



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS PROFESIONAL

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA LA MEDICIÓN DEL IRI EN LABVIEW

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA CIVIL

PRESENTA:

JOSE FRANCISCO RAMOS HERRERA

ASESOR:

DR. NELIO PASTOR GÓMEZ

COASESOR:

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA



MORELIA, MICHOACÁN, AGOSTO 2016

A Dios...

A mis Padres...

Quisiera agradecer primeramente a Dios por permitirme llegar hasta donde estoy, rodeado de grandes personas de las cuales aprendo a diario.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por permitirme realizar mis estudios dentro de sus aulas.

A la Facultad de Ingeniería Civil por brindarme la herramienta necesaria tan valiosa en la enseñanza, como lo fueron mis maestros que me marcaron y me ayudaron a llegar en donde estoy.

A mi Asesor de tesis, Dr. Nelio Pastor Gómez por haberme dado la oportunidad de desarrollar este trabajo, así como el tiempo dedicado no solo a la investigación, sino también a las enseñanzas y anécdotas de la vida que me compartió.

A mi Coasesor de tesis, Dr. Jorge Alarcón Ibarra por brindarme siempre el apoyo para realizar esta investigación y permitirme aprender siempre de él, así como la gran motivación que siempre me brindo para continuar y terminar la investigación.

A mi compañera en el desarrollo de la tesis, M.I. Yesenia Rodríguez Méndez, por su gran compañerismo y gran amistad.

A mis compañeros Leonardo Ambrosio Ochoa Ambriz y Daniela Bocanegra Martínez por el apoyo recibido durante la investigación y durante la carrera, como la motivación y gran amistad que me brindaron siempre.

A César Abel Andrade Salado, Cristóbal Uriel Magaña Díaz y Antonio Padilla Villa por su servicio prestado a la investigación, pero sobre todo por su valiosísima amistad. Así como a todos los demás compañeros que prestaron su servicio a lo largo de la investigación.

A todos mis compañeros de la licenciatura por su gran amistad y por todo el tiempo y vivencias que hemos compartido juntos, en especial a Juan Carlos, Jairo, Juan Manuel, Eduardo Abraham, Rubén, David, José Manuel, Rafael y Soledad.

Al personal de la UMSNH que de alguna forma me ha dado su apoyo durante este tiempo, en especial a Juan Carlos López Calderón.

A mis amigos fuera de la Universidad en especial Miguel Ángel Álvarez Medina y Ricardo Alejandro Hernández Martínez por brindarme su amistad y compartir grandes momentos de mi vida.

A mis padres José Francisco Ramos Castro y María del Rosario Herrera Zavala, por brindarme su apoyo y ayudarme a forjar y formar la persona que ahora soy, enseñarme a luchar por mis metas y anhelos y demostrarme que siempre estarán para mí.

A mis hermanos y a toda mi familia, porque su cariño me ha ayudado a continuar siempre en los momentos difíciles.

Índice de Tesis

Índice de Tesis	I
Resumen	V
Abstract	VI
Glosario	VII
Introducción	VIII
Justificación	IX
Objetivo	X
Organización de la Tesis	XI
Capítulo I. Importancia de la Regularidad Superficial en los Pavimentos	1
1.1 Transporte en México	2
1.2 Costos de Operación	5
1.3 Ciclo de Gestión	5
1.3.1 Fases de deterioro en pavimentos	7
1.4 Textura de los pavimentos	8
1.5 ISA	9
1.6 Profundidad de la Rodera	10
1.7 Nivel de Servicio	11
1.8 Fricción o Resistencia al deslizamiento	12
1.9 Índice Internacional de Rugosidad	13
1.9.1 ¿Qué es el IRI?	13
1.9.2 Importancia de la obtención del IRI	14
1.10 Investigación del Banco Mundial de IRI	15
1.10.1 Cálculo de IRI	19
1.10.2 Algoritmo de Calibración del Banco Mundial	20
1.11 IRI en la red de vialidades de México	22
1.12 Equipos de Medición de IRI	26
1.12.1 Perfiladores de Inercia de Alta Velocidad o perfilómetros	26
1.12.2 Perfilógrafos	27
1.12.3 Perfiladores de peso ligero	27
1.12.4 Sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta (RTRRMS)	28
1.12.5 Dispositivos manuales	29
1.13 Obtención del valor de IRI de una vialidad	30



Capítulo II. Instrumentación Virtual	33
2.1 Estructura de un Instrumento	33
2.1.1 ¿Qué es Medir?	33
2.1.2 Unidades de medida	33
2.1.3 Errores en las medidas directas	34
2.1.4 ¿Qué es un Instrumento?	34
2.1.5 Estructura de un instrumento	35
2.2 Instrumentación Virtual	35
2.2.1 Características de la Instrumentación.	35
2.2.2 Clasificación y Ejemplos de Instrumentos	36
2.2.3 ¿Qué es Virtual?	37
2.2.4 ¿Qué es la Instrumentación Virtual?	38
2.2.5 Hardware	39
2.2.6 Software	40
2.2.7 Ejemplos de la practicidad de la Instrumentación Virtual	40
2.3 Componentes de la instrumentación	41
2.3.1 Sensores y transductores	41
2.3.2 Acondicionamiento de Señal	42
2.3.3 Cables de conexión y Bloques Conectores	42
2.3.4 Adquisición de Datos	44
2.3.5 Computadora y Software	45
2.3.6 Proceso de instrumentación	47
2.4 EMIRI UMICH 001	48
2.4.1 Variables físicas	49
2.4.2 Sensores	50
2.4.3 Conexiones y terminal	50
2.4.4 Tarjeta de Adquisición de Datos	52
2.4.5 PC y Software	53
Capítulo III. Algoritmia y Plataforma Informática	54
3.1 Algoritmia	54
3.1.1 Algoritmo	54
3.1.2 Escritura de Algoritmos	55
3.1.3 Representación de algoritmos	56
3.1.3.1 Pseudocódigos	56
3.1.3.2 Diagrama de Flujo	56
3.2 Plataforma Informática	57
3.2.1 LabVIEW	58
3.2.1.1 Terminales	59
3.2.1.2 Funciones	60
3.2.1.3 Flujo de ejecución	60
3.2.2 Tipos de datos	61

3.2.3	Estructuras de control	62
3.2.3.1	SEQUENCE	62
3.2.3.2	CASE	63
3.2.3.3	WHILE	64
3.2.3.4	FOR	64
3.2.4	Variables y constantes	65
3.2.5	NI DAQmx Software	65
3.2.6	Tipo de señales	67
3.2.6.1	Señales analógicas	67
3.2.6.2	Señales Digitales	68
3.2.6.3	Conversión a digital	69
3.3	Método de desarrollo de software en espiral y diseño Modular	71
Capítulo IV.	Desarrollo de Algoritmo para la Obtención de IRI	73
4.1	Determinación de Objetivos	74
4.2	Planificación y análisis de Riesgos	75
4.2.1	Sensor de Desplazamiento Lineal	75
4.2.2	Sensor de Efecto Hall	77
4.2.3	Respuesta del vehículo	77
4.2.4	Longitud de tramo	79
4.2.5	Velocidad de circulación	80
4.3	Desarrollo del algoritmo	80
4.3.1	Cálculo de la Respuesta del Vehículo v.1.0	80
4.3.2	Longitud del tramo v.1.0	81
4.3.3	Velocidad de circulación v.1.0	82
4.4	Ejecución del Algoritmo en el lenguaje de Programación	83
4.4.1	Programa de la Respuesta del Vehículo	84
4.4.2	Programa Longitud del tramo	85
4.4.3	Programa Velocidad de circulación	86
4.5	Planificar siguiente Iteración.	87
4.5.1	Corrección de errores del programa de la Respuesta del Vehículo	87
4.5.2	Corrección de errores del programa Longitud del tramo	89
4.5.3	Corrección de errores del programa Velocidad de circulación	89
4.6	Documentación	90
4.6.1	Cálculo Respuesta del Vehículo v.2.0	90
4.6.2	Longitud del tramo v.2.0	91
4.6.3	Velocidad de circulación v.2.0	92
4.7	Calibración de Sensores	93
4.7.1	Sensor de desplazamiento longitudinal	93
4.7.2	Autocalibración de sensores	95

4.8	Algoritmo para la medición de IRI en LabVIEW	97
4.8.1	Generador de Archivo de Medición	99
4.8.2	Generador de Archivo de Levantamiento de Calibración	101
4.3.3	Cálculo de la Velocidad de Circulación y longitud de tramo	101
4.8.4	Filtro de factores que Influyen en la medición de IRI	103
4.8.5	Adquisición de la Respuesta del Vehículo	104
4.8.6	Autocalibración de Sensores	106
4.8.7	Inicializador de Escritura	107
Capítulo V.	Proceso de Calibración del equipo EMIRI UMICH 001	113
5.1	Tramos de Calibración	114
5.2	Obtención y Procesamiento de datos registrados por el EMIRI UMICH 001	114
5.2.1	Obtención de las ecuaciones de cada velocidad a la que se realizó la lectura	117
Capítulo VI.	Presentación de Resultados	120
Capítulo VII.	Conclusiones y Trabajo Futuro	122
Anexos		124
Apéndice A	“Manual de usuario de programa JOFRAH”	124
	Manual de Instalación	124
	Partes del Panel Frontal del software	124
	Procedimiento para utilizar el software	125
Apéndice B	“Obtención de IRI por medio de las elevaciones del perfil longitudinal”	130
Apéndice C	“Algunos Conceptos”	133
Índice de Tablas		134
Índice de Figuras		135
Referencias		138

Resumen

Esta tesis consiste en el desarrollo de un algoritmo que permita obtener los valores del Índice de Rugosidad Internacional por medio del equipo **EMIRI UMICH 001**. Para el funcionamiento del equipo se requiere de la adquisición de datos y el procesamiento de la información, debido a que es un Instrumento Virtual. El algoritmo se escribió en el lenguaje de programación de la plataforma LabVIEW.

El EMIRI UMICH 001 está clasificado dentro de los equipos de medición de IRI como un Sistema de Medición de Rugosidad Tipo Respuesta. En este documento se presenta la metodología de calibración, el cual, es un método utilizado por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes para la calibración del *May's Ride Meter*, siendo este un equipo tipo respuesta al igual que el equipo utilizado en esta investigación.

Esta investigación es parte de la primera fase del PROYECTO IRI UMICH. Este proyecto tiene como finalidad ir evolucionando el equipo EMIRI UMICH 001, implementando más sistemas de medición de rugosidad para aumentar su precisión en la medición, como acelerómetros, sensores láser, GPS, entre otros. Usando en esta primera fase dos sensores de desplazamiento lineal y un sensor de Efecto Hall.

En el desarrollo del algoritmo se utilizó la metodología en espiral y el diseño modular, para esto, se realizaron subrutinas que realizan una parte del procesamiento general, permitiendo así tener un mejor control del software, buscando hacerlo preciso y conciso.

El equipo EMIRI UMICH 001 por medio de la Instrumentación Virtual mide la respuesta del vehículo al transitar por una vialidad, la longitud de tramo a la que se genera dicha respuesta y la velocidad promedio de circulación del equipo en el tramo en estudio. Al procesar esta información la transforma en valores de IRI, que es el objetivo central de esta investigación.

Palabras clave: *Desarrollo, Algoritmo, Instrumentación Virtual, Medición, IRI.*

Abstract

This thesis is the development of an algorithm to obtain the values of the International Roughness Index by the equipment EMIRI UMICH 001. For the operation of the equipment data acquisition and processing information are required, because it is a virtual instrument. The algorithm was written in the programming language of LabVIEW platform.

The EMIRI UMICH 001 is classified within measurement equipment IRI as Response Type Road Roughness Measuring System. In this document calibration methodology is presented, which is a method used by the SCT for calibration of *May's Ride Meter*, this being as a response type equipment like the equipment used in this research.

This research is part of the first phase of the IRI UMICH PROJECT. This project is aimed at improve the team Emiri UMICH 001, implementing more roughness measurement systems to increase measurement accuracy, such as accelerometers, laser sensors, GPS, among others. Using in this first phase two sensors linear displacement and a Hall Effect sensor.

In the development of the algorithm, the methodology used was the spiral and modular design, for this, subroutines were used for performing a part of the overall processing, allowing whit this a better control of software, looking for doing it precise and concise.

The EMIRI UMICH 001 through virtual instrumentation measures the response of the vehicle, section length and average flow velocity in the stretch under study. By processing this information, this is transformed into data values of IRI, which is the main objective of this research.

Keywords: Development, Algorithm, Virtual Instrumentation, Measurement, IRI.

Glosario

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes)</i>
ACV	<i>Análisis de Ciclo de Vida</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter (Convertidor de Analógico a Digital)</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange (Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información)</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para el Ensayo y Materiales)</i>
BPR	<i>Bureau of Public Roads (Departamento de Caminos Públicos)</i>
CGS	<i>Sistema Cegesimal de Unidades</i>
CPU	<i>Central Processing Unit (Unidad Central de Procesamiento)</i>
DAQ	<i>Data Acquisition (Adquisición de Datos)</i>
EBCDIC	<i>Extended Binary Coded Decimal Interchange Code (Código estándar de 8bits usado por IBM)</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration (Administración Federal de Carreteras)</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
FTP	<i>Foiled Twisted Pair (Par Trenzado con Blindaje Global)</i>
HCM	<i>Highway Capacity Manual (Manual de Capacidad de Carreteras)</i>
IMD	<i>Intensidad Media Diaria</i>
IRI	<i>International Roughness Index (Índice de Rugosidad Internacional)</i>
IRRE	<i>International Road Roughness Experiment (Experimento Internacional de Rugosidad de las Carreteras)</i>
ISA	<i>Índice de Servicio Actual</i>
NI	<i>National Instruments</i>
PC	<i>Personal Computer (Computadora Personal)</i>
PCI bus	<i>Peripheral Component Interconnect (Interconexión de Componentes Periféricos)</i>
PSR	<i>Present Serviceability Rating (Valor Presente de la Serviciabilidad)</i>
RTRRMS	<i>Response Type Road Roughness Measuring System (Sistema de Medición de Rugosidad Tipo Respuesta)</i>
SI	<i>Sistema Internacional de Unidades</i>
TRB	<i>Transportation Research Board (Consejo de Investigación del Transporte)</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VGA	<i>Video Graphics Array (Adaptador Gráfico de Video)</i>
VI	<i>Virtual Instruments (Instrumentos Virtuales)</i>

Introducción

La infraestructura de una nación es esencial para su desarrollo, tener una infraestructura en buenas condiciones marca la pauta para continuar de manera adecuada con el desarrollo del mismo, y por el contrario el tener un mal estado de la infraestructura genera un lento desarrollo.

En México la mayoría del transporte de carga se realiza por transporte terrestre, en específico por la red vial, por lo tanto, es de vital importancia contar con buenas condiciones en las vialidades. Para poder evaluar en qué condiciones se encuentra una red vial se requiere de una serie de estudios y análisis, y así poder obtener valores que nos refieran el estado que guardan las vialidades.

Dentro de los estudios para la evaluación de las vialidades en México se realizan estudios de 5 parámetros como lo es el ISA, IRI, Profundidad de Rodera, Nivel de Servicio y Resistencia a la fricción. Esta tesis se centra en el estudio del IRI que permite conocer las condiciones que guarda una vialidad, permitiendo con estudios paralelos como aforos vehiculares y auscultaciones del estado de las vialidades, poder obtener los costos de operación del usuario al transitar por dicha infraestructura.

Para obtener el valor de IRI que guarda una vialidad existe una gran variedad de equipos en el mercado, por medio de una medición con estos equipos se obtiene este valor, dentro de la gran variedad de equipos se encuentran variables en cuanto a su funcionamiento como: eficiencia, precisión, costos de operación y costos de adquisición.

En este proyecto se centrará en el desarrollo del Software que permita al equipo EMIRI UMICH 001 obtener el valor de IRI de cualquier camino.

Justificación

No hace falta conocer valores estadísticos, solo se requiere salir a las calles o carreteras y observar las condiciones en las que se encuentra la red de vialidades en todo México. Los datos estadísticos de las dependencias competentes mencionan que la infraestructura carretera se encuentra de manera general entre regulares y aceptables condiciones, esto ocasionado por la antigüedad de las vialidades, puesto que la mayoría de estas ya no pueden dar abasto al tránsito vehicular, por lo tanto, se sobrepasó los valores de su proyección, ocasionando deterioros cada vez mayores en las vialidades.

Otro factor importante que influye en el deterioro de los pavimentos es el exceso de cargas que circula por toda la red vial con relación a las que estaban proyectadas inicialmente. Esto debido a que la mayoría de las vialidades fueron proyectadas para soportar cargas vehiculares de hasta 6 y 8 toneladas, donde en la actualidad circulan vehículos que sobrepasan las 60 toneladas.

El transitar por una vialidad en malas condiciones genera un mayor costo de operación y mayor tiempo de llegada, que una en buenas condiciones. Por eso se requiere tener en constante mantenimiento las vialidades, para garantizar que no pierdan su serviciabilidad, y garantizar un buen desarrollo de la sociedad.

Para conocer las condiciones que guardan las vialidades y obtener los costos de operación del usuario al transitar por ellas, es importante conocer el valor de IRI que guardan las vialidades, debido al alto costo de adquisición de los equipos más eficientes en la obtención de este valor, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo desarrolló un equipo que permitiera obtener este valor de IRI, centrándose en la creación de bajo costo [1] y la eficiencia en la medición.

Este proyecto se basa en el desarrollo del Software que permita al EMIRI UMICH 001 realizar mediciones de IRI de cualquier vialidad.

Objetivo

Debido a la importancia de preservar las redes viales en buenas condiciones, el objetivo general de la presente tesis de licenciatura es desarrollar un software, que permita obtener mediciones de IRI de cualquier vialidad y cualquier condición de circulación por medio del equipo EMIRI UMICH 001.

Para alcanzar el objetivo general de este trabajo se deberán cumplir una serie de objetivos particulares que se describen a continuación:

-  Realizar una recopilación exhaustiva, de la información existente sobre el Índice de Rugosidad Internacional.
-  Conocer las variables físicas que se miden con los equipos ya existentes para poder obtenerlas de la misma manera en el EMIRI UMICH 001.
-  Recopilar información sobre la Instrumentación Virtual ya que el EMIRI UMICH 001 es de este tipo de dispositivos.
-  Conocer el método utilizado para calibración de los equipos existentes y poder utilizarlo en el EMIRI UMICH 001.
-  Desarrollar Software en la plataforma LabVIEW para obtener el valor de IRI de cualquier vialidad con el EMIRI UMICH 001.
-  Comparar los resultados obtenidos del EMIRI UMICH 001 con un equipo en funcionamiento.

