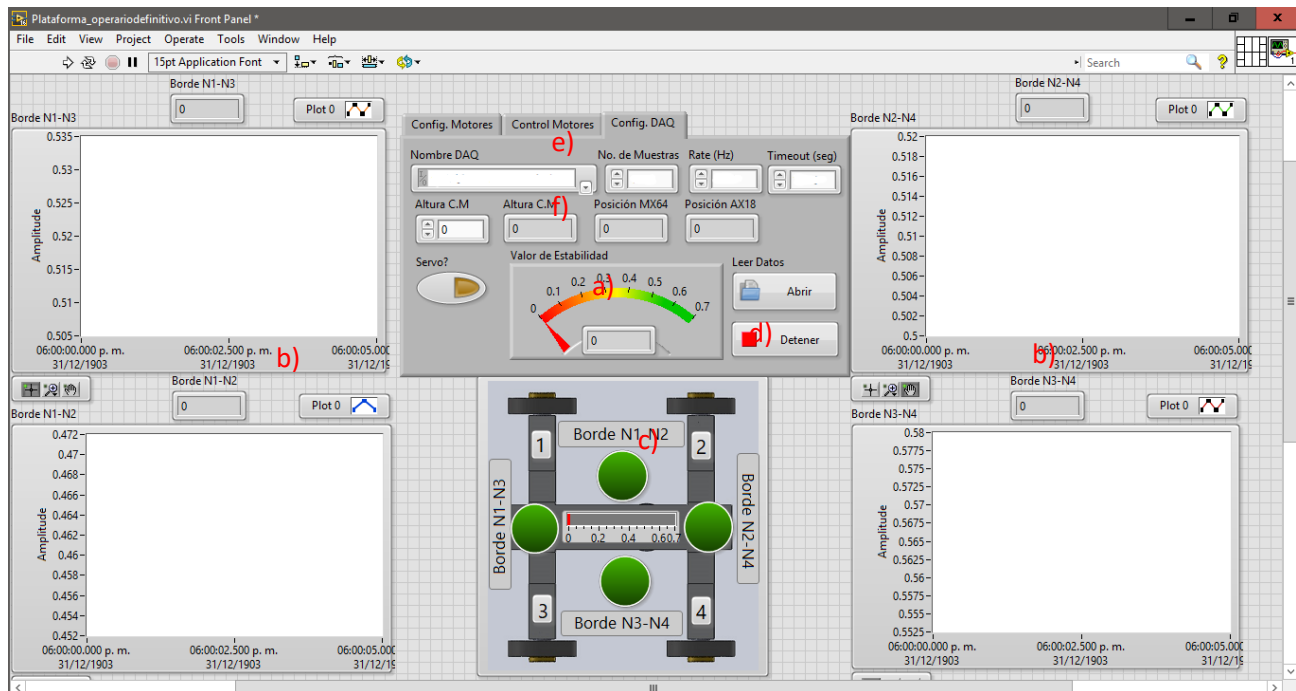


Figura 3.15. Panel Frontal del instrumento virtual. a) Indicador de estabilidad b) Display de las gráficas con el valor de reacción en cada borde c) vista superior de la plataforma en donde se establecen los bordes de apoyo en donde se puede presentar la volcadura d) Botón de paro del sistema e) valores para la configuración de la adquisición de datos desde la tarjeta f) altura del centro de masa y posiciones de los servos.

La Figura 3.15c. nos muestra una vista superior de la plataforma en donde se establecen los 4 miembros de la plataforma (soportes), definidos del 1 al 4, así como los bordes de apoyo, cada uno con un indicador LED el cual, se enciende si el brazo manipulador se encuentra posicionado sobre alguno de estos y dependiendo del valor de estabilidad, poder ocasionar volcadura sobre el borde.

Cada borde (N1-N2, N2-N4, N3-N4, N1-N3) cuenta con un indicador numérico que muestra el valor de la reacción presente en ellos, visualización de la información recibida de la tarjeta DAQ mediante gráficas para cada uno de los bordes, estas permiten observar el comportamiento en tiempo real del valor de estabilidad y comparar cada uno de los valores.

En la parte central inferior (Figura 3.15b) se tiene un indicador con el valor de estabilidad presente en el prototipo que muestra valores en una escala de 0 a 0.7 N/m (escala obtenida durante las pruebas preliminares). Mientras que la flecha se

mantenga en la zona verde, significa que se encuentra en una zona segura, mientras que, si la flecha se encuentra en la zona roja, existe el riesgo de que la plataforma sufra algún percance. Dichos valores fueron calculados basados en el criterio de las reacciones normales promedio teniendo como unidades N/m.

Lateralmente al indicador de estabilidad, hay un botón de paro del sistema (Figura 3.15d), así como el comando para guardar los datos de las deformaciones, de las posiciones de los servomotores, los valores en los bordes y el valor de estabilidad.

En la parte central superior se encuentra un controlador numérico (Figura 3.15e) en el que se puede ingresar la altura del centro de masa a la que se encuentra trabajando la plataforma, el control de conexión a la tarjeta, el número de muestras que se van a tomar, el tiempo de espera, así como los indicadores de la posición de la altura del centro de masa y de la posición actual del brazo manipulador (Figura 3.15f).

En otra pestaña en la misma posición están ubicados los controles de posición de cada servomotor permitiendo el desplazamiento del brazo manipulador (Figura 3.16a). Finalmente, en una última pestaña están los controles de configuración de los servomotores (Figura 3.17a).

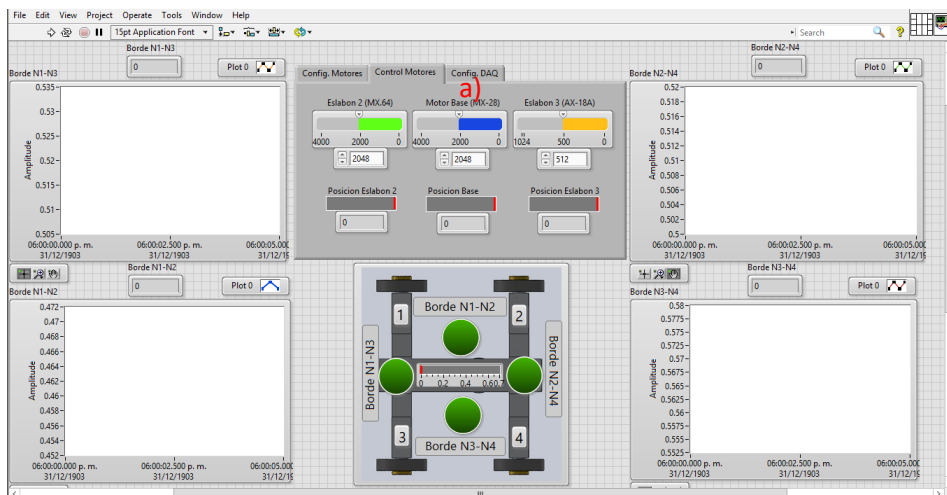


Figura 3.16. Panel Frontal del instrumento virtual. a) Controles de posición de los servomotores Dynamixel.

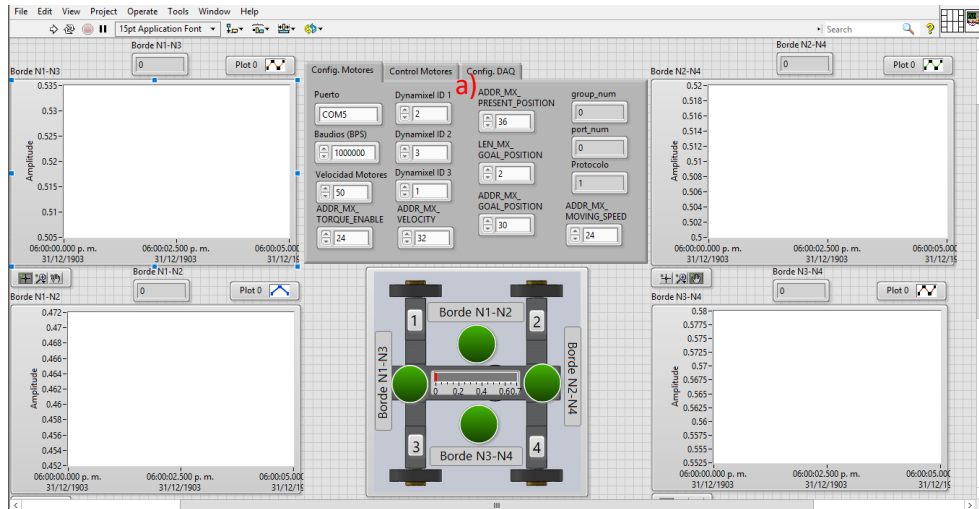


Figura 3.17. Panel Frontal del instrumento virtual. a) Controles encargados de configurar los parámetros de conexión de los servomotores.

El diagrama de bloques está dividido en dos sub-diagramas, el primero es el correspondiente al control de los servomotores dynamixel y presenta la siguiente configuración:

En la parte izquierda del diagrama se tienen la configuración de posiciones, valores y direcciones de los Servomotores Dynamixel. Figura 3.18

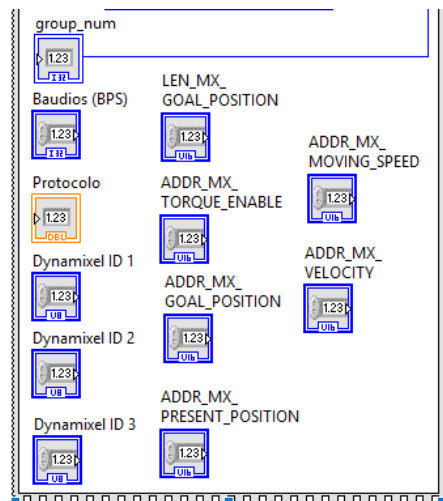


Figura 3.18. Controles de configuración inicial de control de servomotores

En la parte central del diagrama se encuentra la estructura de configuración de movimiento, velocidad y posición de los motores.

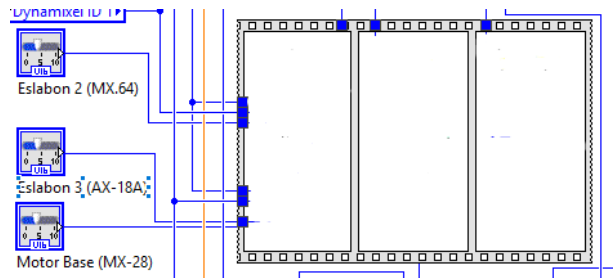


Figura 3.19. Estructura con los controles de movimiento, velocidad y posición para los motores

Al final del diagrama se tienen dos módulos de fórmula, los cuales, son los encargados de recibir los datos de la posición de los servomotores, la altura del centro de masa a partir de las posiciones de cada motor, peso y distancias del brazo para lograr obtener la altura del centro de masa del manipulador móvil. Figura 3.20.

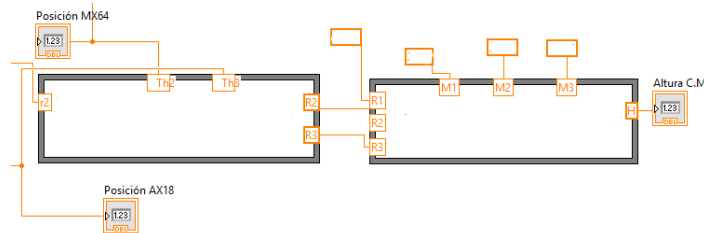


Figura 3.20. Bloques de la aplicación para el cálculo del centro de masa.

El segundo sub-diagrama es el encargado de la adquisición de datos y se encuentra con la siguiente configuración:

En la parte izquierda del diagrama se tiene el módulo de adquisición de datos de la tarjeta DAQ configurado para la recepción de datos de los strain gages, después pasa a un módulo que separa cada señal proveniente de estas para su análisis posterior, Figura 3.21.

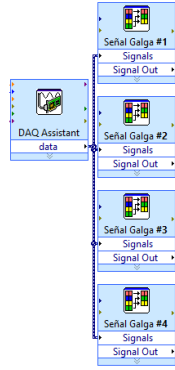


Figura 3.21. Bloques de Configuración de la Adquisición de Datos

En la parte central del diagrama se tiene un módulo de fórmula, el cual recibe los valores numéricos aplicando el criterio de Reacciones Normales Promedio, así como la altura del brazo. Al tener estos valores, el resultado se muestra en indicadores numéricos, Figura 3.22.

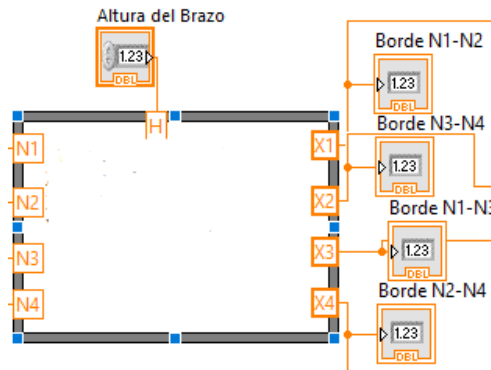


Figura 3.22. Bloques de la Aplicación del Criterio de Estabilidad.

A final del diagrama se tiene el acomodo y los indicadores leds para cada uno de los bordes de la plataforma, Figura 3.23. Al tener todos los resultados se agrupan y a partir de ahí, de acuerdo con el criterio, el valor menor indicará el valor de estabilidad de la plataforma, mientras que el valor mayor, indicará en que borde sucederá esa volcadura, mostrado por los leds y una estructura condicional, que encenderá dependiendo de donde provenga dicho valor.

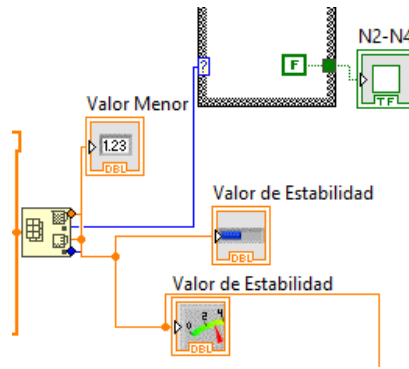


Figura 3.23. Bloques de Acomodo y Visualización de Datos.

En la parte inferior a lo largo de todo el sub-diagrama se encuentran los módulos encargados de obtener todos los datos de las gráficas y guardarlas en forma de datos con el fin de poder ser analizadas. Figura 3.24.

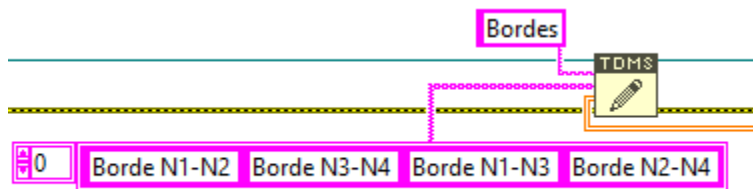


Figura 3.24. Bloques de adquisición de datos

Para que el programa permanezca trabajando continuamente, este se encuentra dentro de una estructura denominada "loop", la cual seguirá ejecutándose hasta que se presione el botón Detener. Figura 3.25.



Figura 3.25. Estructura while y botón de paro general

### 3.5.-El chasis cDAQ9191 y La tarjeta NI9237

Tarjeta de adquisición de datos NI 9237, esta tarjeta posee un módulo de puentes simultáneos para poder ser utilizados con los chasis compactDAQ (cDAQ) y CompactRIO (cRIO) además de contener todo el sistema de acondicionamiento de señal requerida para energizar y obtener mediciones de hasta cuatro sensores basados en puente (cuarto, medio y completo) simultáneamente [59].

