	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PLANTA VIRTUAL QUE INTERACCIONA
CON UN PLC, PARA SIMULAR Y CONTROLAR CONDICIONES DE ADHERENCIA
DE UN CUARTO DE VEHICULO LIVIANO EN PRUEBAS DE RUTA**

Nelson Arley Henao López

Juan Fernando Zapata Quintero

Ingeniería Mecatrónica

Director: Juan José Arbeláez Toro

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Enero 2017

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El sistema de suspensión de un vehículo es el encargado de mantener el confort sobre los ocupantes y garantiza la maniobrabilidad durante la conducción manteniendo adheridas las llantas al piso. La norma EuSAMA (European Shock Absorber Manufacturers Association), evalúa el estado de un sistema de suspensión respecto a la adhesión por medio de una prueba definida en un banco de ensayos, pero no existe un sistema que permita generar alertas y controles en el vehículo cuando la fuerza de adhesión a la vía este disminuyendo. En este trabajo se desarrollará un modelo multicuerpo que represente al vehículo y el camino, se caracterizará los componentes (masa, amortiguadores, resorte, llanta, geometría de los caminos entre otros) y se integrará un PLC Unitronics con el módulo de mecatrónica del software NX Siemens a través de una OPC server; para obtener una planta virtual que permita evaluar y controlar el comportamiento de un vehículo en cuanto a la adhesión, cuando transita a diferentes velocidades en rutas de tipo destapada, adoquinado y asfaltado.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Agradecemos principalmente a Dios por darnos fortaleza en los momentos difíciles de nuestra carrera y por darnos la sabiduría para afrontar las adversidades del conocimiento.

Al profesor Juan José Arbeláez Toro por su apoyo incondicional, paciencia, dedicación y por transmitirnos sus conocimientos en este trayecto como docente y asesor de nuestro trabajo de grado.

A nuestros padres por darnos la oportunidad y todo el apoyo necesario para culminar este proceso, de complementar un poco nuestros conocimientos y nuestra sabiduría.

A nuestros docentes por transmitirnos su sabiduría durante nuestro proceso de educación en la institución, permitiendo avanzar y formarnos como profesionales capaces de afrontar cualquier situación.

Y a amigos y aquellos que indirectamente aportaron para que este trabajo fuera posible

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

1. Estos son los acrónimos encontrados en todo el documento.
2. OPC: OLE for Process Control
3. HMI: Human Interface Machine
4. CAD: Diseño Asistido por Computadora
5. PLC: Controlador Lógico Programable
6. Visilogic: Software de programación del PLC Unitronics y del HMI

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PLANTA VIRTUAL QUE INTERACCIONA CON UN PLC, PARA SIMULAR Y CONTROLAR CONDICIONES DE ADHERENCIA DE UN CUARTO DE VEHICULO LIVIANO EN PRUEBAS DE RUTA

1. INTRODUCCIÓN.....

1.1. Generalidades.....

1.2. Objetivo general

- Objetivos específicos

1.3. Organización del trabajo.

2. MARCO TEÓRICO.....

2.1. Siemens NX.....

2.2. Diseño Mecatrónico

- Simulación Mecatrónica.....

2.3. Sistemas de control y comunicación

2.3.1. PLC (Controlador Lógico Programable)

2.3.2. Visilogic.

2.3.3. OPC Server

2.3.4. UniOPC.....

2.4. Norma EuSAMA.....

2.5. Caminos

2.6. Cuarto de Vehículo

- Suspensión
- Vehículo liviano

3. METODOLOGÍA

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Planta y conexión de la OPC.....

4.2. Representación del camino.....

4.3. Caracterización de un cuarto de vehículo liviano.

4.4. Modelo multicuerpo.....

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.5. Pruebas de desempeño.....

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. Conclusiones.....

REFERENCIAS

Bibliografía.....

APENDICE.....

Apéndice A. Programación de en lenguaje ladder.

APENDICE.....

Apéndice B. Montaje de planta y conexión de la OPC

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades.

Generalmente el proceso de la evaluación del estado de la suspensión se realiza mediante la implementación de la norma EuSAMA, que define la adhesión como la “Relación entre el mínimo valor de la fuerza vertical ejercida por una rueda, estimulada con una frecuencia de 0 a 25 Hz, y la misma fuerza medida a 0 Hz. (Arbelaez Toro Juan Jose, 2006). Es decir que a ciertas velocidades el amortiguador va perdiendo la fuerza que soporta generalmente y debido a esto la llanta va perdiendo la adherencia a la superficie perdiendo así el confort de los ocupantes del vehículo, además si el conductor no se percata que se está presentando esta anomalía podría llegar a ocurrir un accidente y en casos extremos la muerte.

La implementación de procesos en el campo de la simulación mediante software CAD se ha ido ampliando de tal manera que, en gran parte de pruebas realizadas a diferentes procesos, se hacen mediante modelos virtuales que representan en una condición ideal al funcionamiento y modelado de estos. Un modelo es una idealización de la realidad utilizado para plantear un problema, normalmente desde un punto de vista matemático. Es una representación conceptual de un proceso o sistema, con el fin de analizar su naturaleza, desarrollar o comprobar hipótesis o supuestos y permitir una mejor comprensión del fenómeno real al que el modelo representa. Para hacer un modelo se plantea una serie de hipótesis, de manera que lo que se quiere representar esté suficientemente plasmado en la idealización pero que sea lo bastante sencillo para ser manipulado y estudiado. (Arbelaez Toro Juan Jose, 2006)

El amortiguador es parte constituyente de la suspensión de un vehículo, la cual se encarga de absorber choque debido a las irregularidades del terreno por el que circula; de aumentar la comodidad de los pasajeros y el control del vehículo para mantener las ruedas en contacto con el pavimento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Se puede decir que las funciones básicas de la suspensión son las siguientes:

- Reducir las fuerzas transmitidas por causa de las irregularidades del terreno.
- Mantener el control direccional del vehículo.
- Mantener una correcta alineación de las ruedas.
- Soportar la carga del vehículo.
- Mantener la altura óptima del vehículo.

(Arranz J), argumenta que una simulación es un experimento efectuado sobre un elemento en este caso mecánico. Un modelo matemático puede ser ejecutado en un ordenador; la simulación puede darse mediante métodos numéricos o métodos analíticos. De ésta forma, la simulación es una forma simple y segura de efectuar un experimento. La simulación no suele ser utilizada de manera aislada, sino que se combina con técnicas analíticas para conseguir mejores resultados. La figura 1 muestra el esquema de un ciclo de simulación. (Javier, 2011)

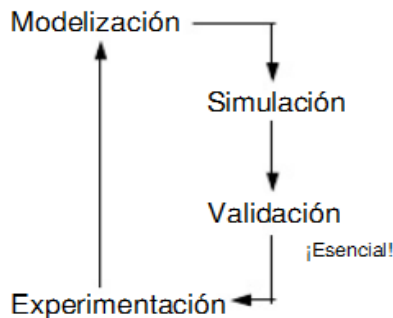


Figura 1. Esquema ciclo simulación. **Fuente:** Arranz, J.

En general este proyecto se realizó con la finalidad de evitar intervenir el vehículo implementando un control que permita al usuario del vehículo saber cuándo las llantas están perdiendo la adherencia a la superficie. Todo esto se logró mediante pruebas realizadas en la plataforma virtual implementada en NX con datos obtenidos en tres vías diferentes (adoquinada, asfaltada y destapada) ya que el vehículo y el sistema de suspensión presentan diferentes comportamientos dependiendo del tipo de vías y dependiendo también de la velocidad en el que estos operan.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.2. **Objetivo general**

Diseñar y construir una planta virtual que interacciona con un PLC, para simular y controlar condiciones de adherencia de un cuarto de vehículo liviano en pruebas de ruta.

• **Objetivos específicos**

- Construir los modelos multicuerpo para un cuarto de vehículo liviano y la planta virtual que simula las pruebas de ruta.
- Caracterizar los componentes que conforman los modelos multicuerpo.
- Generar la interfaz PLC para interactuar con la planta virtual.
- Elaborar un control para interactuar con la planta virtual desde el PLC, que permita penalizar la variable adhesión para garantizar la maniobrabilidad y seguridad del vehículo.

1.3. **Organización del trabajo.**

Este trabajo se divide en 5 capítulos donde se describe el proceso del diseño, la implementación y construcción de una planta virtual que interacciona con un PLC, para simular y controlar condiciones de adherencia de un cuarto de vehículo liviano en pruebas de ruta.

En el primer capítulo se describe la necesidad de acondicionar y efectuar este tipo de pruebas para mejorar y asegurar el confort de los vehículos livianos en los diferentes tipos de vías por las que estos transitan.

Así mismo en el segundo capítulo se encuentra el marco teórico que da pie para entender los conceptos vitales para facilitar al lector la comprensión de este proyecto.

En el tercer capítulo se halla la metodología, es decir cada uno de los pasos que se llevaron a cabo para la implementación y sustentación de este trabajo.

Luego en el cuarto capítulo se habla de los resultados obtenidos y recomendaciones para un mejor desarrollo de la plataforma virtual.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Finalmente, en el quinto capítulo se describen las conclusiones y recomendaciones para una futura intervención y mejora en la que se involucre este tipo de investigación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Siemens NX.

Es un software PLM (Product Lifecycle Management) que trabaja de forma integrada herramientas CAD, CAE, CAM; además permite el enlace y la comunicación entre diversos software y hardware de control.

Nx-Siemens está conformado por una plataforma multicuerpo (solución dinámica y cinemática) integrada a sistemas de control, para este trabajo se utilizó este software para lograr la simulación del modelo multicuerpo virtual y de esta manera enlazar el PLC por medio de una OPC, para ello se usó del módulo de conceptos de diseño mecatrónico donde se realizó el modelado de la planta (véase figura 2).

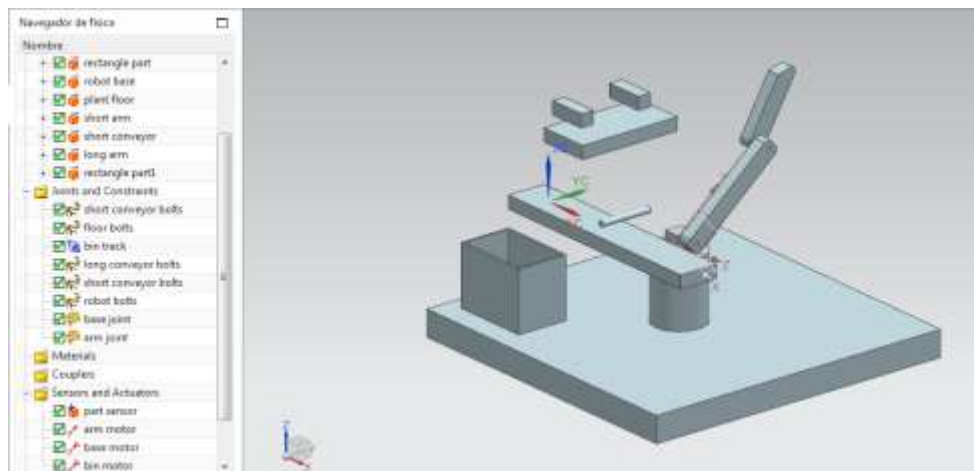


Figura 2. Entorno conceptos de diseño mecatrónico siemens NX.

Fuente: PLM training (Siemens)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.2. Diseño Mecatrónico

El diseño mecatrónico está orientado a definir un proceso para la generación de un producto de forma tal que aproveche el avance tecnológico permitiendo así acelerar el desarrollo de soluciones tradicionalmente mecánicas que respondan ágilmente a los cambios del mercado, es decir, un sistema mecatrónico se define como un sistema compuesto de partes mecánicas, eléctricas y electrónicas, dotadas de sensores que registran la información, microprocesadores que la interpretan, la procesan, analizan y partes que reaccionan ante esta información para realizar acciones requeridas por el proceso. (A, 2003)

- **Simulación Mecatrónica**

El constante avance del software y hardware en los últimos años ha cambiado la forma de comprender el concepto de Diseño Asistido por Computador ya que actualmente se entiende como la integración de la parte mecánica con la parte de control. Esto ha permitido que los profesionales relacionados a estas tecnologías mejoren su productividad y su calidad, de manera que puedan dedicar mayor tiempo a la mejora de sus diseños. La aplicación de CAD en la ingeniería incluye la elaboración de diagramas de diversos tipos, representación normalizada de piezas para su diseño y fabricación, representación tridimensional de modelos dinámicos, análisis con elementos finitos, aplicaciones en realidad virtual, robótica, etc., por medio de software de alto nivel. Una de las características generales que tiene un software de CAD es que permite el desarrollo de sistemas virtuales dentro de un entorno, permitiendo que el diseñador analice un sistema dinámico sin la necesidad de fabricar un prototipo. (Carro Suarez Jorge, 2003) En la figura 13 se muestra un modelo de diseño mecatrónico.

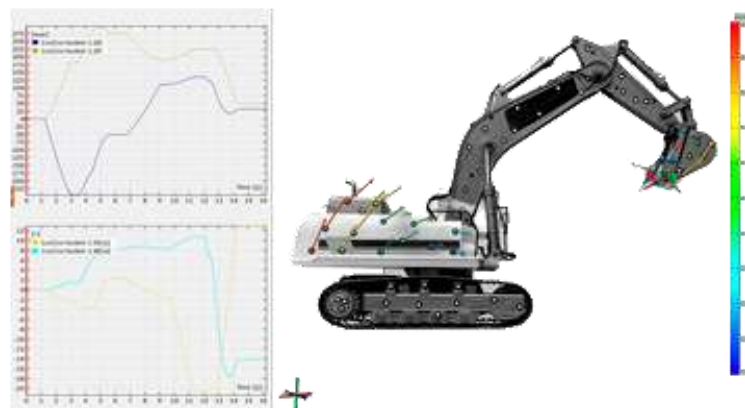


Figura 3. Diseño de un sistema mecatrónico asistido por un software CAD.

Fuente: <http://www.cimco.com.mx/index.html>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3. Sistemas de control y comunicación

2.3.1. PLC (Controlador Lógico Programable)

Un PLC (Véase figura 3) es un dispositivo digital electrónico con una memoria programable para el almacenamiento de instrucciones, que permite la ejecución de funciones lógicas, secuenciales, temporizadas, de conteo y aritméticas; con el objeto de controlar máquinas y procesos. También se puede definir como un equipo electrónico, el cual realiza la ejecución de un programa de forma cíclica. La ejecución del programa puede ser interrumpida momentáneamente para realizar otras tareas consideradas más prioritarias, pero el aspecto más importante es la garantía de ejecución completa del programa principal. Estos controladores son utilizados en ambientes industriales donde la decisión y la acción deben ser tomadas en forma muy rápida, para responder en tiempo real. Los PLC son utilizados donde se requieran, tanto controles lógicos, como secuenciales o ambos a la vez. (Micromecanica)

El PLC es uno de los elementos principales en el proceso de simulación, ya que por medio de este dispositivo electrónico se permite enviar o recibir datos y ordenes hacia NX para su correcto funcionamiento y de allí poder realizar el análisis necesario para la implementación de este proyecto.



Figura 4. PLC Unitronics V1040 entradas y salidas.

Fuente: <http://unitronicsplc.com/vision-series-vision1040/>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3.2. Visilogic.