Organización de la Tesis

Índice de Tesis

Resumen

Abstract

Glosario

Introducción

Justificación

Objetivo

Organización de la Tesis

Capítulo I. *Importancia de la Regularidad Superficial en los Pavimentos*

- 1.1 Transporte en México
- 1.2 Costos de Operación
- 1.3 Ciclo de Gestión
- 1.4 Textura de los pavimentos
- 1.5 ISA
- 1.6 Profundidad de la Rodera
- 1.7 Nivel de Servicio
- 1.8 Fricción o Resistencia al deslizamiento
- 1.9 Índice Internacional de Rugosidad
- 1.10 Investigación del Banco Mundial de IRI
- 1.11 IRI en la red de vialidades de México
- 1.12 Equipos de Medición de IRI
- 1.13 Obtención del valor de IRI de una vialidad

Capítulo II. *Instrumentación Virtual*

- 2.1 Estructura de un Instrumento
- 2.2 Instrumentación Virtual
- 2.3 Componentes de la instrumentación
- 2.4 EMIRI UMICH 001

Capítulo III. *Algoritmia y Plataforma Informática*

- 3.1 Algoritmia
- 3.2 Plataforma Informática

3.3 Método de desarrollo de software en espiral y diseño Modular***Capítulo IV. Desarrollo de Algoritmo para la Obtención de IRI***

- 4.1 Determinación de Objetivos**
- 4.2 Planificación y análisis de Riesgos**
- 4.3 Desarrollo del algoritmo**
- 4.4 Ejecución del Algoritmo en el lenguaje de Programación**
- 4.5 Planificar siguiente Iteración.**
- 4.6 Documentación**
- 4.7 Calibración de Sensores**
- 4.8 Algoritmo para la medición de IRI en LabVIEW**

Capítulo V. Proceso de Calibración del equipo EMIRI UMICH 001

- 5.1 Tramos de Calibración**
- 5.2 Obtención y Procesamiento de datos registrados por el EMIRI UMICH 001**

Capítulo VI. Presentación de Resultados***Capítulo VII. Conclusiones y Trabajo Futuro******Anexos***

Apéndice A “Manual de usuario de programa JOFRAH”

Apéndice B “Obtención de IRI por medio de las elevaciones del perfil longitudinal”

Apéndice C “Algunos Conceptos”

Índice de Tablas***Índice de Figuras******Referencias***

Capítulo I.

Importancia de la Regularidad Superficial en los Pavimentos

La infraestructura es un factor determinante para el desarrollo económico de un país, ya que una buena infraestructura permite mantener comunicado a un país dentro y fuera del mismo, así como para continuar con su desarrollo. Por lo tanto, ésta es de gran importancia para la sociedad, con una buena infraestructura obtendremos un mejor desarrollo en todos los aspectos que refieren al bienestar social y por el contrario una mala infraestructura nos arrojará un lento desarrollo en estos aspectos.

“El bienestar de las naciones está relacionado con el grado de desarrollo de su infraestructura, por que brinda comunicación permanente entre los centros de población con los polos regionales de desarrollo, centros de producción y de consumo, gracias a esto es un factor para elevar la competitividad: reduce costos y tiempos de transporte, facilita el acceso a mercados e integra cadenas productivas y a servicios de educación, salud, entre otros. Contribuye a eliminar desequilibrios regionales y le da sentido de unidad a todo el país.” [2]

Al estar comunicados, podemos obtener muchos y mejores beneficios que al no estarlo, para contar con una buena comunicación se debe de atender todos los componentes de la infraestructura, como se muestra en la Figura I.1 las principales son: Ferrocarriles, Puertos, Aeropuertos, Electricidad, Telecomunicaciones y Carreteras.



Figura I.1 “Áreas que componen la infraestructura de un País”

1.1 Transporte en México

Cada uno de los rubros es igual de importante que los demás, por lo tanto, es necesario hacer un estudio específico para conocer las condiciones en las que se encuentra cada uno de estos. Esta investigación concierne a las carreteras, en específico a un parámetro de las vialidades, que nos permite conocer las condiciones en las que se encuentran, como lo es el Índice de Rugosidad Internacional.

“México ha desarrollado una red de comunicaciones carreteras no desdeñable, a partir de mediados de la década de los años 20’s del siglo pasado. Esta red ha desempeñado desde aquel entonces un papel muy importante en la evolución nacional, si bien, no fue el mismo en todas las épocas.” [3]

“En la actualidad se cuenta con 374 mil kilómetros de red carretera y caminos en México, de los cuales 49 mil kilómetros son de la red federal (8,400 km son de cuota y 40,600 km son de tránsito libre), donde el estado físico de las carreteras federales libres se considera en un 80% como buenas o aceptables.” [2]

“El transporte por carretera en nuestro país es el de mayor contribución a la actividad nacional en sus aspectos comercial, industrial y de movimiento de pasajeros y de carga, por lo que de la red nacional de carreteras se convierte en la columna vertebral en la vida económica, social y política de México.” [4]

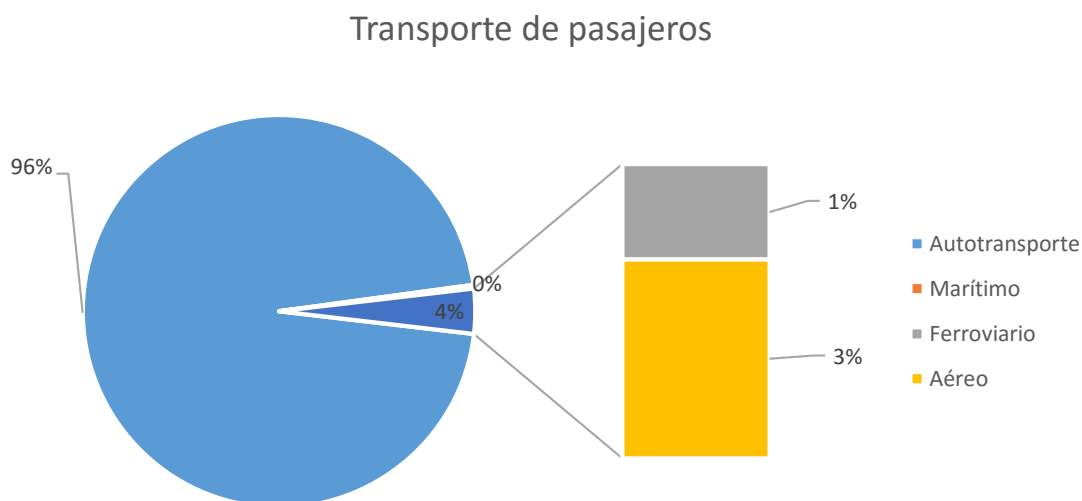


Figura 1.2 “Porcentajes del transporte de pasajeros en México [2]”

Como se muestra en la Figura I.2 se muestra el porcentaje de usuarios que utilizan los diferentes medios de transporte en México, teniendo 96% por autotransporte, 0.30% por transporte marítimo, 1.20% por transporte Ferroviario y 2.50% por transporte Aéreo.

En la Figura I.3 se puede observar el porcentaje de carga que circula por cada uno de los medios de transporte, siendo un 55% por autotransporte, 32.30% por transporte Marítimo, 12.60% por transporte Ferroviario, 0.10% por transporte Aéreo. Gracias a estos datos estadísticos podemos darnos cuenta de la importancia que tiene la red carretera en México, debido a su gran uso tanto para transporte de pasajeros como de carga. Por lo tanto, es importante tener un conocimiento específico de las condiciones en las que se encuentran las vialidades en México, ya que para continuar con el desarrollo del país se requiere mantenerlas en buen estado.

Algunas de las causas fundamentales de los problemas de la situación actual de las carreteras son las siguientes: más del 60% de los tramos existentes se construyeron hace más de 40 años con criterios de diseño, especificaciones y materiales diferentes a los exigidos hoy en día. Los volúmenes de tránsito que circulan hoy por la red federal son mucho mayores a los previstos en su diseño original y los porcentajes de vehículos pesados se han incrementado hasta en 50% en algunos tramos. Los programas anuales de conservación, las asignaciones presupuestales son siempre insuficientes para cubrir las necesidades y en ocasiones se aplican de manera excesiva en múltiples frentes de trabajo y

Transporte de Carga

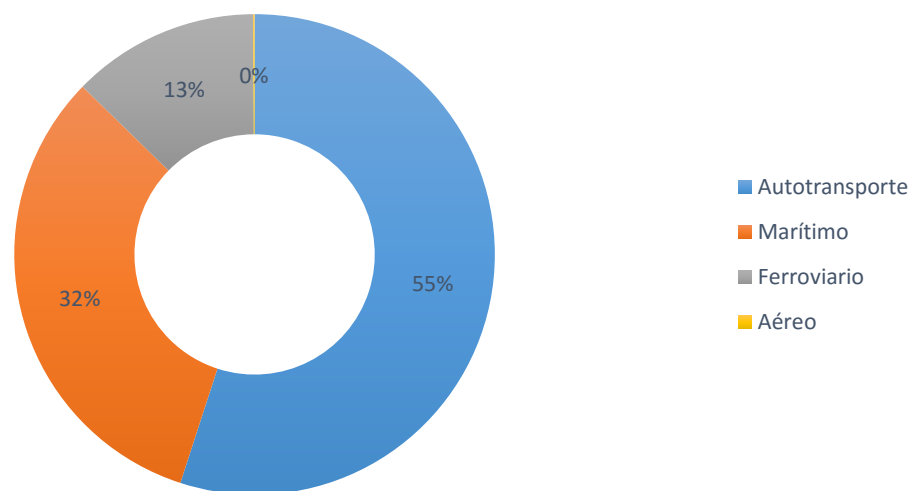


Figura I.3 "Porcentaje de Transporte de Carga en los diferentes medios en México [2]"

con la falta de una estrategia general que contenga programas de mediano y largo plazo para el mantenimiento y reconstrucción sostenida durante un periodo aproximado de 15 años. [4]

Considerando estos datos podemos darnos cuenta de la necesidad de contar con información que nos permita conocer las condiciones de las vialidades en México, obteniendo una auscultación de estas para considerar que vialidades se encuentran en bueno, regular o mal estado, y así atender las necesidades de acuerdo a su demanda de usuarios, ya que esto permitirá continuar con el desarrollo de la infraestructura del país y no quedarse estancados.

Como se muestra en la Figura I.4 se requiere identificar que el diseñar y construir una vialidad con las especificaciones y materiales que se necesitan para la elaboración de la misma, nos arroja un costo de conservación menor al que nos arrojaría si la elaboración estuviera fuera de toda especificación, puesto que de acuerdo a las condiciones de donde se construirá la vialidad, el elaborar un buen diseño y construcción de esta nos genera un costo inicial de construcción mayor al que se obtendrá si de contrario se realiza sin hacer caso a las especificaciones vigentes hoy en día. Puesto que la elaboración y así como la conservación genera un costo que al final solventa la sociedad.

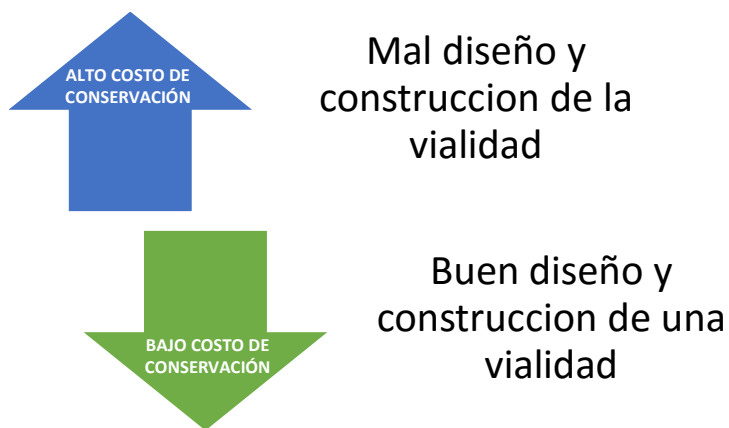


Figura I.4 "Relación costo de operación y costo de conservación"

A los usuarios de las vialidades, al transitar por una de ellas se les genera un costo por el hecho de pasar con el vehículo sobre esta, por lo tanto, también existe una relación entre transitar por una vialidad en buen estado que genera menor costo de operación que el transitar por una vialidad en malas condiciones.

1.2 Costos de Operación

Como se mencionó en el apartado anterior existen tres diferentes tipos de costos que son generados de manera directa de acuerdo a las condiciones durante la vida útil de una vialidad, por lo tanto, hay que definirlos y conocer cuál es su importancia para considerar el mismo a la hora del diseño y construcción de la vialidad, los cuales son:



✚ Costo de construcción, este es el que se genera al desarrollar la vialidad

✚ Costo de conservación, son aquellos que se realizan para darle mantenimiento a la vialidad y este alcance a otorgar buen servicio durante la vida útil de esta, considerando el confort como principal estado de serviciabilidad, el cual con el paso de los años se irá incrementando.

✚ Costo de operación, es el que se genera al usuario al transitar sobre la vialidad.

Figura 1.5 “Costos que influyen en el costo de operación”

Los tres costos afectan a los usuarios, pero el costo que sobre sale de los demás es el costo de operación, ya que el costo de operación depende de las condiciones de construcción y si se realiza una adecuada conservación, además de que diariamente se requiere trasladar de un lugar a otro, ya sea un bien, un producto, o personas. El transitar en una vialidad en mal estado ocasiona incrementos en los costos de estos productos, por lo tanto, es el costo que más afecta a la sociedad, puesto que al transitar por cualquier vialidad se genera un costo, como se muestra en la Figura 1.5 desglosando dicho costo obtenemos: costos en combustible, lubricantes, llantas, reparación y refacciones, operador, depreciación y reposición de vehículos, intereses, seguros y tiempo de traslado de productos. [4]

1.3 Ciclo de Gestión

Los costos se encuentran relacionados con los tiempos en los que se realiza el mantenimiento a una vialidad, de acuerdo al tipo de vialidad que sea (pavimento rígido o flexible, mampostería, terracería, entre otros) es diferente su tiempo y tipo de mantenimiento, además de tener como principal factor para acortar los tiempos el tráfico de vehículos (**TDPA**) ya que son deteriorados contiguamente.

El tráfico de los vehículos pesados son los principales deformadores de las vialidades, haciendo a estos fallar por fatiga, y agregándole las condiciones ambientales, los métodos de construcción, así como los materiales utilizados, son los que ocasionan la presencia de deterioros (desprendimiento de agregados, fisuras, deformaciones permanentes, baches, asentamiento de losas, etc.)

“Por ello, es necesario revisarlos en forma periódica, para evitar que su condición caiga por debajo de niveles admisibles. Lo anterior confiere a la aplicación de los sistemas de gestión de pavimentos un carácter cíclico, que da lugar a lo que se conoce como ‘ciclo de gestión’, el cual se refiere a la aplicación reiterada de los componentes del sistema”. [5]

Este ciclo permite verificar de manera permanente las condiciones en las que se encuentra hasta llegar al fin de su vida útil, y a este se le conoce como Análisis de Ciclo de Vida (ACV), es una herramienta que permite ser utilizada para evaluar el impacto de un producto a lo largo de su ciclo de vida. [6]

En cualquier obra civil se puede desarrollar el ACV, donde es necesario contar con información confiable para procesar las etapas de la vida útil de la obra, las cuales consisten en información de la fabricación y traslado de los materiales utilizados, la construcción y desarrollo de la obra, su conservación y rehabilitación y llegando al final de la vida útil de la obra, ocasionada por el deterioro de la misma.

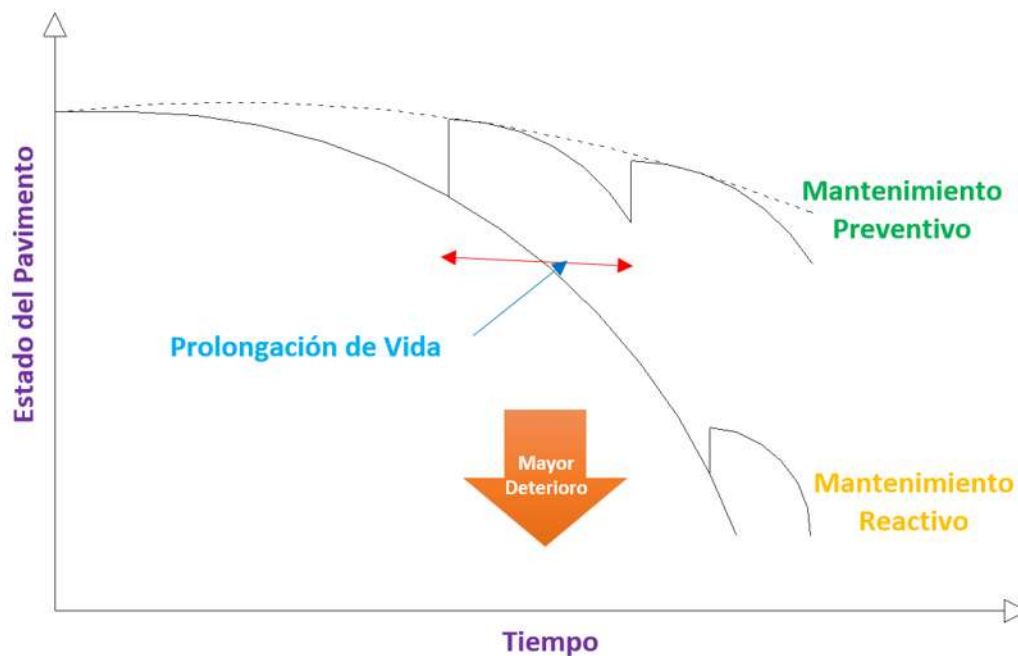


Figura 1.6 “Análisis de Ciclo de Vida de un Pavimento [5]”

Realizando el ACV se puede Graficar la vida útil de una obra civil obteniendo la gráfica final como se muestra en la Figura I.6 podemos observar que, realizando las verificaciones para conocer las condiciones de las vialidades, y realizando mantenimientos preventivos constantes, podemos prolongar la vida útil de un pavimento, a diferencia de realizar mantenimientos reactivos al encontrarse la vialidad en un estado deteriorado.

1.3.1 Fases de deterioro en pavimentos

Es necesario conocer las fases de deterioro de un pavimento, en general, como se muestra en la Figura I.7 son dos fases de deterioro claramente diferenciables:

1. La primera fase es aquella etapa del deterioro que se produce entre la puesta en funcionamiento de una vía con pavimento nuevo, inmediatamente después de su construcción, y el momento en que se lleva a cabo en ella una reparación de importancia. Para tal efecto es necesario precisar que se considera como reparación de importancia en un pavimento a aquella que genere un mejoramiento en el nivel de servicio de la vía, por lo mismo es que son reparaciones de importancia. [6]
 - Todas las actividades de restauración, tales como: fresado, reparaciones de espesor parcial o total, reemplazo de losas, restablecimiento de la transferencia de carga entre losas, etc.
 - Reencarpetado
 - Reconstrucciones
2. La segunda fase de deterioro es la etapa que va desde la aplicación de mantenimiento de manera significativa en adelante. Al llevar a cabo la rehabilitación siempre se elimina o reduce el deterioro existente, o bien, se afecta a la progresión del mismo con el paso del tiempo, por lo que el comportamiento después del mantenimiento de la estructura de pavimento es diferente al comportamiento antes del mantenimiento, por lo tanto, al realizar una rehabilitación que se considere significativa es porque el deterioro se reinicia nuevamente desde un valor igual o cercano al valor inicial de un pavimento nuevo o porque la progresión con que avanza el mismo es menor (o mayor) que antes del mantenimiento.