La tarjeta de adquisición de datos NI9237 o DAQ (debido a sus siglas en inglés) es un módulo que incluye todo el acondicionamiento de señales necesario para alimentar y medir simultáneamente hasta cuatro sensores basados en puente, como es ese caso, el módulo proporciona medidas de tensión y carga sin desfase entre canales. Puede calibrar los instrumentos de medición tanto como para instrumentos deformables como para los puentes de medición.

La razón principal de la selección de la tarjeta es debido a que realiza medición de hasta 50000 muestras por segundo, volviéndose un instrumento confiable a la hora de realizar pruebas con las galgas extensométricas.

Toda la información recolectada por la tarjeta es mostrada en LabVIEW como muestra la Figura 3.26.

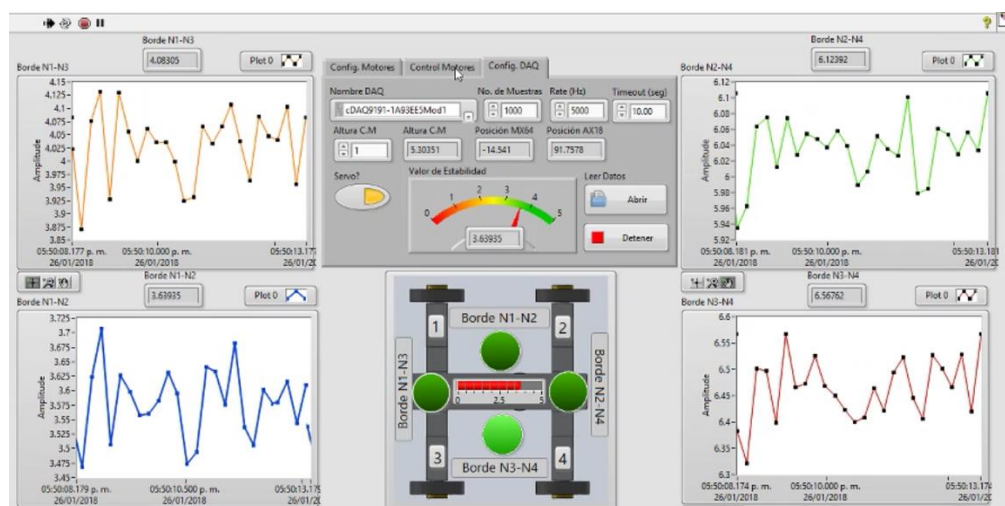


Figura 3.26. Instrumento virtual mostrando los datos adquiridos por las galgas y la tarjeta NI9237



Se puede programar el NI9237 para usarse con sensores de cuarto de puente, medio puente y puente completo con excitación integrada. Los cuatro conectores RJ50 proporcionan conexión directa a celdas de par de torsión o carga y ofrecen soluciones personalizadas de cable o inalámbricamente

En nuestro caso en particular se trabajó con un cuarto de puente, para completar el puente completo y lograr obtener los datos se requirió utilizar los accesorios de terminación de cuarto de puente NI 9945, en el siguiente diagrama (Figura 3.27.) se puede observar la conexión.

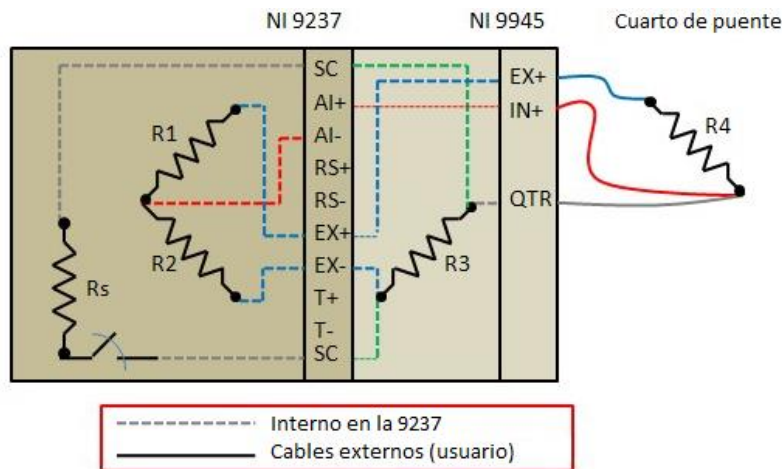


Figura 3.27. Diagrama de conexión entre la tarjeta, el accesorio y la galga que en conjunto generan un puente de Wheatstone logrando transferir la información necesaria al instrumento virtual. [60]

### 3.6.- Comunicación entre la tarjeta, las galgas y el instrumento virtual

Finalmente, para lograr establecer comunicación entre el Instrumento Virtual y la tarjeta de adquisición de datos es necesario montar la tarjeta a un chasis en nuestro caso el chasis cDAQ-9191 (Fig.3.29.) que se encargara del acondicionamiento de las señales recibidas por las galgas y por la tarjeta NI-9237 para posteriormente ser interpretadas por el Instrumento Virtual [61].

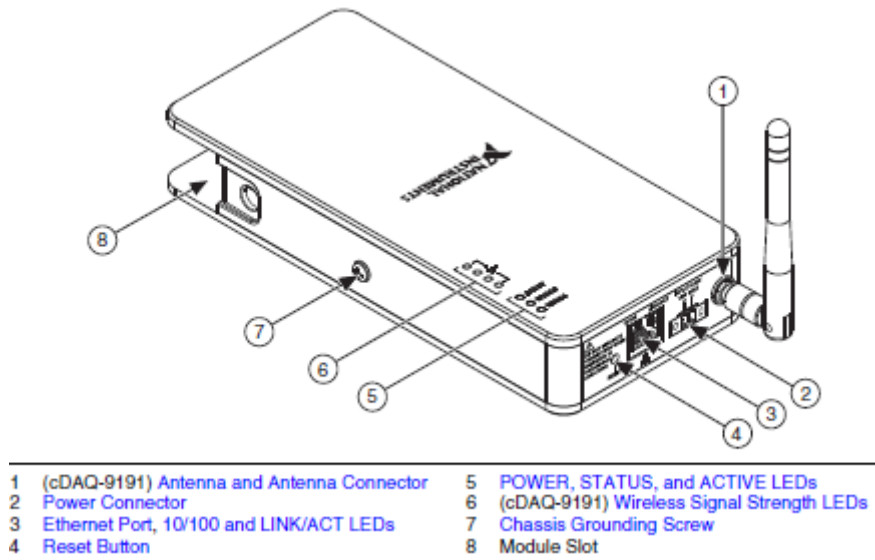


Figura 3.28. Diagrama de chasis cDAQ-9191 [61]

El software encargado de realizar dicha conexión tiene por nombre NI MAX (Fig.3.29.), con el cual se puede realizar la configuración inicial del chasis tanto de manera inalámbrica (Wi-Fi) o alámbrica (Ethernet), siendo la segunda en nuestro caso, al finalizar la configuración y para lograr establecer la configuración es necesario añadir el módulo dentro del Diagrama de Bloques en el instrumento virtual para empezar a obtener los datos de la tarjeta.

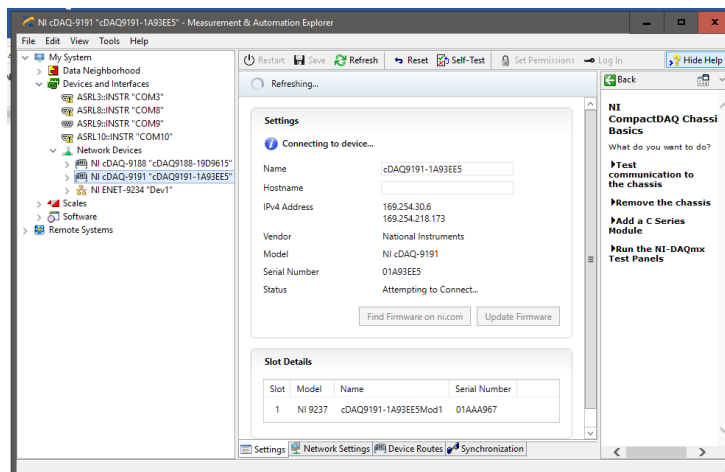


Figura 3.29. Interfaz de NI MAX donde se pueden configurar los DAQ

Una vez añadido el módulo en el diagrama de bloques se realiza la calibración de las galgas para lograr obtener la mayor precisión posible. Fig.3.30. Para finalmente obtener los datos de deformación de cada una de las galgas y así medir el valor de estabilidad dentro del Instrumento Virtual como fue mostrado en la figura 3.26.

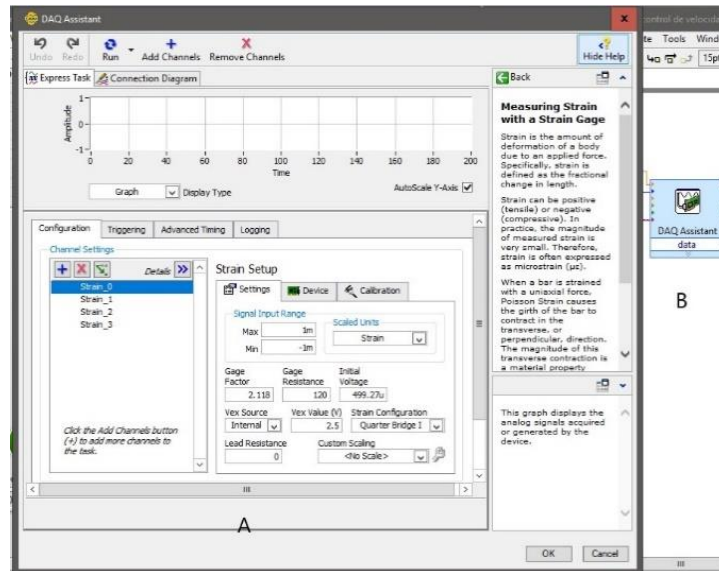


Figura 3.30. A) Modulo dentro del diagrama de bloques para calibración y configuración de las galgas B) Bloque de configuración DAQ en Diagrama de Bloques

### 3.7. Motorreductores EMG30 y Controlador MD25

El desplazamiento de la plataforma se logró gracias a los motorreductores con modelo **EMG30**, los cuales tienen una relación de movimiento de **30:1** [62] siendo ésta suficiente para generar un desplazamiento en superficies tanto regulares como irregulares, incluso, inclinadas tal cómo se realizaron las pruebas, los motorreductores están Unidos a una rueda de 100 mm y para poder controlar y energizar a los motores se utilizó el controlador MD25 en conjunto con una tarjeta Arduino como muestra la figura 3.31.

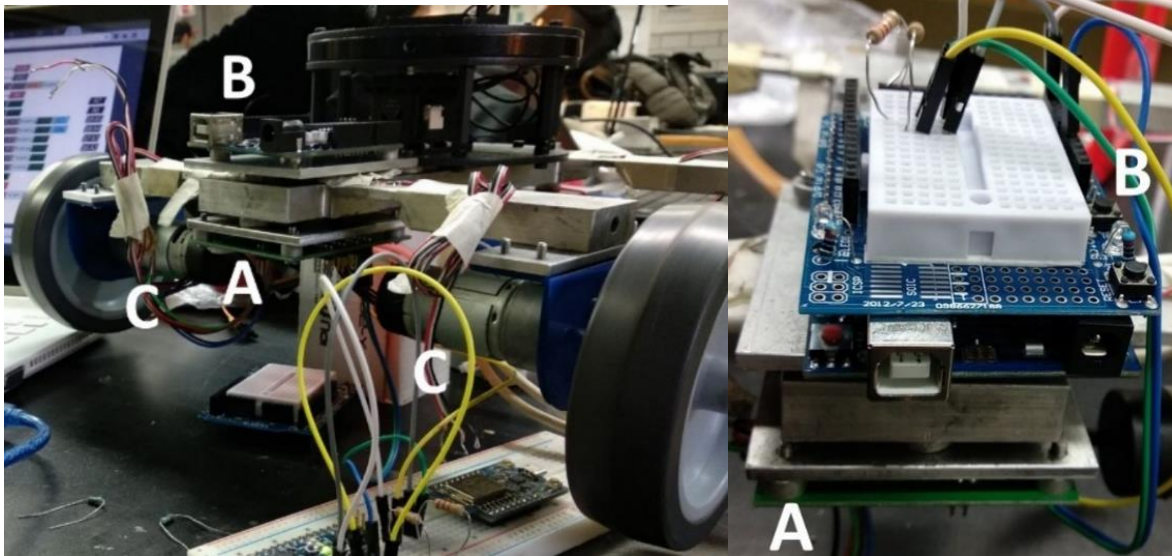


Figura 3.31. A) Controlador MD25 sujeta al inferior de la base del chasis del manipulador.

B) Tarjeta Arduino montada al chasis del manipulador. C) Motores EMG30 y ruedas.

La tarjeta Devantech MD25 [63] es un controlador de doble puente H desarrollado para el control de dos motores de corriente continua, en particular para el modelo EMG30 ya que, facilita el control de los motores, gracias a los comandos preestablecidos que sólo requieren la activación de distintos registros, además de ser el encargado de generar el voltaje y amperaje necesario para energizar a los motores y darle la velocidad y posición requerida para las pruebas. Se decide utilizar la interfaz I<sup>2</sup>c para el control de la tarjeta, debido a que el microcontrolador a utilizar sólo cuenta con una terminal para comunicación serial y es más fácil lograr establecer comunicación en conjunto con todo el software trabajado.

Para lograr esto es necesario el uso de una placa Arduino UNO basada en un microcontrolador ya que al tener una memoria interna es capaz de almacenar los datos necesarios para que funcionen los motores ya que envían y reciben los comandos de movimiento por parte de la placa ARDUINO. El diagrama de conexión entre el Arduino el MD25 y los EMG30 se muestra en la Figura 3.32.

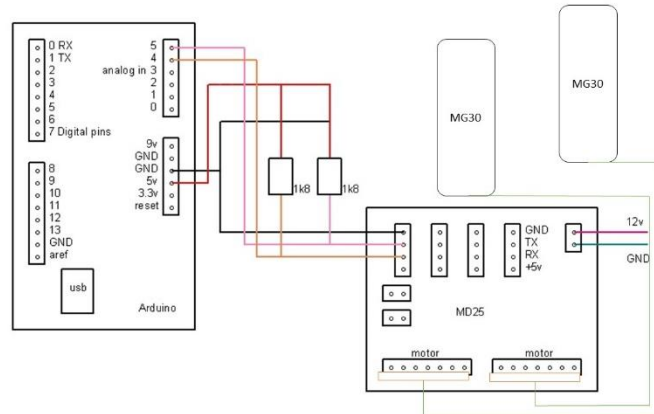


Figura 3.32 Diagrama de conexión I<sup>2</sup>c entre Arduino UNO, controlador MD25 y motores MG30

Para lograr generar el desplazamiento se requirió de programar la placa ARDUINO UNO dentro de su propia interfaz.

El programa permitió controlar el desplazamiento de la plataforma con sólo oprimir la tecla **1** y **enter** para lograr el desplazamiento de manera frontal contrario a esto se requiere oprimir la tecla **0** y **enter** para el desplazamiento en sentido contrario este tipo de control simple permitió realizar las pruebas ya que no interfería con ningún otro ámbito del instrumento virtual permitiéndonos censar de manera adecuada los valores de estabilidad al momento.

```

HelloMotor Arduino 1.8.3
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
HelloMotor
#include <I2c.h>
#include <MD25IIC.h>
// MD25IIC METHODS:
// -----|-----|-----|
// | MOTOR | BOARD |
// -----|-----|-----|
// | setMotor1Speed(byte) | getAddress() |
// | getMotor1Encoder() | setMode(byte) |
// | getMotor1Current() | getBattery() |
// -----|-----|-----|
// | 2 | setMotor2Speed(byte) | enableTimeOut(T/F) |
// | getMotor2Encoder() | resetEncoders() |
// | getMotor2Current() | setAcceleration(byte) |
// -----|-----|-----|

MD25IIC MyBoard;

// Setup function
//*****
void setup()
{
  MyBoard.enableTimeOut(true); // Stop motor if no command sent
                               // within a 2s window
  for(int k = 0; k<256; k++)
  {
    MyBoard.setMotor1Speed(k); // Set motor 1 to k speed
  }
}

```

Figura 3.33. Programa de Arduino y código para programar a la placa ARDUINO UNO.