Es un software que permite programar autómatas de la gama Visión de la marca Unitronics y tiene una interfaz gráfica intuitiva, además permite la generación del código en lenguaje Ladder (véase figura 5) o escalera del PLC y el sistema SCADA (véase figura 6) de la pantalla HMI.

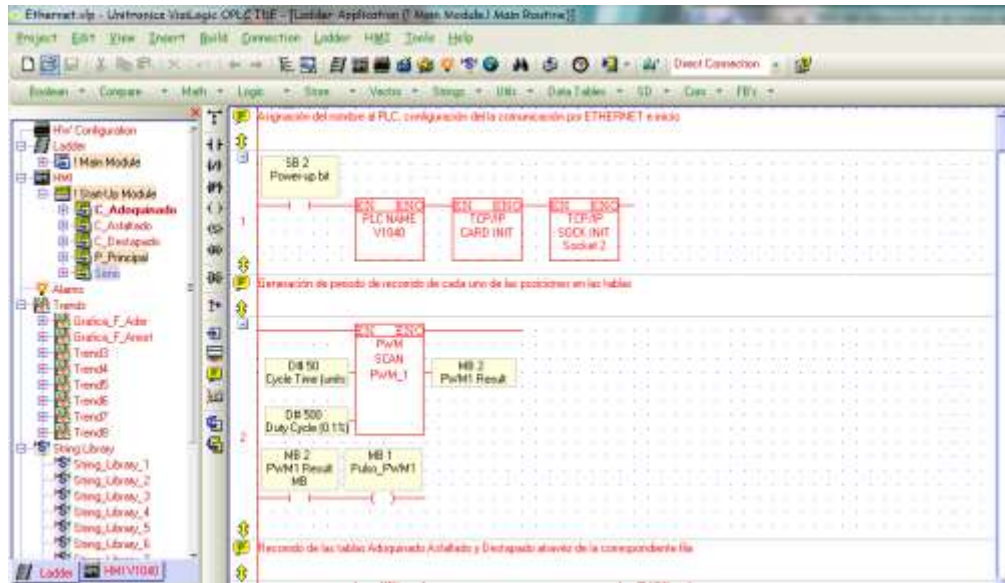


Figura 5. Interfaz de programación en lenguaje ladder. **Fuente:** Autores

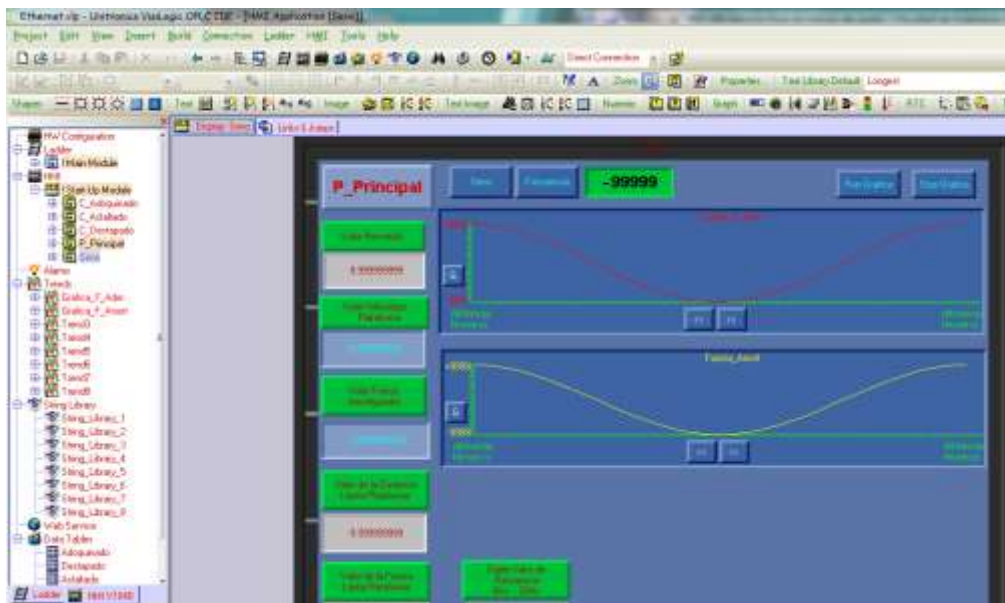


Figura 6. Interfaz de programación para la pantalla HMI. **Fuente:** Autores.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3.3. OPC Server

OPC (OLE for Process Control) es un software creado por National Instruments y define el estándar para comunicar datos en tiempo real entre los dispositivos de control de una planta y la interfaz hombre-máquina-HMI (véase figura 6).

Los servidores OPC están disponibles virtualmente para todos los PLC's y para PAC's (Programmable Automation Controller). (Instruments, 2013). Por medio del software OPC se logró en este trabajo enlazar el controlador lógico programable de Unitronics y el entorno de conceptos de diseño mecatrónico de NX.

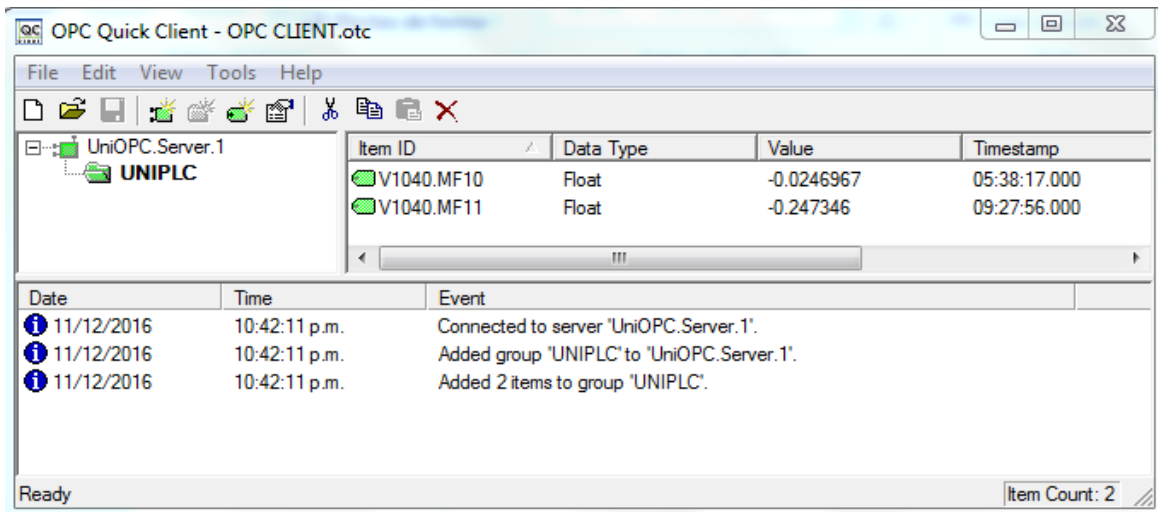


Figura 7. Interfaz OPC server. **Fuente:** <http://www.ni.com/white-paper/7906/es/>

2.3.4. UniOPC.

Es un software integrado a los PLC's Unitronics (figura 7) que se encarga de enlazar el PLC con el computador y sus puertos para permitir el acoplamiento con el cliente (OPC de National Instruments), garantizando la comunicación entre el PLC y NX-Siemens.



Figura 8. Software UniOPC. **Fuente:** Autores.

2.4. Norma EuSAMA

La European Shock Absorber Manufacturer, EuSAMA (1976), define la adhesión como la “Relación entre el mínimo valor de la fuerza vertical ejercida por una rueda, estimulada con una frecuencia de 0 a 25 Hz, y la misma fuerza medida a 0 Hz, (tabla 1 y figura 8). (Arbelaez Toro Juan Jose, 2006)

Tabla 1. Interpretación de la norma EuSAMA. **Fuente:** Juan José Arbeláez Toro

Medida de Adhesión	Interpretación de la EuSAMA
61% a 100%	Excelente contacto dinámico de la llanta
41% a 60%	Buen contacto dinámico de la llanta
21% a 40%	Aceptable contacto dinámico de la llanta
1% a 20%	Pobre contacto dinámico de la llanta
0%	Ningún contacto dinámico de la llanta

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para determinar este porcentaje de adherencia se opera la siguiente ecuación:

$$A = 100 \left(\frac{F_{min}}{W} \right)$$

Donde A: Adherencia en porcentaje (%)

Fmin: Fuerza mínima vertical de contacto durante la oscilación (N)

W: Peso debido a la masa en vacío, es decir masa por gravedad (N). (Johana, 2012)

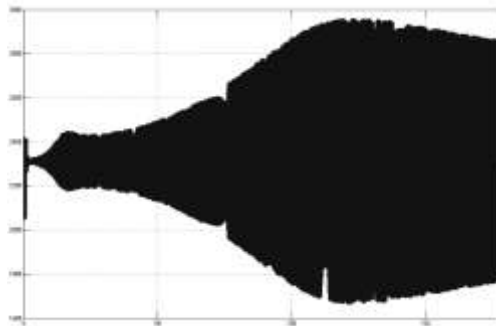


Figura 9. Diagrama de fuerza de contacto vs frecuencia.

Fuente: Juan José Arbeláez Toro

2.5. Caminos

La principal causa de las vibraciones en un automóvil se debe a las irregularidades del camino, la rugosidad de este depende de factores tales como el recubrimiento, el clima o la cantidad de tránsito que tenga. En el caso más sencillo la irregularidad del camino puede ser representada como un sobresalto sinusoidal representado en la figura 9. (Claudia Liliana Arredondo Salazar, 2005)

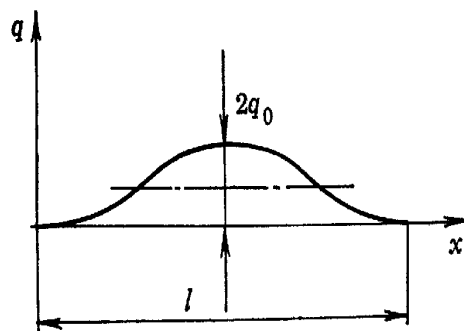


Figura 10. Perfil de una irregularidad sinusoidal

Fuente: Claudia Liliana Arredondo Salazar

Para este proyecto se tomaron los datos registrados del trabajo “Análisis de la suavidad de marcha (ride confort) de un autobús urbano mediano”, para tres tipos de vías a una distancia determinada (véase figuras 10, 11 y 12), es decir se registraron las irregularidades del camino para excitar el vehículo, para evaluar el estado de la suspensión ya que a ciertas velocidades y dependiendo del terreno las llantas del vehículo pueden llegar a perder la adherencia a la superficie.

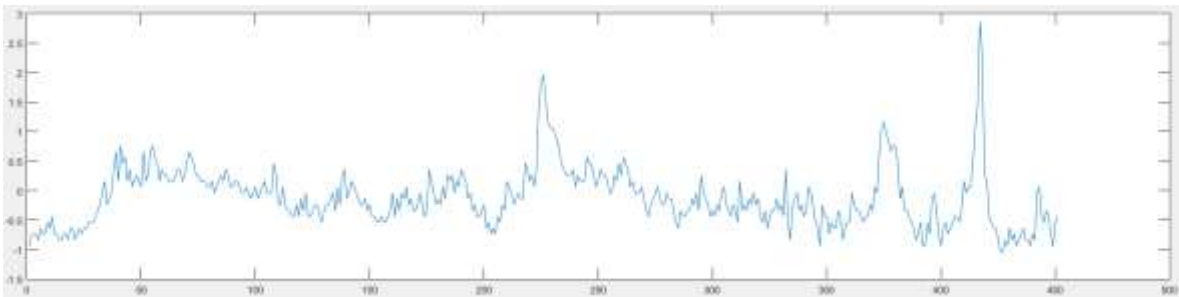


Figura 11. Camino asfaltado. **Fuente:** Autores.

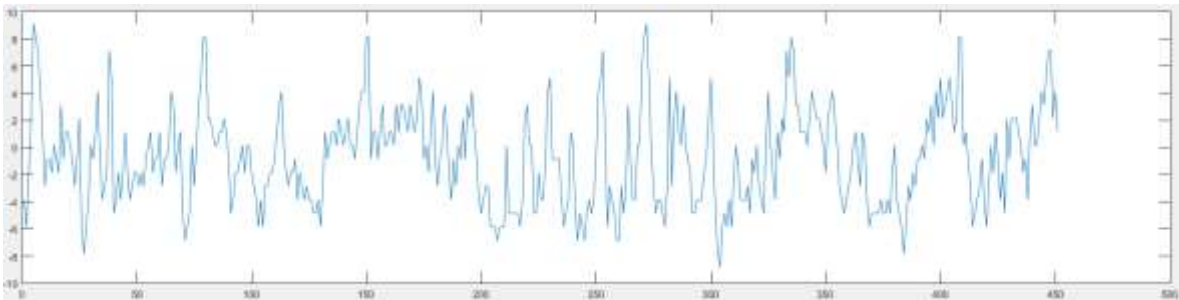


Figura 12. Camino destapado. **Fuente:** Autores.

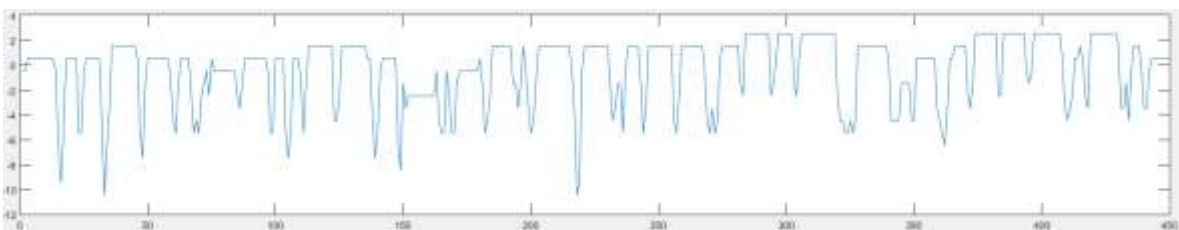


Figura 13. Camino adoquinado. **Fuente:** Autores

2.6. Cuarto de Vehículo

En algunas de las simulaciones de suspensiones de vehículos se utilizan como modelo un cuarto de vehículo, el cual se usa un sistema simplificado que consta de una masa suspendida (la masa de un cuarto de un vehículo “ideal”), conectada a una masa “no suspendida” (el eje y el neumático) a través de un muelle o un amortiguador lineal (la suspensión). (Arbelaez Toro Juan Jose, 2006). La figura 14 muestra el modelo dinámico que representa un cuarto de vehículo.

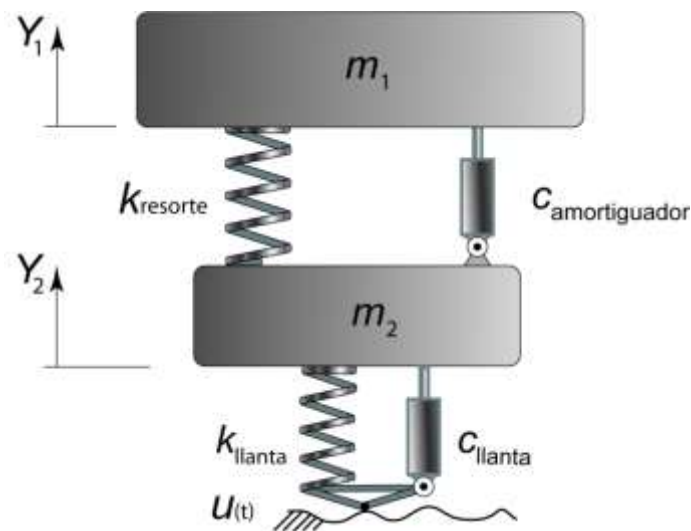


Figura 14. Modelo dinámico de un cuarto de vehículo.