Para poder verificar las condiciones en las que se encuentra la infraestructura del país se requiere de una evaluación, la cual en México se realiza con 5 parámetros, los cuales son:

1. ISA
2. IRI
3. Profundidad de la Rodera
4. Nivel de Servicio
5. Resistencia a la Fricción

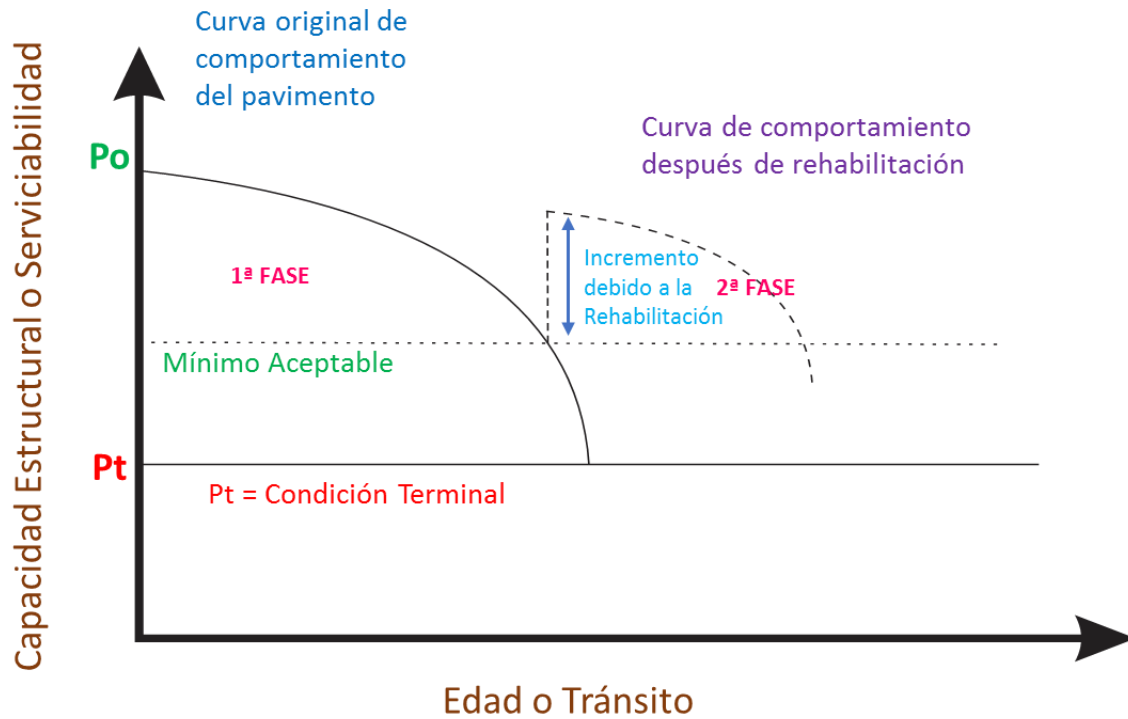


Figura I.7 "Esquema de deterioros de pavimentos 1ra y 2da fase" [7]

1.4 Textura de los pavimentos

La mayoría de los parámetros mencionados en el apartado 1.2 tienen que ver de manera directa con la textura de los pavimentos, por lo tanto, es necesario conocer su condición para la conservación de las vialidades.

Tipo de Textura	Dimensiones Horizontal (mm)	Dimensiones Verticales (mm)	Relación con	Ocasiona	Observaciones
Microtextura	0.00 - 0.50	0.00 - 0.20	<i>Irregularidades de la grava y arena, y de la superficie de rodadura en contacto con el neumático.</i>	<i>Sensación de mayor o menor rugosidad en el pavimento.</i>	<i>No apreciable a simple vista</i>
Macrotextura	0.50 - 50	0.20 - 10	<i>Tamaño de material pétreo, diseño de mezcla, puesta en obra (compactación), tratamientos superficiales.</i>		<i>Tiene longitud de onda del mismo orden de magnitud que el dibujo del neumático</i>
Megatextura	50 - 500	10 - 50			<i>Presenta longitud de onda de la misma magnitud que las causadas por el contacto de la calzada con el neumático.</i>

Tabla I-1 "Clasificación de los tipos de textura de los pavimentos [9]"

“La textura es la geometría más “fina” del perfil longitudinal de la carretera, que se define como la desviación de la superficie del firme, respecto a una superficie plana menor o igual que 0.5 metros.” [8]

La textura superficial de un pavimento se divide en microtextura, macrotextura y megatextura. Como se describe en la Tabla I-1 los tipos de textura se clasifica de acuerdo a sus características.

1.5 ISA

La serviciabilidad fue definida como la capacidad de un pavimento para servir al tránsito para el cual fue diseñado. [9] Es de gran importancia conocer la serviciabilidad que guardan las vialidades (como se menciona en el apartado 1.2 y 1.3) y comprender la relación que existe de manera directa con los deterioros, la capacidad de manera estructural, y la seguridad vial que presentan. Por lo tanto, es necesario conocer el estado que guardan las vialidades de manera superficial.

Para evaluar el estado actual de las carreteras con las que cuenta México, se utilizó durante varios años el método desarrollado por la AASHTO en la década de los 60's, que consistía en obtener el Valor Presente de la Serviciabilidad (PSR por sus siglas en inglés), que es más conocido en México como el Índice de Servicio Actual. [9]

El parámetro ISA consiste en conocer la calidad presente en las vialidades, está relacionado con el confort que percibe el usuario, teniendo esa variación ocasionada por las condiciones en las que se encuentra la capa de rodadura y los componentes de la seguridad vial, por lo tanto, se utiliza para conocer el estado físico que guardan las carreteras de manera superficial. Este se obtiene con la apreciación personal del usuario, con respecto al confort que le ofrece esta vialidad, considerando una escala numérica que va de cero a cinco, como se muestra en la Figura I.8 cero se considera una vialidad intransitable y cinco una vialidad en excelentes condiciones y se utiliza con aproximación a un decimal.



Figura I.8 “Escala de valores de ISA”

Esta evaluación se lleva a cabo con un mínimo de cuatro usuarios a bordo de un vehículo que se encuentre en buen estado funcional (suspensión en buen estado, alineación reciente, dirección estable, entre otras) para garantizar una lectura correcta y eliminar mayormente los errores que se pueden obtener, circulando a la velocidad de proyecto de la vialidad, dividiendo el camino en

secciones de 1 km y asignándole un valor a cada sección, donde posteriormente al finalizar el tramo se calcula el promedio aritmético de cada usuario (la diferencia entre los promedios de cada usuario tiene como tolerancia 0.3, si se tiene una diferencia mayor se considera el trabajo inaceptable) y se divide entre el número de usuarios que realizaron la lectura, obteniendo así el valor de ISA de la vialidad.

Como se mencionó anteriormente, este parámetro se utilizó de manera universal para conocer la serviciabilidad de una vialidad. Actualmente se cuenta con los resultados del estudio del Banco Mundial para la obtención del IRI, donde se realizó una evaluación para conocer la correlación de estos dos parámetros y se encontraron grandes diferencias entre los valores de cada uno. Por lo tanto, “El Banco Mundial recomienda que no se utilice la calificación del panel de valuadores (ISA) para la obtención o correlación del Índice Internacional de Rugosidad, debido a que ambos parámetros tienen principios contrarios; mientras que uno es sentido (ISA), el otro es medido (IRI).” [4]

1.6 Profundidad de la Rodera

La Profundidad de rodera es una deformación en el pavimento que presentan las huellas del tránsito. [10] También es conocido como ahuellamiento, es una deformación que se presenta específicamente en pavimentos asfálticos al encontrarse una depresión vertical en forma de canal producida por la huella de circulación de los vehículos y que consiste en una depresión canalizada por la huella de circulación de los vehículos. Se produce en pavimentos asfálticos sometidos a una combinación de elevados niveles de tránsito, tráfico pesado y/o lento y altas temperaturas de servicio. [11]

El ahuellamiento se puede presentar tanto en la capa asfáltica como en las capas subyacentes (ocasionado principalmente por mala compactación de las bases granulares). Como se muestra en la Tabla I-2 el bajo contenido de vacíos, material pétreo y grado asfáltico inadecuado en las mezclas asfálticas son los principales problemas que llegan a ocasionar el ahuellamiento en los pavimentos, ocasionados durante su construcción. Además, existen causas de ahuellamiento que se presentan durante la vida útil del pavimento como lo son las altas temperaturas, cargas pesadas y circulación a bajas velocidades.

En la actualidad para la medición de ahuellamiento se utilizan equipos de alto rendimiento, el primer método para medir el ahuellamiento es la regla AASHTO de 1.2 m, consta en pasar la regla de forma transversal a la vía y medir la profundidad de la deformación. Las lecturas se realizan en secciones de la vialidad de 20m por carril, donde se considera el valor máximo

de profundidad de ahuellamiento como 10 mm por sección, para considerar una vialidad en estado aceptable.

Problema	Causas
Bajo contenido de vacíos	I. Excesiva compactación de la mezcla en terreno II. Compactación en laboratorio poco representativa III. Variaciones de la mezcla en terreno
Material pétreo inadecuado	a) Granulometría muy densa b) Forma y textura
Tipo asfáltico inadecuado	Mala selección del tipo de asfalto

Tabla I-2 "Principales problemas de Ahuellamiento [11]"

1.7 Nivel de Servicio

El Nivel de Servicio se describe como una medida cualitativa que define condiciones operacionales dentro de la circulación vial, o su percepción por el conductor o usuario. En estas condiciones se define generalmente por medidas tales como velocidad y tiempo de recorrido, libertad de maniobra, interrupción del tránsito, confort y seguridad. [12]

Los factores que afectan el nivel de servicio se clasifican en internos y externos. Los internos son las variaciones en la velocidad, en el volumen, en la composición del tránsito, en el porcentaje de movimientos de entrecruzamientos o direccionales, etc. Los externos son características físicas, la anchura de carriles, la distancia libre lateral, la anchura de acotamientos, las pendientes, etc.

Existen seis Niveles de Servicio establecidos por el Manual de Capacidad Vial HCM 2000 del TRB, las cuales son: A, B, C, D, E Y F, siendo A el mejor y F el peor.

- ✚ Nivel de Servicio A. Circulación a flujo libre, alta libertad de selección de velocidad, alta libertad de maniobrar.
- ✚ Nivel de Servicio B. Circulación a flujo libre, alta libertad de selección de velocidad, libertad de maniobrar existente.
- ✚ Nivel de Servicio C. Circulación a flujo estable, libertad de selección de velocidad medio, libertad de maniobrar restringida.
- ✚ Nivel de Servicio D. Circulación a flujo denso, libertad de selección de velocidad restringida, libertad de maniobrar restringida.
- ✚ Nivel de Servicio E. Circulación cerca o en el límite de capacidad, velocidad en niveles bajos, libertad de maniobrar casi inexistente.

- ✚ Nivel de Servicio F. Circulación a flujo forzado, velocidades cercanas a 0, gran existencia de colas de vehículos.

1.8 Fricción o Resistencia al deslizamiento

Los niveles de adherencia de los pavimentos con el tiempo se ven afectados, esto producido a la deformación que sufre la vialidad con el pulimiento de su superficie ocasionado por las rodadas de los vehículos, por este motivo se requiere realizar una auscultación de su condición verificando el coeficiente de fricción que esta vialidad mantiene.

Esta característica del pavimento también es un valor crítico en la seguridad, cuando el pavimento está mojado. Su medida y estudio es fundamental en carreteras de alta velocidad o elevada intensidad de tráfico (carreteras de altas especificaciones). La fricción se determina de forma indirecta, midiendo el coeficiente de rozamiento entre el pavimento artificialmente mojado y una rueda de goma ‘estandarizada’. [8]

El coeficiente de rozamiento (o fricción) es el parámetro que se emplea para determinar el nivel de adherencia entre el neumático y el pavimento. Este coeficiente se ve afectado por el estado superficial de la vialidad y por unos factores no dependientes de las condiciones de esta, como el caso de condiciones meteorológicas (lluvia, nieve, algún lubricante, entre otros) y de condiciones en las que influye el usuario (estado de los neumáticos del vehículo y la velocidad), el valor de este coeficiente se encuentra en función de la velocidad y de la cantidad de agua sobre la carretera, que son parámetros directamente dependientes del tipo y estado de la vialidad. [8]

Existen diferentes tipos de equipos de medición de fricción de las vialidades que permiten obtener sus coeficientes de fricción, como es el caso de:

- ✚ El método de círculo de Arena (“Norma española NLT-335/92”)
- ✚ El Péndulo de Fricción (“ASTM E-303/83” o “NLT-175/92”)
- ✚ Perfilómetro Láser (se determina el CF por medio de láser que miden a escala de macrotextura)
- ✚ El Sideway Coefficient Routine Inventory Machine (“NLT-336/92”).
- ✚ El Mu – Meter (“ASTM E-274/90”)

En México con el objeto de que la superficie de rodamiento presente condiciones seguras para los usuarios, tanto en situación seca como en presencia de una película de agua, el valor de la característica de la resistencia de fricción, se mide con equipo mu-meter a 75 km/h, en condiciones de presencia de película de agua, tanto para pavimentos flexibles

como rígidos, y no deberá ser inferior a 0.6. En caso de que el valor sea inferior a 0.6, se requiere proceder a la corrección de la superficie. La evaluación de la resistencia a la fricción se realiza de forma anual. [9]

1.9 Índice Internacional de Rugosidad

Como se mencionó el apartado 1.2 para mantener un bajo costo de operación en las vialidades, en específico en el que recae en el usuario, es necesario mantener una vialidad en condiciones óptimas, y esto se ve afectado de manera directa en las condiciones en las que se encuentre la capa superior de la estructura (capa de rodadura). Así como los parámetros mencionados en los apartados 1.5, 1.6, 1.7 y 1.8 el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de la misma manera se encuentra en función de las condiciones de esta capa superior, en específico de la sensación de confort del usuario al transitar por una vialidad.

Los usuarios de una carretera juzgan su calidad principalmente por la comodidad que tienen al transitar por ella. Desde el punto de vista de un usuario, caminos en mal estado significan incomodidad, reducción de la velocidad, daño potencial del vehículo y un mayor costo de operación. [1]

1.9.1 ¿Qué es el IRI?

El Índice Internacional de Rugosidad o Índice de Rugosidad Internacional mejor conocido como IRI (*International Roughness Index*) es el parámetro utilizado para medir la regularidad y rugosidad de la planicie con que cuenta un pavimento en la capa de rodadura de forma longitudinal, para conocer la sensibilidad a la que el usuario percibe dichas irregularidades.

En el Artículo Número 45 del Banco Mundial “*The International Road Roughness Experiment*” [13] la rugosidad se define como la variación en las elevaciones de la superficie que produce vibraciones en los vehículos que circulan una vialidad. Además, menciona que la rugosidad de la vialidad tiene una influencia directa sobre el desgaste del vehículo, el confort en marcha y la seguridad.

Este valor de IRI se obtiene utilizando equipos de medición, que han sido empleados desde los primeros años del siglo pasado, teniendo como primer método la instalación y adaptación de dispositivos en vehículos que permitieron tomar lecturas del estado superficial de las vialidades, estos fueron llamados rugosímetros, entre los cuales destacan los *Response Type Road Roughness Measuring System* (RTRRMS). [1] En México el equipo

que más tiempo se utilizó para la medición del IRI de las carreteras fue el modelo *Mays Ride Meter* utilizado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en la actualidad la Secretaría contrata empresas de iniciativa privada para la medición de este índice, donde la variedad de dispositivos radica en la variedad de empresas que se dedican a ejecutar este servicio. Aún con esto se sigue utilizando el *Mays Ride Meter* que se encuentra bajo cuidado y uso de la unidad regional de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en la Ciudad de Morelia para comparar valores de IRI en los cuales se requiere rectificar en esta región del País.

La lectura que se obtiene de las vialidades por medio de los equipos mencionados anteriormente, la medición de un equipo tipo respuesta consta en obtener el desplazamiento acumulado que se tiene verticalmente de la masa superior del equipo con respecto a la masa fija que se considera el eje del mismo, y de acuerdo a la distancia longitudinal a la que se realiza la lectura para una velocidad de desplazamiento a la que el equipo de medición se encuentra diseñado, es decir, el desplazamiento vertical acumulado en relación con el desplazamiento longitudinal a la velocidad de medición del equipo en la vialidad en que se toma la lectura, dando lugar a unidades de mm/m o m/km en sistema métrico así como in/mi en el sistema inglés. Como se muestra en la Figura I.9 la masa 1 es la masa que se considera, carrocería es la estructura del vehículo, y la masa 2 es la masa fija a la vialidad es decir la que está en contacto directo con esta, para un sistema tipo respuesta siguiendo el principio del sistema cuarto de carro.

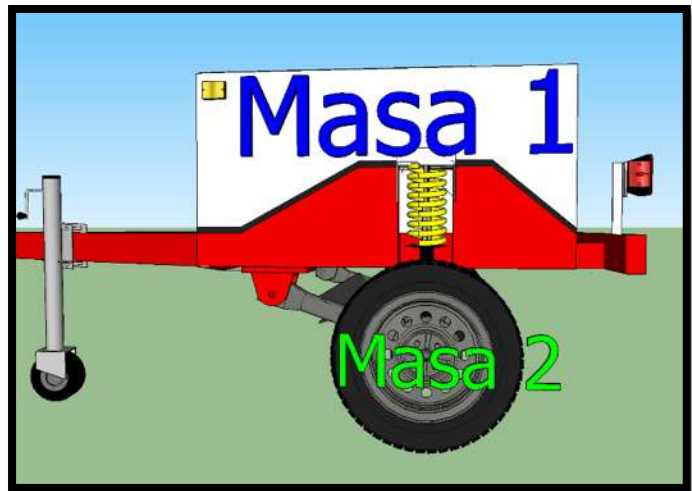


Figura I.9 "Masas que se consideran para la obtención del IRI"

1.9.2 Importancia de la obtención del IRI

La importancia de obtener el valor de IRI que guarda una vialidad radica en conocer como es su comportamiento con el paso del tiempo, esto es conocer el valor de IRI al inicio de la vida útil de las vialidades y compararla de manera directa con el valor que se va obteniendo con el paso del tiempo, esto para actuar de manera adecuada para darle el mantenimiento necesario y adecuado para mantener su serviciabilidad en buen nivel para el usuario y prolongar su vida útil.

1.10 Investigación del Banco Mundial de IRI

Como se mencionó anteriormente en el apartado 1.3 para conocer las condiciones en las que se encuentra una vialidad se requiere de una serie de estudios o procesos con los cuales se puede obtener un dictamen para dictaminar en que condición se encuentra una vialidad, pero se debe de tener una referencia para poder indicar en qué condiciones se encuentra, esto viene a ser desde una escala para establecer en que parte de la esta se encuentra, así como de una unidad de medida y una universalidad para poder comparar los resultados contra otros y poder ser correlacionables.