### 3.8. Servomotores Dynamixel

Para el manipulador se decidió utilizar los servomotores de la marca DYNAMIXEL. Los servomotores son un tipo especial de motor de corriente continua que se caracterizan por su capacidad para posicionarse de forma inmediata en cualquier postura dentro de su intervalo de operación al enviar una señal codificada [64]. Con tal de que una señal codificada exista en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje.

Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones lo hace de la misma manera. En la práctica, se usan servos para posicionar superficies de control como el movimiento de palancas, pequeños ascensores y timones, radio control, y por supuesto en robots o manipuladores. [65] La decisión de utilizar dichos servos es debido a que estos son más sofisticados que los servos convencionales ya que cada DYNAMIXEL tiene la capacidad de controlar su velocidad, temperatura, posición, tensión y carga soportada.

El algoritmo de control utilizado para mantener la posición de cada servo puede ajustarse individualmente, permitiendo el control retroalimentado de la velocidad y carga que soporta cada servo ya que cada uno de ellos posee un microcontrolador permitiéndoles leer el estado del motor como puede ser la posición actual, la corriente consumida, o la variación de la temperatura del servo incluso con carga aplicada en el mismo, entre otras. [66]

Al poseer la capacidad de poder leer o fijar parámetros dentro del servo nos permiten trabajar de una manera libre con una libertad de movimiento en grados y con mayor precisión. Para el brazo robótico se seleccionaron tres servomotores:

El primero con el modelo MX-28T (Figura 3.34) el cual nos permite rotar la base del manipulador hasta 360 grados logrando así, posicionar el brazo prácticamente en cualquier punto que se desee.



Figura 3.34. Servomotor Dynamixel MX-28T utilizado en la base del manipulador [67].

El siguiente cuyo modelo es el MX-64T (Figura 3.35) cuya principal cualidad es que posee el torque necesario para levantar el brazo y posicionarlo libremente alrededor de 190° de libertad incluso teniendo carga en el efector final de éste. Se encuentra ubicado entre los dos motores restantes [68].



Figura 3.35. Servomotor Dynamixel MX-64T utilizado para mover el brazo manipulador desde la base.

Por último, el servomotor AX-18<sup>a</sup> (Figura 3.36) siendo el más chico de los 3 sin embargo, capaz de desempeñar las funciones requeridas para el presente trabajo y es el que permite el movimiento entre el efector final y el poste de en medio como muestra la Figura 3.37.



Figura 3.36 Servomotor Dynamixel AX-18A utilizado para mover el efector final del manipulador. [69]

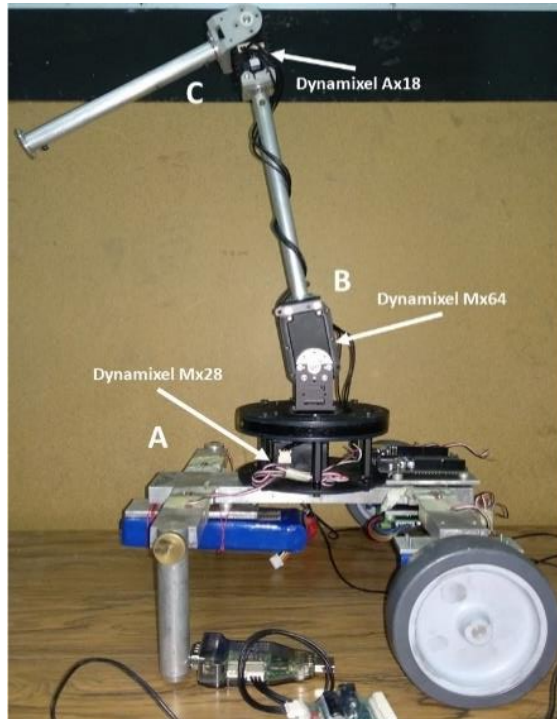


Figura 3.37. A) MX-28T, Ubicado en la base del manipulador. B) MX64-T, Encima del servo MX-28T. C) AX-18A, Ubicado en el efector final.

Los tres motores le proporcionan 3 grados de libertad al manipulador permitiéndonos trabajar fluidamente y realizar pruebas con distintas configuraciones con el fin de poder obtener todos estos datos en nuestro instrumento virtual.

Para lograr establecer comunicación entre los motores y la computadora fue necesario utilizar los dispositivos USB2DYNAMIXEL y EL SMPS2Dynamixel Figura 3.38.

El primero por medio de la PC. Puede controlar a los servos, cambiar los puertos seriales, establecer comunicación inalámbrica, entre otras funciones [70]. El segundo es el encargado de poder energizar por medio de una fuente de voltaje a los servos que sean conectados a este, proporcionando un voltaje recomendado de 12V a 5A.



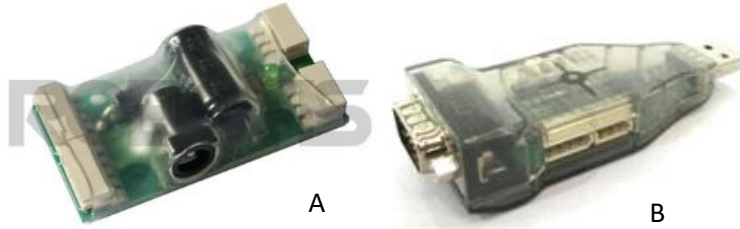


Figura 3.38 A) SMPS2DYNAMIXEL; Encargado de energizar a los servomotores B) USB2DYNAMIXEL; Establece comunicación entre los servos y la computadora. [71]

Finalmente, para lograr trabajar dentro del instrumento virtual se utilizó la librería específica DynamixelSDK-master para los servomotores en LabVIEW. Figura 3.39

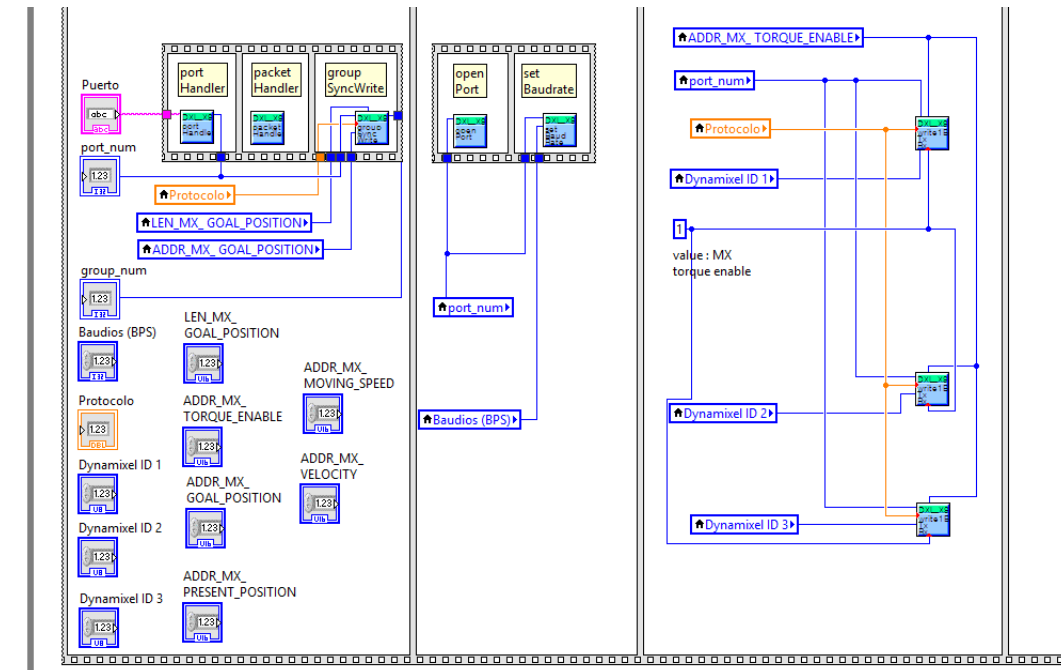


Figura 3.39. Biblioteca de Dynamixel dentro del diagrama de bloques de LabVIEW.

### 3.9.- ESTIMACIÓN DEL CENTRO DE MASA

Uno de los puntos importantes para la obtención de la medida de estabilidad dentro del Instrumento Virtual, es la consideración del centro de masa ya que este es considerado en el criterio MNGR por lo cual, se estimó teniendo las siguientes consideraciones:

Principalmente, debido a que la geometría del manipulador no es uniforme o definida, se tuvo que dividir en secciones al manipulador como se muestra en la Figura 3.40. ya que para obtener el centro de masa del cuerpo se utiliza la fórmula (3.2):

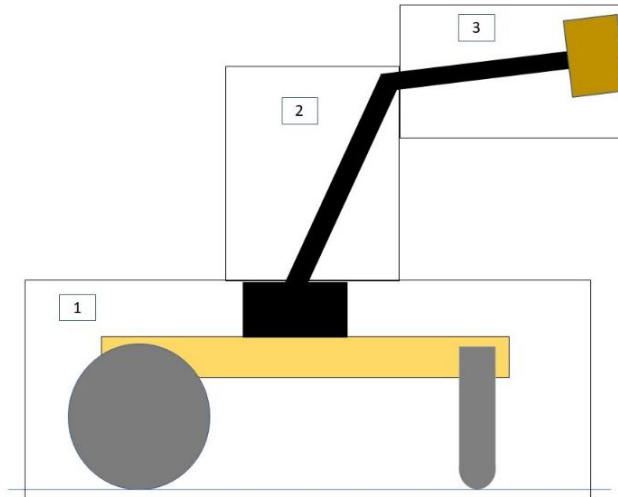


Figura 3.40 Esquema del manipulador dividido en 3 secciones: La sección 1 es de la base que contiene a la plataforma y a los rodamientos, así como la base con un motor para el desplazamiento del manipulador sobre su propio eje. La sección 2 contiene dos motores, uno en cada extremo y una extensión del brazo. La sección 3 posee la extensión final del brazo y al final una adaptación para agregar peso.

La fórmula para obtener el centro de masa es la siguiente:

$$h_{c.m.} = \frac{r_1 m_1 + r_2 m_2 + r_3 m_3}{m_1 + m_2 + m_3} \dots \dots \dots n \quad (3.2)$$

Donde:

$r_1$ = es la distancia desde el punto inicial “z” (Figura 3.41a) al centro de masa estimado de la primera sección.

$m_1$ = es la masa de la base del manipulador.

$r_2$ = es la distancia del punto inicial “z” al centro de masa estimado de la segunda sección.

$m_2$ = es la masa de la base del manipulador.

$r_3$ = es la distancia del punto inicial “z” al centro de masa estimado de la tercera sección.

$m_3$ = es la masa de la base del manipulador

De la fórmula se tiene que la altura del centro de masa total es la sumatoria de cada centro de masa de las distintas geometrías del cuerpo, quedando así dividido como muestra la siguiente Figura 3.41:

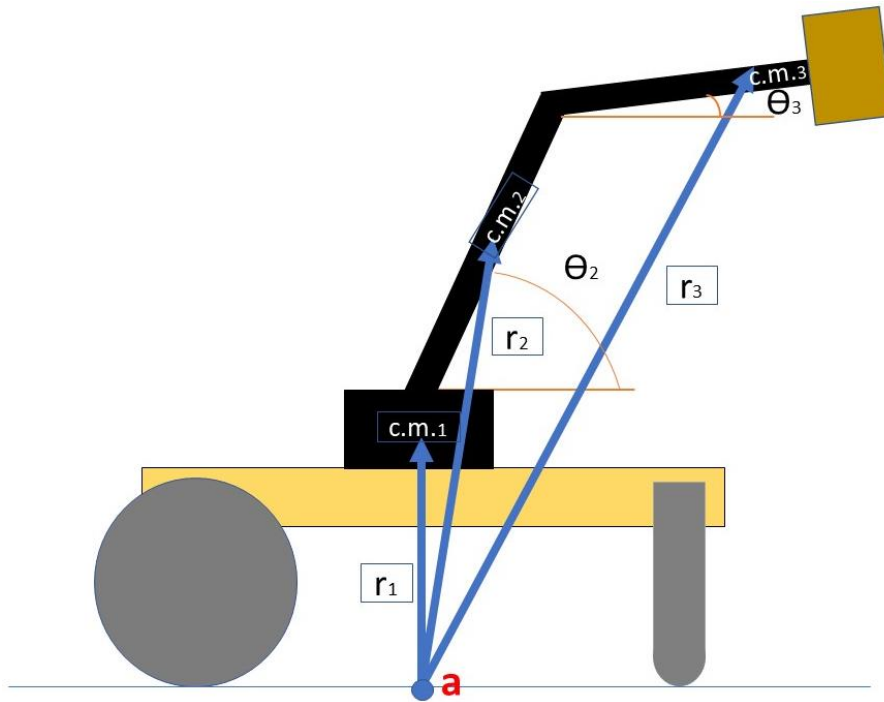


Figura 3.41. Valores por considerar en el cálculo del c.m. a) Punto inicial z que sirve de base para la estimación del c.m.

Cada una de las secciones fueron medidas y pesadas, quedando los siguientes datos:

$m_1=2.405$ kg	$h_1= 0.141$ m
$m_2=0.2436$ kg	$h_2= 0.251$ m
$m_3= 0.1867$ kg	$h_3= 0.153$ m

Finalmente, se tiene que las alturas centros de masa de cada sección son:

$$h_{c.m.1} = 0.07077 \text{ m}$$

$$h_{c.m.2} = 0.092 \text{ m (considerando que } \theta_2 = 90^\circ)$$

$$h_{c.m.3} = 0.079 \text{ m (considerando } \theta_3 = 90^\circ)$$

Debido a la movilidad que presenta el brazo manipulador la altura del centro de masa varía con respecto a la posición del brazo por lo que se tomó a  $r_2$  y  $r_3$  considerando las posiciones con las siguientes fórmulas:

$$r_2 = 14.1 + 9.2 \sin \theta_2 \quad (3.3)$$

$$r_2 = 14.1 + 25.1 \sin \theta_2 + 7.9 \sin \theta_3 \quad (3.4)$$

Para obtener  $\theta_2$  y  $\theta_3$  dentro del programa fue necesario realizar una sencilla conversión con los valores que manejan los servomotores.

Para el caso de los servomotores Mx-64T y Mx-28T manejan valores de bits de 0 a 4080 por lo tanto se observa que el valor de 2223 bits nos entrega un valor de posición de  $90^\circ$  de inclinación y que 1311 bits, nos muestra un valor de  $0^\circ$  para el experimento, por medio de esta información es simple obtener una regla de 3 y en ese caso obtener el valor de la posición en el instrumento virtual y para el motor más chico el Mg-18 se realizó lo mismo, pero con los valores pertinentes ya que este último posee valores de operación distintos.

Finalmente, toda la información fue introducida al instrumento virtual y mostro el valor de  $\theta_2$  y  $\theta_3$ , así como del valor de estabilidad Figura 3.42.