Fuente: Juan José Arbeláez Toro

Para la simulación de este proyecto se utilizó un modelo de cuarto de vehículo de Nissan Sentra con suspensión tipo McPherson (véase figura 15).

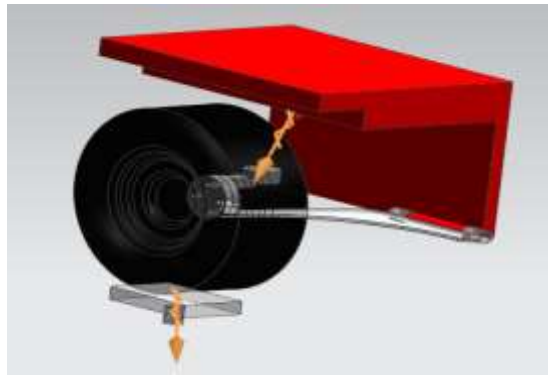


Figura 15. Modelo de cuarto de vehículo de Nissan.

Fuente: Juan José Arbeláez Toro

- **Suspensión**

Un sistema de suspensión (véase figura 16) es un conjunto de dispositivos que garantizan la unión elástica entre el sistema portante y las ruedas, efectuando disminución de las cargas dinámicas al sistema portante y el amortiguamiento de sus vibraciones, como también la regulación de la posición del chasis durante el movimiento del automóvil". (Pacejka, 2006)



Figura 16. Sistema de suspensión del tipo McPherson.

Fuente: Juan José Arbeláez Toro.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Vehículo liviano**

Según la legislación de los EE.UU., vehículos livianos son todos los automóviles que están en la categoría de peso bruto (GVWR, que quiere decir peso del vehículo más la capacidad de carga considerada) de menos de 8 500lb (3 859 kg.). Los vehículos livianos están subdivididos en las siguientes categorías (w1): automóviles de pasajeros, camiones livianos de carga liviana (LLDT), bajo 6 000 lb GVWR, camiones pesados de carga liviana (HLDT), sobre 6 000 lb GVWR. El cuarto de vehículo corresponde a la cuarta parte de un vehículo de categoría LLDT. (Arbelaez Toro Juan Jose, 2006)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se inició con el desarrollo de pruebas que permitieron la integración del hardware del PLC con el módulo de simulación mecatrónica de Nx-Siemens, por medio de la configuración de protocolos Quick client OPC de National Instruments y UNIOPC de Unitronics. Posteriormente se programaron en el PLC las vías de adoquinado, destapado y asfaltada (tomadas del trabajo de grado “Análisis de la suavidad de marcha (Ride Comfort)) y se elaboraron estos mismos caminos en un paquete CAD representados en un perfil de una leva construida con una curva Spline de grado 2.

Finalizada la integración PLC con Nx y elaborados los caminos se procedió a elaborar el modelo multicuerpo que representa a un cuarto de vehículo liviano con suspensión McPherson en los entornos de simulación mecatrónica y movimiento del software Nx (véase figura 18a), el modelo se alimentó de los valores de constantes elásticas, masas y el coeficiente de amortiguación de la llanta obtenidos en la investigación “Modelado, diseño y construcción de un banco de pruebas para el análisis de la adhesión en la evaluación en suspensiones de vehículos livianos bajo la norma european shock absorber manufacturers association (EuSAMA)”; los datos que caracterizan el amortiguador se obtuvieron por pruebas realizadas en el banco de ensayos del laboratorio de máquinas eléctricas del ITM (Véase figura 18B).

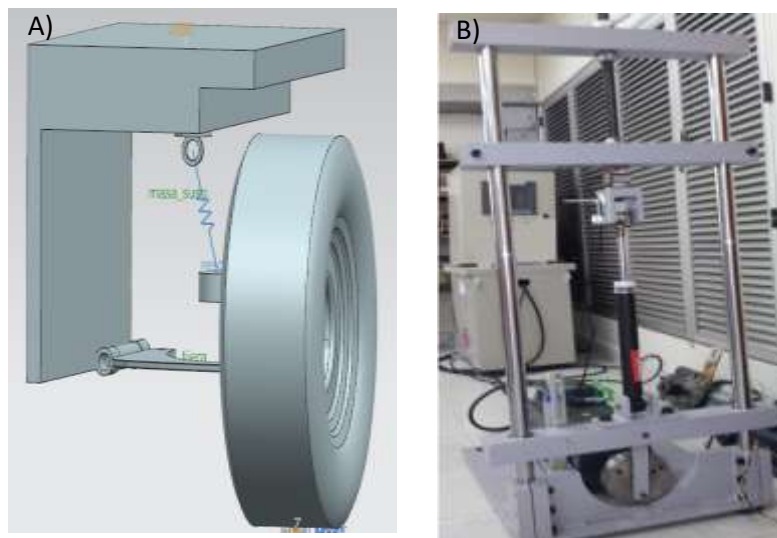


Figura 17. Caracterización del resorte y la suspensión McPherson, **A)** modelo virtual y **B)** modelo real. **Fuente:** Autores.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Generados los modelos multicuerpos se acoplaron los caminos (adoquinado, destapado y asfaltado) a través del PLC para el caso del entorno de mecatrónica y las levas para el módulo de movimiento; se realizaron la programación del barrido de velocidades para graficar la respuesta de la fuerza de adherencia (Norma EuSAMA) del modelo y poder encontrar los puntos críticos para ejecutar las acciones de control que permitan mantener la seguridad del vehículo sobre la vía.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Planta y conexión de la OPC

El proceso de integración de la planta virtual con el PLC se observa en las gráficas 18.

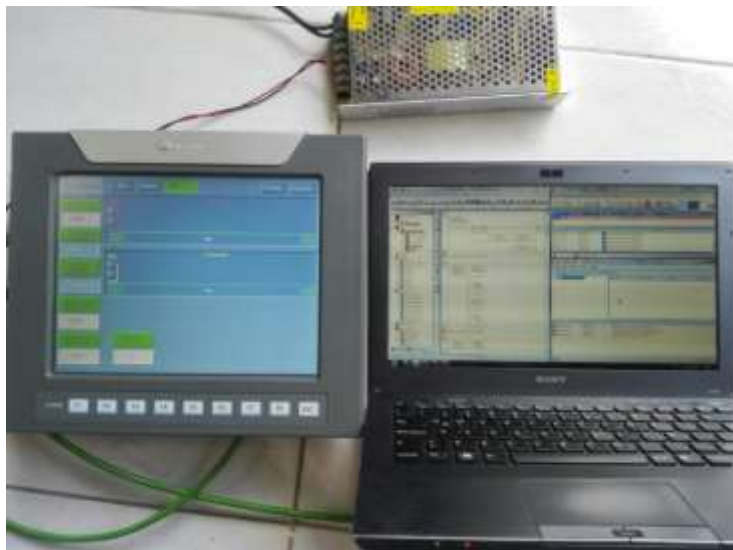


Figura 18. Integración del PLC con la planta virtual. **Fuente:** Autores.

La comunicación entre el software y el hardware se realizó por medio de marcas que permiten la transferencia de datos en este caso información de caminos y parámetros físicos del sistema (véase figura 19); en el apéndice A se encuentra el programa Ladder del protocolo de comunicación

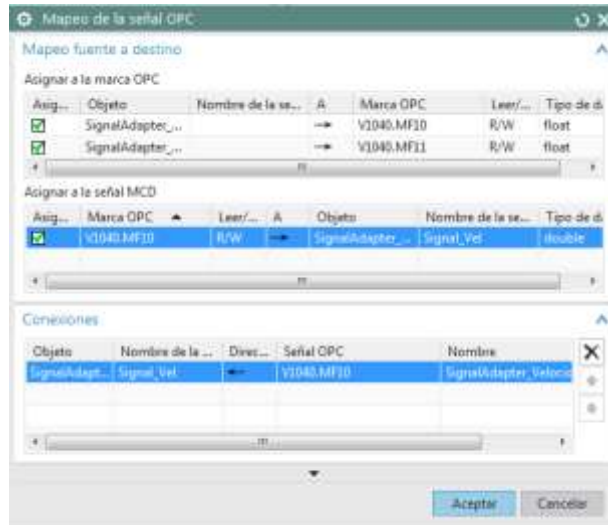


Figura 19. Asignación de la marca a la señal externa. **Fuente:** Autores.

4.2. Representación del camino.

Los perfiles de los diferentes caminos asfaltado, destapado y adoquinado se representan por medio de las levas (véase figura 20) generadas por curvas Spline de grado 2, y a través de marcas implementadas con el PLC's Unitronics (véase figura 21).

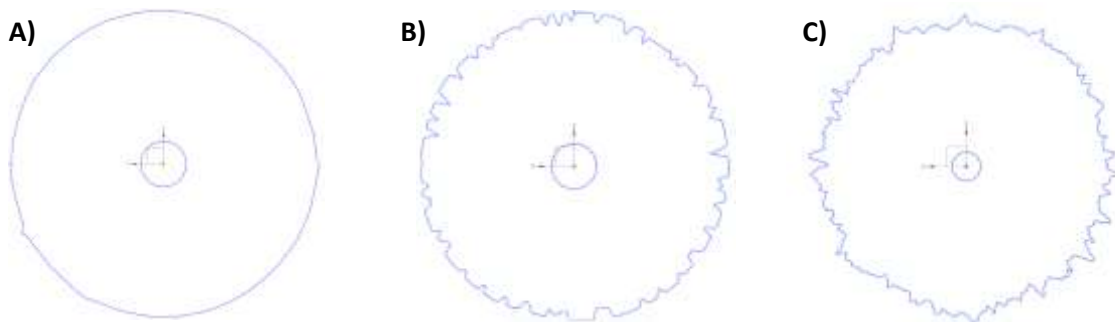


Figura 20. Representación de caminos **A)** Asfaltado, **B)** Adoquinado y **C)** Destapado.

Fuente: Autores.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

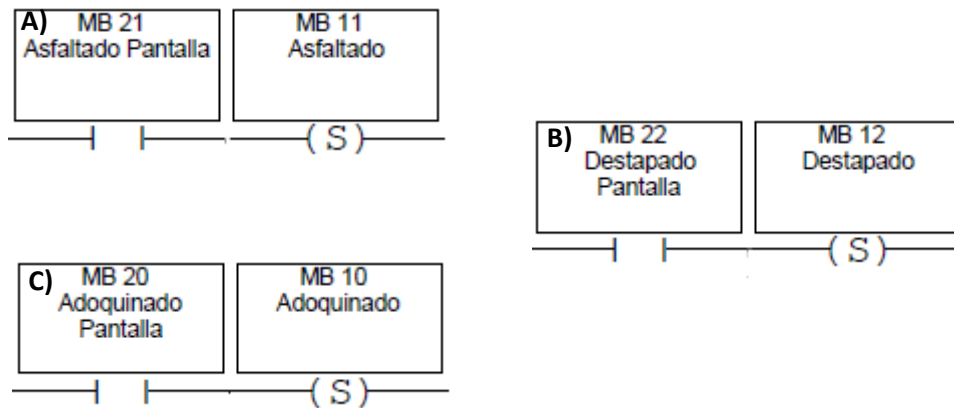


Figura 21. Marcas que dan paso para seleccionar el camino, **A)** Asfaltado, **B)** Destapado y **C)** Adoquinado. **Fuente:** Autores

4.3. Caracterización de un cuarto de vehículo liviano.

Los datos de constantes elásticas, masas y coeficientes de amortiguación propias de un vehículo liviano se muestran en la tabla 2 tomadas del trabajo “Modelado, diseño y construcción de un banco de pruebas para el análisis de la adhesión en la evaluación en suspensiones de vehículos livianos bajo la norma european shock absorber manufacturers association (EuSAMA)”

Tabla 2. propiedades del modelo. **Fuente:** Juan José Arbeláez Toro

Pieza.	Masa. (Kg)	Rigidez. (KN/m)	Amortiguación. (Kg/s).
Llanta.	20	127,200	10
Porta mangueta.	5	---	---
Tijera.	3	---	---
Masa Suspendida.	208	---	---
Resorte.	---	18,709	0
Amortiguador.	---	0	1300

De las pruebas de amortiguadores basadas en la norma NTC1711 realizadas en el banco de pruebas de amortiguadores (véase figura 22), se obtiene una constante de amortiguación graficando fuerza VS velocidad (véase figura 23) la cual se implementó para este trabajo de 1300 kg/s. (Icontec, 2008)

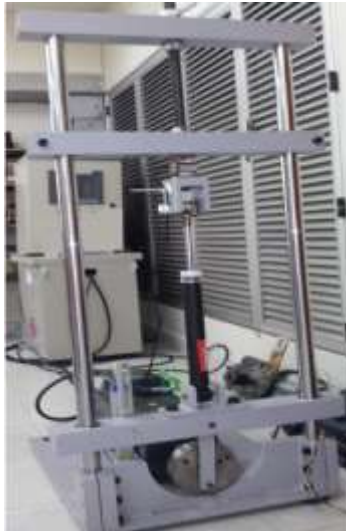


Figura 22. Banco de pruebas de amortiguadores. **Fuente:** Juan José Arbeláez Toro

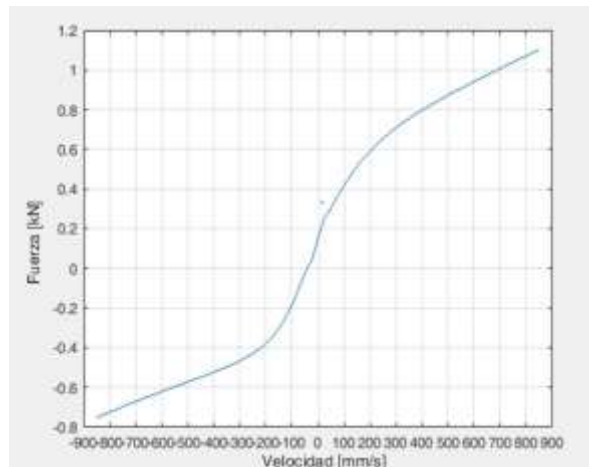


Figura 23. Grafica fuerza vs velocidad. **Fuente:** Autores

4.4. Modelo multicuerpo

El modelo multicuerpo de cuarto de vehículo liviano con sus respectivas juntas cinemáticas tanto para el entorno de movimiento y de simulación mecatrónica se observa en la figura 24.