Para esto en la década de los 70 el banco mundial financió una serie de pruebas donde su finalidad era conocer la calidad de las vías, así como sus costos de operación para los usuarios, durante el desarrollo de las mismas se logró observar que existía una gran variación entre las regularidades de las vías aun perteneciendo a un mismo país, dando esto lugar a resultados pocos confiables, a causa de que las mediciones se realizaban utilizando equipos y aplicando una metodología que no eran estables en el tiempo. [14]

Contando con el principal problema de no poder comparar los resultados obtenidos en las mediciones de una vialidad con otra por la variación de las regularidades, el Banco Mundial se dio a la tarea de unificar los parámetros utilizados en esa época en los diferentes países para así determinar un solo parámetro que permitiera hacer correlacionable las mediciones a nivel mundial independientemente el tipo de equipo a utilizar durante la medición, siendo Brasil en el año 1982 donde se realizó el proyecto *International Road Roughness Experiment (IRRE)*, teniendo participación de equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica. Donde se llevó a cabo la medición controlada de la regularidad superficial de pavimentos para vías que se encontraban bajo diferentes condiciones y utilizando una variedad de instrumentos y métodos. A partir de este proyecto se seleccionó un parámetro de medición de la regularidad superficial denominado *International Roughness Index (IRI)*. [14]

Después de realizar las diferentes pruebas se llegó a la unificación del método para la obtención del valor de IRI, el cual se basa en un modelo matemático llamado Cuarto de Carro (*Quater-Car*), como su nombre lo dice consiste en enfocarse en un cuarto del vehículo con lo que se cuenta con su respectivo sistema de suspensión, carrocería y neumático. En otras palabras, el cuarto de carro cuenta con una masa fija y sistema de resorte en contacto directo a la vialidad que corresponde a la rueda neumática y al eje, contando verticalmente con un sistema amortiguador-resorte que una la masa fija con la masa en suspensión, como se muestra en la Figura I.9 se encuentra articulado el eje a la masa en suspensión y a su vez

al sistema amortiguador-resorte permitiendo que el desplazamiento que se tenga entre las dos masas sea lineal.

El sistema anterior permitió de manera directa unificar el método ya que los equipos de medición pudieron ser tanto colocados sobre un vehículo que contara con sistema amortiguador-resorte o con un remolque que cumpliera con el mismo sistema de suspensión, el siguiente paso fue hacer correlacionable cualquier sistema o equipo que se utilizara, ya que cada vehículo cuenta con su propio sistema de suspensión y este difícilmente es igual a otro modelo, contando con un coeficiente de resorte y de amortiguación diferente, además cada neumático de acuerdo al modelo, dimensión e inflado que tenga este dará diferente tipo de respuesta de resorte, por lo tanto fue necesario realizar mediciones con el equipo llamado *Golden Car*, como se muestra en la Figura I.10 y Figura I.11 se consideraron sus componentes principales del cuarto de carro como lo son las constantes de amortiguación, así como los dos de resorte y el valor de sus dos masas, donde posteriormente se realizó la lectura de los tramos de calibración para así obtener valores de IRI unificados.

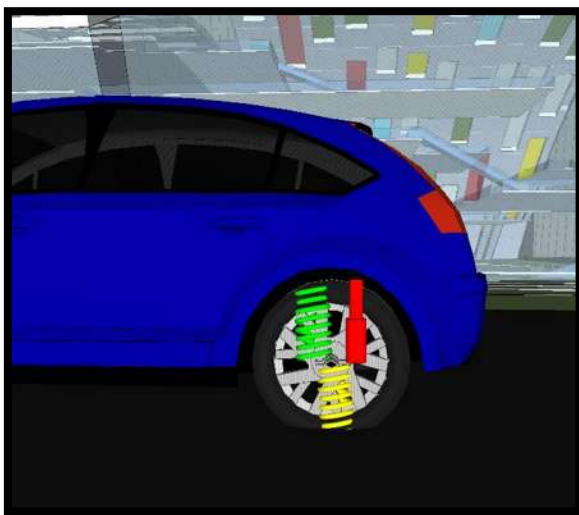


Figura I.10 "Sistema de suspensión de vehículo"

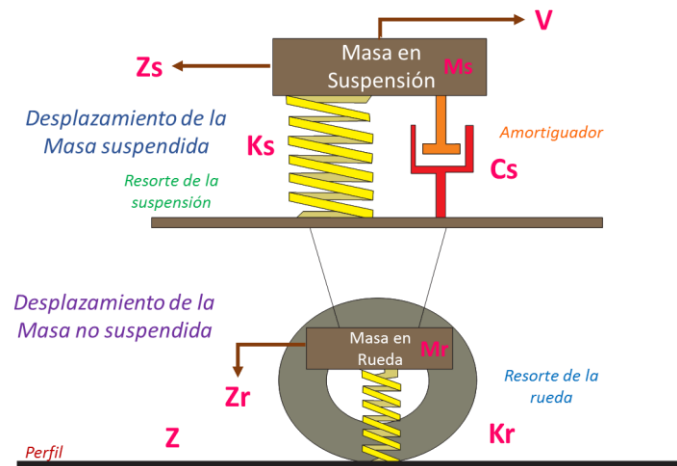


Figura I.11 "Componentes y constantes del Cuarto de Carro"

En el cálculo matemático del IRI cuenta con ecuaciones dinámicas presentes en el modelo cuarto de carro, formando un sistema de ecuaciones que utilizan como dato de entrada el perfil longitudinal de la vialidad, el desplazamiento vertical acumulado donde se obtiene como resultado de medida final el valor de IRI en sus respectivas unidades.

En la Figura I.11 se pueden apreciar las componentes del cuarto de carro, donde:

- K_s Constante del resorte de la suspensión
- K_r Constante del resorte de la rueda
- M_s Masa suspendida

Mr	Masa no suspendida
Cs	Amortiguador
Zs	Velocidad vertical de la masa del vehículo
Zr	Velocidad vertical de la masa del eje

Obteniendo la ecuación:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{X/V} |Z_s - Z_r| dt$$

Donde:

IRI	Índice de Rugosidad Internacional en mm/m
X	distancia longitudinal en m
V	Velocidad del Golden Car (80 km/h)
X/V	Tiempo que tarda el modelo en recorrer cierta distancia X
dt	Incremento de tiempo

En la medición de IRI existen factores que influyen durante su proceso, como lo son las longitudes de onda que se encuentran entre 1.25 hasta 30 metros, partiendo de la simulación del cuarto de Carro. El Comité Técnico de Características Superficiales de la PIARC (Asociación Mundial de Carreteras) propuso una clasificación de las características geométricas superficiales, con base en las longitudes de onda y las amplitudes de las irregularidades, se muestra en la Tabla I-3. [15]

Tipo de Textura y de regularidad		Rango de Medida	
		Long. de onda (horizontal)	Amplitud (Vertical)
Microtextura		0 - 0.5 mm	0 - 0.2 mm
Macrotextura		0.5 - 50 mm	0.2 - 10 mm
Megatextura		50 - 500 mm	1 - 50 mm
Regularidad Superficial	Ondas Cortas	0.5 - 5 m	1 - 20 mm
	Ondas Medias	5 - 15 m	5 - 50 mm
	Ondas Largas	15 - 50 m	10 - 200 mm
Trazado		50 m	10 - 5000 mm

Tabla I-3 "Tipos de Textura y Regularidad Superficial"

La aportación en la medición de IRI de las irregularidades de microtextura, macrotextura y megatextura es mínima, pero no despreciable del todo, mientras que la zona con longitudes de onda mayores a 30 metros correspondientes a onda larga que bien pueden ser propias de la geometría de la vialidad, como las curvas verticales y demás aspectos propios de la

topografía de la vía, que tampoco reflejan cambios en los valores de IRI de acuerdo a la simulación del cuarto de carro. [15]

Las irregularidades que mayor incidencia tienen en el IRI son aquellas de longitud de onda corta y media y algunas de onda larga, comprendidas entre 1.25 m y 30 m, y estas pueden corresponder a juntas, bacheos y bacheos irregulares, depresiones, fallas, hundimientos, ondulaciones, curvas verticales, entre otras. [15]

Para llegar a encontrar una escala de valores de IRI se requirió buscar tramos de calibración los cuales fueran desde las condiciones óptimas hasta las pésimas condiciones, esto evaluando las regularidades existentes en su perfil longitudinal. Propiciando con esto encontrar la escala del IRI donde las unidades están en mm/m, m/km, etc. El rango de la escala del IRI para un camino pavimentado es de 0 a 12 m/km (0 a 760 in/mi), donde 0 es una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable. En la Figura I.12 se muestran las características de los pavimentos y su escala de IRI de acuerdo a la investigación del Banco Mundial. Para una superficie con pendiente constante sin deformaciones (plano inclinado perfecto), el IRI es igual a cero. Por lo que la pendiente, como tal no influye en el valor de IRI, no así los cambios de pendiente. [4]

Al contar con un método unificado de medición se requería hacer correlacionable los datos obtenidos durante la investigación del banco mundial, como se mencionó anteriormente se utilizó el *Golden Car* para realizar dichas mediciones. Para poder hacer correlacionable con cualquier otro equipo se realizó una medición del perfil longitudinal de los tramos de calibración por medio de perfilógrafos, nivel topográfico, etc. Donde la metodología para correlacionar los tramos de calibración consistió en pasar el *Golden Car* por los tramos de calibración a diferentes velocidades en las cuales estaba a 20, 32, 50 y 80 km/h y al finalizar la investigación se encontró que la velocidad idónea para hacer las mediciones del tramo es 80 km/h pues a esta velocidad se obtiene mejor lectura de las regularidades de las vialidades. Teniendo esto como punto de partida y por medio del cálculo matemático se obtuvieron unas matrices de correlación entre los valores obtenidos por el carro de oro y los valores obtenidos por las lecturas del perfil longitudinal, estos obtenidos por un algoritmo realizado durante la investigación, esto permite en cualquier parte del mundo introducir los valores obtenidos por tramos donde se pretenda calibrar los equipos de medición y obtener un valor de IRI, y posteriormente pasar el equipo de medición y de acuerdo a la respuesta obtenida hacer una calibración con el IRI calculado por el algoritmo del Banco Mundial. En otras palabras, se realiza la correlación de los equipos realizando una simulación de medición del *Golden Car*.

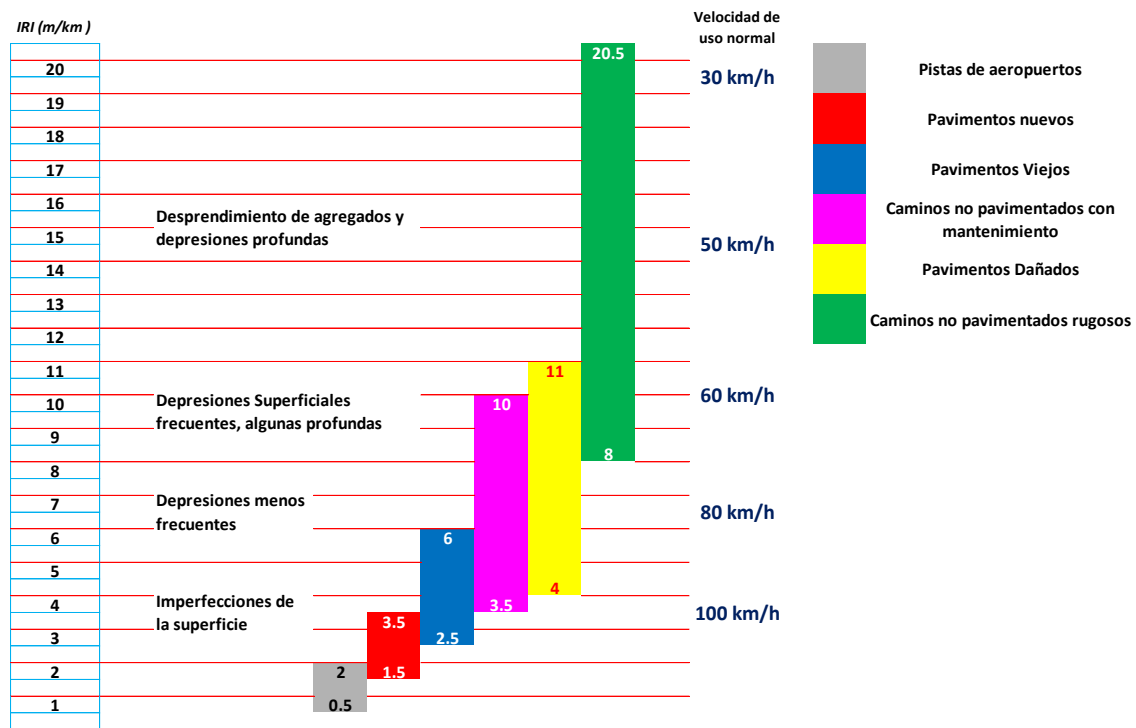


Figura I.12 "Escala de valores de IRI y características de los pavimentos"

1.10.1 Cálculo de IRI

Como se mencionó anteriormente una parte importante de la investigación del Banco Mundial fue la obtención del IRI, el cual se basa en la obtención del perfil longitudinal del tramo los cuales constaban de levantamiento a cada 50, 100, 250 y 500mm. Donde después de la obtención de resultados de medición de IRI se encontró que la mejor velocidad para calibrar era 80 km/h, además se encontró que la distancia recomendada para el levantamiento de elevaciones del perfil longitudinal es 250 mm (ASTM E 950-98), en cada variación de velocidad se obtiene una respuesta diferente del equipo por ello se calibra con la simulación del cuarto de carro a 80 km/h. En una distancia entre cada lectura mayor a 250 mm se ocultan niveles más altos de regularidad superficial, esto es ocasionado por el vacío de información que se forma entre cada lectura donde puede existir una variación considerable de desplazamiento y no es obtenida durante el levantamiento del perfil longitudinal y de manera contraria menor a 250 mm resulta menos practico al obtener una cantidad considerable de información y durante el levantamiento no resulta practico realizarlo.

La obtención del IRI con elevaciones consiste en realizar un levantamiento con nivel topográfico, perfilógrafo tipo california o con dipstick del perfil longitudinal de la vialidad en estudio que se considerara tramo de calibración, a una distancia recomendada de 25 cm.

Para el levantamiento se planea realizar la calibración en vialidades abiertas al tráfico se recomienda definir tramos de estas vías en los cuales se cumplan condiciones desde las mejores hasta malas condiciones (se recomienda como mínimo 2 buenos, 2 regulares y 2 malos), posteriormente se debe considerar que sean vialidades que sean de bajo tráfico o en los cuales no se afecte al cerrar el carril que se tomará como tramo para calibración, siempre cuidando la seguridad del personal y de los usuarios de la vía, además de esta condición deben de ser tramos de los cuales mínimo 350 metros sea recto y permitan mantener una velocidad constante durante todo el recorrido del tramo, puesto que se eliminan posibles errores de lectura en el equipo y garantizar una mejor lectura del tramo, una condición muy importante es que el tramo cuente con una regularidad de proyecto, es decir, no se tengan cambios de pendientes en diseño de la vialidad, puesto que puede arrojar un error en los resultados de la calibración, se debe considerar que no se tenga cambio de tipo de pavimento, topes, reductores de velocidad, alcantarillas, etc.

Una vez definidos los tramos de calibración se recomienda trazar una línea de inicio y una línea de final del tramo, así como una referencia cada 100m, partiendo del inicio del tramo se recomienda dar alineación cada 100 metros por donde se pretenda pasar la cada llanta del equipo y realizar marcas en los pavimentos a cada 25 cm de preferencia un pequeño punto y una línea a cada metro, para durante el levantamiento rectificar en qué punto se realizó el levantamiento, y marcar a cada 20 metros el cadenamiento en el que se encuentra.

Ya definido el trazo del tramo, se inicia con el levantamiento del perfil longitudinal, si éste se realiza con nivel topográfico se debe tomar en cuenta las condiciones en las que se realizará el levantamiento sean las óptimas, y haciendo puntos de liga tanto como sea necesario para realizar una buena lectura, se recomienda realizar uno cada 100 metros colocando el nivel a una distancia media entre cada referencia para punto de liga. Una vez concluido el levantamiento longitudinal por ambos lineamientos y verificando que dicho levantamiento se realizó de manera correcta, se continúa a procesar la información dentro del algoritmo de calibración del Banco Mundial.

1.10.2 Algoritmo de Calibración del Banco Mundial

El *Algoritmo de Calibración* creado por el Banco Mundial establece ya unos coeficientes de calibración, los cuales se utilizan de acuerdo a la distancia a la que se realizó la medición del

perfil longitudinal y la velocidad a la que se quiere conocer el valor de IRI, es decir es una simulación de la respuesta que el *Golden Car* arrojaría si pasara por el tramo de calibración. Estos coeficientes se pueden obtener calculándolos por medio de un algoritmo previo donde las se introducen las características del Equipo Golden Car o tomarlas del Documento número 45 del Banco Mundial *The International Road Roughness Experiment*.

El *Algoritmo de Calibración* se realiza por medio de una ecuación matricial en la cual se utilizan 5 variables que están en función de los valores obtenidos del levantamiento longitudinal. Las cinco variables dentro de la ecuación se obtienen inicialmente de la siguiente manera:

$$Z'_{11} = Z'_{31} = \frac{(Y_a - Y_i)}{11} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$Z'_{21} = Z'_{41} = 0 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$Y_p = \frac{(Y_i - Y_{i-1})}{D_x} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$a = \left(\frac{11}{D_x}\right) + 1 \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

$Z'_{11}, Z'_{21}, Z'_{31}, Z'_{41}$ y Y_p	Son las cinco variables que se utilizan en la ecuación matricial
a	Es el punto en el que se encuentra la elevación a los 11 metros
Y_a	Representa la elevación del perfil a los 11 metros
Y_i	Es la elevación del primer punto
D_x	Es la distancia entre cada lectura

Los valores obtenidos anteriormente son los valores iniciales de dichas variables, donde el Y_p se calcula a partir del primer proceso hasta n (la elevación final del tramo; n = número de elevaciones medidas), posteriormente los valores de las Z se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$Z_1 = (ST_{11} * Z'_{11}) + (ST_{12} * Z'_{21}) + (ST_{13} * Z'_{31}) + (ST_{14} * Z'_{41}) + (PR_1 * Y_p) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$Z_2 = (ST_{21} * Z'_{11}) + (ST_{22} * Z'_{21}) + (ST_{23} * Z'_{31}) + (ST_{24} * Z'_{41}) + (PR_2 * Y_p) \quad \text{Ecuación 6}$$

$$Z_3 = (ST_{31} * Z'_{11}) + (ST_{32} * Z'_{21}) + (ST_{33} * Z'_{31}) + (ST_{34} * Z'_{41}) + (PR_3 * Y_p) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$Z_4 = (ST_{41} * Z'_{11}) + (ST_{42} * Z'_{21}) + (ST_{43} * Z'_{31}) + (ST_{44} * Z'_{41}) + (PR_4 * Y_p) \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

$Z'_j = Z_j$ para $j = 1, 2, 3, 4$, son el valor anterior de la variable; es decir el Z_1 es el nuevo valor de Z'_1 y los valores del nuevo Z_1 se utilizan hasta que se llega a la solución de las 4 ecuaciones anteriores.

ST_{ij} y PR_j son los Coeficientes de la matriz obtenida por el Banco Mundial, y están en función de la distancia de lectura del perfil longitudinal y la velocidad de la simulación.

Como se mencionó anteriormente los valores iniciales se obtienen de las ecuaciones 1, 2 y 4, siendo estos los valores de entrada y obteniendo un primer proceso resolviendo la ecuación 3, 5, 6, 7 y 8, además de la obtención de la pendiente rectificada (RS) de un perfil filtrado que se calcula como:

$$RS_k = |Z_1 - Z_3| \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde los valores de Z_1 y Z_3 son los de cada proceso es decir que se obtiene un valor de RS para cada proceso, teniendo los valores de RS el IRI se calcula como:

$$IRI = \frac{1}{n-1} \sum_2^n RS_k$$

Ecuación 10

Como resultado final se obtiene el Índice de Rugosidad Internacional del tramo en estudio.