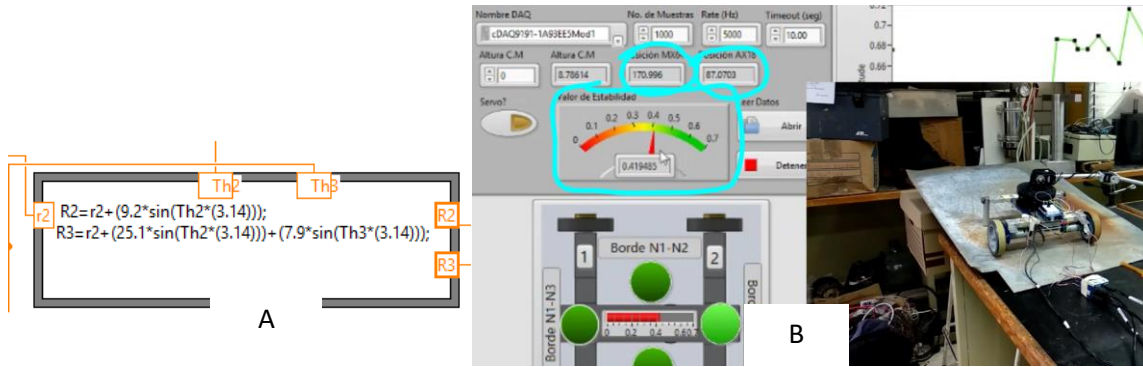


Figura 3.42. A) Datos previamente obtenidos dentro del diagrama de bloques. B) valores de  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  y de estabilidad dentro del instrumento virtual.

### 3.10. PRUEBAS

El objetivo de tener un indicador en la interfaz es debido a que no siempre se puede operar en condiciones “estables” por lo que, se realizaron pruebas para conocer las posiciones más seguras, así como, las que presentan riesgo de volcadura para darle al operador el conocimiento necesario de las condiciones en las que se encuentra el sistema que se está utilizando y, por ende, lograr prevenir accidentes.

Con el prototipo se realizaron distintas pruebas usando diferentes configuraciones de los motores con el fin de reconocer las vulnerabilidades del sistema, conocer la medida de estabilidad, el comportamiento del control de los motores, la instrumentación virtual y el desplazamiento de la plataforma con las ruedas.

La primera prueba se realizó para conocer el comportamiento general de la interfaz y la comunicación de esta con la tarjeta de adquisición de datos, los servomotores y los motorreductores. Se comenzó por realizar un recorrido con el brazo manipulador alrededor de la base sobre los bordes N3-N4, N1-N3 y N1-N2 con diferentes configuraciones del efector final como muestra la Figura 3.43.

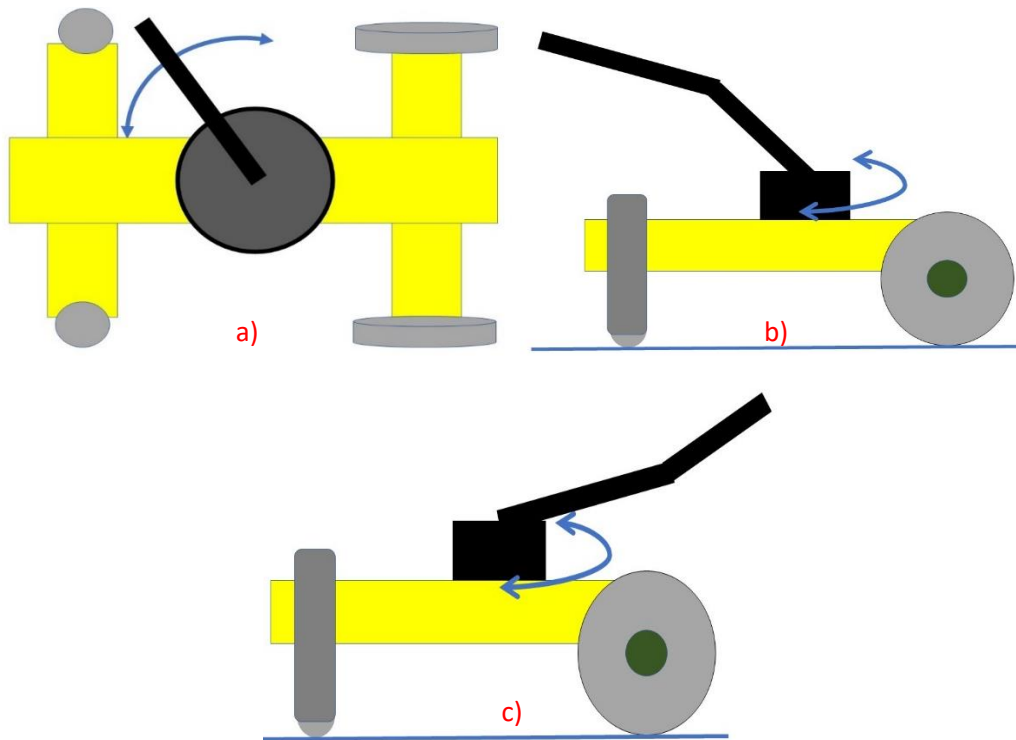


Figura 3.43. Prueba inicial con diferentes configuraciones del brazo manipulador. a) Desplazamiento del brazo manipulador sobre cada borde. b) Configuración inicial del manipulador desplazándose. c) Manipulador con diferente configuración realizando un paneo alrededor de los bordes de la base.

Al finalizar se logró estimar el rango del valor de estabilidad dentro del instrumento virtual el cual se hizo en una escala de 0 a 0.7 N/m (Figura 3.44a) (unidades que maneja el valor de estabilidad) debido a que uno de los valores más altos registrados por la prueba fueron de 0.7375 N/m (Figura 3.44b) a una posición de **33.45°** para el motor Mx64 (Figura 3.44e) y **13.24°** para el motor Ax18 (Figura 3.44f) así como el valor de estabilidad en los bordes N3-N4 y N1-N2 los cuales, debido a la geometría de la base pueden presentar un mayor riesgo de volcadura.

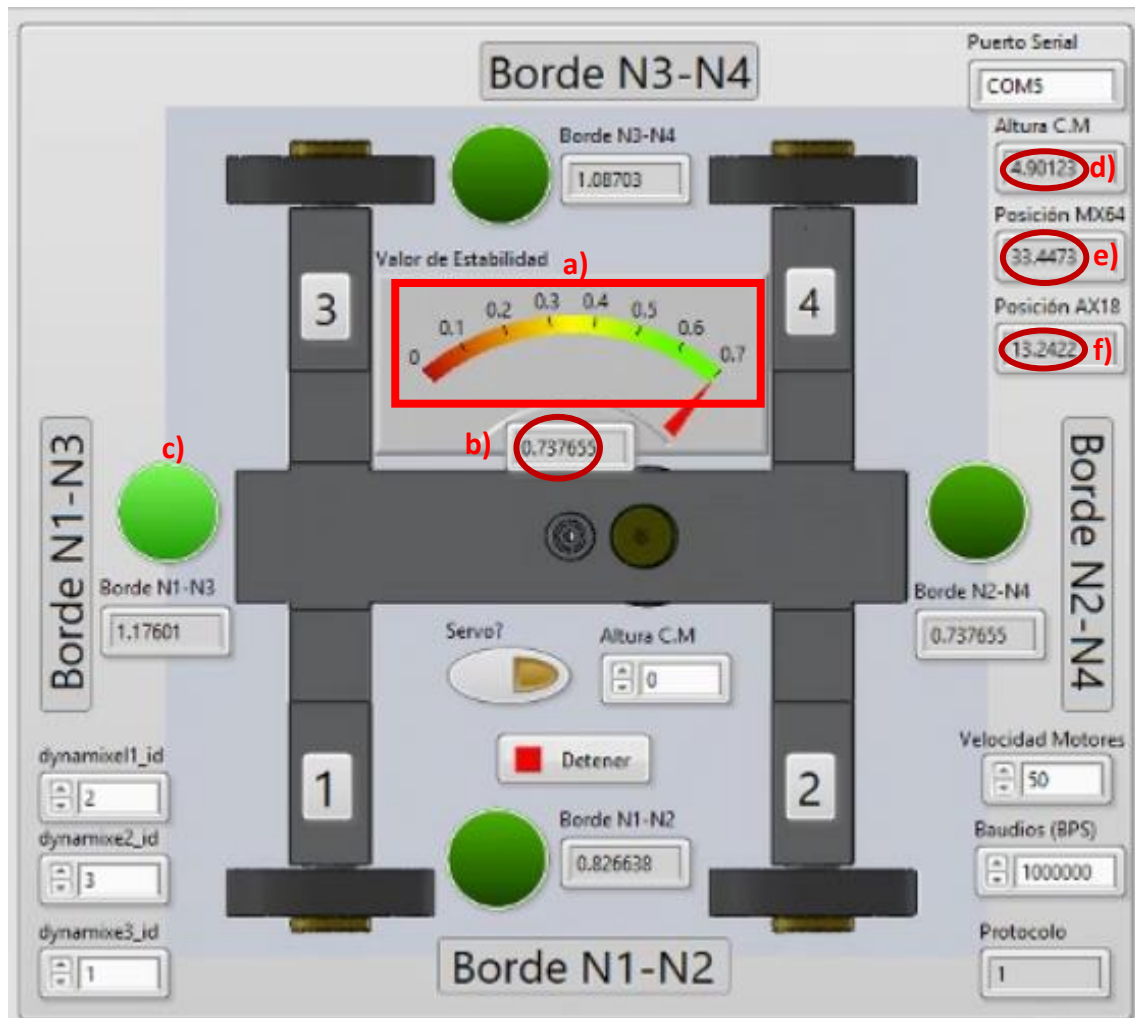


Figura 3.44. Instrumento virtual mostrando la base del manipulador con vista inferior durante la prueba inicial. a) Indicador con la escala del valor de estabilidad de 0 a 0.7N/m. b) Valor de posición más estable considerada durante la prueba. c) Indicador LED encendido mostrando que el manipulador se encuentra posicionado sobre el borde N1-N3, los LEDs restantes encenderán de acuerdo con la inclinación que presente el brazo sobre cada borde. d) Indicador del valor de la altura del centro de masa la cual varía conforme la posición del brazo manipulador. e) Valor de la posición actual del motor MX64 en grados. f) Valor de la posición actual del motor AX18 en grados.

### 3.10.1.- CASO 1.

Para el primer caso, la prueba se realizó con la plataforma fija sobre una superficie horizontal, posicionando el brazo entre los bordes N1-N3 y N2-N4 variando el ángulo de inclinación en distintas configuraciones en forma de cabeceo realizando un recorrido de 0° a 180° con el fin de conocer el valor de estabilidad en diferentes puntos.

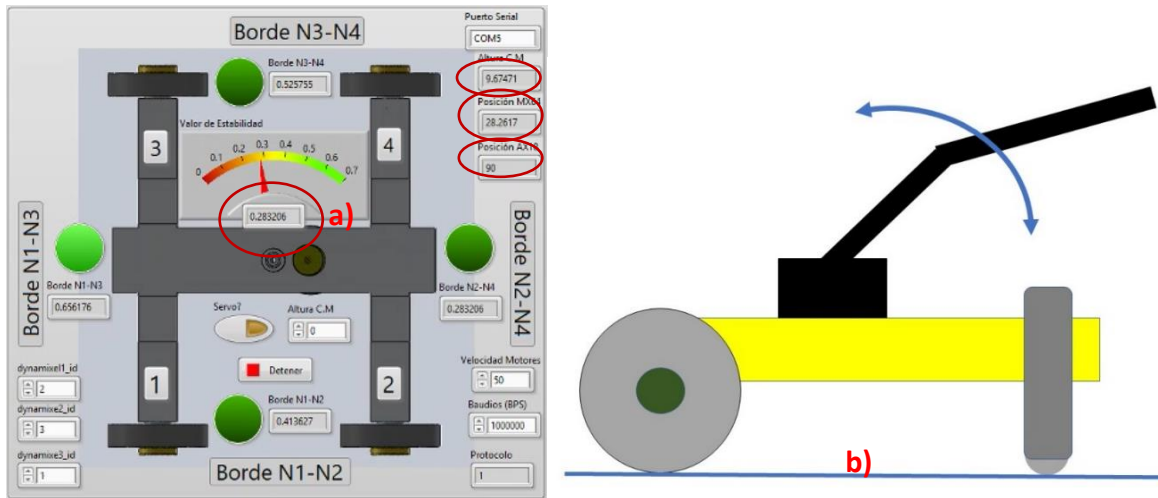


Figura 3.45. Caso 1 a) Instrumento virtual donde se muestra el valor de estabilidad. b) Movimiento del brazo del borde N1–N3 al borde N2–N4.

### 3.10.2.-CASO 2.

Para la siguiente prueba el manipulador fue posicionado alrededor de los cuatro bordes variando la orientación del brazo de 0° a 360° realizando un paneo, así como la altura del manipulador para observar la estabilidad en cada uno de los bordes (Figura 3.46), los indicadores LED mostraban al momento el borde en donde se encontraba inclinado el brazo manipulador como muestran las Figuras 3.47b. y 3.48b.



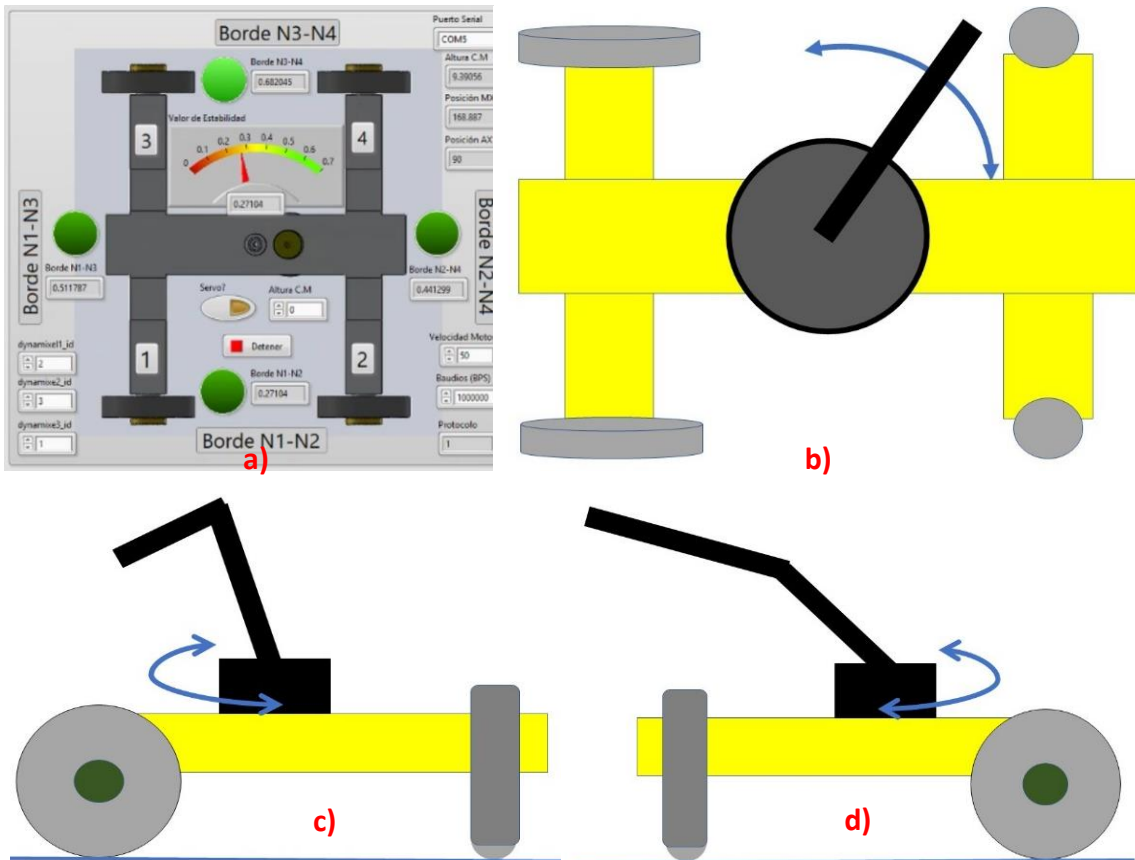


Figura 3.46. Caso 2. a) Interfase virtual mostrando valor de estabilidad y posición del manipulador en el borde N3-N4. b) Movimiento de paneo del brazo por los cuatro bordes. c) Desplazamiento del brazo manipulador usando una configuración alrededor de los bordes de la base d) Desplazamiento del manipulador realizando un paneo por los bordes variando su configuración.