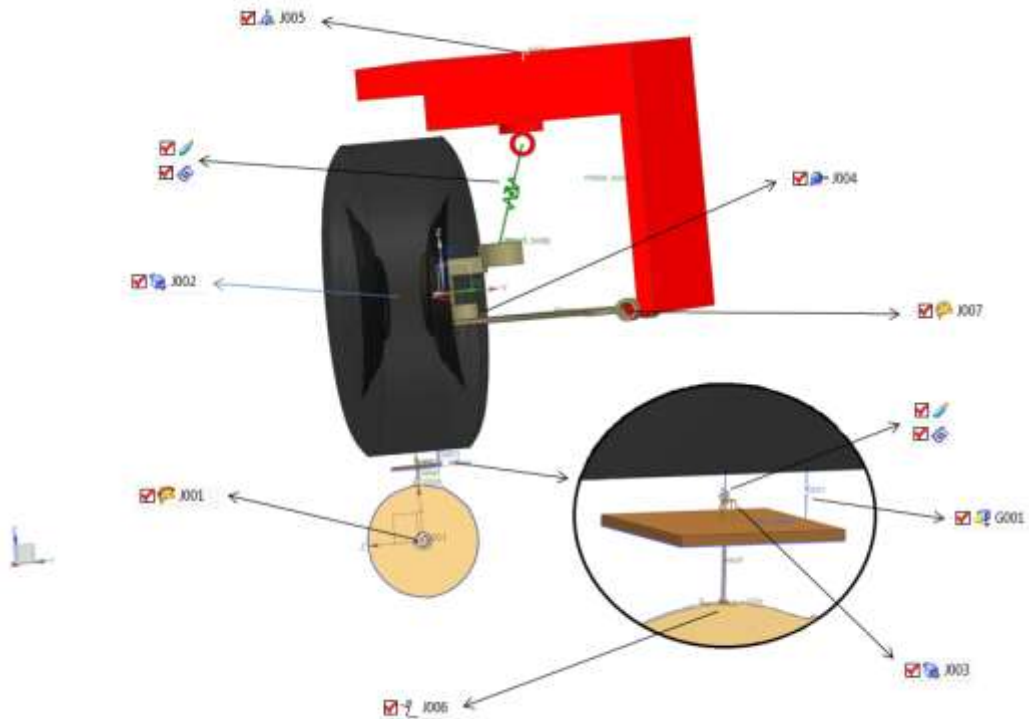






Figura 24. Modelo multicuerpo cuarto de vehículo liviano. **Fuente:** Autores.

En la tabla 3, se presenta una descripción de las herramientas utilizadas para el ensamble del cuarto de vehículo.

Tabla 3. Herramientas para el ensamble del modelo de cuarto de vehículo.

Fuente: Autores.





Imagen	Nombre	Descripción
	Junta deslizante	Par V clase, reduciendo el movimiento a solo traslación.
	Junta de revolución	Par V clase, generando un único movimiento de rotación.
	Junta esférica	Par III clase, obligando a los cuerpos rígidos solo a rotar.
	Junta de orientación	Par de II clase, caracterizado por un movimiento vinculado a un eje.

Definidas las juntas se procede a realizar los conectores de las piezas, es decir, determinar el punto donde se van a ubicar el resorte y el amortiguador con sus respectivas constantes como se muestra en la tabla 4.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 4. Herramientas para determinar los puntos de conexión de las piezas.

Fuente: Autores.

Imagen	Nombre	Descripción
	Junta 3D	Garantiza la interacción de las masas.
	Resorte	Conector que considera la constante elástica (N/m) tanto del resorte de la masa suspendida como de la llanta.
	Suspensión	Elemento que define la respuesta amortiguada (Kg/s).
	Contacto punto sobre curva	Este enlace garantiza el recorrido por el contorno de la leva que contiene el camino.

Las masas, constantes elásticas y constantes de amortiguación se definen en el modelo multicuerpo según datos obtenidos de la caracterización.

4.5. Pruebas de desempeño

La equivalencia de las revoluciones por segundo a Km/h se hace por medio del cálculo del perímetro de la leva diseñada, ecuación 1.

$$(1) \quad P_{\text{leva}} = 2\pi(r)$$

siendo $r=100\text{mm}$, entonces se entiende por P_{leva} una revolución (vuelta). Multiplicando P_{leva} por cada revolución a la que va a avanzar, se obtiene los milímetros por unidad de tiempo, ecuación 2.

$$(2) \quad P_{\text{leva}} \times \text{Revolución} = V$$

Siendo $V = \text{mm/seg.}$

Haciendo una tabla de conversión se logra obtener o identificar la equivalencia de revoluciones por segundo a Km/h.

En las gráficas 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 y 33 se muestran los resultados de 9 gráficas para los caminos de asfalto, adoquinado y destapado obtenidas del total de 25 pruebas

realizada; en las tablas 3, 4 y 5 se muestra el total de los resultados obtenidos para evaluar la fuerza de adherencia del vehículo en cada uno de los test ejecutados a diferentes configuraciones de velocidad, con un tiempo de visualización de 25 segundos y con una resolución de 1000 pasos.

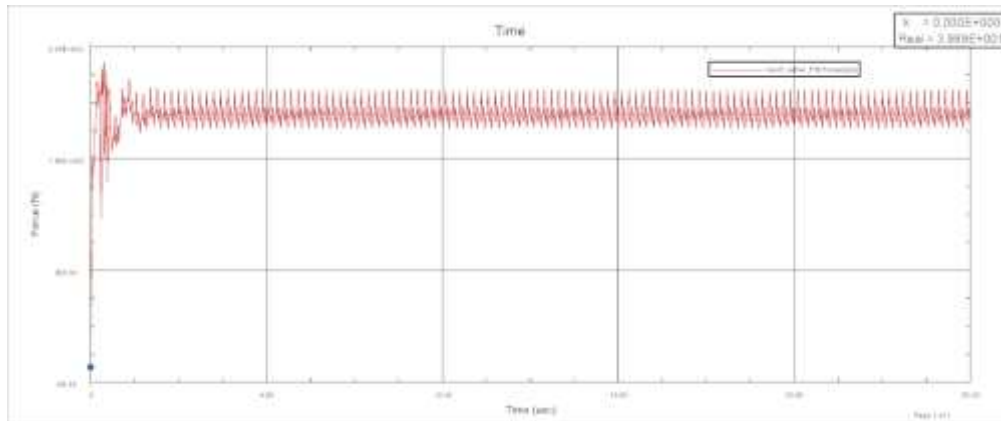


Figura 25. Grafica de fuerza vs tiempo camino asfaltado a 5 revoluciones por segundo.

Fuente: Autores

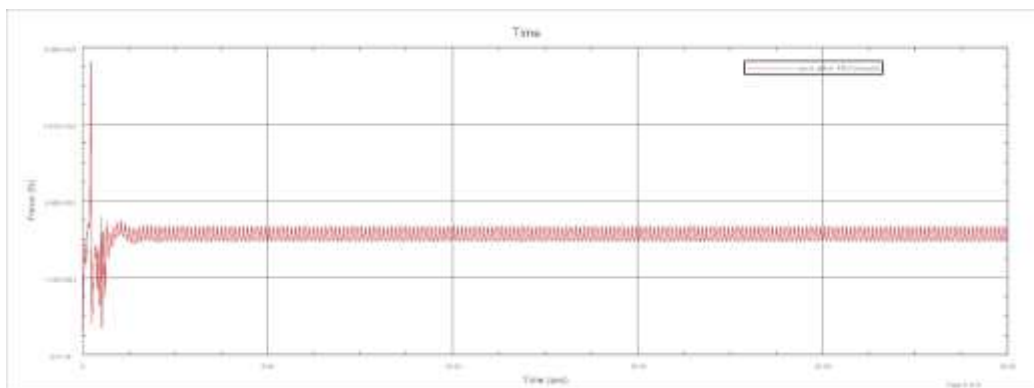


Figura 26. Grafica de fuerza vs tiempo camino asfaltado a 30 revoluciones por segundo.

Fuente: Autores

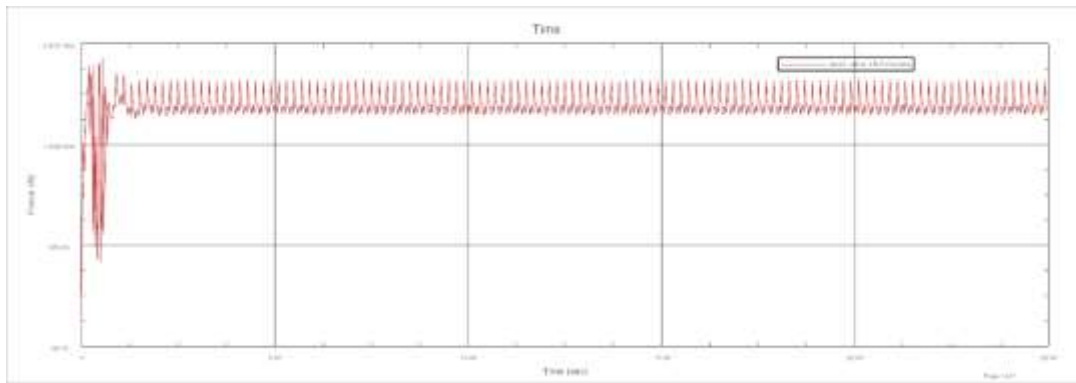


Figura 27. Grafica de fuerza vs tiempo del camino asfaltado a 55 revoluciones por segundo. **Fuente:** Autores

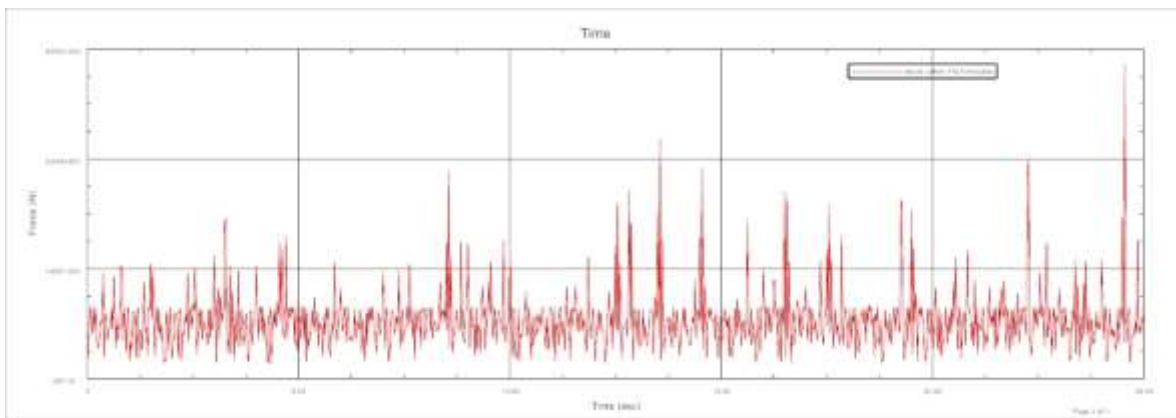


Figura 28. Grafica de fuerza vs tiempo camino adoquinado a 1 revolución por segundo. **Fuente:** Autores

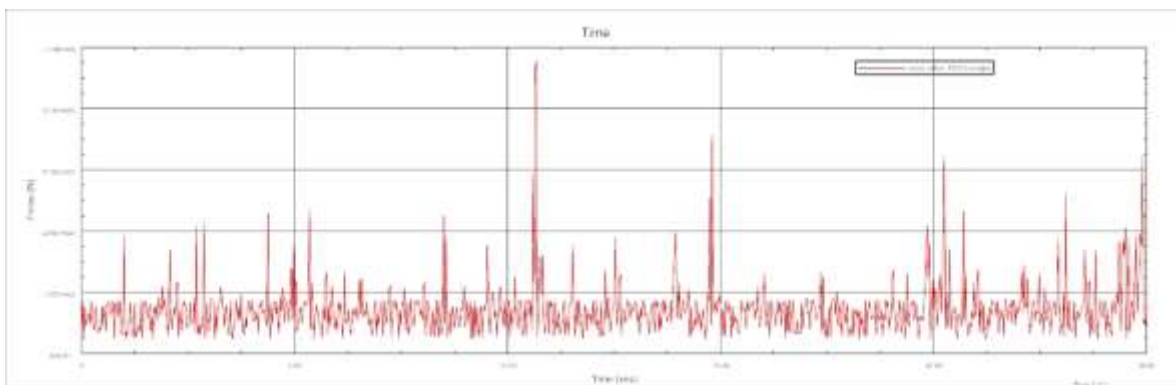


Figura 29. Grafica de fuerza vs tiempo camino adoquinado a 10 revoluciones por segundo.

Fuente: Autores

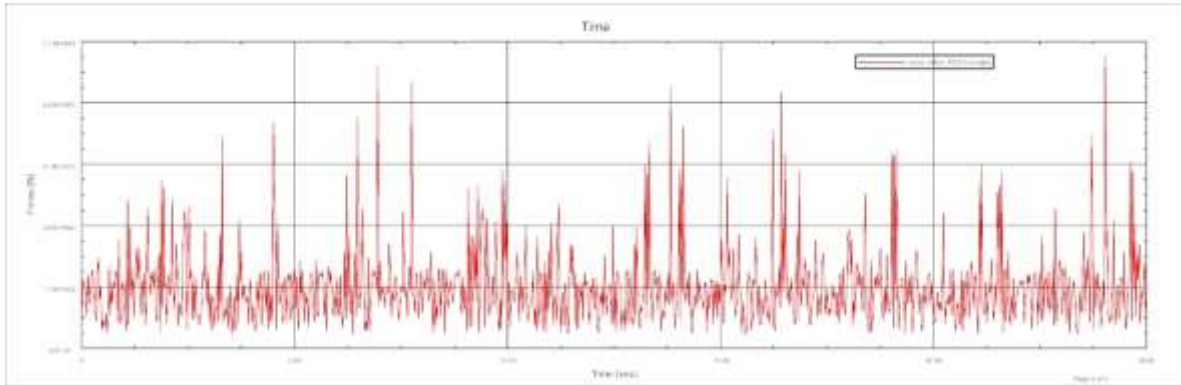


Figura 30. Grafica de fuerza vs tiempo del camino adoquinado a 25 revoluciones por segundo. **Fuente:** Autores

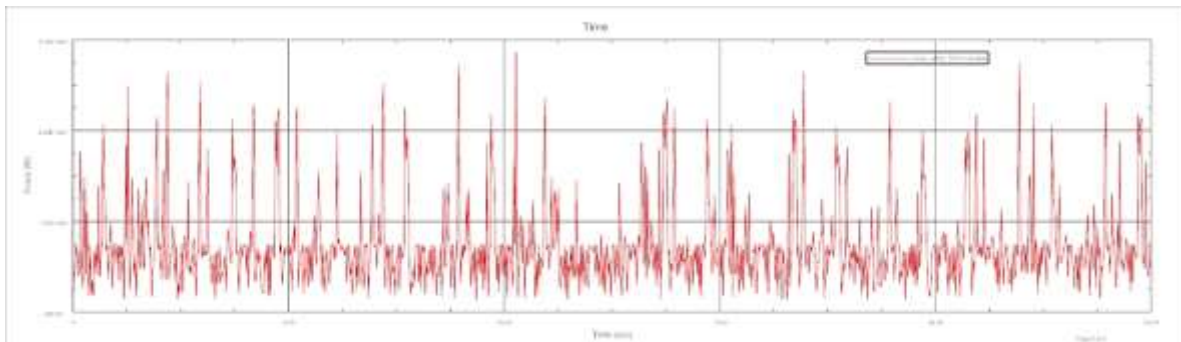


Figura 31. Grafica de fuerza vs tiempo camino destapado a 1 revolución por segundo.