Cabe recordar que este valor de IRI obtenido es el valor que obtendría el *Golder Car* en dicho tramo, esto es parte de la correlacionabilidad. Por este motivo se debe utilizar una velocidad en específico ya que varían los coeficientes de la matriz de acuerdo a la velocidad de simulación, tomando en cuenta que la velocidad recomendada por el Banco Mundial es de 80 km/h se debe utilizar de la misma manera esta velocidad para hacerlo correlacionable y así obtener un valor de IRI de mayor confiabilidad. En la Figura I.13 “Diagrama de Flujo de Algoritmo de Calibración del Banco Mundial” se muestra el diagrama de Flujo del algoritmo antes mencionado. El algoritmo se puede encontrar en el Documento número 45 del Banco Mundial *The International Road Roughness Experiment*.

1.11 IRI en la red de vialidades de México

Como se mencionó en el apartado 1.3 el comportamiento de la condición superficial de la vialidad se encuentra en función del tiempo entre otros factores que impactan en su estado de servicio, por tal motivo, cuando una vialidad es abierta al tráfico, inicia con un valor de IRI determinado y este se irá deteriorando con el paso del tiempo mientras que no se le dé un mantenimiento preventivo su valor de IRI irá incrementando hasta llegar a un estado que no permita el tránsito por la vialidad.

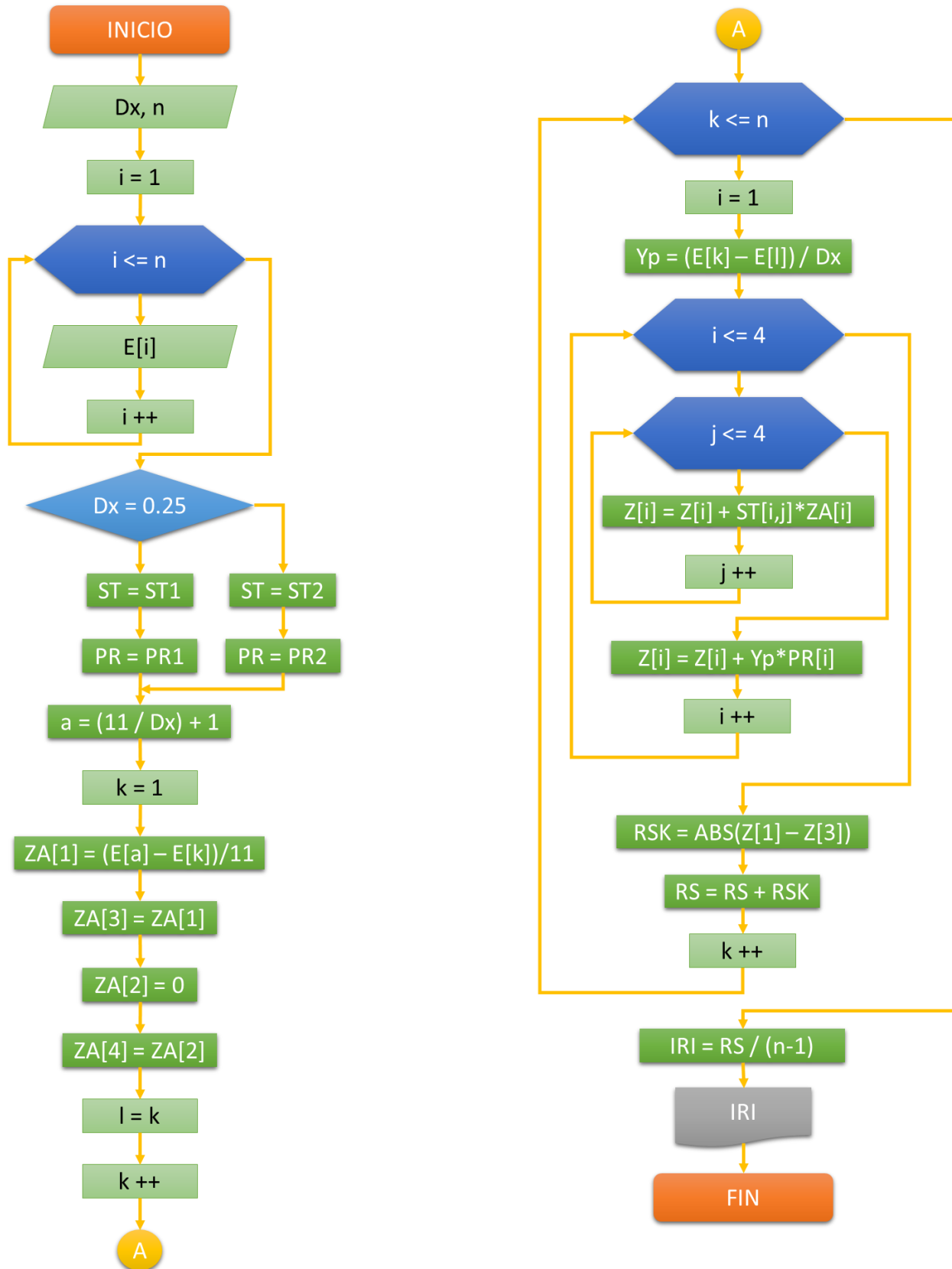


Figura I.13 "Diagrama de Flujo de Algoritmo de Calibración del Banco Mundial"

Como se muestra en la Figura I.6 esta disminución de serviciabilidad o incremento del valor de IRI de la capa superficial de la vialidad no es lineal, puesto que el deterioro irá incrementando de una manera no lineal, teniendo un incremento de deterioros de la vialidad cada vez mayor que el anterior. Por lo tanto, es necesario conocer las condiciones en las que se encuentra la red de vialidades para poder actuar en el momento necesario para mantenimiento a la misma.

En los Estados Unidos de América, la agencia FHWA (Federal Highway Administration) ha reportado que los rangos típicos de IRI evaluados en diferentes tramos carreteros están entre 0.8 a 4.7 m/km. Los tramos de pavimentos con valores menores de 2.4 m/km son considerados como pavimentos en buen estado y confiables, mientras que los valores de 4.7 m/km o más, son considerados como rugosos y no confortables. [4]

En España, la Orden Circular 308/89C y E de 1989, fijaron el valor de 2m/km como límite para recibir una carretera. Más tarde se modificó para admitir el IRI de 2.5 m/km en todo el tramo, siempre que en el 80% del tramo se alcance como máximo IRI de 2, y debiendo comenzar además el IRI de 1.5 en la mitad del tramo. Actualmente se fija un valor de 1.85 de IRI para recibir nuevas carreteras. Para carreteras en servicio con la Intensidad Media Diaria (IMD) mayor de 2,000 vehículos fijan un porcentaje de la longitud de calzada con un valor mínima de 3.5 m/km. y para valores de IMD < 2,000 vehículos el IRI mínima de 4.5 m/km. [4]

En Chile, se considera un valor del IRI entre 0 y 3 m/km. como un camino bueno, entre 3 y 4 como uno regular y para un IRI mayor que 4 m/km. como un camino malo. Mientras que en Honduras su clasificación es la siguiente: para IRI < 3.5 m/km. se considera el camino como bueno, entre 3.5 y 6 como regular y finalmente cuando el IRI es mayor que 6m/km. indica que el camino es malo. [4]

En Uruguay hacen una diferencia de valores de IRI para pavimentos asfálticos y de concreto hidráulico que se presenta en la Tabla I-4.

Condición del camino	Pavimento asfáltico IRI (m//km)	Pavimento hidráulico IRI (m/km)
Muy bueno	< 3.2	< 2.8
Bueno	3.2 – 3.9	2.8 – 3.5
Regular	4.0 – 4.6	3.6 – 4.3
Malo	> 4.6	> 4.3

Tabla I-4 "Valores de IRI en Uruguay" [4]

En México la SCT es la dependencia que cuenta con los valores actuales de IRI. Existe un programa para realizar constantemente la auscultación de las vialidades para conocer el estado actual de las redes de todo el País. Esta información no se encuentra disponible en la red y no se cuenta con una norma que rijas el rango de valores en que se encuentran las carreteras es decir bueno, regulares o malos según la escala del IRI.

Gracias a información proporcionada por la SCT del estado de Michoacán, la red de carreteras libres se encuentra evaluada en su 100 % en agosto de 2016 obteniendo los datos que se muestran en la Tabla I-5. Y la clasificación de las condiciones superficiales de la vialidad según su valor de IRI que se utiliza en este estado es la mostrada en la Figura I.14

CAMINOS TIPO	IRI PROMEDIO	LONG. EVALUADA KM	LONG TOTAL EVALUADA
A	1.36	79.36	2334.72
B	1.16	707.53	
C	2.32	1547.83	

Tabla I-5 "Datos de Auscultación proporcionados por SCT en agosto 2016"

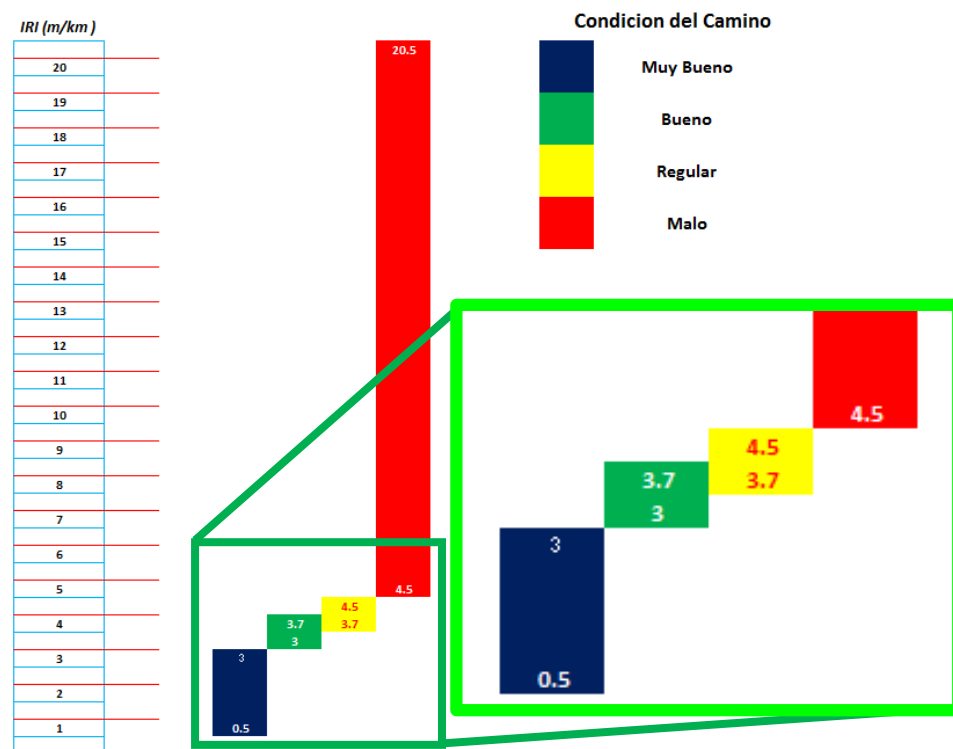


Figura I.14 "Clasificación de la Superficie de las vialidades en el estado de Michoacán según su valor de IRI"

1.12 Equipos de Medición de IRI

Existe una gran variedad de equipos para la medición del perfil longitudinal del camino y con ello determinar la regularidad superficial, los cuales han venido evolucionando con el paso del tiempo, y dentro de esa gran variedad existen equipos con mayor precisión que otros en las lecturas, así como del tiempo empleado para la obtención de resultados volviéndose unos más eficientes que otros. Los equipos se pueden clasificar en cinco categorías las cuales son:

- A. Perfiladores de Inercia de Alta Velocidad o perfilómetros
- B. Perfilógrafos
- C. Perfiladores de peso ligero
- D. Sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta (RTRRMS)
- E. Dispositivos manuales

1.12.1 Perfiladores de Inercia de Alta Velocidad o perfilómetros

Estos dispositivos recogen información sobre el estado del pavimento a altas velocidades y registran datos suficientes para monitorear el perfil del pavimento. Los principales componentes de un perfilador de alta velocidad son sensores láser de altura, acelerómetros y un sistema de medición de distancia precisa. Los sensores se encargan de registrar la altura que hay entre la superficie del pavimento y el vehículo. Los acelerómetros, se ubican en la parte superior de los sensores de altura y se encargan de registrar la aceleración vertical del sensor. El perfil longitudinal se deriva entonces de estas dos mediciones de altura. El sistema de medición de distancia ata las mediciones a un punto de partida de referencia. Los sensores de altura sin contacto se utilizan actualmente en los perfiladores ya sea láser o de ondas ultrasónicas. [1]



Figura I.15 "Perfilómetro de alta velocidad"
Imagen obtenida de <http://www.geocisa.com>

Como se observa en la Figura I.15 estos dispositivos se pueden encontrar en un vehículo adaptado para la colocación de estos, donde existe gran variación de vehículos y gran variación de que modelo o cantidad de sensores láser se colocaran en este. Los cuales dentro del mercado estos equipos los venden ya adecuados para su óptimo funcionamiento.

1.12.2 Perfilógrafos

Estos equipos cuentan con una rueda sensible montada al centro del marco para mantener el movimiento vertical libre. La desviación de un plano de referencia, establecido por el marco del perfilógrafo, se registra (automáticamente en algunos modelos) en papel según el movimiento de la rueda sensible. Se pueden encontrar en una gran variedad de formas, configuraciones y marcas. [14]

Comparando los perfiladores de alta velocidad con los perfilógrafos se tiene como una de sus principales diferencias el plano de referencia que utiliza cada uno. Los perfilógrafos son utilizados para evaluar la uniformidad de la construcción de los pavimentos nuevos mientras que el perfilador de alta velocidad se utiliza comúnmente para evaluar las condiciones de las redes viales. En la Figura I.16 se muestra el perfilógrafo tipo California, que es el modelo de los más utilizados y sigue usándose en la actualidad en México.



Figura I.16 "Perfilógrafo tipo California"
Imagen obtenida de <http://constructoracien.com>

1.12.3 Perfiladores de peso ligero

Estos dispositivos son utilizados para evaluar nuevas construcciones de estructuras carreteras. Perfiladores de peso ligero hace referencia a los perfiladores de alta velocidad, pero a diferencia que el sistema es colocado en vehículos ligeros como pequeños vehículos todo terreno, carros de golf entre otros y gracias a esto el sistema es muy similar al de los Perfiladores de alta velocidad, ya que el funcionamiento y la obtención de resultados es muy parecido. Se utiliza de mayor manera para obtener el **Índice de Perfil (IP)** e identificar y ubicar las irregularidades para su próximo mantenimiento.



Figura I.17 "Perfilador de peso ligero"
Imagen obtenida de <http://nnimgt-a.akamaihd.net>

En la Figura I.17 se muestra el sistema de perfilador adaptado para colocarse en un vehículo ligero todo terreno adecuado para el buen funcionamiento del sistema de obtención de datos.

1.12.4 Sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta (RTRRMS)

Los equipos RTRRMS operan a la velocidad normal de circulación de una carretera. Miden los movimientos verticales del eje trasero del automóvil o el eje del remolque respecto a la masa del vehículo en suspensión. De esta manera el equipo mide la respuesta (rebote) del vehículo a la regularidad del camino, por lo que no es realmente una medida verdadera de la lisura de la superficie o Índice de Perfil. [14] Estos equipos pueden ser cualquier automóvil o un remolque de un solo eje.

Estos equipos llamados RTRRMS están formados por tres partes fundamentales: dispositivo sobre el cual se colocarán los otros componentes el cual puede ser un vehículo o remolque con el que se realizarán las mediciones, un conjunto de sensores que miden el desplazamiento verticalmente que sufre la masa del equipo en suspensión con respecto al eje de este y la velocidad de circulación del equipo por la vialidad y por ultimo un dispositivo que permita visualizar y almacenar las señales registradas por los sensores.

Al pasar el equipo por la vialidad en estudio, este proporciona información de acuerdo a la respuesta dinámica que se tuvo circulando por la superficie de rodamiento donde entrega el valor de IRI del tramo en estudio. Entre estos equipos los más conocidos son el *May's Ride Meter* y el Rugosímetro del *Bureau of Public Roads* (BPR).

El *May's Ride Meter* se muestra en la Figura I.18 "*May's Ride Meter*" fue fabricado por la compañía Rainhard. Éste equipo utiliza dos sensores, uno para obtener la rugosidad y otro para obtener la velocidad, éste último va conectado al velocímetro del vehículo que lo remolca. Para obtener la rugosidad, el sensor utiliza un codificador óptico, conectado a una graficadora, para producir pulsos eléctricos que son mecánicamente acumulados por un motor de un paso. Aunque el sensor para la obtención de la rugosidad trabaja apropiadamente en carreteras de todos los niveles de rugosidad, el motor tiene sus



Figura I.18 "*May's Ride Meter*" [1]

límites de respuesta, lo cual ocasiona que los conteos obtenidos no sean correctos a altos niveles de rugosidad. [16]

Como se muestra en la Figura I.19 este equipo es un remolque de una sola rueda que al ser remolcado debe circular a una velocidad de 30 km/h, donde el sistema de funcionamiento de este equipo consiste en la rueda montada en resortes soportados por la estructura del remolque, donde a igual manera que el *May's Ride Meter* las irregularidades de la superficie de la vialidad ocasionan el movimiento vertical de la masa del remolque con respecto a la rueda del equipo.

Al presentarse en uso con el paso del tiempo el sistema se vuelve susceptible a los cambios de temperatura, a la condición de la superficie donde opera y a otros factores mecánicos. En adición, tiene un problema de frecuencia de resonancia que, si es excitado, produce resultados erróneos. [1]

Como consecuencias de los errores obtenidos en las lecturas este equipo se ha ido utilizando cada vez de menor manera.



Figura I.19 "Rugosímetro BPR"
Imagen obtenida de <http://www.vialidad.gov.ar>

1.12.5 Dispositivos manuales

Este tipo de dispositivos se utilizan comúnmente para validar o verificar los datos recolectados por los equipos antes mencionados, donde podemos encontrar una variedad de equipos desde nivel y estatal hasta el Dipstick y el Walking Profiler entre otros. Donde el nivel y estatal topográficos es la manera más conocida y se puede considerar como el método con mayor precisión para la obtención del perfil longitudinal de la capa de



Figura I.21 "Dipstick IRI"
Imagen obtenida de <http://www.terex.es>

rodamiento de una vialidad y su procedimiento de referencia estándar se describe en la norma ASTM E 1364. Este equipo topográfico como se muestra en la Figura I.20 consiste en un nivel topográfico empleado para establecer el dato de la línea horizontal, usándose junto con un estadal de precisión, graduada con unidades convenientes de elevación (divisiones en cm o pies). El Dipstick se muestra en la Figura I.21 consiste en un inclinómetro sostenido entre dos apoyos separados por 300 mm o 250 mm (dependiendo de las unidades de análisis, los apoyos pueden separarse 12 pulgadas), los cuales registran la elevación de un apoyo relativo a la elevación del otro.

1.13 Obtención del valor de IRI de una vialidad

Como se mencionó en el apartado anterior 1.5 el nivel de Servicio Actual estaba definido por este índice, y en México por muchos años se utilizó este método para evaluar las condiciones en las que se encontraban las vialidades. En los apartados 1.9 y 1.10, se mencionó ¿Qué es?, ¿En qué Consiste?, ¿Cuál es la escala? del Índice de Rugosidad Internacional, pero se requiere conocer cómo se obtiene el valor de IRI de una vialidad.