Al variar la posición y la altura del brazo, se logró observar que el valor de estabilidad disminuyó de 0.639477N/m (Figura 3.47a.) a 0.438548 N/m (Figura 3.48a.), la estabilidad reduce debido a que el efector final se aleja del borde N2-N4 como muestra la Figura 3.48c.



Figura 3.47. Prueba del caso 2. a) Valor de estabilidad de 0.639477N/m. b) Indicador LED mostrando la ubicación del manipulador (borde N2-N4) c) Ubicación del efector final con respecto al LED.



Figura 3.48. Prueba del caso 2 (continuación). a) Valor de estabilidad de 0.438548N/m. b) Indicador LED mostrando la ubicación del manipulador (borde N2-N4) c) Ubicación del efector final con respecto al LED del borde N2-N4, se puede apreciar que este se encuentra más alejado del borde y de la base.

### 3.10.3.-CASO 3

El manipulador se posiciona sobre una superficie inclinada a  $8.4^\circ$ . El brazo gira  $180^\circ$  en forma de cabeceo del borde N1-N2 al borde N3-N4, con el fin de conocer si el sistema de medición funciona simétricamente entre los bordes mencionados.

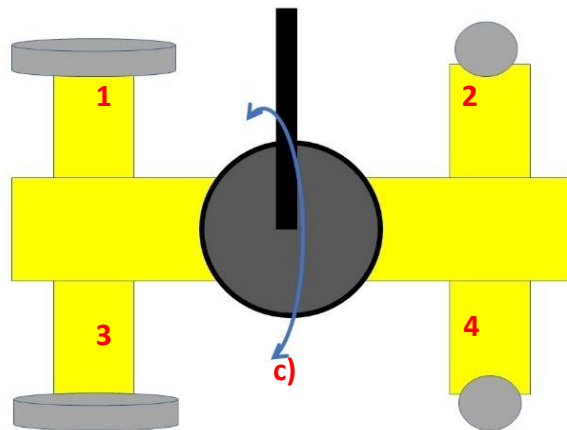
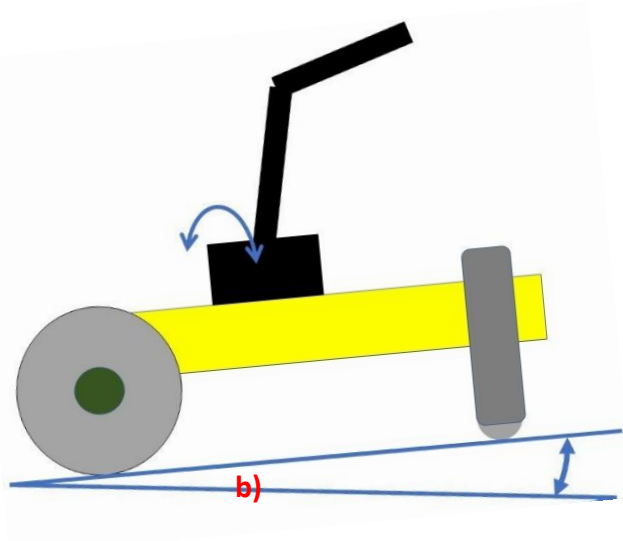
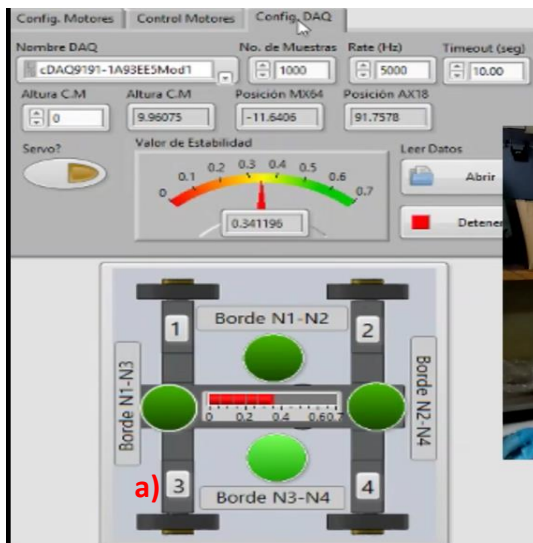


Figura 3.49. Caso 3 (Con inclinación). a) Instrumento virtual mostrando el valor de estabilidad sobre el borde N3-N4 (vista superior de la base). b) variación de la orientación del brazo (en forma de cabeceo) sobre una superficie inclinada. c) Vista superior del manipulador.

Para lograr realizar una comparación se realizó otra prueba con el fin de complementar a la ya realizada, el procedimiento fue el mismo, sin embargo, la diferencia fue en la orientación del manipulador ya que fue posicionado a  $0^\circ$ .

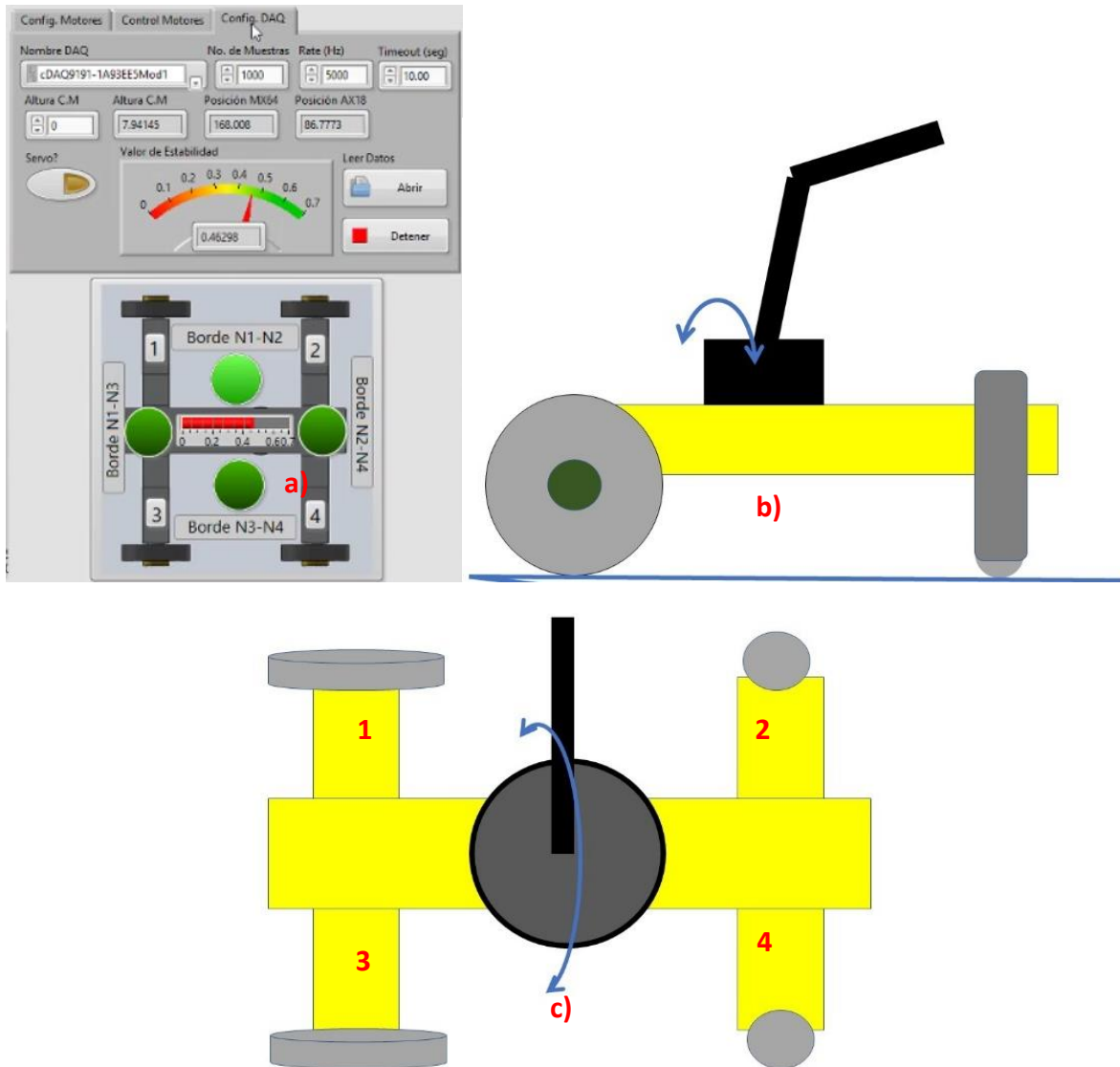


Figura 3.50. Caso 3 (Horizontal). a) Instrumento virtual mostrando el valor de estabilidad sobre el borde N1-N2. b) variación de la orientación del brazo (en forma de cabeceo) sobre una superficie horizontal. c) Vista superior del prototipo describiendo el movimiento del manipulador.

### 3-10.4.- CASO 4

La prueba se realizó desplazando al manipulador sobre un terreno irregular horizontal (con una posición del brazo que podría generar volcadura) pasando por una superficie con una inclinación de  $4.6^\circ$  recorriendo una distancia total aproximada de 1 metro de ida y 1 metro de regreso sin cambiar la posición del brazo con respecto al chasis como muestra la Figura 3.51. Planeando comprobar como la posición del terreno y del brazo influye en el valor de estabilidad.

Como se logró observar en las pruebas, el brazo tiene una orientación que reduce ligeramente el valor de estabilidad pasando de  $0.43 \text{ N/m}$  a  $0.36 \text{ N/m}$  al pasar de la superficie horizontal a la inclinada, presentando un ligero riesgo de volcadura (Figura 3.51c.).

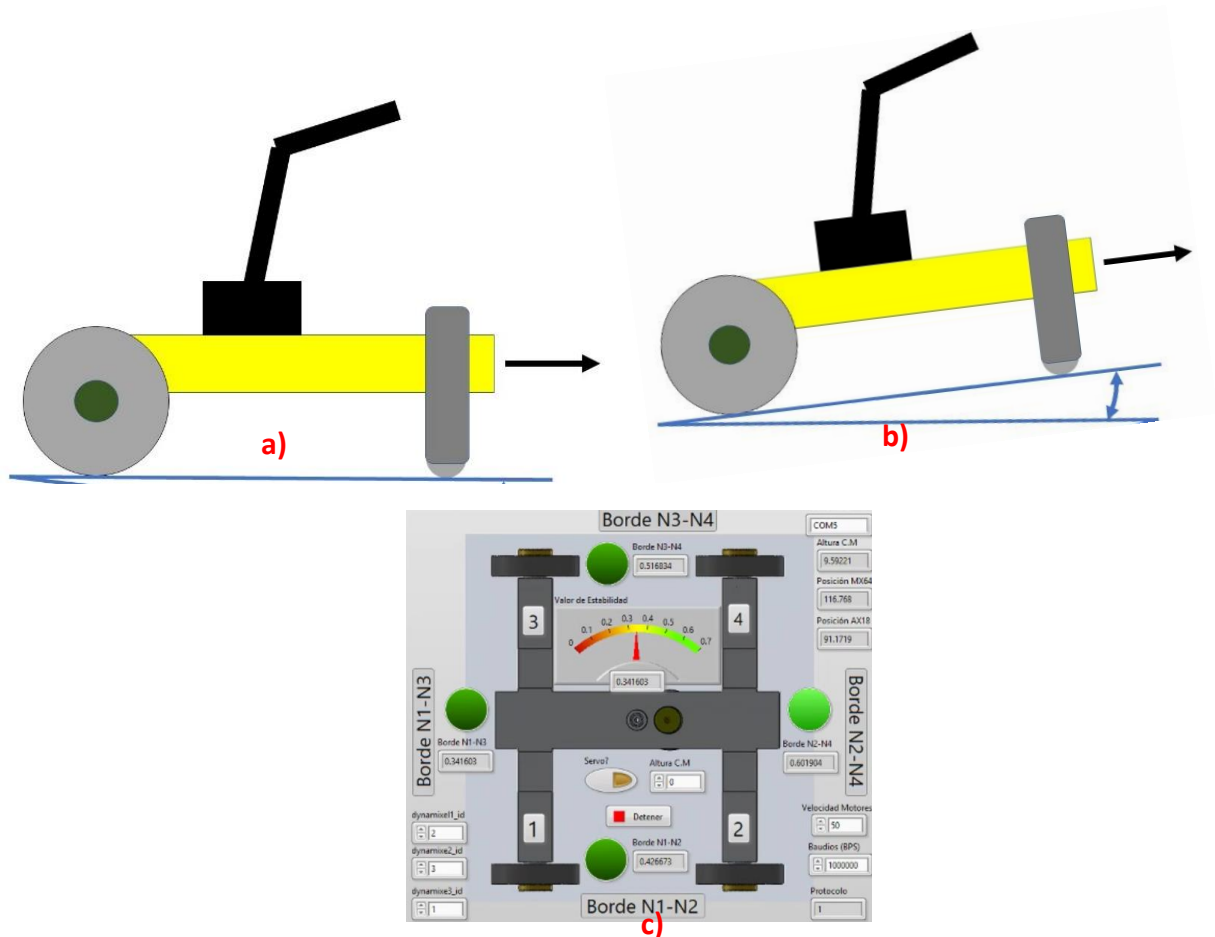


Figura 3.51. a) desplazamiento del móvil sobre superficie horizontal y; b) desplazamiento del móvil sobre la superficie inclinada a  $4.6^\circ$ . c) Valor de estabilidad medio en la interfaz del instrumento virtual al desplazarse por el terreno inclinado.

### 3.10.5.- CASO 5

El manipulador se desplaza de una superficie horizontal a una ligeramente inclinada con el brazo posicionado en un punto considerablemente crítico (sentido contrario a la inclinación) sin cambiar la posición del brazo respecto al chasis.

En este caso, al contrario de la prueba anterior, la posición del manipulador presenta un mayor riesgo de volcadura al recorrer la superficie inclinada mostrando un valor de estabilidad muy bajo (Figura 3.52c.).