Fuente: Autores

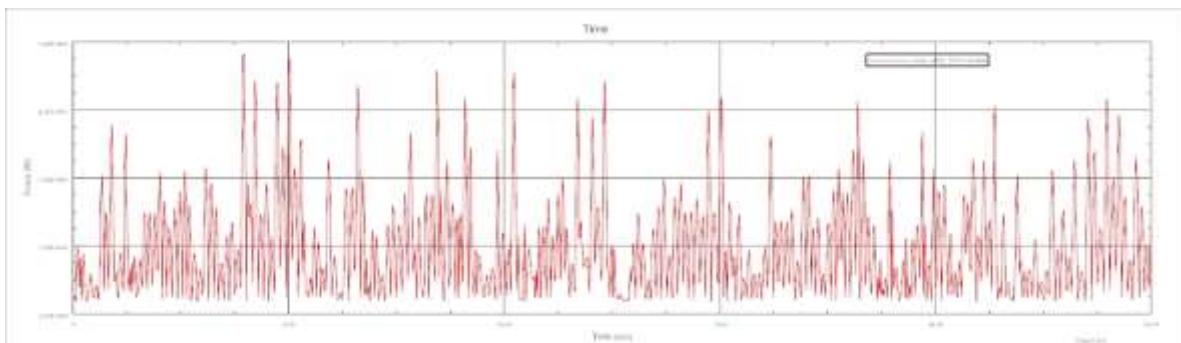


Figura 32. Grafica de fuerza vs tiempo camino destapado a 4 revoluciones por segundo.

Fuente: Autores

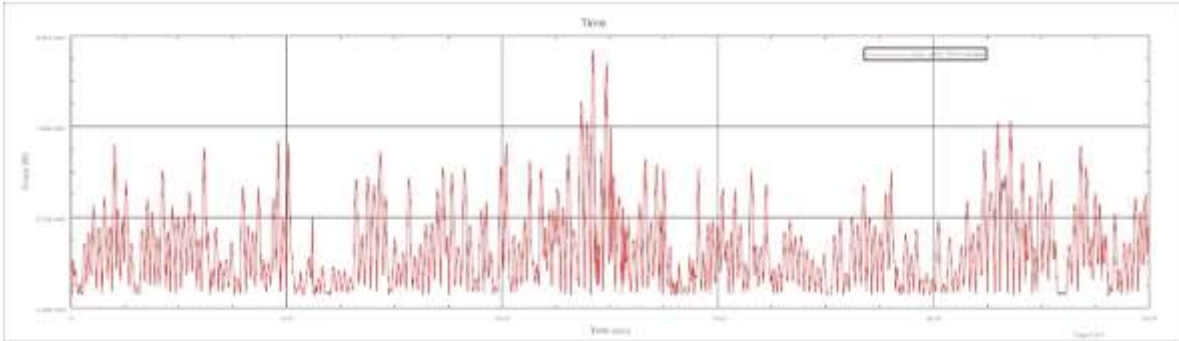


Figura 33. Grafica de fuerza vs tiempo del camino destapado a 7 revoluciones por segundo. **Fuente:** Autores

Tabla 3. Respuesta del sistema para el camino asfaltado. **Fuente:** Autores.

Peso Muerto	Velocidad (Km/h)	Velocidad (Rev/s)	Fuerza de Adherencia	% de Adherencia
2837	11,3097	5	2173,368	76,6079609
2837	22,6195	10	2178,847	76,80107743
2837	33,9292	15	2192,728	77,29037971
2837	45,2389	20	2198,220	77,48396788
2837	56,5487	25	1874,126	66,06013394
2837	67,8584	30	1583,531	55,81709552
2837	79,1681	35	1412,233	51,77909764
2837	90,4779	40	1371,857	48,35590412
2837	101,7876	45	1288,617	45,42181882
2837	113,0973	50	1214,683	42,81575608
2837	124,4071	55	1152,953	40,63986606

Tabla 4. Respuesta del sistema para el camino adoquinado. **Fuente:** Autores.

Peso Muerto	Velocidad (Km/h)	Velocidad (Rev/s)	Fuerza de Adherencia	% de Adherencia
2837	2,2619	1	2398,430	84,5410645
2837	6,7858	3	1952,836	68,83454353
2837	11,3097	5	1834,785	64,67342263
2837	22,6195	10	1793,352	63,21297145
2837	33,9292	15	1586,027	55,90507578
2837	45,2389	20	1376,294	48,51230173
2837	56,5487	25	924,962	32,60352485

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 5. Respuesta del sistema para el camino destapado. **Fuente:** Autores.

Peso Muerto	Velocidad (Km/h)	Velocidad (Rev/s)	Fuerza de Adherencia	% de Adherencia
2837	2,2619	1	2223,851	78,38741628
2837	4,5239	2	2127,307	74,98438491
2837	6,7858	3	1791,374	63,14324991
2837	9,0478	4	1583,795	55,82640113
2837	11,3097	5	1405,192	49,53091294
2837	13,5717	6	1297,542	45,7364117
2837	15,8336	7	1224,749	43,1705675

Cabe aclarar que los datos tomados de los tres tipos de vía no son genéricos, es decir, no todos los terrenos por los que transita un vehículo cumplen las mismas condiciones así se trate de una vía asfaltada, adoquinada o destapada.

De las tres tablas anteriores se puede decir que a medida que aumenta la velocidad se va perdiendo la adherencia dependiente del tipo de vía y a su vez afectando el correcto funcionamiento de la suspensión, es aquí donde entra a intervenir el control para garantizar que la llanta este en contacto con la superficie garantizando la seguridad y el confort de los ocupantes.

Finalmente, en el modelo multicuerpo se realizó la prueba dictada por la norma EuSAMA que permite evidenciar la frecuencia en la cual la fuerza de adherencia se pierde en el vehículo (véase figura 34)

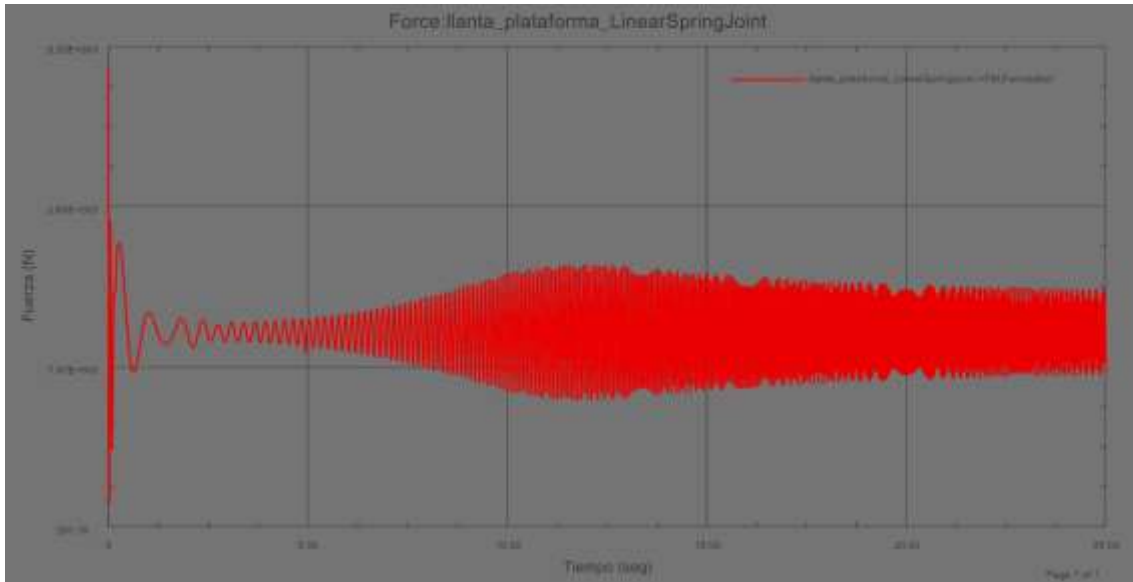


Figura 34. diagrama de fuerza de contacto vs la frecuencia. **Fuente:** Autores.

Para obtener este resultado se realizó una simulación en el entorno de NX implementando una función que permite aumentar la frecuencia por cada intervalo de tiempo hasta 25 Hz según lo establecido por la norma, esto se logra haciendo uso de una volante con una oscilación de 2π y con una biela que posee un recorrido de 3 a 6mm. para el caso particular la resonancia se da a 11 Hz.

En el Apéndice A se observa la estrategia de control implementada en el PLC para garantizar condiciones seguras de conducción en cuanto a la adhesión en un vehículo liviano. En figura 35 se muestra los protocolos de comunicación ethernet utilizados para la integración del PLC con la planta virtual.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

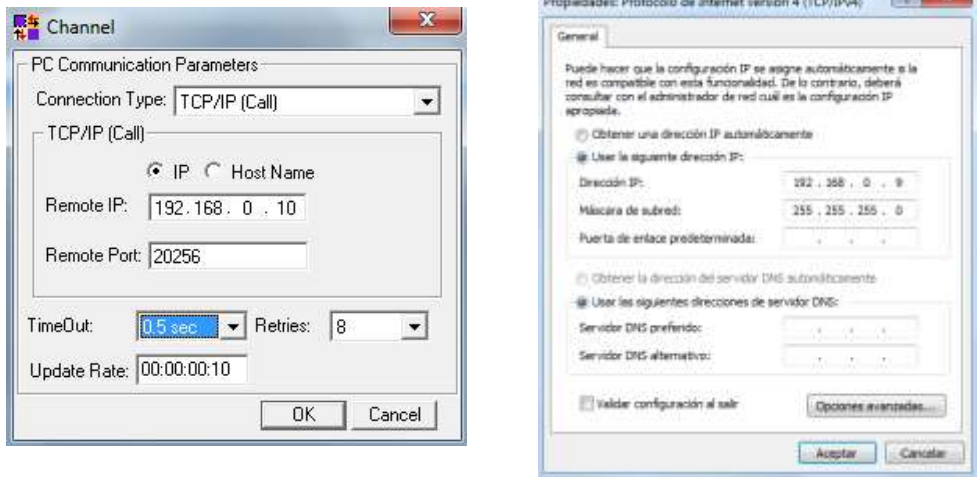


Figura 35. Enlace PLC y planta virtual. **Fuente:** Autores

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. Conclusiones.

- Se diseñó y construyó una planta virtual que interacciona con un PLC, para simular y controlar condiciones de adherencia de un cuarto de vehículo liviano en pruebas de ruta.
- Se realizaron los modelos multicuerpo del vehículo y las vías (asfalto, adoquin y destapado) integradas a un módulo mecatrónica y de movimiento para simular los efectos de adherencia entre el vehículo y la vía a diferentes rangos de velocidad.
- Se logró obtener los parámetros de amortiguación por medio de la ejecución de la norma NTC 1711 en el banco de pruebas del laboratorio de máquinas eléctricas del ITM.
- Se observó que los límites de velocidad para poder tomar una acción de control con respecto a la adherencia y garantizar la seguridad del vehículo y de sus ocupantes para un sistema de suspensión McPherson, se recomienda no sobre pasar los 90 Km/h, 20 Km/h y 13 Km/h para vías asfaltada, adoquinada y destapada respectivamente.
- De los datos obtenidos de las gráficas de fuerza se concluye que las vías escarpadas (adoquín y destapado) representan un peligro para la maniobrabilidad del vehículo.
- Se elaboró una solución de control PID inmerso en el programa Ladder del PLC que permite tomar acciones seguras sobre el vehículo cuando este alcanza los setpoint que señalan la pérdida de adherencia en el vehículo.
- Se encontró que los paquetes que integran sistemas mecánicos con eléctricos y de control no gozan de condiciones suficientes para restringir grados de libertad en mecanismos complejos, estas opciones hoy son solo posibles con módulos multicuerpo acopladas a unidades de programación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

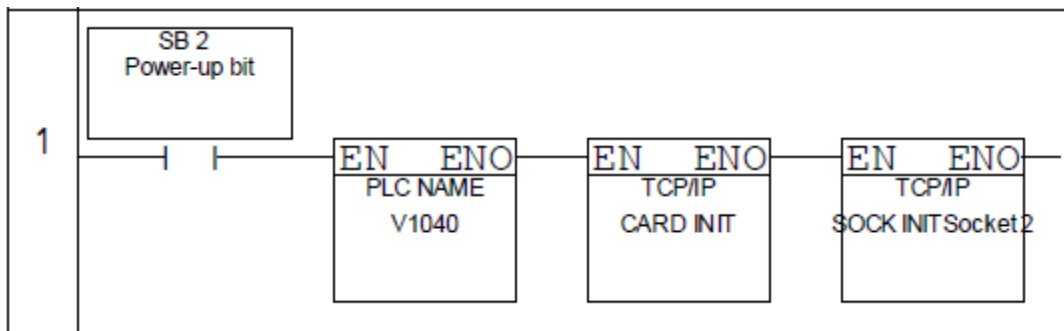
Bibliografía

- A, P. (2003). Diseño Mecatronico, un curso de aplicacion de nuevas tecnologias. *Ciencia e Ingenieria Neogranadina*, 61-70.
- Arbelaez Toro Juan Jose, M. Q. (2006). Modelado, diseño y construcción de un banco de pruebas para el análisis de la adhesión en la evaluación en suspensiones de vehículos livianos bajo la norma european shock absorber manufacturers association (eusama). Pereira, Risaralda, Colombia.
- Carro Suarez Jorge, F. N. (2003). Simulación y Control de un Sistema Mecatrónico. 90-98.
- Claudia Liliana Arredondo Salazar, J. F. (2005). Analisis de la suavidad de marcha (ride confort) de un autobus urbano mediano.
- Icontec, I. (2008). Norma Tecnica Colombana NTC1711.
- Instruments, N. (11 de Diciembre de 2013). *National Instruments*. Obtenido de <http://www.ni.com/white-paper/7906/es/>
- Javier, A. I. (2011). *Simulacion del comportamiento de diversos modelos de amortiguadores magneto-reologicos mediante Modelica*. Madrid.
- Johana, M. C. (2012). Evaluacion teorico-experimental en confirmacion metrologica del banco de suspension segun modelizacion de un cuarto de vehiculo.
- Micromecanica, A. (s.f.). *Automation Micromecanica s.a.i.c.* Obtenido de www.micro.com.ar
- Pacejka, H. B. (2006). Tyre and Vehicle Dynamics (Second Edition). *sciencedirect*, 1-60.
- Siemens. (2016). *Siemens PLM Software*. Obtenido de https://www.plm.automation.siemens.com/es_sa/products/nx/for-design/advantages-benefits.shtml

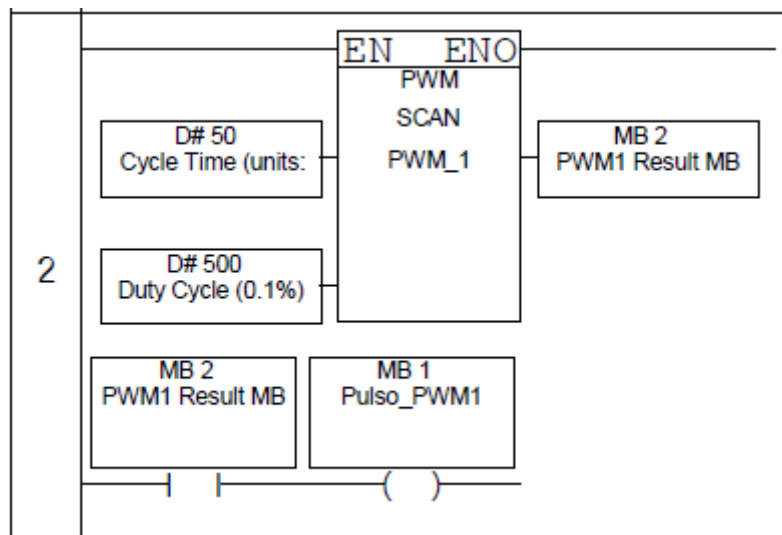
APENDICE

Apéndice A. Programación de en lenguaje ladder.