El Índice de Rugosidad Internacional puede obtenerse para la capa superficial de cualquier vialidad. Para la obtención del mismo se requiere entender que el cálculo del IRI se encuentra en función de la regularidad a lo largo de la vialidad en estudio y de la longitud de esta, la regularidad es promediada para obtener el valor de IRI de la vialidad. Gracias a esto llegamos a la conclusión de que el valor de IRI de una vialidad debe ir acompañado de la longitud del tramo en estudio y no solo el valor de la regularidad como comúnmente se habla en la bibliografía. [14]

En el apartado 1.12 se mencionaron los diferentes tipos de equipos de medición, así como existe una gran variedad de equipos, de la misma manera es la obtención del valor de IRI con cada uno. Dentro de esa variedad de métodos deben cumplir con la Norma ASTM E 950 la cual establece la medición y el almacenamiento de datos de perfil y con la Norma ASTM E 1170 que describe el cálculo de la respuesta vehicular a la rugosidad de la carretera.

Es importante mencionar que existirá una variación entre el resultado obtenido por los diferentes equipos de medición, ya que cada uno tiene su propio rango de error ocasionado por su eficiencia a la hora de la lectura, que tiene que ver con inadecuadas lecturas o con el desgaste del equipo, y debido a que las condiciones en las que cada uno toma lectura de la vialidad en estudio tiene variaciones en el tiempo y en el ambiente, así como es difícil hacer que todos los equipos pasen de manera exacta justo por donde paso el anterior.

La universidad de Michigan en el Instituto de Investigación del Transporte realizó estudios para identificar los factores que afectan la calidad de la medición de la rugosidad de una vialidad. [1] Los factores los dividieron en cinco grandes categorías:

-  Diseño de perfiles
-  Forma de la superficie
-  Entorno de medición
-  Manejo de perfiles
-  Conductor y de competencia del operador

Como se muestra en la Tabla I-6 cada uno de los factores de la medición del perfil afectan el rendimiento de perfiles en una de cuatro maneras:

- a) Precisión a la mayoría de los factores le afecta la precisión de la medición del perfil, la consecuencia es un sesgo en el valor de rugosidad.
Acuerdo algunos factores influyen en el acuerdo entre los perfiladores. Se difiere en la precisión ya que ninguna norma figura la posición de sensores. Por ejemplo, dos perfiladores que difieren en el espaciamiento del sensor lateral, pueden medir con precisión, pero con valores diferentes de rugosidad, porque no miden en las mismas posiciones. Dado que no existe norma para el espaciamiento de sensor, ni de perfiles, no se puede considerar uno correcto y el otro no.
- b) Repetibilidad varios de los factores, en particular a los aspectos de forma del pavimento y operación de perfiles, les afecta la capacidad de repetición de un perfilador, es decir, que causan dispersión en los valores de rugosidad que se miden en ensayos repetidos.
- c) Interpretación algunos de los factores que se relacionan con la interpretación de las mediciones de rugosidad, no afectan el acuerdo entre perfiladores o mediciones repetidas por el mismo perfilador, pero afectan el sentido de la medición. [17]

Además, como el IRI involucra la diferencia entre el perfil longitudinal teórico y el perfil longitudinal existente, es un hecho que se pueden presentar singularidades que pueden afectar la medición, siendo estas cualquier alteración del perfil longitudinal del camino que no provenga de fallas constructivas y que incremente el valor de IRI en el tramo en que se encuentra. Entre ellas se puede citar puentes, tapas de alcantarillas, cruces de calles, vías férreas, entre otras, que por diseño geométrico alteren el perfil de camino.

Por lo tanto, la medición deberá determinarse en sectores homogéneos, que corresponden a un pavimento de estructuración uniforme y se debe tomar en consideración al realizar una medición, hacerla en las condiciones más óptimas siendo condiciones climáticas

adecuadas, de preferencia cuando no intervenga agua u otro material entre el contacto del dispositivo y la capa de rodamiento de la vialidad.

Factor	Precisión	Acuerdo	Repetitividad	Interpretación	Factor	Precisión	Acuerdo	Repetitividad	Interpretación
Diseño del Perfil	X	X		X	Medición Ambiental	X			
Intervalo de muestra	X				Viento	X			
Cálculo del Algoritmo	X				Temperatura	X			
Comprobación Automatizada de Errores	X				Humedad	X			
Sensores de Altura	X				Humedad Superficial	X			
Acelerómetros	X	X			Contaminantes de la Superficie	X			
Medición de Distancia Longitudinal	X				Marcas del Pavimento	X			
Número de Sensores				X	Color del Pavimento	X			
Espaciado Lateral del Sensor		X			Luz Ambiental	X			
Forma de la Superficie	X		X		Operación del Perfil	X		X	X
Variaciones Transversales			X		Velocidad de Operación	X			
Variaciones Diarias			X		Cambios de Velocidad	X			
Variaciones Estacionales			X		Posición Lateral			X	
Textura de la Superficie	X				Deducción			X	
Deterioro del Pavimento	X		X		Posición Longitudinal			X	
Curvas	X				Longitud del Segmento				X
Grados y Subidas	X				Frecuencia de Colección de Datos				X
					Comprobaciones de Sanidad del Perfilador	X			
					Conductor y Operador del Perfil	X		X	

Tabla I-6 "Factores influyentes en la medición de IRI" [1]

Capítulo II.

Instrumentación Virtual

En el capítulo anterior se mencionó el equipo EMIRI UMICH 001, como un equipo para la medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), en este capítulo describiremos su diseño y funcionamiento. Las consideraciones de diseño fueron planteadas bajo el principio de la instrumentación virtual, de esta manera se presenta una pequeña introducción a los instrumentos y sus aplicaciones, concluyendo con la instrumentación virtual y su desarrollo en el presente trabajo.

2.1 Estructura de un Instrumento

Un instrumento es un equipo diseñado y construido con una serie de piezas, que permiten realizar una medición específica para la cual está diseñado, que sirve para hacer la actividad de medir y registrar, y en ocasiones poder controlar un proceso determinado; esto último no como una función propia del instrumento en sí, sino como una función agregada.

Para establecer la estructura de un instrumento de medición, revisaremos brevemente los conceptos: medir, unidad de medida, errores en medición.

2.1.1 ¿Qué es Medir?

Es comparar una cantidad desconocida que se quiere determinar y una cantidad conocida de la misma magnitud, que se elige como unidad. Al resultado de medir se le llama medida y da como producto de número n veces sea la unidad, que es la relación entre el objeto a medir y la unidad de referencia. Cuando medimos algo se debe hacer con gran cuidado, evitando algún tipo de error, que existen debido a las imperfecciones del instrumento, limitaciones del medio o errores experimentales, ópticos, etc. [18]

2.1.2 Unidades de medida

La unidad de medida es el patrón utilizado para medir. Como se muestra en la Figura II.1 una unidad de medida debe cumplir estas condiciones: ser inalterable, esto es, no ha de cambiar con el tiempo ni en función de quien realice la medida. Ser universal, es decir puede ser utilizada por todo el mundo. Debe de ser fácilmente reproducible. [18]

Existen conjuntos de unidades de medida establecidos, los cuales se conocen como sistemas de unidades y definen un grupo de unidades de medida y a partir de estas se deriva el resto. Como lo son el Sistema Internacional de Unidades (SI), “siendo este el sistema más usado”, Sistema Métrico Decimal, Sistema Cegesimal de Unidades (CGS), Sistema Anglosajón de unidades, entre otros.

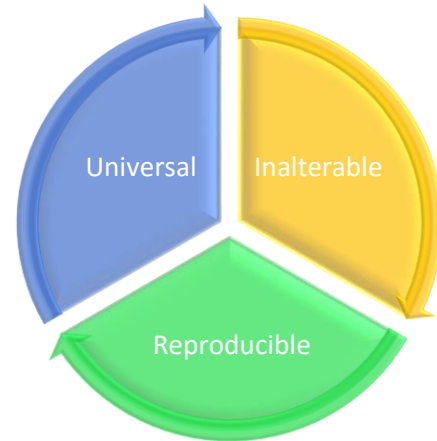


Figura II.1 "Requisitos de una Unidad de Medida"

2.1.3 Errores en las medidas directas

Existen varios errores de medición, de los cuales se distinguen:

- ✚ **Errores sistemáticos.** – se generan a partir de diferentes situaciones y condiciones dentro de las cuales podemos mencionar el desajuste del instrumento, el desgaste, la mala calibración, entre otros. Por lo general conservan la magnitud y el sentido. Esto da lugar a sesgo en las medidas.
- ✚ **Errores aleatorios.** – no son producidos de un modo regular, la magnitud y sentido varían de forma aleatoria, son complicados de prever, esto ocasiona la mala calidad en la medición.
- ✚ **Error absoluto.** – es la diferencia entre el valor real de la magnitud y el valor que se ha medido.
- ✚ **Error relativo.** – es la relación entre el error absoluto y la magnitud medida, es adimensional y se representa en porcentaje.
- ✚ **Error estándar.** – es la desviación estándar de una medida en una medición repetida o su estimación. [18]

2.1.4 ¿Qué es un Instrumento?

Es el medio con el cual se realiza la medición. Dos características importantes de un instrumento son: la resolución, que es la mínima cantidad que el instrumento puede medir de una determinada magnitud y unidad, o sea es el intervalo entre dos divisiones sucesivas a escala, y la sensibilidad, que es la relación que existe entre la medición y la medida real.

Ejemplos de Instrumentos de medición:

- ✚ Regla y metro, son instrumentos para medir longitudes, los cuales pueden estar hechos de distintos materiales ya sean flexibles o rígidos, que sirven para medir la distancia que existe entre dos puntos o en su caso la regla también para trazar líneas rectas.

- ✚ Voltímetro, instrumento para medir magnitudes eléctricas, en específico mide las tensiones eléctricas o voltaje aplicado en sus terminales.
- ✚ Bascula para medir masa, reloj para medir tiempo, termómetro para medir temperatura, manómetro para medir presión, etc.

2.1.5 Estructura de un instrumento

Un instrumento es un dispositivo que transforma una medida de una variable física, en información definida con un sentido, así como una magnitud, que permite conocer las dimensiones de esta lectura. Un instrumento está estructurado por un componente físico que de acuerdo al rango de lectura y a la funcionalidad del mismo nos permite conocer la variable física a medir, esto es, un instrumento de medición se define por lo que va a leer, continuando por el rango sobre el cual se encontrara la magnitud medida; Si se quiere conocer las dimensiones longitudinales de una propiedad, se requiere utilizar un equipo de medición de longitud, como lo es una cinta métrica flexible y no una regla, puesto que el rango de una regla esta con unidades al cm, mientras que una cinta métrica flexible tiene como rango de medida unidades al metro.

2.2 Instrumentación Virtual

La instrumentación virtual es un concepto introducido por la compañía National Instruments, que lo define como "un instrumento que no es real, se ejecuta en una computadora y tiene sus funciones definidas por software", esta definición proviene a partir de que decidieron enfrentar el problema de crear un software que permitiera utilizar la computadora personal como un instrumento para realizar mediciones. A este software le dieron el nombre de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, más comúnmente conocido por las siglas LabVIEW. A partir del concepto de instrumento virtual, se define la instrumentación virtual como un sistema de medición, análisis y control de señales físicas con un PC por medio de instrumentos virtuales [19].

2.2.1 Características de la Instrumentación.

Cuando se habla de instrumentos, es normal pensar en una carcasa rígida, en la que destaca su panel frontal, el cual contiene botones, LED's, perillas, visualizadores, etc. Puesto que estamos acostumbrados como usuarios, a solo ver esa parte del instrumento, ya sea de cualquier tipo de instrumentos existentes, siendo que esto solo es una parte superficial de la instrumentación y de su funcionamiento.

En la cara oculta del panel están los contactos de esos controles que los unen físicamente con las conexiones como circuitos, engranes, etc. de acuerdo a las características del tipo

de instrumentación existentes. Como es el caso de una instrumentación con circuitos internos, tienen circuitos integrados y otros elementos que procesan las señales de entrada en función del estado de los controles, el resultado se muestra en el panel frontal.

En instrumentación, las variables físicas son transformadas en una señal mecánica o eléctrica, siendo esta señal procesada y usada por registradores, indicadores, controladores, etc.

Como se muestra en la Figura II.2 la instrumentación cuenta con características esenciales para su construcción y desarrollo, en el párrafo anterior se mencionó que la instrumentación está estructurada por una variable física como parte central del instrumento, por lo tanto este instrumento está definido de acuerdo a la variable a medir, esto es, el tipo de Instrumento a utilizar esta en función de lo que se quiere medir, siendo esto para obtener una información más precisa de esta lectura, ya que los diferentes tipos de instrumentos comercialmente se catalogan de acuerdo a su función, o a su principio de excitación.



Figura II.2 "Partes esenciales de una instrumentación"

Teniendo en cuenta que la instrumentación tiene varios componentes y cada uno es importante de acuerdo a su función en el trabajo, algunos de los componentes importantes son los instrumentos de acuerdo a la estructuración que se utilice en la construcción del mismo, donde cada instrumento tiene una función específica a realizar y los podemos encontrar dentro de toda la estructura de la instrumentación, como un instrumento receptor o un indicador por mencionar algunos.

2.2.2 Clasificación y Ejemplos de Instrumentos

“Los instrumentos de medición y de control son relativamente complejos y su función puede comprenderse bien si están incluidos dentro de una clasificación adecuada. Como se muestra en la Figura II.3 "Clasificación de instrumentos" se consideran dos clasificaciones básicas: la primera relacionada con la función del proceso del instrumento y la segunda con la variable del proceso que mide" [20]. Este modo de clasificarlos no es necesariamente el único, pero se considera bastante completo.

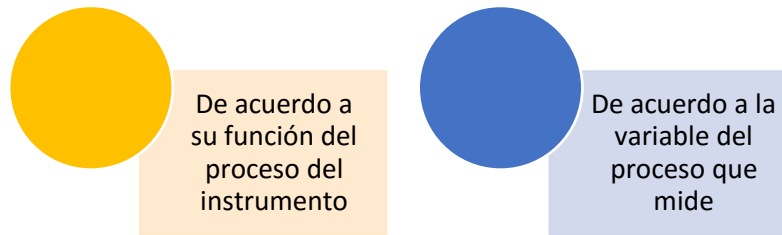


Figura II.3 "Clasificación de instrumentos"

Cuando los instrumentos se clasifican de acuerdo a su función, quiere decir que dichos instrumentos son catalogados de acuerdo a lo que realizan, y no a la variable física a medir. La clasificación de acuerdo a la variable del proceso es de acuerdo a la variable física a medir donde los instrumentos.

“Esta clasificación corresponde específicamente al tipo de las señales medidas siendo independiente del sistema empleado en la conversión de la señal de proceso. De este modo, un transductor neumático de temperatura del tipo del bulbo y capilar, es un instrumento de temperatura a pesar de que la medida se efectúa convirtiendo las variaciones de presión del fluido que llena el bulbo y el capilar; el aparato receptor de la señal neumática del transmisor anterior es un instrumento de temperatura, si bien, al ser receptor neumático lo podríamos considerar instrumento de presión, caudal, nivel o cualquier otra variable, según fuera la señal medida por el transmisor correspondiente.” [20]

Así como se mencionó anteriormente la existencia y las características de la instrumentación, es necesario mencionar que esta instrumentación es conocida actualmente como instrumentación tradicional, que mayormente se utilizaba en el campo de la industria. En la actualidad y derivado de los avances tecnológicos la instrumentación ha ido evolucionando, incorporado nuevas tecnologías en el desarrollo de la misma, dando lugar a la Instrumentación Virtual. Al darle apertura a nuevas tecnologías se cuenta con nuevas ventajas en la instrumentación, haciendo a esta más eficiente, económica y precisa.

Para llegar a un mejor entendimiento de lo que trata un instrumento virtual, así como de las partes que la componen y sus virtudes, es importante conocer los siguientes conceptos.

2.2.3 ¿Qué es Virtual?

“Virtual¹ es un adjetivo que, en su sentido original, hace referencia a aquello que tiene virtud para producir un efecto, pese a que no lo produce de presente. El concepto, está asociado a lo que tiene existencia aparente, opuesto a lo real o físico” [21]. Este término es

¹ “Del latín medieval *virtualis*, y este derivado del latín *virtus* (‘Poder’, ‘facultad’, ‘fuerza’ o ‘virtud’)” [32]

muy usual en el ámbito de la informática y la tecnología para referirse a la realidad construida mediante sistemas o formatos digitales.

2.2.4 ¿Qué es la Instrumentación Virtual?

Como su nombre lo indica es un instrumento con una parte virtual, esto quiere decir que está compuesto por una parte física (hardware) y una parte virtual (software), que permite tener un mejor desarrollo así como la optimización del mismo, por lo tanto por fines de desarrollo se puede dividir en dos partes primordiales, como lo es el hardware y el software, dando lugar a un instrumento de arquitectura abierta, esto quiere decir que puede ser modificado de acuerdo a las necesidades del usuario.

Comprendiendo lo anterior podemos caracterizar a los instrumentos virtuales como instrumentos que son definidos por el usuario mientras que los instrumentos tradicionales tienen funcionalidad fija, definida para el usuario.

Como se muestra en las Figura II.4 y Figura II.5 se puede observar diferencias existentes entre la estructura de un instrumento virtual, así como de un instrumento tradicional. Teniendo como principal diferencia una estructura caracterizada por un software y un hardware dentro de la instrumentación virtual, mientras que en la instrumentación tradicional se tiene como principal esquema una estructura ya definida para una tarea predispuesta, implementada en hardware.

Un instrumento tradicional cuenta con un sistema operativo con una estructura definida por el fabricante (Firmware), esto consiste en una estructura cerrada que no se puede modificar. El cual tiene un subsistema de adquisición de la información con componentes fijos.



Figura II.4 "Estructura de un instrumento tradicional"

Este tipo de instrumentos trabajan con un Temporizador y control que permite procesar la información medida por el subsistema de adquisición, de la misma manera cuenta con una interfaz de usuario fija y, en algunos casos, como medio de transmisión una interconexión de componentes periféricos (PCI bus, por sus siglas en inglés) y debiendo contar con una fuente de alimentación específica para este instrumento.

En contraparte, un instrumento virtual cuenta como principal característica el software, desarrollado sobre la plataforma del sistema operativo con el que cuenta la computadora donde se trabajara el diseño del instrumento. El principio fundamental de un instrumento virtual se basa en el procesamiento de la información obtenida por el hardware, la adquisición de datos se obtiene por medio de sensores y transductores, una vez acondicionadas estas señales se procesan por medio del software desarrollado, como complemento y teniendo en consideración que se cuenta con hardware modular, esto quiere decir que dicho hardware cumple con el principio modular. Una de las características más interesantes de la instrumentación virtual es que se cuenta con una interfaz definida por el usuario, y una temporización y control de tipo (FPGA), y teniendo como ventaja una fuente de alimentación compartida.



Figura II.5 "Estructura de un Instrumento Virtual" [19]

De las principales ventajas de utilizar un instrumento virtual es que tiene un precio accesible y casi siempre menor que los instrumentos tradicionales con tareas semejantes, o con la misma variable física a medir. Con el paso del tiempo contando con una arquitectura abierta, es decir una estructura de instrumentación de manera flexible, se convierte en un costo mucho menor que el de una instrumentación tradicional, considerando mantenimientos o reutilización de la instrumentación para tareas diferentes.