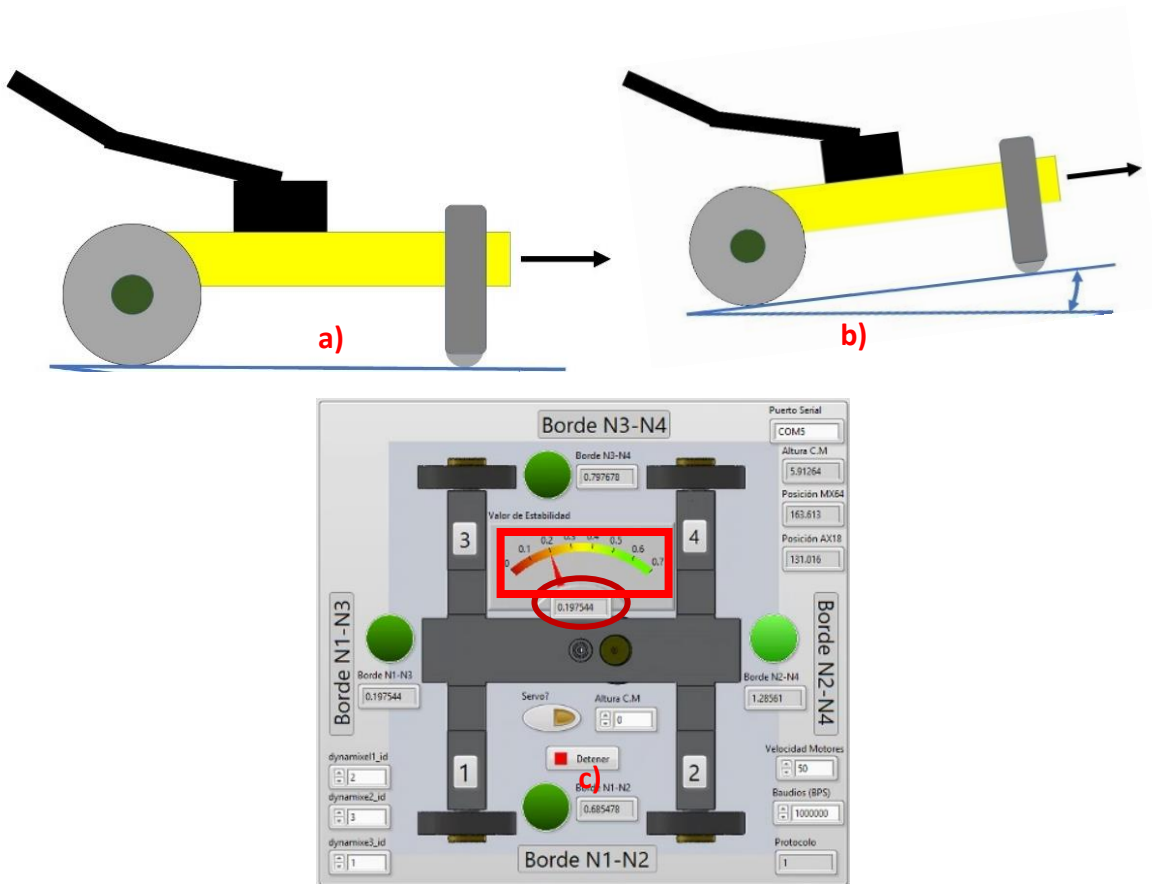


Figura 3.52. a) desplazamiento del móvil sobre superficie horizontal con manipulador en posición posiblemente crítica; b) Manipulador desplazándose sobre la superficie inclinada con una posición del brazo que genera inestabilidad. y; c) Se puede observar en el instrumento virtual que el valor de estabilidad es bajo e incluso peligroso (0.1975 N/m).

### 3.10.6.- CASO 6

Finalmente se realizaron una serie de pruebas en el manipulador las cuales consistieron en generar un movimiento circular en el brazo, Figura 3.53, mientras se mide en tiempo real la variación de la estabilidad

En la primera prueba el efector final no tenía carga, mientras que en las dos subsecuentes se le colocaron 2N y 4N respectivamente, para ir incrementando las posibilidades de vuelco en el mecanismo e ir restringiendo el movimiento del brazo para evitar la pérdida de equilibrio.

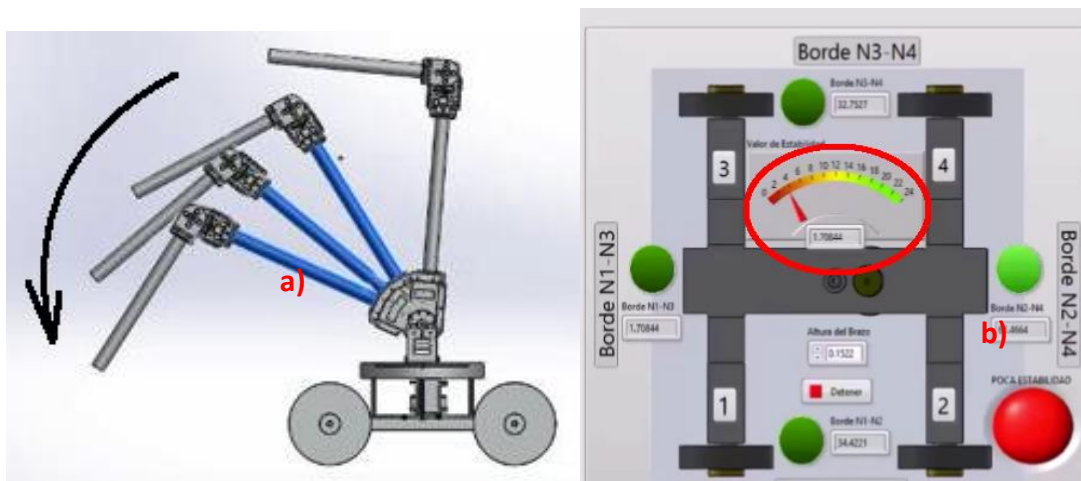


Figura 3.53. a) Movimiento angular del brazo b) Interfaz mostrando el valor de estabilidad encendiéndose el indicador rojo cuando se presenta riesgo de volcadura

La medición de estabilidad presenta un rango de medición de 0 a 24 N/m, en donde 0 significa que el sistema es completamente inestable mientras que 24 es la máxima estabilidad que puede presentar. El valor mínimo de estabilidad elegido para la realización de las pruebas fue de 5 para evitar el vuelco.

## Capítulo 4. RESULTADOS

### 4.1.-CASO 1

En la gráfica de la Figura 4.1. se muestran los valores de estabilidad a una posición de  $65^\circ$  durante unos segundos y como cambia el valor de estabilidad al posicionar el brazo a  $101^\circ$ , la gráfica muestra que el valor de estabilidad varía ligeramente al desplazarse el manipulador a una mayor altura aumentando la estabilidad pasando de 0.4 a 0.5.

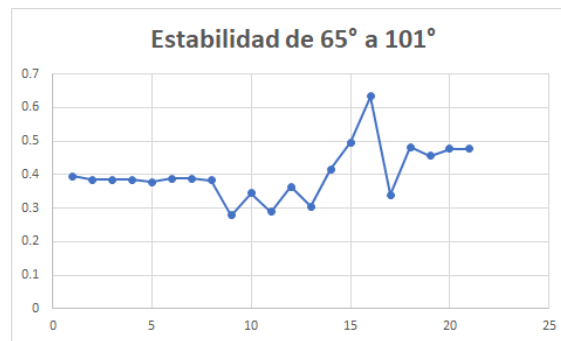


Figura 4.1. Valores de estabilidad con inclinación de  $65^\circ$  a una inclinación de  $101^\circ$

En la Figura 4.2 El valor de estabilidad disminuye al reducir la altura del brazo mientras se encuentra completamente estirado sobre el borde N1-N3 mostrando un reducido valor de estabilidad en la posición final.

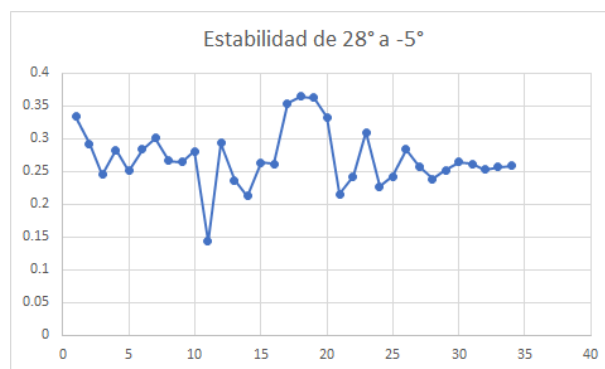


Figura 4.2. Valor de estabilidad de una inclinación de  $28^\circ$  a  $-5^\circ$  sobre borde N1-N3



El valor de estabilidad se mantiene constante al dejar el manipulador en una posición estática durante unos segundos como muestra la Figura 4.3.

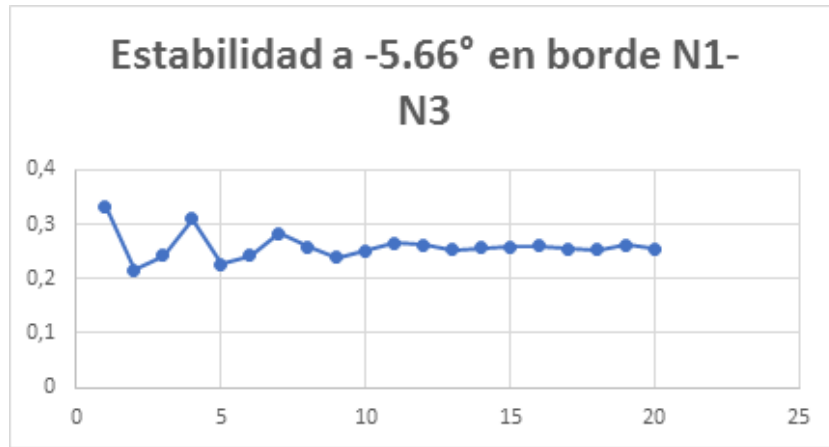


Figura 4.3. Se muestra el valor de estabilidad al mantener el brazo manipulador en una sola posición durante unos segundos. En donde, los valores de estabilidad no varían.

La Figura 4.4 muestra el recorrido realizado del brazo manipulador. Se puede observar como en las configuraciones en donde el brazo y el efector final se encuentran en una posición cercana a los 90° el valor de estabilidad aumenta y al reducir la altura en donde el brazo se encuentra más alejado de la base, la estabilidad disminuye considerablemente encontrándose dentro de un rango con riesgo de volcadura como muestran los datos al final de la gráfica.



Figura 4.4. Valores de estabilidad durante la primera prueba.

## 4.2.-CASO 2

El valor de estabilidad durante el recorrido del brazo manipulador entre los bordes N1-N3 y N3-N4, el brazo al encontrarse completamente estirado presenta valores de estabilidad bajos. Figura 4.5.

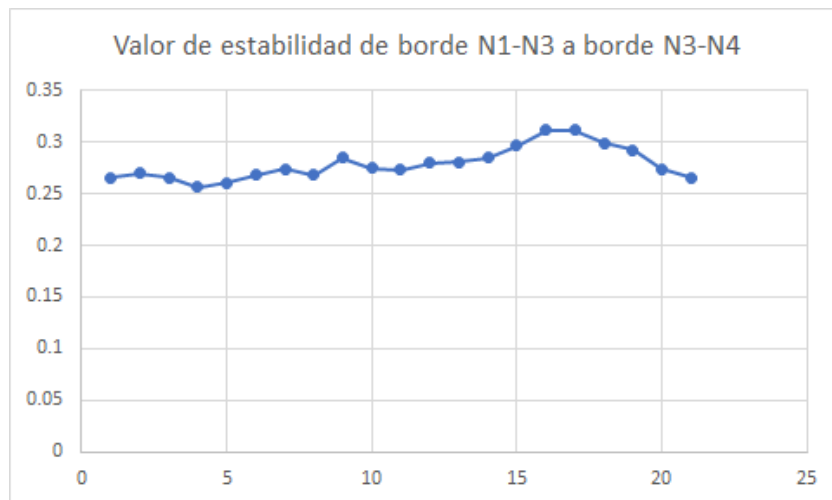


Figura 4.5. Valores de estabilidad durante el recorrido entre el borde N1-N3 y N3-N4.

La Figura 4.6 muestra el aumento del valor de estabilidad al realizar el cambio de posición en el manipulador y en el efector final de una posición de  $134.96^\circ$  a  $145.42^\circ$ , la estabilidad mejoró debido a que el efector final se acerca a la base del manipulador.

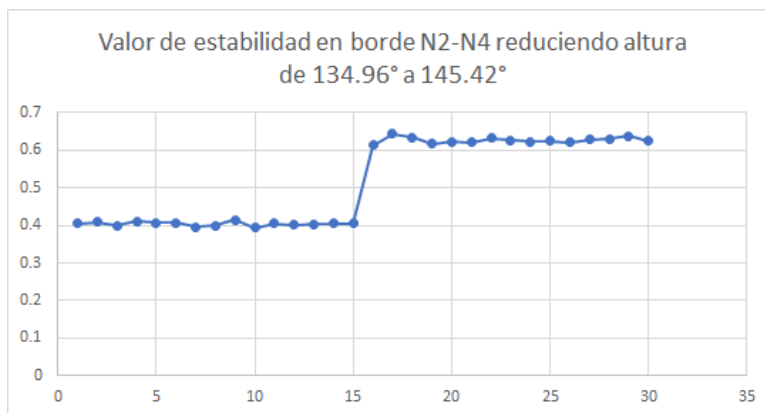


Figura 4.6. Valor de estabilidad en el borde N2-N4. La estabilidad mejora al reducir la distancia entre el efector final y la base del manipulador.

Valores de estabilidad durante el recorrido del brazo manipulador entre los bordes N2-N4 y N1-N2. El recorrido realizado por el brazo con una configuración con alto valor de estabilidad muestra que se eleva el valor de estabilidad al pasar por las ruedas de la base y posicionarse cerca de ellas. Figura 4.7.

La segunda gráfica muestra la reducción del valor de estabilidad al regresar el brazo manipulador al borde N2-N4 mostrando un comportamiento casi simétrico.

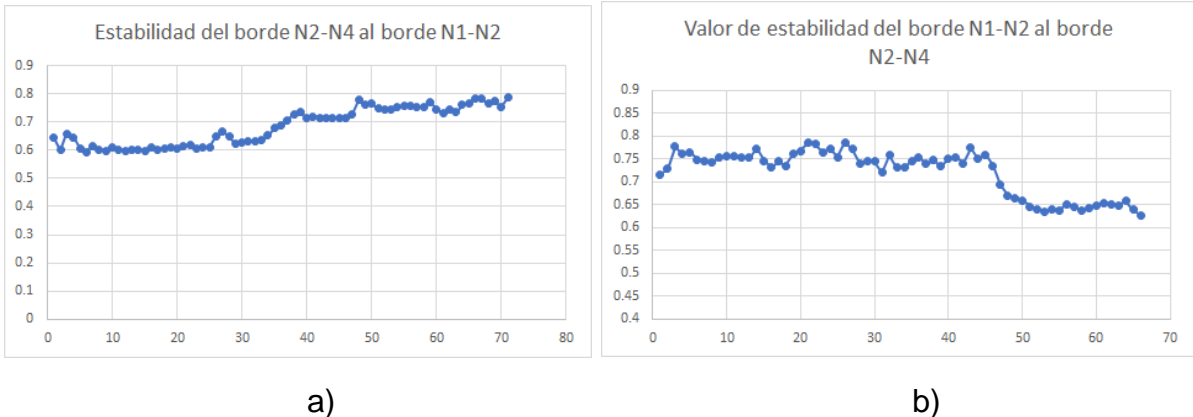


Figura 4.7. Valor de estabilidad al desplazar el brazo manipulador entre los bordes N2-N4 y N1-N2. Los valores muestran que la medición es confiable.

Al cambiar la posición del efector final de un punto cercano a la base del manipulador a uno más alejado, el valor de estabilidad reduce considerablemente, mostrando riesgos de volcadura.

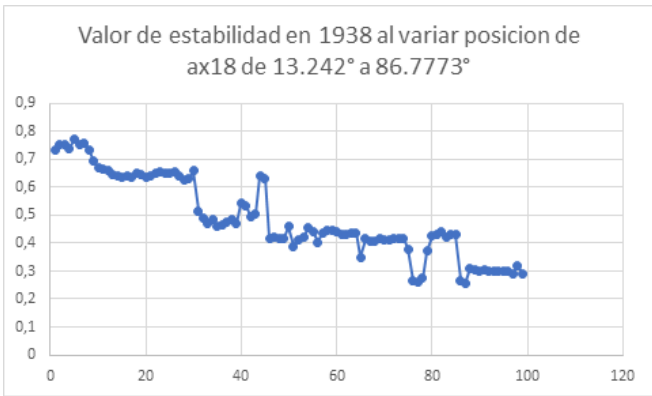


Figura 4.8. Valor de estabilidad en el borde N2-N4 se observa cómo el valor de estabilidad se reduce al realizar el cambio de posición en el efector final.