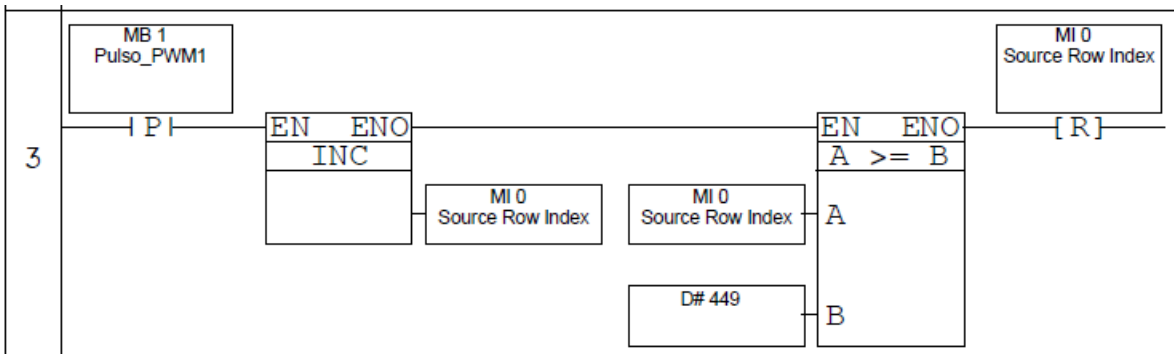
En este segmento se realiza la asignación del nombre del PLC, la configuración de la comunicación por Ethernet e inicio.



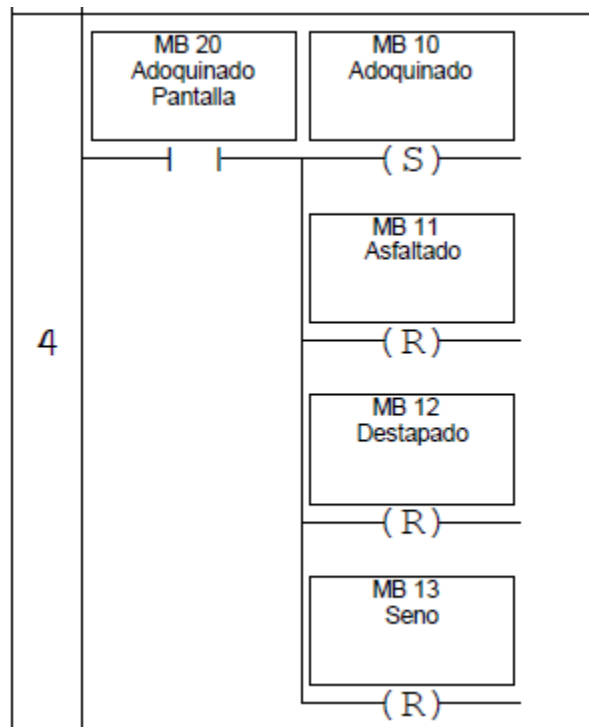
Generación del periodo de cada uno de las posiciones en las tablas



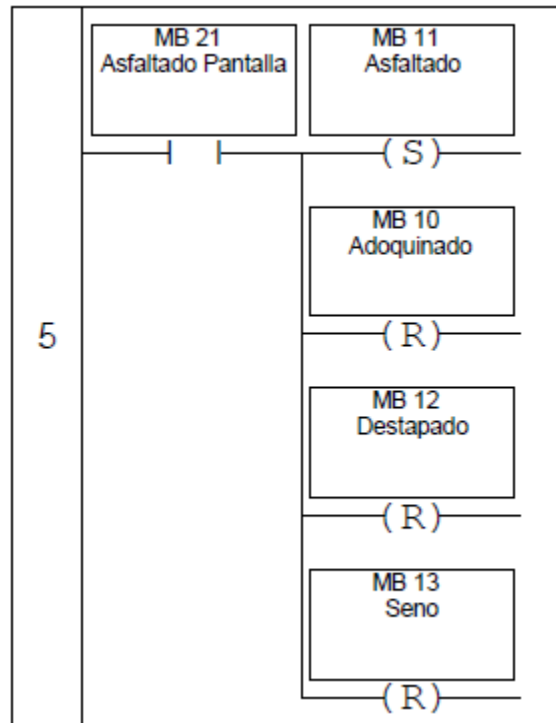
Recorrido de las tablas adoquinado y asfaltado



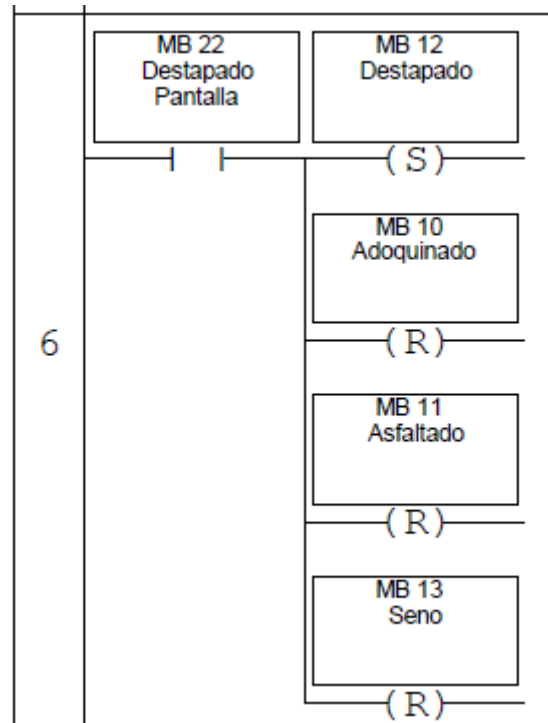
Selección del camino adoquinado



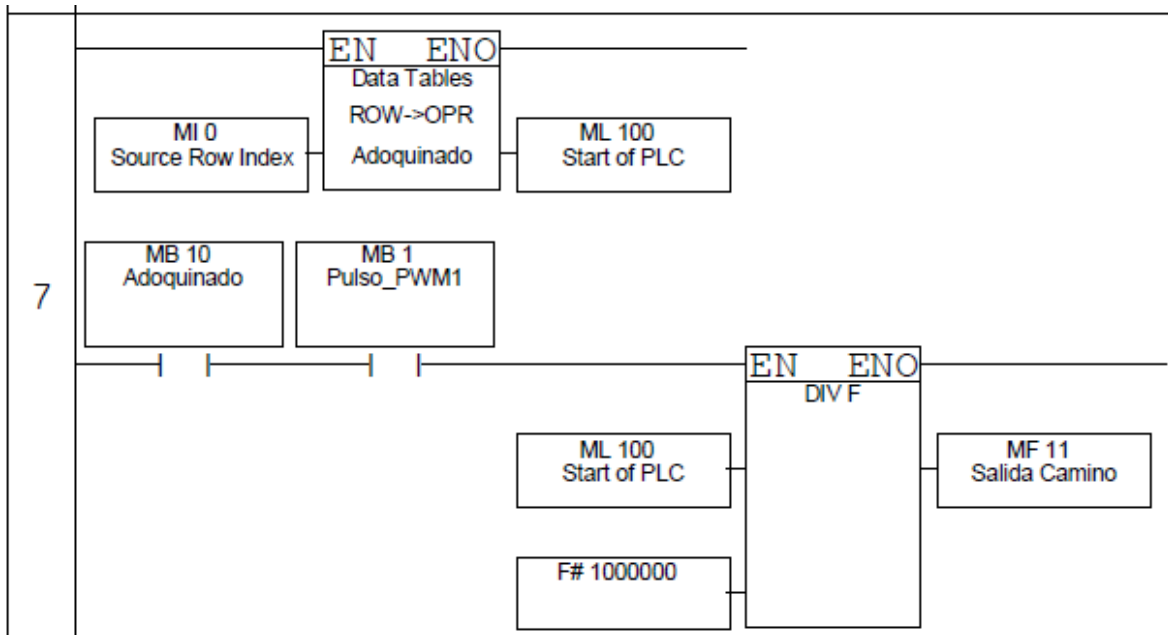
Selección del camino asfaltado



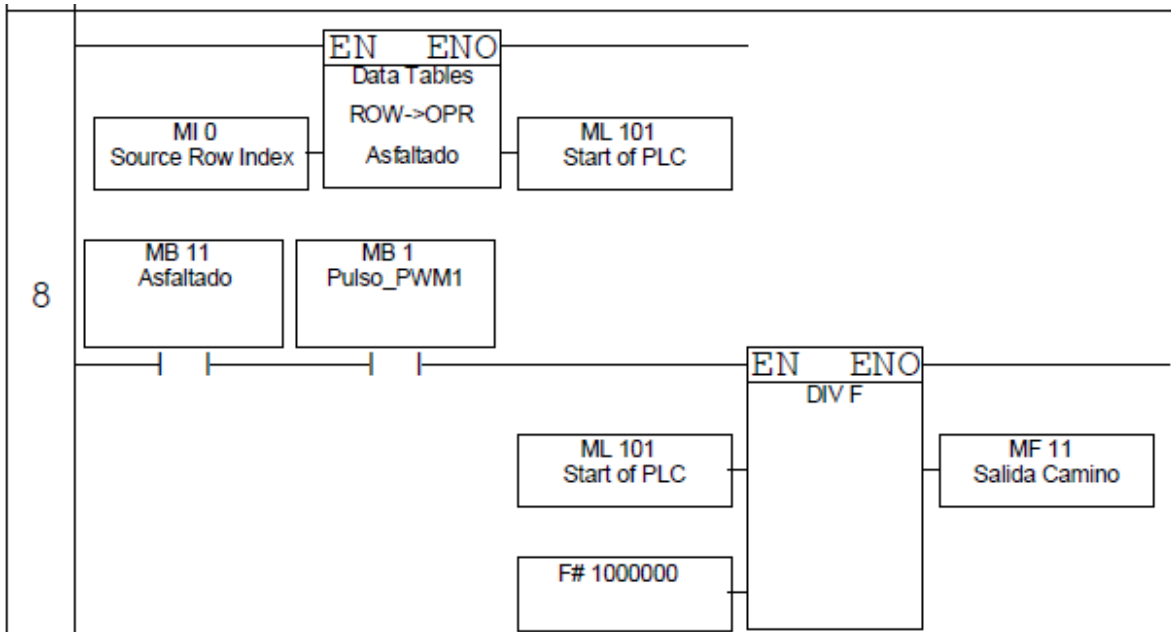
Selección del camino destapado



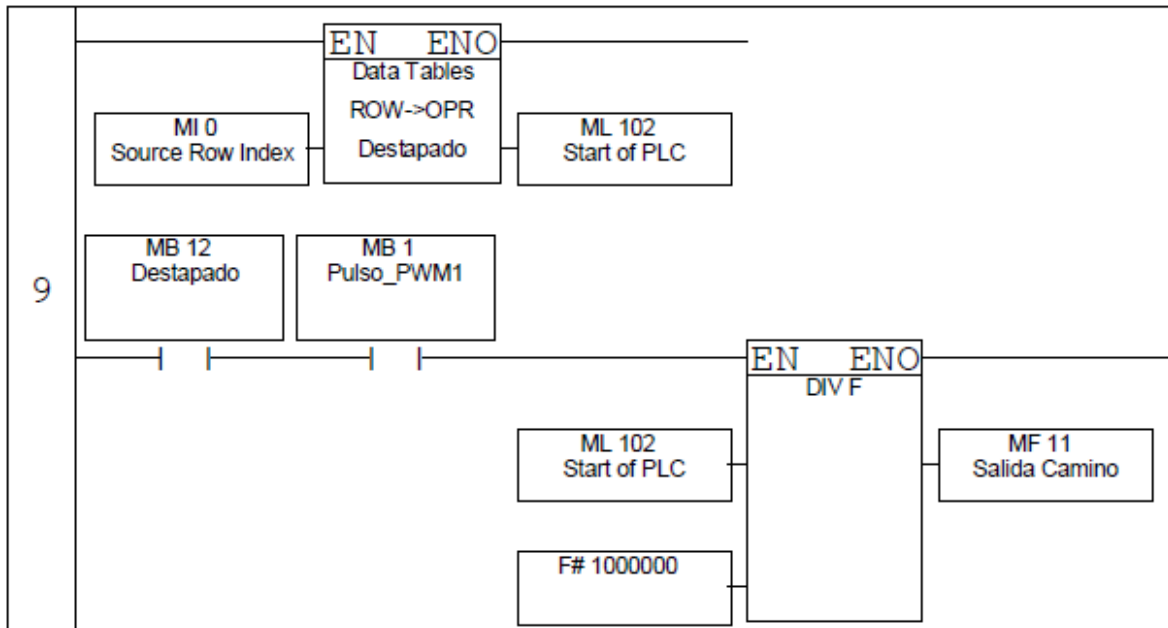
Lee y carga la tabla correspondiente al camino adoquinado.



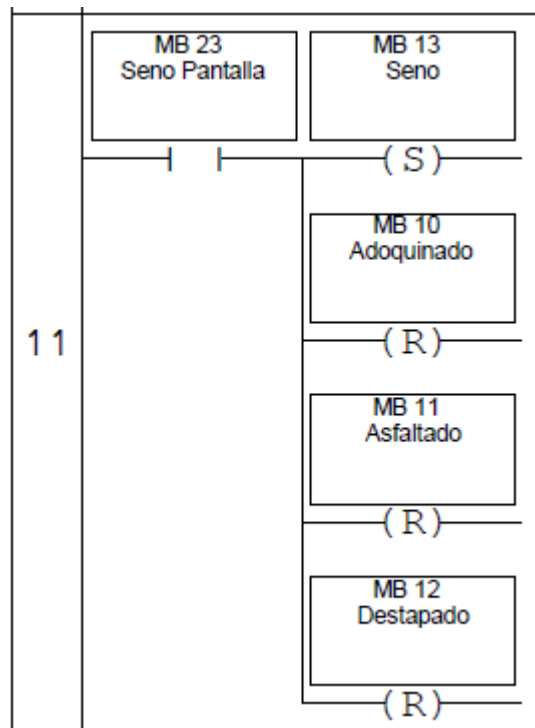
lee y carga la tabla correspondiente al camino asfaltado y la recorre.



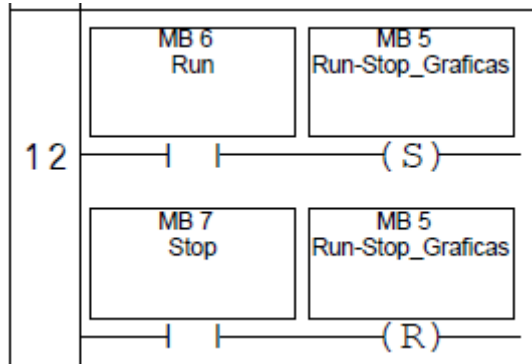
Lee y carga la tabla correspondiente al camino destapado y la recorre.