2.2.5 Hardware

El término hardware se refiere a cualquier parte de la computadora que se puede tocar. El hardware consiste en dispositivos electrónicos interconectados que el usuario puede utilizar para controlar un procesamiento, así como entrada y salida de información de la computadora; son los dispositivos físicos que conforman el sistema de computación. Cuando la gente habla de una computadora, por lo general se refiere al hardware.

En el caso de la instrumentación virtual como se muestra en la Figura II.6 el hardware se refiere a los sensores, medio de transmisión, bloques de terminales, tarjeta de adquisición de datos y la Unidad Central de Procesamiento (CPU por sus siglas en inglés).



Figura II.6 "Componentes del Hardware de la instrumentación virtual"

2.2.6 Software

El software es el conjunto de instrucciones electrónicas que indican al hardware qué debe hacer. Estos conjuntos de instrucciones también se conocen como programas y cada uno tiene un propósito específico, es decir, los programas hacen que la computadora ejecute las funciones deseadas.

En la instrumentación virtual el software es el encargado del procesamiento de datos que se requieren trabajar para adquirir la información deseada. La ejecución del software permite obtener el resultado de la medición, eliminando información innecesaria y que solo resulta estorbosa.

2.2.7 Ejemplos de la practicidad de la Instrumentación Virtual

Al no utilizar software y hardware preestablecido, se obtiene máxima flexibilidad definida por el usuario. Un instrumento tradicional proporciona tanto software como circuitos de medición empacados en un producto con lista finita o funcionalidad fija. Un instrumento virtual proporciona todo el software y hardware necesario para lograr la medición o tarea de control. El programador puede ajustar la adquisición, análisis, almacenamiento, unión, y funcionalidad de presentación, usando un software productivo y potente, para una mejor interfaz de usuario y una mejor adquisición de información. [22]

Dentro de las características prácticas de la instrumentación virtual, una de las más destacadas es la utilización de una aplicación del software para diferentes dispositivos, es decir, se pueden adquirir datos de varios dispositivos y procesar dicha información en una

sola aplicación, sin tener la necesidad de utilizar una aplicación para cada dispositivo. Otra característica es la de varias aplicaciones con un solo dispositivo, esto quiere decir que se pueden realizar diferentes aplicaciones de tareas diferentes, y utilizar un mismo dispositivo para adquirir información de cada tarea predispuesta. Esto es cuando se realizan diferentes tareas en diferentes aplicaciones. [22]

2.3 Componentes de la instrumentación

Los sensores, los acondicionadores de señal, cables de conexión y bloques conectores, adquisición de datos, PC y software, se consideran como principales componentes de una estructura de Instrumentación Virtual. Cada componente es de igual importancia en la instrumentación ya que trabajan en serie.

2.3.1 Sensores y transductores

Se denomina transductor, en general, a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente, pero de otra forma física distinta. Es decir, un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro. [23]

Los transductores son conocidos con nombres diversos en diferentes áreas de investigación en donde estos son utilizados, como es el caso de:

-  Sensor (o sonda), en contacto con la magnitud física a medir.
-  Mecanismos auxiliares.
-  Captador, proporciona una cierta señal eléctrica.
-  Preamplificador o acondicionador de señal.

Los transductores se dividen en dos tipos: transductor de entrada (señal física a señal eléctrica) y transductor de salida (Señal eléctrica a presentación de lectura). [23]

Los sensores y los transductores como se mencionó anteriormente, en ocasiones se utilizan como sinónimos, pero el sensor tiene un significado más extenso, la amplitud de los sentidos para adquirir una magnitud física, que por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos, mientras que el transductor sugiere que la señal de entrada y salida no deben ser homogéneas. Con lo anteriormente mencionado podemos definir un transductor como un dispositivo que transforma una magnitud física o química en otra magnitud más sencilla de medir y procesar, y podemos diferir a un sensor como un transductor alimentado por una fuente eléctrica que transforma una magnitud física de gran amplitud sensorial en una señal eléctrica procesable. [23]

El termino sensor se emplea en la actualidad para nombrar al transductor de entrada, por lo tanto, podemos definir al sensor como el dispositivo que genera una señal de respuesta (señal eléctrica), ocasionado por la excitación o estimulo de una condición física o química, para la cual se encuentra diseñado. [23] Es decir cada sensor se encuentra preestablecido para ante una situación o tarea, este dispositivo generara una señal de respuesta de la medición.

2.3.2 Acondicionamiento de Señal

Los acondicionadores de señal, adaptadores o amplificadores, en sentido amplio, son los elementos de la instrumentación virtual que transforma la señal de salida de un sensor, en una señal apta que permita un procesamiento posterior mediante la Instrumentación [23]. La señal de salida del sensor se debe procesar de una forma adecuada para la siguiente etapa de operación de la información. Esta señal puede ser demasiado pequeña y por lo tanto tener que amplificarla; podría contener interferencias que eliminar por medio de un filtrado; ser analógica y requerir de una digitalización; ser un cambio en el valor de la resistencia y convertirla a un cambio de corriente, etc.

Los procesos que se pueden presentar en un acondicionamiento de una señal son los siguientes:

-  Protección (Para evitar ocasionar un daño al elemento de la instrumentación ocasionado por un voltaje o corriente elevada).
-  Tipo de señal adecuada (Cuando es necesario convertir una señal de voltaje o una corriente a una adecuada).
-  Nivel adecuado de la señal (Conversión de la señal de acuerdo al tipo que se requiera, así como la amplificación de la señal para obtener la adecuada).
-  Eliminación o reducción del ruido (Cuando se requiere eliminar un ruido de la señal se utiliza un filtro).

2.3.3 Cables de conexión y Bloques Conectores

Hablar de los cables en lo que concierne a la instrumentación es hablar de uno de los componentes básicos de esta. Existe una gran diversidad de cables y el tener una buena elección del mejor con respecto a los demás depende de varios factores como lo es el ancho de banda, la distancia existente entre un dispositivo a otro que se vaya a conectar, y el costo del mismo. Cada diferente cable tiene sus ventajas y desventajas, no existe un tipo de cable ideal. La principal diferencia entre los tipos de cables radica en la anchura de banda permitida y el rendimiento máximo de transmisión, su grado de inmunidad frente a

interferencias electromagnéticas y la relación entre la amortiguación de la señal y la distancia recorrida.

Existen dos principales distinciones entre los tipos de cable de acuerdo al tipo de conductor eléctrico del que esté constituido y al número de conductores que conformen el cable: conductores flexibles (formado por alambres lo suficientemente finos y unidos eléctricamente entre si, formando el conductor) y conductores rígidos (es un único cable cilíndrico de una determinada sección y suele denominarse hilo); Cables unipolares (Constituidos por un solo conductor aislado rígido o flexible) y cables multipolares o multiconductores (formado por más de un conductor aislados entre si y denominan cables multiconductores, mangueras o cables múltiples).

El cable multiconductor se clasifica en:

-  Cable Multiconductor normal, este tipo de cable es de bajo costo y de fácil manejo, aunque tiene una tasa mayor de error respecto a otros tipos de cable.
-  Cable Multiconductor blindado, cada conductor es cubierto con una malla plástica, y el conjunto de pares se recubre con una malla metálica.
-  Cable Multiconductor con relleno, los espacios vacíos entre los conductores son cubiertos por relleno plástico que permite tener un aislamiento entre cada conductor.

Dentro de la variedad de cables que se utilizan para instrumentación, podemos encontrar la Faja FDD, el par trenzado, Faja IDE de 40 hilos, Faja IDE de 80 hilos, Unidad SATA, Cables USB, Cables IEEE1394, Cable PS/2, Cables UTP, entre otros.

Una de las partes importantes dentro del cableado son los Conectores o Bloque de Conectores, ya que nos permiten tener una conexión correcta y además nos permite realizar modificaciones en el sistema de cableado. Contando con diferentes tipos de conectores donde su elección concierne de acuerdo para el tipo de conexión que se quiera realizar. Uno de los conectores más usados dentro de la instrumentación son las borneras. [24]

Bornera es un conjunto de bornes individuales o múltiples y sus respectivos accesorios (véase *Figura II.7*). Una bornera se puede formar con bornes individuales sobre un riel o bien por un bloque que contiene a los elementos de conexión. La formación de una bornera no solo concierne al borne sino a una serie de elementos accesorios tales como extremos, tapas, separadores, puentes, numeradores, etc.

Un borne es un elemento que tiene un cuerpo de material plástico aislante que contiene o incluye un elemento metálico al cual se o pueden fijar los conductores de cables (véase Figura II.8). Las formas y materiales que lo forman son variados y obedecen a las innumerables aplicaciones que se hacen de este elemento. [25]

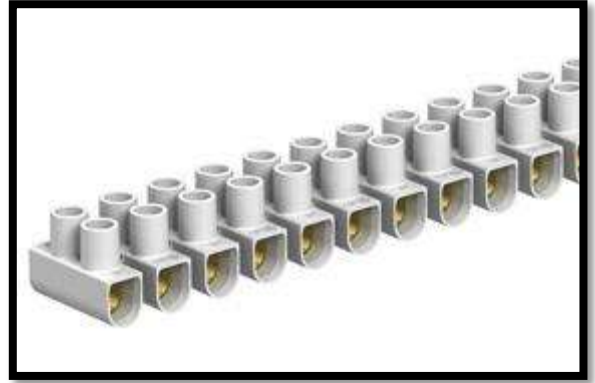


Figura II.7 "Bornera"

Los bornes permiten conectar a los cables o sus terminales mediante el empleo de tornillo (la fijación del cable o de su terminal a la pieza metálica que hace la conexión dentro del cuerpo del borne se hace en este caso mediante tornillo), resorte, soldado o enchufado. [25]

Existe una gran variedad de bornes como lo es: el borne simple (el más común de todos con un lado para el cable de entrada y otro para la salida, este es el más utilizado), borne de varios pisos (son bornes dobles o triples en altura, que permiten la ejecución de un puente entre los elementos conductores de los distintos niveles), borne con seleccionador (permite interrumpir mecánicamente la continuidad eléctrica entre la entrada y salida), borne con fusible (este permite la protección de circuitos en el cual está inserto), borne con porta diodo y borne de puesta a tierra. [25]

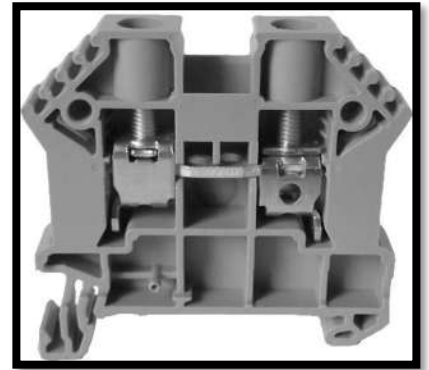


Figura II.8 "Borne"

Imagen obtenida de <http://www.ndu.cl>

Además del borne existen otros tipos de conectores usados en la instrumentación como el PS/2, VGA, USB, FireWire o IEEE, RJ-45, RS-232 o SERIAL, entre otras.

2.3.4 Adquisición de Datos

Antes de procesar y obtener la respuesta de una lectura de una magnitud física medida, se encuentra el proceso de adquisición de datos. El cual consiste como pasos previos la obtención de una señal por medio de un sensor y pasando por un acondicionador, por medio de conexiones y llegando a una tarjeta de adquisición de datos.

Como se mencionó con anterioridad en el apartado 2.3.1 los sensores envían una señal de salida, que es acondicionada de acuerdo a las necesidades y transmitida como se menciona en el apartado anterior por medio de una conexión, llegando así a una DAQ, la cual se

encarga de la conversión de señales adecuándola a las necesidades del usuario, y la comunicación con el ordenador.

Como características más relevantes de una tarjeta de adquisición de datos están:

- ✚ Número de canales analógicos (es el número de magnitudes distintas que se pueden adquirir utilizando la misma tarjeta)
- ✚ Velocidad de muestreo (Cuanto mayor sea la velocidad de muestreo mejor representación obtendremos de la señal analógica)
- ✚ Resolución (Esta dada por el número de bits del ADC que se utilizan para representar cada muestra, mientras el número de bits del ADC sea mayor la tarjeta será capaz de detectar variaciones menores en la señal)
- ✚ Rango de entrada (Indica los márgenes entre los que debe estar la señal de entrada para que pueda ser convertida)
- ✚ Capacidad de temporización (Permite controlar los momentos en los que debe leer una señal, identificar cuantas veces se ha producido un evento, generar formas de onda de acuerdo al reloj, etc.)
- ✚ Forma de comunicarse con la computadora

En la Figura II.9 se muestra el diagrama de bloques típico de una DAQ. Las capacidades comunes que suelen tener las DAQ son:

- ✚ Adquisición de señales analógicas
- ✚ Generación de señales analógicas
- ✚ Generación y adquisición de señales digitales
- ✚ Contadores y timers
- ✚ Triggers (pre-trigger y post-trigger)
- ✚ Autocalibración, sensores, etc.}

2.3.5 Computadora y Software

Una computadora se puede definir como una maquina digital, electrónica, programable para el procesamiento de información. La información son representaciones codificadas en condiciones para ser introducidas en la computadora suelen llamársele datos, donde se pueden ser utilizados de manera individual o como grandes conjuntos con un debido acomodo estructurado, como el de una matriz de datos. La unidad de información más elemental es una variable binaria, conocida como BIT, que toma el valor 0 o 1. El bit corresponde a la mínima información posible ya que solo puede tomar dos valores distintos posibles.

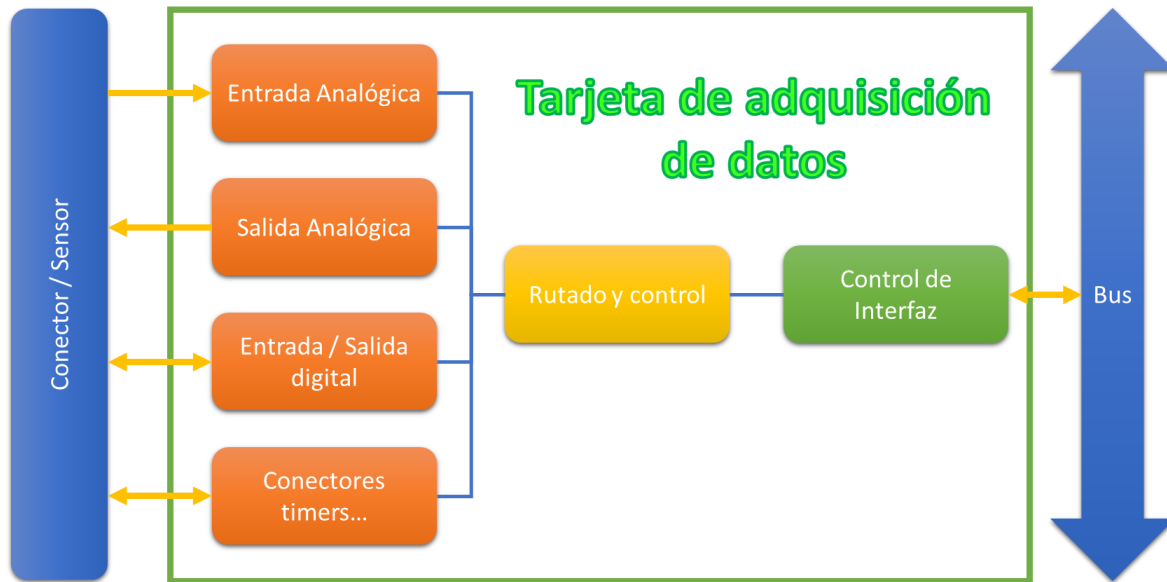


Figura II.9 "Esquema de bloques de una tarjeta de adquisición de datos" [24]

El concepto procesar consiste en aplicar un conjunto de operaciones tales como ordenar, seleccionar, ejecutar cálculos, etc. Por lo tanto, como se muestra en la Figura II.10 el procesar Información es adecuar datos en información organizada, y de manera que se vuelva útil y manejable donde esta información se encuentra compuesta por datos. [27]

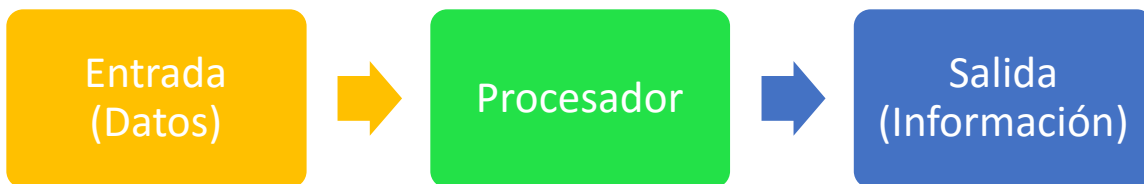


Figura II.10 "Proceso de datos"

El concepto procesador es muy amplio más que la computadora, ya que existen procesadores que no son computadoras. Para procesar datos, la computadora debe ser capaz de realizar ciertos tipos de operaciones:

- ✚ Entrada de datos (Suministrar información a la computadora)
- ✚ Salida de datos (Presentar los resultados en pantalla o computadora)
- ✚ Almacenar (Copia permanente de información)
- ✚ Recuperación (Leer de nuevo la información almacenada)
- ✚ Transmisión (Compartir la información con otro dispositivo computacional)
- ✚ Recepción (Recibir la información enviada por otro computador)

- ✚ Tratamiento (Operaciones sobre datos, tales como la ordenación, selección, combinación, reclasificación, realización de cálculos que permita obtener la información deseada)

El software es el sistema computacional que permite procesar la información que se introduce en este, dentro de la instrumentación virtual el software toma un papel muy importante ya que es el encargado de controlar el proceso de los datos para obtener información ordenada y que permita obtener un mejor manejo de dicha información. [28]

2.3.6 Proceso de instrumentación

Como se muestra en la Figura II.11 este proceso se divide en 5 partes elementales, la variable física a medir, el sensor, el medio de transmisión el procesador de información y el despliegue de resultados siendo estos bloques del proceso los esenciales para la funcionalidad de la instrumentación Virtual.

Ya definidas las partes elementales de la instrumentación virtual, podemos definir el proceso de instrumentación y los elementos que conforman cada parte de este proceso. Por ello, lo primero que se establece para la elaboración de un instrumento virtual es la variable física que se va a medir, esta parte es elemental ya que de acuerdo al tipo de variable y la magnitud de esta se elige el tipo de sensor a utilizar, que será este el elemento que estará en contacto con dicha variable, donde dependiendo de la magnitud de esta, el sensor enviará una señal eléctrica que será transmitida por medio de cables y conexiones después de su acondicionamiento, hasta la tarjeta de adquisición de datos que será la receptora y alimentadora de la señal emitida por los sensores, esto ocurre al momento en que la tarjeta de adquisición de datos alimenta con un voltaje a los sensores y estos a su vez dependiendo de la magnitud que estén midiendo regresaran una señal a la tarjeta. Posteriormente la tarjeta al recibir la señal del sensor envía esta información por medio de un cable a la computadora donde será procesada la información por medio del software.

Al finalizar a el procesamiento de la información es necesario el despliegue de los resultados ya que esta es la finalidad de la instrumentación, donde la computadora puede tomar parte de este proceso puesto que se despliegan los resultados en el monitor o ejecuta una acción para su impresión.