### 4.3.- CASO 3

Las gráficas muestran los valores de estabilidad al realizar el cabeceo del brazo manipulador completamente estirado entre los bordes N1-N2 y N3-N4 con una inclinación de  $8.4^\circ$ .

Se puede observar cómo los valores de estabilidad aumentan al posicionar el brazo manipulador dentro del área de la base de la plataforma y mientras que, al posicionarse sobre los bordes el valor disminuye considerablemente de un promedio de 0.6 a un valor aproximado de 0.35, los valores de inclinación variaron entre cada recorrido del brazo mostrando, aun así, valores de estabilidad similares en cada recorrido.

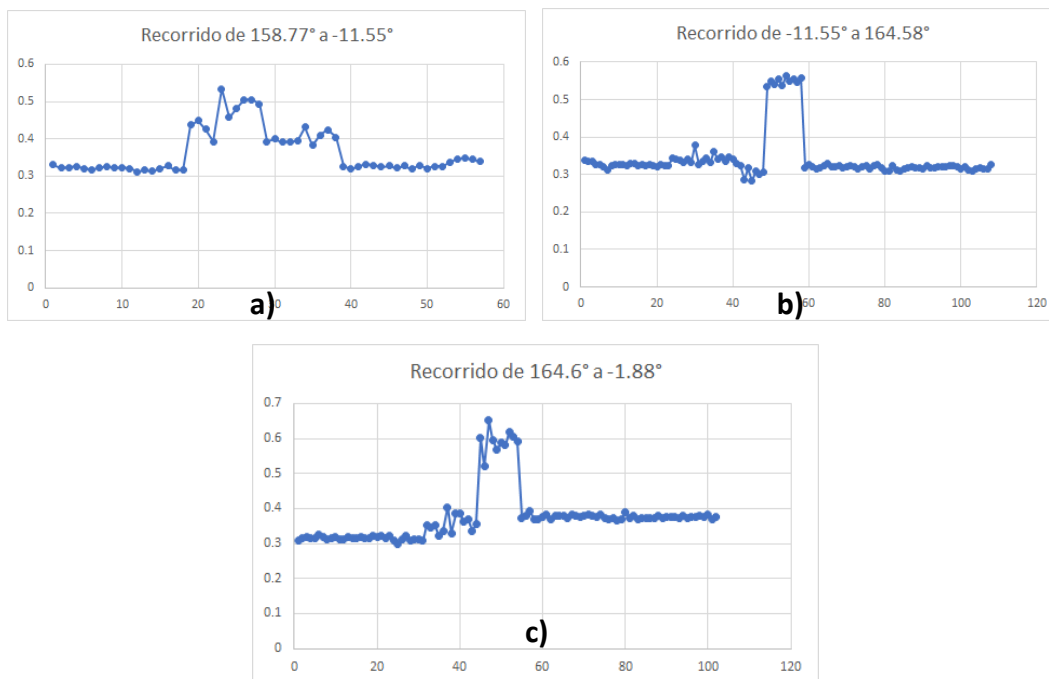


Figura 4.9. Valores de estabilidad entre los bordes N1-N2 y N3-N4.

- a) Primer recorrido realizado mostrando una simetría en los valores de estabilidad entre los bordes contrarios.
- b) Segundo recorrido de una posición de  $-11.55^\circ$  a una de  $164.58^\circ$
- c) Tercer recorrido donde el valor de estabilidad aumenta ligeramente, pero se mantiene constante.

Para comparar los datos anteriores se obtuvieron muestras del valor de estabilidad en un plano horizontal realizando el mismo recorrido entre los bordes N1-N2 y N3-N4, las gráficas muestran que posee un comportamiento similar al caso pasado sin mostrar un alto riesgo de volcadura, incluso sin mostrar variación entre las pruebas pasadas.

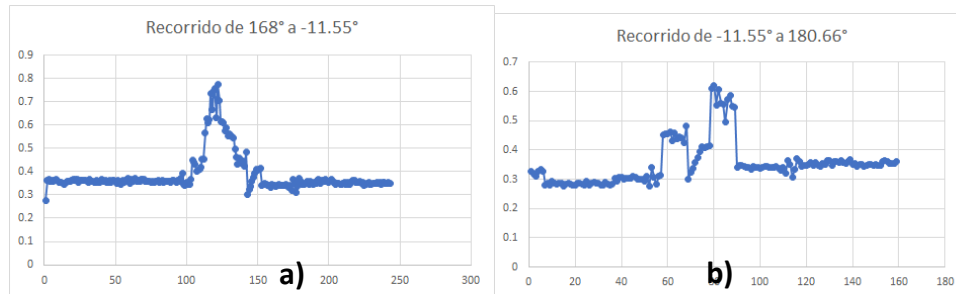


Figura 4.10. Valores de estabilidad entre los bordes N1-N2 y N3-N4 a 0°.

a) Recorrido del brazo manipulador de 165° a  $-11.55^\circ$ , los datos muestran simetría como en la prueba anterior.

b) Segundo recorrido realizado.

#### 4.4.- CASO 4

Las gráficas nos muestran como los valores de estabilidad son constantes al inicio del recorrido en la superficie horizontal, luego reducen al pasar por la superficie inclinada y al realizar el recorrido de regreso se puede observar como el valor de estabilidad iba en aumento de nuevo, esto ocurre en ambas ocasiones de la prueba mostrando valores de estabilidad parecidos.

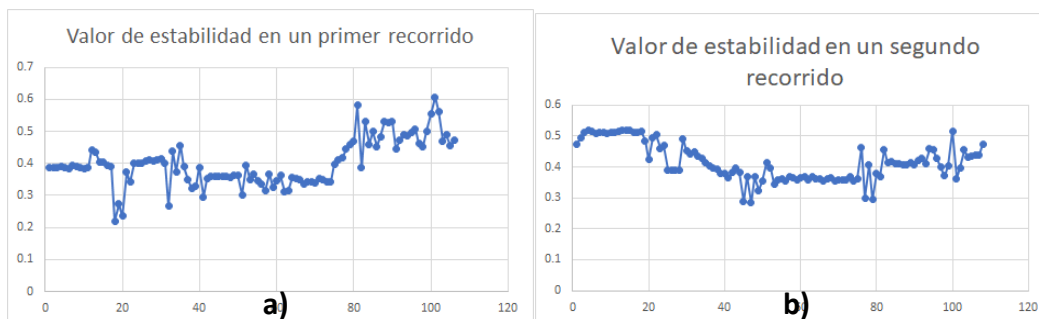


Figura 4.11. Valores de estabilidad al realizar el recorrido sobre una superficie inclinada a) Valores durante el primer recorrido realizado por el manipulador. b) Valores de estabilidad durante un segundo recorrido, se puede observar como el comportamiento es similar durante ambos recorridos y que los valores mostrados son similares.

#### 4.5.- CASO 5

Al igual que en el caso anterior, las gráficas muestran como los valores de estabilidad son constantes al inicio del recorrido en la superficie horizontal, después se reducen drásticamente al pasar por la superficie inclinada mostrando bajos valores de estabilidad debido a la posición del manipulador, y al realizar el recorrido de regreso se puede observar como el valor de estabilidad iba en aumento de nuevo aun manteniendo valores bajos de estabilidad, esto ocurre en ambas ocasiones de la prueba mostrando valores de estabilidad parecidos.

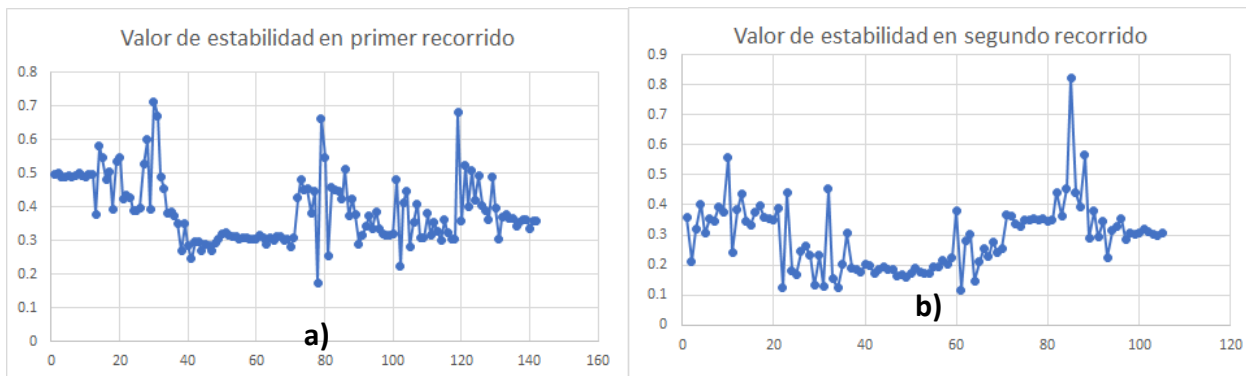
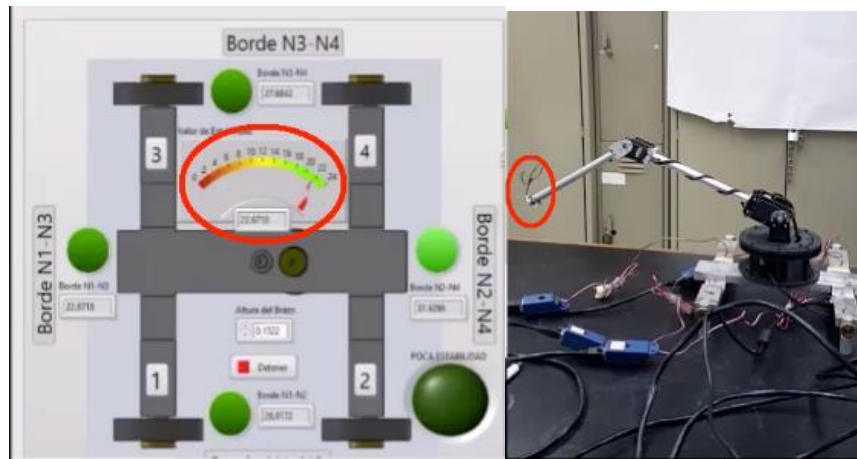


Figura 4.12. Valores de estabilidad al realizar el recorrido sobre una superficie inclinada a) Valores durante el primer recorrido realizado por el manipulador.

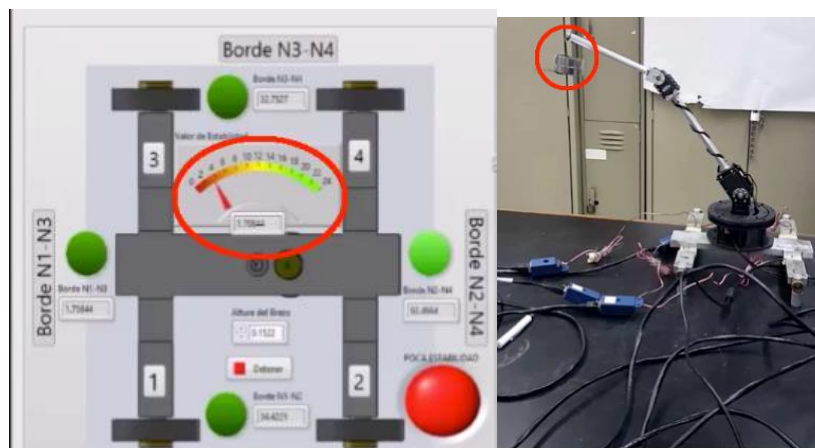
b) Valores de estabilidad durante un segundo recorrido, se puede observar como el comportamiento es similar durante ambos recorridos y que los valores mostrados son similares.

#### 4.6.- CASO 6

En la Figura 4.13a se puede observar que el manipulador presenta una estabilidad elevada a pesar de que el efector final se encuentre cercano al piso, debido a que no lleva ninguna carga externa. La Figura 4.13b muestra al brazo en una posición más elevada ya que no pudo bajar, como en el caso anterior, por la restricción de estabilidad con la que cuenta el sistema, de no ser así la carga de 4N que lleva el actuador final provocaría el vuelco del manipulador.



a)



b)

**Figura 4.13.** Prueba de estabilidad. a) Instrumento virtual indicando nivel alto de estabilidad con el manipulador sin carga, y; b) Instrumento virtual indicando nivel bajo de estabilidad con el manipulador con carga.

**Tabla 1.**

Orientación vs nivel de estabilidad

<b>Prueba 1 (sin carga)</b>		
<b>Orientación brazo</b>	<b>Valor de estabilidad</b>	<b>de</b>
<b>90°</b>	24	
<b>75°</b>	24	
<b>56°</b>	22	

<b>Prueba 2 (2N)</b>		
<b>Orientación brazo</b>	<b>Valor de estabilidad</b>	<b>de</b>
<b>90°</b>	24	
<b>75°</b>	17	
<b>56°</b>	11	

<b>Prueba 3 (4N)</b>		
<b>Orientación brazo</b>	<b>Valor de estabilidad</b>	<b>de</b>
<b>90°</b>	24	
<b>75°</b>	14	
<b>56°</b>	5	

En la prueba 1 la estabilidad presenta una variación mínima y es elevada, lo que significa que el peso del brazo mecánico es mucho menor que el peso del chasis del manipulador.

La prueba 2 muestra una mayor variación estabilidad ya que, en relación al caso anterior, el brazo presenta mayor peso por la carga aplicada sobre el actuador final, sin embargo, tampoco se alcanza un valor crítico que restrinja el movimiento para evitar el vuelco.

Finalmente, la prueba 3 llega alcanzar un valor crítico “5” por lo que el movimiento del brazo se restringe para no perder el equilibrio.



## CONCLUSIONES

Es posible cuantificar la estabilidad de un manipulador móvil a través del criterio de estabilidad basado en las reacciones normales promedio entre los apoyos y el suelo, para poder predecir qué tan propenso está un manipulador móvil a volcarse. El sistema responde a la transición de una superficie horizontal a una inclinada tal y como lo muestran los resultados de las pruebas realizadas.

Es factible monitorear la estabilidad tip-over por medio de extensometría eléctrica de un manipulador mientras se encuentra en total movimiento siempre y cuando el chasis presente una geometría que facilite el cálculo de las reacciones normales en los apoyos, es decir, las fuerzas se pueden medir en función de la deformación que sufre el chasis.

La instrumentación del chasis con strain gages permite medir las reacciones en los apoyos, las cuales son la base principal del algoritmo de estabilidad que se está aplicando.

El uso de los motores de la marca Dynamixel en conjunto con el Instrumento virtual permitieron realizar las pruebas anteriores, sin embargo, presentan áreas de oportunidad en la comunicación por lo que se planea buscar nuevas alternativas de comunicación.

Debido a que los resultados obtenidos en el presente trabajo fueron favorables, se buscará en un futuro implementar el sistema de instrumentación en plataformas elevadoras industriales para hacerlas más seguras y productivas ya que los sistemas de seguridad con los que cuentan actualmente para evitar el vuelco restringen considerablemente su desempeño.

El monitoreo de la estabilidad en un manipulador móvil permitirá realizar un estudio sobre las posturas del manipulador más adecuadas que permitan operar de forma segura y efectiva, es decir, si se requiere trabajar en una determinada posición, y la medida de estabilidad indica que dicha posición no es muy favorable, entonces se debe buscar una configuración adecuada del sistema para mejorar la medida de estabilidad.

Finalmente es aceptable implementar el sistema de medición de estabilidad en un manipulador autónomo u operado utilizando celdas de carga colocadas en los apoyos (llantas o estabilizadores) mientras la plataforma móvil se encuentra estática y solo el brazo presente movimiento.