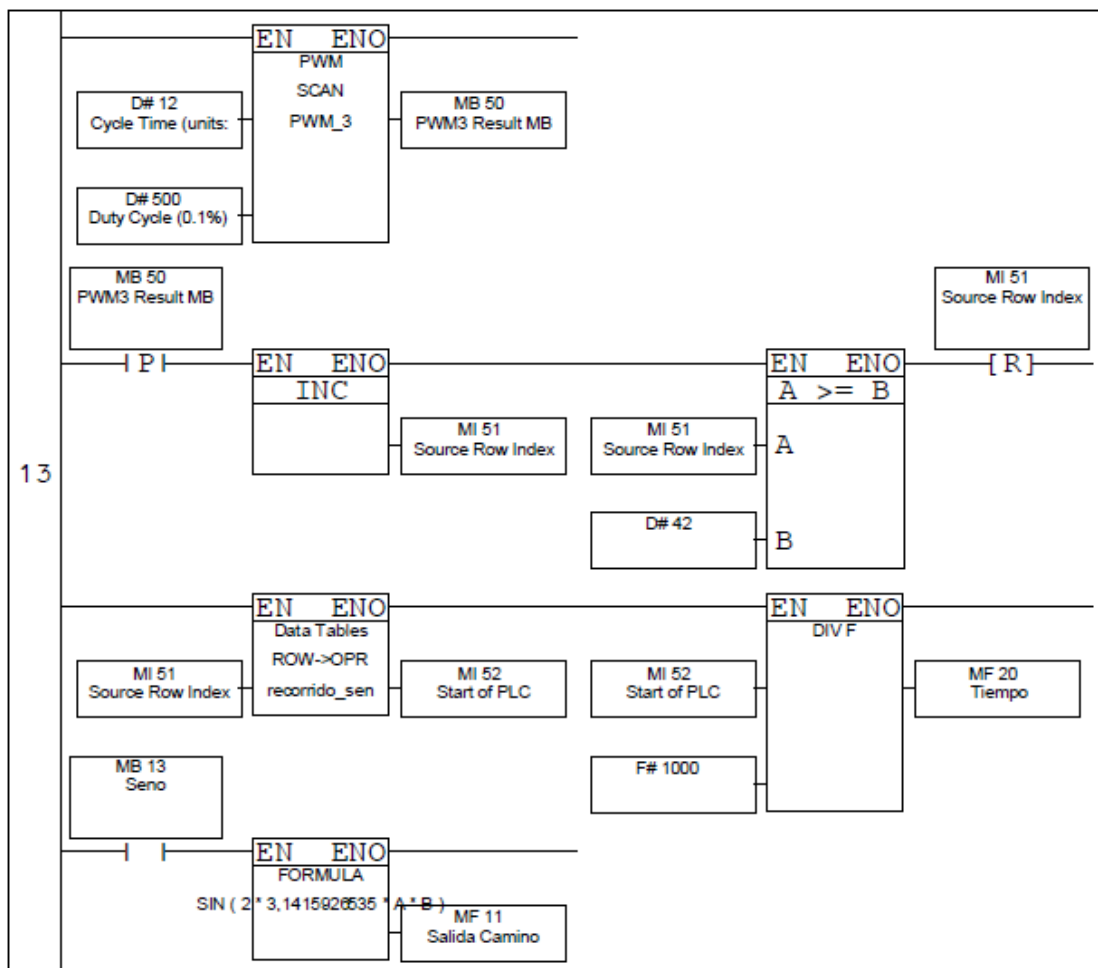
Selección de la pantalla donde se realizan las pruebas con lo que respecta a la norma EuSAMA.



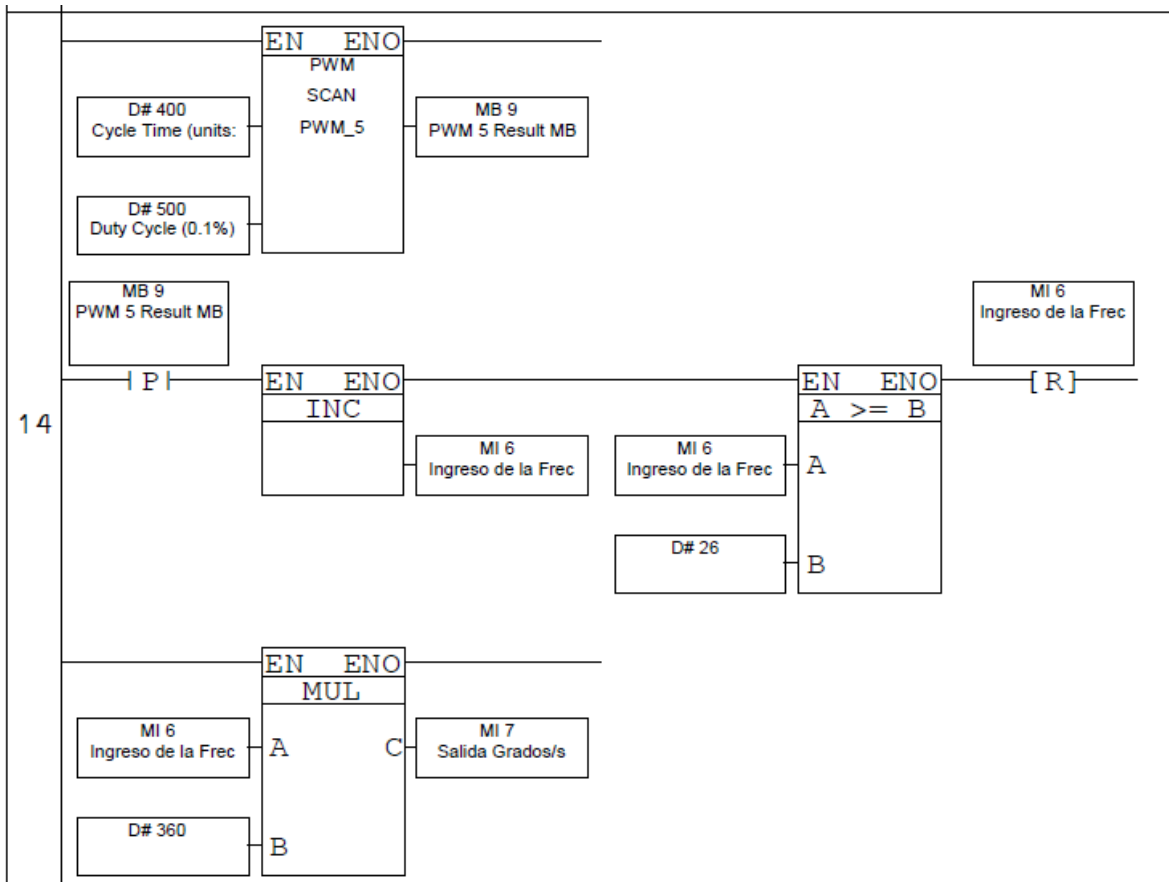
Permite la habilitación de lectura en las gráficas.



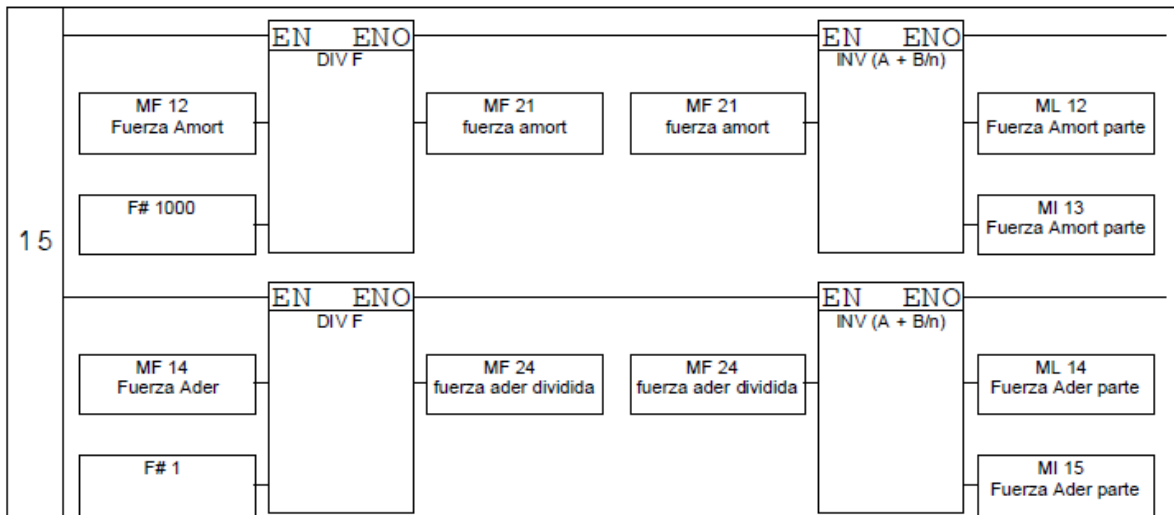
Prueba de recorrido de la onda sinusoidal de un segundo y con una variación de frecuencia de 0Hz a 25Hz. No se logran los resultados con este método debido a la falta de resolución entre el hardware (PLC) y la interfaz OPC server.



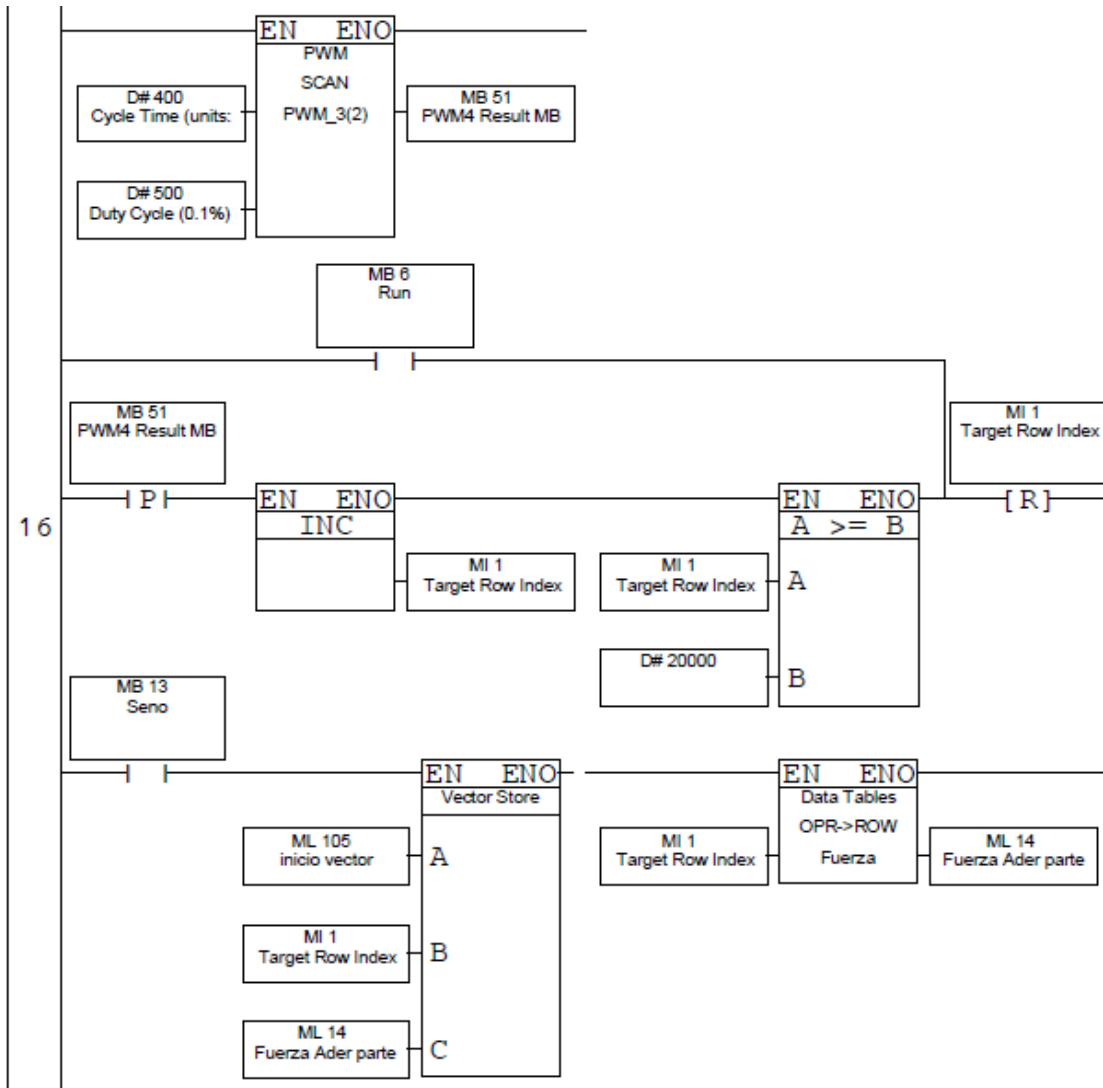
Selección del rango de frecuencia para el recorrido de la onda sinusoidal.



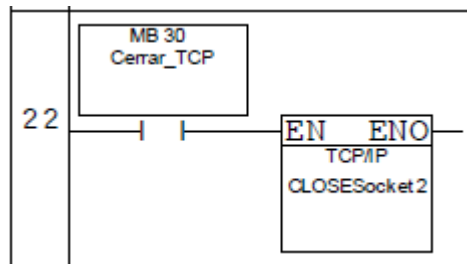
En este segmento se realiza la división de la fuerza para llevarla a un número largo o numero entero y poder graficar estos datos.



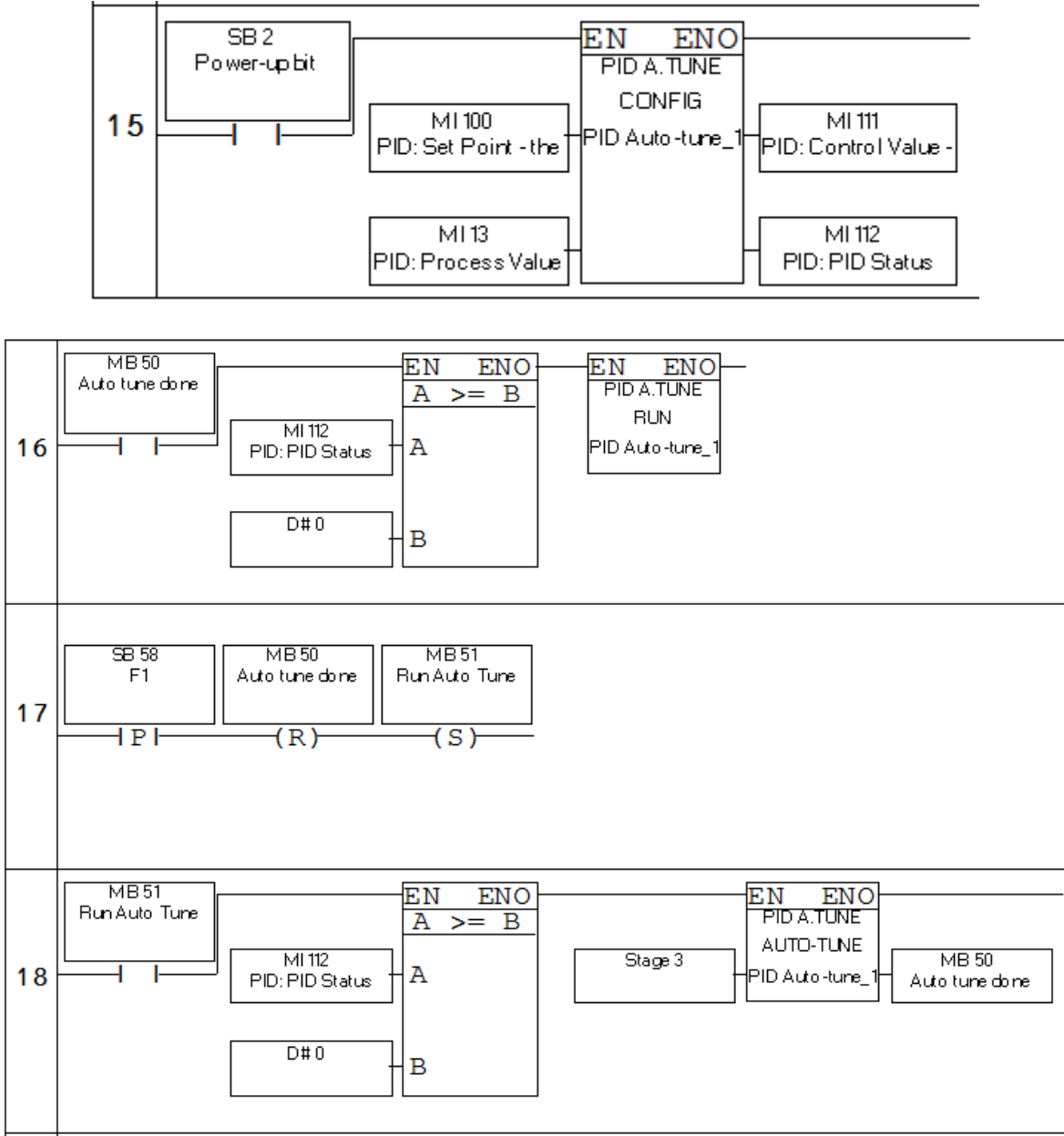
En este segmento utiliza una función PWM para poder recorrer todos los datos obtenidos y así llevarlos a una tabla para previamente ser analizada y graficada.