## REFERENCIAS

- [1] Reyes, F. (2011) "Robótica: Control de robots manipuladores". México, Puebla: Alfaomega pp. 10.
- [2] Blume, C., Gremminger, K., Messemer, G., Smidt, D., Wadle, M. (1989, May) "EMIR A Combination Of Manipulator and Robot for New Outdoor Applications in Unstructured Environments," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Scottsdale, AZ.
- [3] Babu, N. (2015) "Design and analysis of multipurpose mobile manipulator for defence application and study the dynamic effects on stability of an unmanned tracked vehicle" Robotics, Automation, Control and Embedded Systems (RACE), International Conference on, IEEE Conference Publications pp. 1-6.
- [4] Wang, F., Tang, C., Ou, Y., Xu, Y. (2012, 6-8 July) A real-time human imitation system. 10<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Beijing China, pp. 3692-3697.
- [5] Li, Y., Frank, A. A. (1986, June) "A moving base robot," in Proc. of American Control Conference, (Seattle, WA), pp. 192.7-193.2.
- [6] Dubowsky, S., Vance, E. E. (1989, May) Planning mobile manipulator motions considering vehicle dynamic stability constraints," in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. (Scottsdale, AZ), pp. 1271-1276.
- [7] Shiller, Z., Gwo, Y. R. (1989, Apr.) "Dynamic motion planning of autonomous vehicles, IEEE Trans. On Robotics and Automation, vol. 7. pp. 241-249.
- [8] McGhee, R. B., Frank, A. A. (1986) "On the stability properties of quadruped creeping gait," Mathematical Biosciences, vol. 3, no. 2, pp. 331-351.
- [9] McGhee, R., Iswandhi, G. (1979) "Adaptative locomotion of a multilegged robot over rough terrain," IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics vol. SMC-9. no. 7. pp. 176-182.
- [10] Song, S., Waldron, K. (1989) Machines that Walk. Cambridge, MA: MIT Press.
- [11] Sreenivasan, S., Wilcox, B. (1994) "Stability and traction control of an actively actuated micro-rover," J. of Robotic Systems, vol. pp. 487-502.
- [12] Davidson, K., Schweitzer, G. (1990, Dec.) "A mechanics-based computer algorithm for displaying the margin of static stability in four-legged vehicles, Trans ASME J. Mechanical Design, vol. 112, no. 2, pp. 480-487.
- [13] Sugano, S., Huang, Q., Kato, I. (1993) "Stability criteria in controlling mobile robotic systems," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. pp. 832-838

- [14] Kang, D., Lee, Y., Lee, S., Hong, Y. (1997, April) Bien 7 A Study on an Adaptive Gait for a Quadruped Walking Robot Under External Forces. In: IEEE Proc of International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque. NM USA 20-25: 2777-2782.
- [15] Kim, W. K., Chung, Y., Youm, Lee, B. H. (2002) Real time ZMP compensation method using null motion for mobile manipulators," Proc. Of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 196-197.
- [16] Papadopoulos, E G., Rey, D. A. (1996) "A new measure of tipover stability margin for mobile manipulators" Proc. of the IEEE Int. Conf, on Robotics and Automation, pp. 3111-3116.
- [17] Rey, D. A., Papadopoulos, E. (1997, 7-11 Sep.) Online Automatic Tip-over Prevention for Mobile Manipulators. In: IEEE Proc. of the International Conference on 1278 Intelligent Robots and Systems, Grenoble, France; 3: 12-73
- [18] Zhong, G., Kobayashi, Y., Emaru, T., Hoshino, Y., (2013) Optimal Control of the Dynamic Stability for Robotic Vehicles in Rough Terrain. Nonlinear Dynamics pp. 73.1-2 981-992.
- [19] Safar, M., Watanabe, K., Maeyama, S., Nagai, I. (2012, 20-24 Nov.) Tip-over Stability Prediction for Holonomic Omnidirectional Transport Mobile Robot. In Proc. of 6<sup>th</sup> International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and 13<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Intelligent Systems, Kobe, Japan, pp. 763-768.
- [20] Long., S., Xin, G., Deng, H. & Zhong, G. (2015, Dec.) An improved force-angle stability margin for radial symmetrical hexapod robot subject to dynamic effects International Journal of Advanced Robotic Systems.
- [21] Moosavian, S. A., Alipour, K. (2006, October) "Moment-height tip-over measure for stability analysis of mobile robotic systems." in 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. pp. 5546-5551.
- [22] Alipour, Khalil, Moosavian, S. (2015) Dynamically stable motion planning of wheeled robots for heavy object manipulation. Advanced Robotics, 29.8: 545-560.
- [23] Li B, Liu J, Tan D. (2005) Research on the Tipover Stability of a Reconfigurable Modular Robot. Robot, 27.3: 241-246,283.
- [24] Wang G, Chen X. Ye X. (2013, 4-7 Aug.) Research on Anti- rollover Stability for Crablike Robot. IEEE international Conference on Mechatronics and Automation Takamatsu, Japan. pp. 1229-1233.
- [25] Hatano, M., & Obara, H. (2003, August). Stability evaluation for mobile manipulators using criteria based on reaction. In SICE 2003 Annual Conference, Fukui, Japan 4-6 Aug. 2003. 2: 2050-2055). IEEE.
- [26] Abo-Shanah, R.F. and N. Sepehri. (2001) On dynamic stability of manipulators mounted on mobile platforms. Robotica, 94: pp. 439-449.

- [27] Abo-Shanah, R.F., Sepehri, N. (2002) Effect of base compliance on the dynamic stability of mobile manipulators. *Robotics*, 206: pp. 607-613.
- [28] Abo-Shanab, R. F., Sepehri, N. (2005, June) Tip-Over Stability of Manipulator-Like Mobile Hydraulic," *ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control* Vol. 127, pp. 295-301.
- [29] Li, Y., Liu, Y. (2005) Kinematics and tip-over stability analysis for the mobile modular manipulator" *Proc. of the IMechE Part C: J. of Mechanical Engineering Science*, Vol. 219 (3), pp. 331-342.
- [30] Meghdari, A., Nader, D., Alam, M.R. (2005) "Neural network-based observer for real-time tipover estimation". *Mechatronics*, Vol. 15 (8), pp. 989-1004.
- [31] Li, Y., Liu, Y. (2006) Real-Time Tip Over Prevention and Path Following Control for Redundant Nonholonomic Mobile Modular Manipulators via Fuzzy and Neural-Fuzzy Approaches. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 284-753.
- [32] Takubo, T., H. Arai, et al. (2002). Control of mobile manipulator using a virtual impedance wall. *Robotics and Automation (2002) Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*.
- [33] Mu, X., Q. Wu, et al. (2005). On tip-over situation of mobile platforms via impact effects. *2005 IEEE International Conference on Control Applications, CCA, August 28, 2005 - August 31, 2005, Toronto, ON, Canada, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*
- [34] Qiu, C., Q. Cao, et al. (2008). "Improving the stability level for on-line planning of mobile manipulators." *Robotica* 27(03): 389.
- [35] Wang, J. and Y. Li (2008). Kinematics and tip-over stability analysis for a mobile humanoid robot moving on a slope. *IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL 2008, September 1, 2008 - September 3, 2008, Qingdao, China, Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society.*
- [36] Haddad, M., S. Hanchi, et al. (2009). "Point-to-point trajectory planning of wheeled mobile manipulators with stability constraint. Extension of the random-profile approach." *European Journal of Mechanics - A/Solids* 28(3): 477-493.
- [37] Morales, J., J. L. Martinez, et al. (2009). Center of gravity estimation and control for a field mobile robot with a heavy manipulator. *Mechatronics, 2009. ICM 2009. IEEE International Conference on*.
- [38] Yang, Y., X. Zhao, et al. (2011). Study of Dynamic Transient Stability of a 2-Link Wheeled-Suspended Mobile Flexible Manipulator. *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference on*.
- [39] Bascarevic, N. et al. (2012, 3-5 Oct.) Tip-over stability examination of a compliant anthropometric mobile robot. In: *IEEE International Conference*

on Control Applications, CCA. Dubrovnik, Croatia 3: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

- [40] Choi, D., M. Kim, et al. (2012). "Development of a rapid mobile robot with a multi-degree-of-freedom inverted pendulum using the model-based zero-moment point stabilization method." *Advanced Robotics* 26(5-6): 515-535.
- [41] Lee, S., M. Leibold, et al. (2012). Online stability compensation of mobile manipulators using recursive calculation of ZMP gradients. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2012, 445 Hoes Lane / P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, United States, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [42] Liang, H. (2012). Tip-over avoidance algorithm for modular mobile manipulator. *Innovative Engineering Systems (ICIES)*, 2012 First International Conference on.
- [43] Juhairi Aziz Safar, M. et. al. (2012) Tip-over stability prediction for a holonomic omnidirectional transport mobile robot, Department of Intelligent Mechanical Systems, Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Japan; International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems, SCIS/ISIS p 763-768, 2012, 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems, SCIS/ISIS 2012F
- [44] Dube, Chioniso. (2013). Experimental validation of tip over stability of a tracked mobile manipulator. *IEEE AFRICON Conference*. 1-6. 10.1109/AFRCON.2013.675-7728.
- [45] Alipour, Khalil & Hasanpour, Arman & Daemy, Parisa. (2014). Comparing two online tip-over avoidance algorithms for mobile manipulators. 2014 2nd RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics, ICRoM 2014. 310-315.
- [46] Nikhade G.R. Chiddarwar S.S.et al. (2015) "Tip-Over Stability of Omni-Directional Mobile Robot", International Conference on Communication, Control and Intelligent Systems (CCIS) p 299-303, March 21, 2016, Engg., Shri Ramdeobaba College of Engg. and Mgmt. Nagpur--440013, India.
- [47] Souza, J. J. A. (2017) "Análisis de Estabilidad de un Manipulador Híbrido Móvil", Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [48] Martínez, N.; Souza, J.; González, V. (2017) "Análisis de la estabilidad en un manipulador móvil sujeto a fuerzas externas aplicando el criterio MNGR" ISBN: 978-607-9394-XX-X, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.

- [49] García, H. J. C. (2016) "Instrumentación de Prototipos de Estabilizadores de Plataformas Móviles para Medición de Estabilidad Mecánica", Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [50] Matilsa. (2014) Curso de Seguridades y Tipos en el manejo de Plataformas Elevadoras. (Internet), España, Disponible desde: [http://www.matilsaformacion.es/doc/curso\\_plataformas\\_elevadoras.pdf](http://www.matilsaformacion.es/doc/curso_plataformas_elevadoras.pdf) [Acceso 5 de febrero de 2019].
- [51] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (2015) NTP 1040: Plataformas elevadoras móviles de personal (II): Gestión preventiva para su uso seguro. (Internet), Madrid, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) Disponible desde: <https://www.insst.es/documents/94886/330477/NTP+1040.pdf/12ad6f7f-c8b8-4ae9-bd42-680d45e132ba> [Acceso 5 de febrero de 2019].
- [52] Souza, J; Gonzalez, V; Elorza, N and Martinez, N. (2014, Octubre) Prueba experimental de un algoritmo de Estabilidad Tip-Over basado en el criterio de las reacciones normales promedio. In: SOMI XXIX Congreso de Instrumentación, Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico 29-31.
- [53] eCourses (2019) STRAIN GAGES BASICS [Internet], Disponible desde: [https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=me&chap\\_sec=08.3&page=theory](https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=me&chap_sec=08.3&page=theory) [Visitado el 20/03/19 a las 23:30]
- [54] National Instruments (2013) Cómo hacer medidas con células de carga o transductores de presión. [Internet], Estados Unidos, National Instruments. Disponible desde: <http://www.ni.com/tutorial/7138/es/> [Acceso 19 de febrero de 2019]
- [55] Mendiburu D. Henry A. (2006) Instrumentación Virtual Industrial [Internet], INDECOPI-PERÚ Disponible desde: <http://es.scribd.com/doc/7288743/InstrumentacionVirtual-Industrial#scribd> [Acceso 18 de octubre de 2017]
- [56] CIMAT (2003) Visita al Centro de Investigación en Óptica (CIO). (Internet), México, CIMAT Disponible desde: [http://www.cimat.mx/ciencia\\_parajovenes/tcj/2003/optica/notas\\_visita.html](http://www.cimat.mx/ciencia_parajovenes/tcj/2003/optica/notas_visita.html) [Acceso 13 de Marzo de 2017]
- [57] Chacón R. Rugeles (2002) "La Instrumentación Virtual en la Enseñanza de la Ingeniería Electrónica." Acción Pedagógica. Vol. 11, No. 1 pp. 74-84
- [58] LabVIEW User Manual April (2003) Edition, National Instruments, pp. 1-1 a 4-21, 11500 North Mopac Expressway: Austin, Texas 78759-3504 USA <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>

- [59] National Instruments (2015) NI 9237 Datasheet. (Internet) Estados Unidos. Disponible desde: [http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a\\_02.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf) [Acceso 25 de Enero 2019]
- [60] National Instruments (2014) Conexión de Galgas Extensiométricas y Resistores Tipo Shunt a un NI 9237. (Internet) Estados Unidos. Disponible desde: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/12E1B21BB0F0B29F86257B42006B7A91> [Acceso 28 de Enero 2019]
- [61] National Instruments (2017) NI cDAQ-9181/9184/9188/9191 User Manual. (Internet) Texas. Disponible desde: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372780k.pdf> [Acceso 10 de Febrero 2019]
- [62] Robotshop (2003) EMG30 data. (Internet) Quebec, Canada. Disponible desde: <https://www.robotshop.com/media/files/pdf2/077-rb-dev-40.pdf> [Acceso 5 de febrero de 2019]
- [63] Robotshop (2015) Devantech. (Internet) Quebec, Canada. Disponible desde: <https://www.robotshop.com/en/devantech-md25-dual-h-bridge-dc-motor-driver.html> [Acceso 5 de febrero de 2019]
- [64] Norman Nise. Control Systems Engineering. John Wiley & Sons Inc, 4th edition, 2004.
- [65] Antonio Barrientos. Fundamentos de robotica. McGrawHill. Madrid, España, 1997
- [66] Dynamixel (2017) Dynamixel serie Mx. (Internet), Lake Forest, CA. Disponible desde: Robotis Sitio web: <http://www.robotis.us/mx-series/> [Acceso 30 de enero de 2019]
- [67] ROBOTIS (2017) Dynamixel MX28T. (Internet), Lake Forest, CA. Disponible desde: Robotis Sitio web: <http://www.robotis.us/dynamixel-mx-28t/> [Acceso 30 de enero de 2019]
- [68] ROBOTIS (2017) Dynamixel MX64T. (Internet), Lake Forest, CA. Disponible desde: Robotis Sitio web: <http://www.robotis.us/dynamixel-mx-64t/> [Acceso 30 de enero de 2019]
- [69] ROBOTIS (2017) Dynamixel AX18A. (Internet), Lake Forest, CA. Disponible desde: Robotis Sitio web: <http://www.robotis.us/dynamixel-ax-18a/> [Acceso 30 de enero de 2019]
- [70] ROBOTIS (2017) Dynamixel Usb2Dynamixel. (Internet), Lake Forest, CA. Disponible desde: Robotis Sitio web: [http://support.robotis.com/en/product/auxdevice/interface/usb2dxl\\_manual.htm](http://support.robotis.com/en/product/auxdevice/interface/usb2dxl_manual.htm) [Acceso 30 de enero de 2019]
- [71] García, H. J. C. (2016) "Instrumentación de Prototipos de Estabilizadores de Plataformas Móviles para Medición de Estabilidad Mecánica", Universidad Nacional Autónoma de México, México.