Cerrar el puerto Ethernet.



Segmentos de la estrategia de control PID



APENDICE

Apéndice B. Montaje de planta y conexión de la OPC

En la figura 1 se puede apreciar el programa hecho en el software Visilogic quien posee las marcas necesarias para realizar la acción de control, junto a esta están el software OPC Quick Client y UniOPC Server quienes hacen el enlace con la maquina real y la planta virtual.

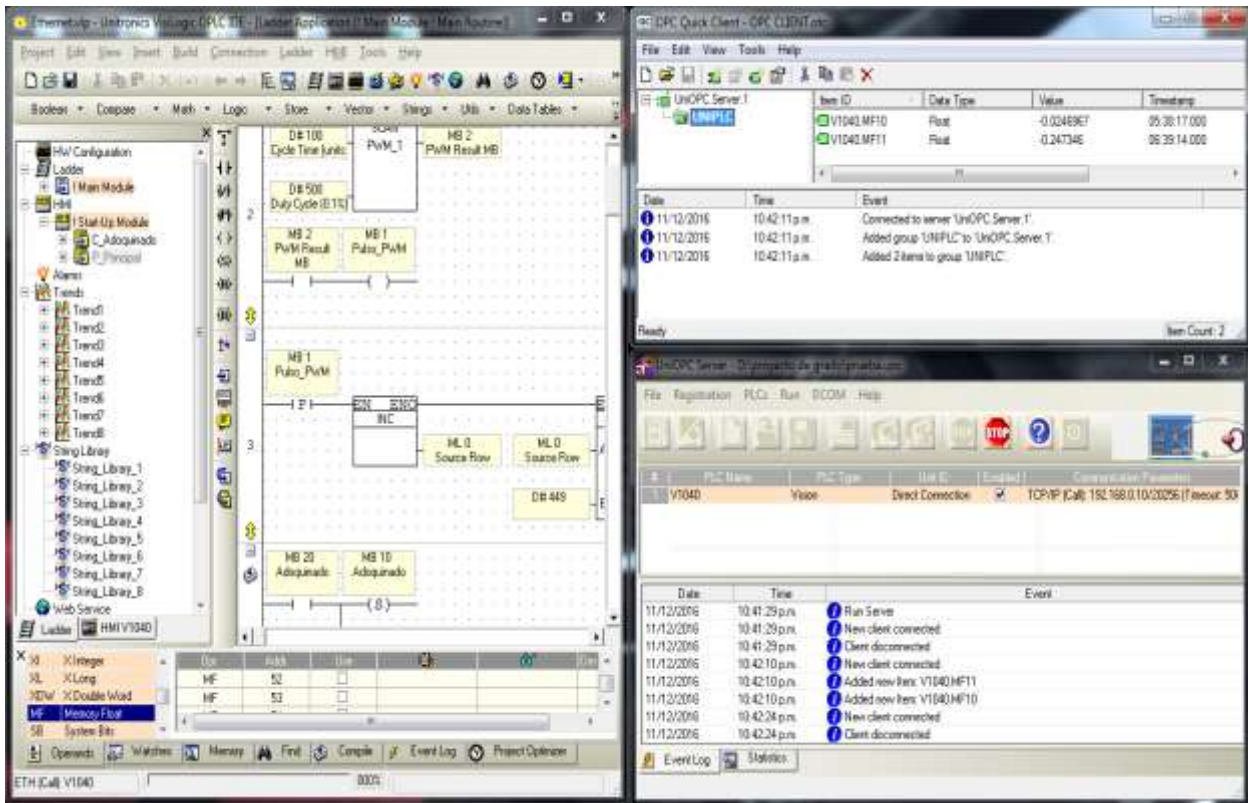
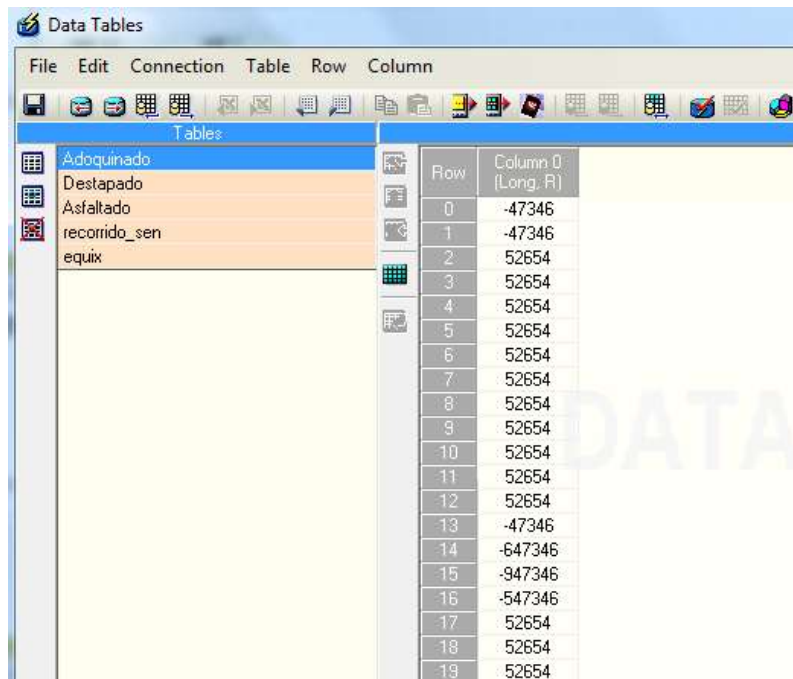


Figura 1. Software Visilogic, software OPC Quick Client y software UniOPC Server. Fuente: Autores.

En la figura 2 se tiene la tabla de datos que contiene la información necesaria para simular los caminos en el entorno de NX.



Row	Column 0 (Long. R)
0	-47346
1	-47346
2	52654
3	52654
4	52654
5	52654
6	52654
7	52654
8	52654
9	52654
10	52654
11	52654
12	52654
13	-47346
14	-647346
15	-947346
16	-547346
17	52654
18	52654
19	52654

Figura 2. Tablas de datos para los caminos. **Fuente:** Autores

En las figuras 4, 5, 6, 7 y 8 se muestra el entorno visual de la pantalla del PLC donde se interactúa con el entorno virtual.

En la figura 3 se encuentra el entorno de la pantalla principal donde se encuentra el acceso a los diferentes caminos, se pueden observar los datos en las gráficas y además se puede ingresar a la pantalla donde se ajustan los parámetros para probar la norma EuSAMA.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

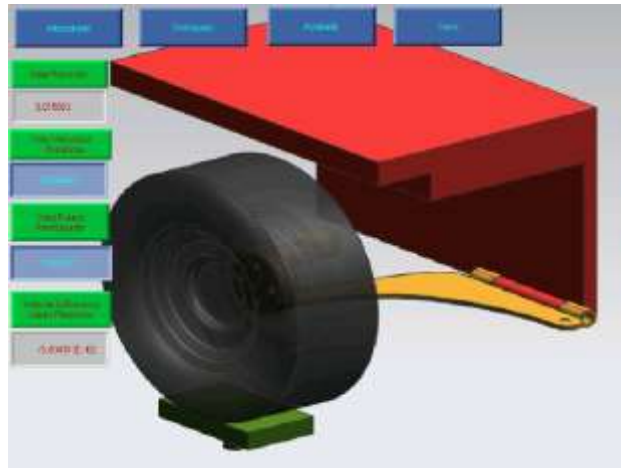


Figura 3. Pantalla principal. **Fuente:** Autores.

En la figura 4 se tiene la pantalla donde se puede comprobar la norma EuSAMA y así poder verificar la veracidad del modelo virtual en NX.

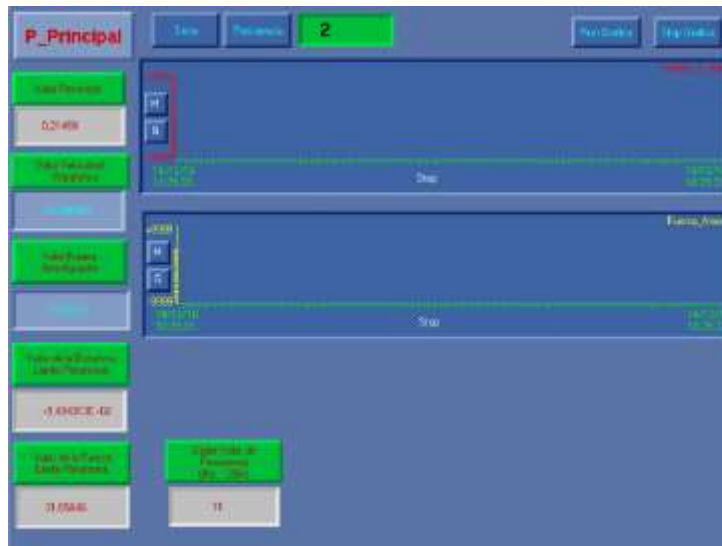


Figura 4. Pantalla para realizar prueba EuSAMA. **Fuente:** Autores.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

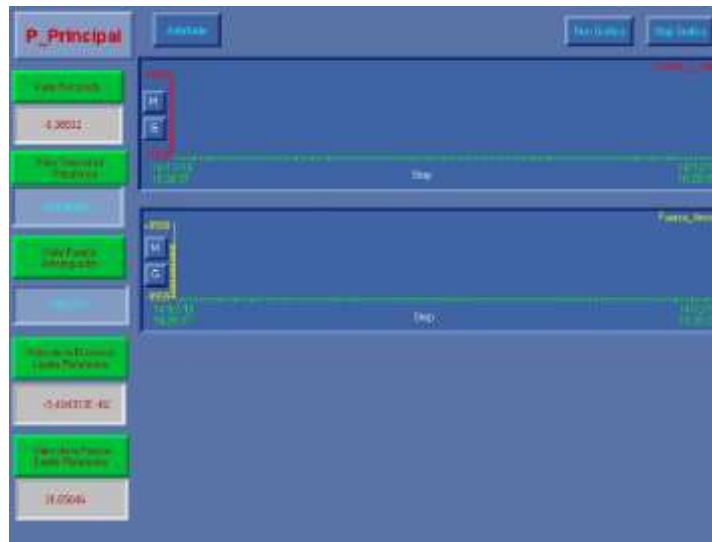


Figura 5. Pantalla para el camino asfaltado. **Fuente:** Autores

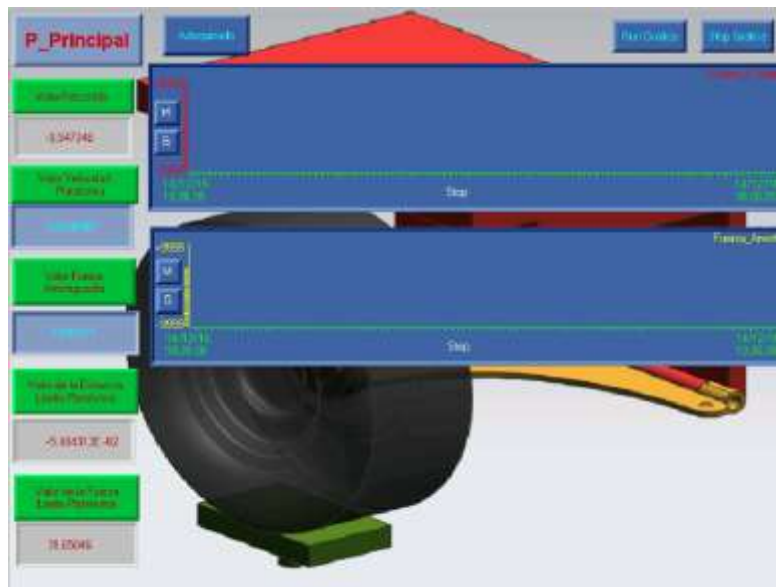


Figura 6. Pantalla para el camino adoquinado. **Fuente:** Autores

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

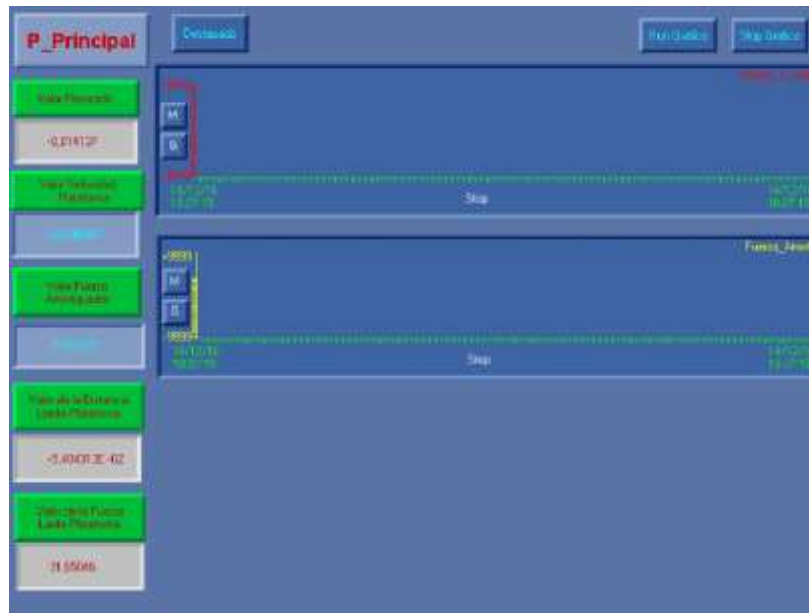
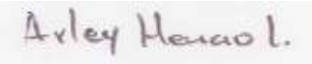
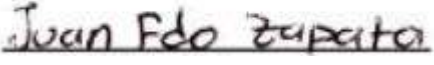



Figura 7. Pantalla para el camino destacado. **Fuente:** Autores

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



FIRMA ESTUDIANTES





FIRMA ASESOR

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES_____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____