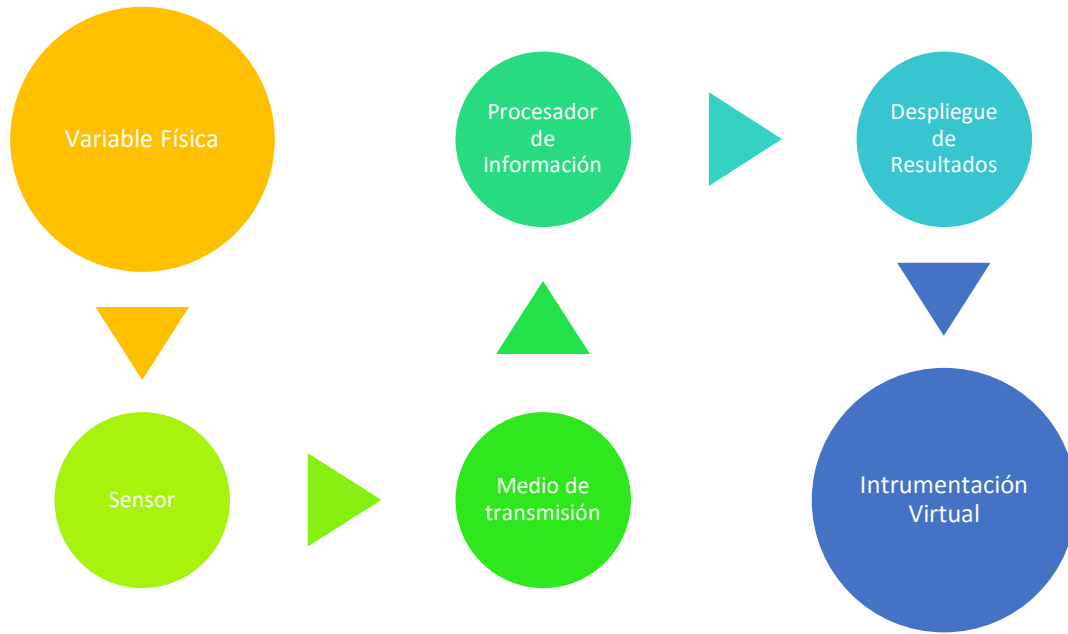


Figura II.11 "Proceso central de un Instrumento virtual"

2.4 EMIRI UMICH 001

Como se mencionó en el apartado 1.12 del capítulo anterior existe una variedad de equipos de medición del Índice de Rugosidad Internacional, y una de sus clasificaciones son los llamados Tipo Respuesta, recibiendo su nombre debido a la respuesta medida que genera al transitar por una vialidad, proporcionando un valor de IRI de acuerdo a la respuesta generada del equipo, debido al rebote que tiene este ocasionado por la rugosidad.

La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo busco diseñar un equipo que sea funcional, económico y de fácil operación. De acuerdo a la investigación realizada y con la planeación del proyecto, en una primera etapa de la investigación se desarrolló un equipo tipo respuesta, el cual se diseñó y construyó siendo un equipo ligero de tipo remolque de un solo eje, denominado EMIRI UMICH 001 (*Equipo Medidor del Índice de Rugosidad Internacional de la Universidad Michoacana 001*, véase Figura II.12), para más información de diseño, construcción y especificaciones del equipo ver en la referencia [1].



Figura II.12 "EMIRI UMICH 001" [1]

2.4.1 Variables físicas

Las variables físicas a medir con el EMIRI UMICH 001 para la obtención del valor de IRI son la respuesta del vehículo al transitar por una vialidad, la longitud de tramo a la que se genera dicha respuesta y la velocidad promedio de circulación del equipo en el tramo anteriormente mencionado como se muestra en la Figura II.13. Se le llama la respuesta del vehículo al desplazamiento dinámico verticalmente acumulado de la masa fija o masa en contacto con la vialidad del vehículo con respecto a la masa en suspensión del mismo, véase en el apartado 1.9.1. Por lo tanto, se requiere medir la velocidad a la que transita el vehículo, la distancia que circulara el vehículo durante la obtención del parámetro y el desplazamiento verticalmente acumulado entre las dos masas del vehículo respuesta de la regularidad superficial de la vialidad por la que transite.

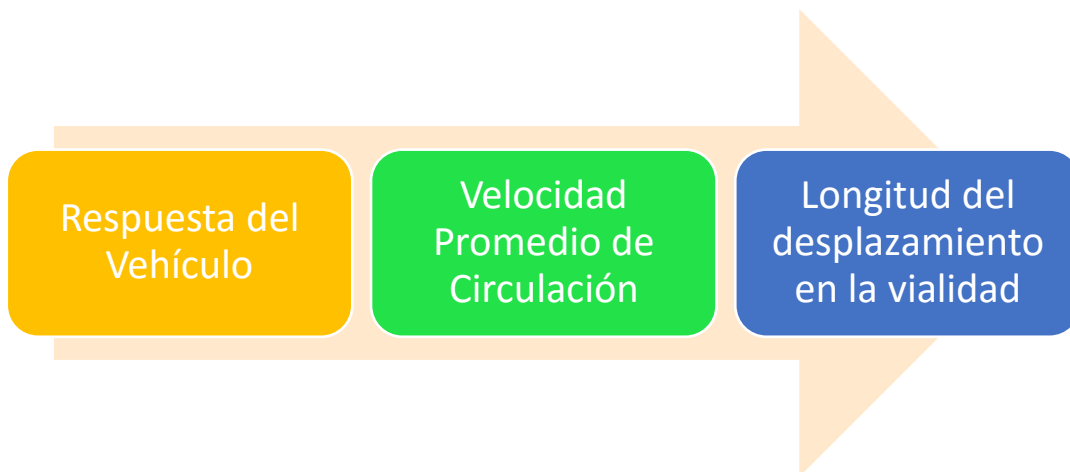


Figura II.13 "Variables Físicas medidas por el EMIRI UMICH 001"

2.4.2 Sensores

Recapitulando el apartado 2.3.1 los sensores son dispositivos eléctricos que nos permiten medir una magnitud de una variable física, para la cual es diseñado. Al requerirse medir la velocidad de circulación y la distancia que circula el vehículo, se colocó un sensor de Efecto Hall (*véase Figura II.14*), el cual consiste en generar un pulso electrónico cada que un campo magnético se pone en contacto con el sensor, este sensor se colocó dentro del tambor derecho en el eje del EMIRI UMICH 001 [1], al conocer la distancia a la que se colocó el imán, será esta la distancia cada que se genera el pulso electrónico, y por medio del tiempo que tarda en generarse cada pulso se obtiene la velocidad de circulación del equipo.

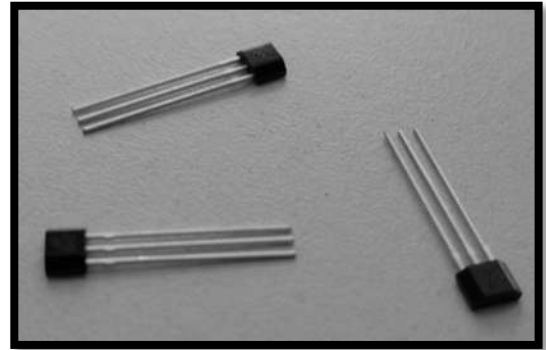


Figura II.14 "Sensor de Efecto Hall"

Para obtener la medición del desplazamiento entre la masa en suspensión y la masa en contacto con la vialidad ocasionado por la rugosidad en esta, se colocó un sensor de medición de desplazamiento lineal (*véase Figura II.15*) uno de lado derecho y otro del lado izquierdo, para medir la respuesta generada por el vehículo en cada rodera. Al pasar un campo magnético sobre este sensor a una distancia no mayor a 3.5 cm de este, se generara una variación en una señal eléctrica de acuerdo a la posición en la que se encuentra el campo magnético con respecto a la longitud del sensor, generando así una lectura de información al hacer que la posición del campo tenga una variación en paralelo con el desplazamiento que tiene una masa con respecto de la otra, esto quiere decir que el desplazamiento que exista entre ambas masas será el mismo que el desplazamiento del campo magnético, obteniendo así una respuesta del vehículo por medio del desplazamiento acumulado del campo magnético. Para más especificaciones ver en la referencia [1].

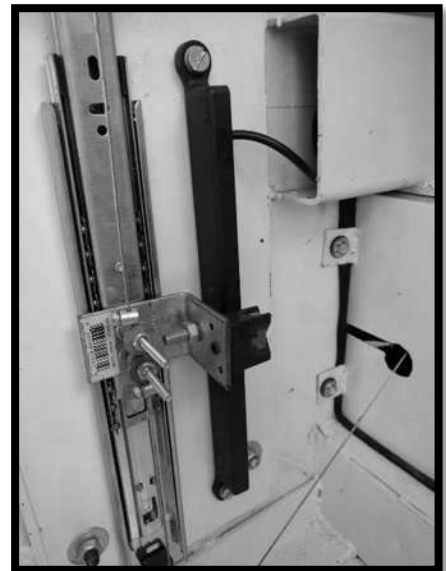


Figura II.15 "Sensor de desplazamiento lineal"

2.4.3 Conexiones y terminal

Para conectar los sensores antes descritos a la terminal usada en el EMIRI UMICH 001 se utilizó un Cable Multiconductor blindado (*véase Figura II.16*), que permite proteger la señal del sensor y evitar la interferencia entre el conjunto de las señales electrónicas que se utilizaran en el equipo, ya que el blindaje que recubre el conjunto de cables evita que los

cables se trocen al manipularlo, además de que cada conductor es recubierto de plástico evitando la interferencia entre estos. Los sensores fueron soldados a estos cables utilizando cautín y soldadura con estaño, recubriendo esta soldadura con thermofit para proteger esta misma y tener un mejor resultado en la adquisición de señal (véase Figura II.17).



Figura II.16 "Cable Multiconductor Blindado"



Figura II.17 "Equipo para soldar (electrónica) utilizado en el EMIRI UMICH 001"

Para unir los cables de los sensores en uno solo se utilizó un borne (véase Figura II.18) que protege esta conexión, evitando una posible falla, interrupción o pérdida de la señal, ocasionando una mala adquisición de datos.



Figura II.18 "Borne utilizado en el EMIRI UMICH 001"

En el EMIRI UMICH 001 se utilizó dos conectores de NI accesorio de la Serie NI USB-600 para Generación de Prototipos (véase Figura II.19), son conectores de 16 posiciones de los dispositivos de adquisición de datos NI USB-6008, USB-6009 y USB-6501. Este dispositivo sirve para liberar tensión en la conexión, para cableado más limpio y tener un mejor resultado en la conexión a la DAQ, se considera como blindaje para la conexión buscando

aislar cada puerto y convirtiendo los 16 pines en una sola conexión. Su carcasa además proporciona cuerpo que permite manipular en mejor manera esta terminal.



Figura II.19 "Conectores de NI accesorio de la Serie NI USB-600"

2.4.4 Tarjeta de Adquisición de Datos

La tarjeta de Adquisición de datos que se utiliza en el proyecto EMIRI UMICH 001 es el dispositivo DAQ USB-6009 Multifunción de Bajo Costo de 14 bits (véase Figura II.20). Durante la planeación del proyecto uno de los principales objetivos fue hacer el equipo de bajo costo comparado con los equipos en el mercado que tuvieran el mismo funcionamiento, no dejando a un lado la precisión y confiabilidad de los resultados. Por lo tanto, se llegó a la elección de un equipo producido por NI siendo la empresa número 1 en el mercado dedicado a la instrumentación virtual, además de que ofrece equipos de bajo costo y proporciona la plataforma (LabVIEW) para programar y poder operar de manera más precisa estos equipos.



Figura II.20 "DAQ NI USB-6009"

Debido a que la DAQ USB-6009 utiliza un cable USB para conectar la tarjeta con una computadora, en el desarrollo del equipo al estar operado dentro del vehículo remolcador se utiliza un cable USB de 5 metros (véase *Figura II.21*), que permitiera manipular dicho cable y llegara hasta la cabina de operación, fue por eso que se realizó el cambio del cable que viene junto con la DAQ por un cable con mayor longitud y que no permitiera tener pérdida de energía debido a la longitud de este y al bajo voltaje de alimentación de la tarjeta, utilizando un cable USB 2.0 Certificado de 5 metros con conectores USB "A" y USB "B" con soporte de velocidades de datos hasta 480 Gbps.

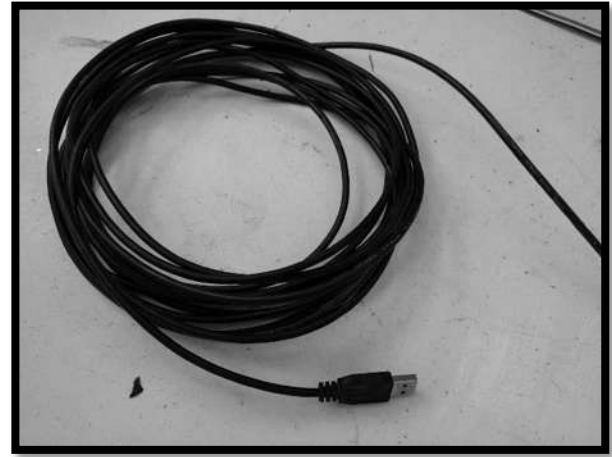


Figura II.21 "Cable USB 2.0 de 5m, USB A - USB B"

2.4.5 PC y Software

El PC utilizado en el EMIRI UMICH 001 no es de gran relevancia mencionar sus especificaciones, pero si mencionar que este equipo se utiliza de manera particular para el desarrollo del proyecto, buscando un mejor rendimiento del mismo.

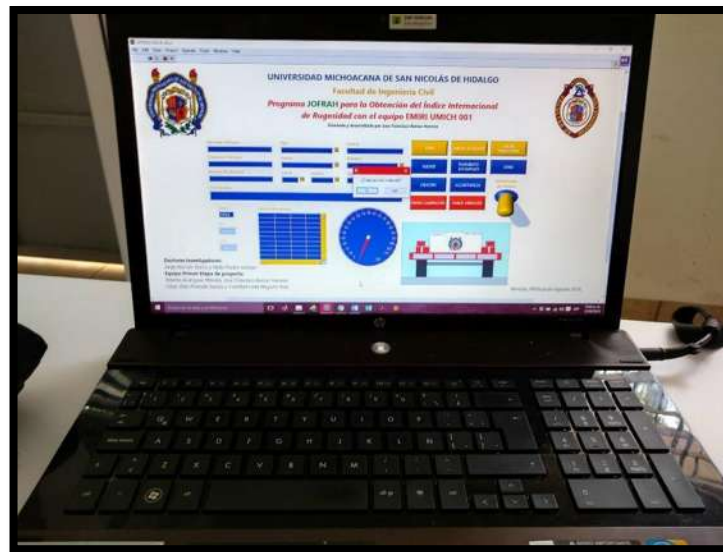


Figura II.22 "Computadora y Software utilizado en el EMIRI UMICH 001"

El software utilizado en el proyecto es algoritmo que se describe en la presente tesis, programado en la plataforma LabVIEW que permite dar un mayor rendimiento en el funcionamiento de la tarjeta de adquisición elegida para el proyecto (véase *Figura II.22*).

Capítulo III.

Algoritmia y Plataforma Informática

El tema central de esta tesis es el desarrollo de un algoritmo en LabVIEW, por ello es necesario definir el concepto algoritmo y el conocer el funcionamiento de LabVIEW como plataforma informática.

3.1 Algoritmia

La algoritmia se puede definir como el estudio de los algoritmos. Cuando se pretende resolver un problema es posible que haya toda una gama de algoritmos disponibles. Para elegir un algoritmo dependerá de las necesidades y límites que se tengan para utilizar algún equipo, existirán grandes variaciones de algoritmos, algunos más rápidos que otros durante el proceso, una metodología con menor error, su capacidad de almacenamiento, entre otras características.

3.1.1 Algoritmo

El nombre algoritmo proviene del matemático persa del siglo IX Al Khwàrizmî, que lo define como un conjunto de reglas para efectuar algún cálculo, bien sea a mano o, más frecuentemente, en una máquina. La ejecución de un algoritmo no debe implicar, normalmente, ninguna decisión subjetiva, ni tampoco debe hacer preciso el uso de la intuición ni de la creatividad. Por lo tanto, se puede considerar una receta de cocina como un algoritmo si describe precisamente la forma de preparar un cierto plato, utilizando las cantidades exactas que deben utilizarse y seguir las instrucciones detalladas acerca del tiempo que debe guisarse. Por otra parte, si se incluyen nociones vagas tales como “sazonar al gusto” o “guísese hasta que este medio hecho” esto no se podría considerar algoritmo [29]

Cuando se utiliza un algoritmo para calcular la respuesta de un problema concreto, lo normal es suponer que las reglas nos darán la respuesta adecuada si se aplican correctamente. Al ejecutar un algoritmo con alguna operación matemática por ejemplo el cálculo de la raíz cuadrada de 2, ningún algoritmo nos podrá dar una respuesta exacta en notación decimal, por cuanto la representación de $\sqrt{2}$ es infinitamente larga y no se repite. Por esta razón se diseñará el algoritmo para que pueda dar una respuesta que sea tan precisa como nosotros decidamos: 4 dígitos de precisión, o 10 dígitos o los que queramos.

La respuesta de un algoritmo puede variar de gran manera de acuerdo a factores que afecten esta respuesta, tales como número de datos a procesar, la metodología a utilizar, entre otros.

Un algoritmo realiza determinadas acciones definidas para la solución de un problema, y estos problemas suelen ser complejos. Por ello es necesario desarrollar el algoritmo por medio de un método que permita dar solución al problema en cuestión. Para que un algoritmo pueda ser introducido a una computadora debe ser:

-  Preciso, estar definido por pasos ordenados.
-  Definido, si se ejecuta n veces el algoritmo, se debe obtener el mismo resultado en toda ocasión.
-  Finito, debe tener un número finito de procesos.

Por lo tanto, podemos definir un algoritmo como un método para resolver un problema mediante una secuencia de pasos bien definidos, ordenados y finitos.

3.1.2 Escritura de Algoritmos

Existen diferentes maneras de escribir un algoritmo, por lo cual es importante decidir ¿cómo se estructurará?, ¿qué lenguaje se utilizará? El lenguaje de escritura del algoritmo se define por el diseñador. La escritura de un algoritmo debe ser conciso y preciso en el proceso.

Una vez que se tenga definido el algoritmo de manera sencilla y clara, es necesario poder transcribir el algoritmo diseñado a un lenguaje de programación. Para simplificar los programas se utilizarán datos sin **magnitudes** para que estos sean manejables.

Existe una gran cantidad de lenguajes de programación, estos han ido evolucionando con el paso del tiempo y algunos se han dejado de usar. Los lenguajes de programación utilizan conjuntos de caracteres “alfabeto” para comunicarse con las computadoras. En la actualidad la mayoría de las computadoras trabajan con diferentes tipos de conjuntos de caracteres donde destacan el código ASCII y el EBCDIC.

De la misma manera que los lenguajes humanos, los lenguajes de programación poseen una estructura y un significado. Estos lenguajes se pueden definir como un conjunto de reglas, símbolos y palabras definidas que permiten construir un programa. Algunos ejemplos de lenguajes de programación son el FORTRAN, BASIC, PASCAL, C, C++, LISP, ADA, entre otros.

Cada plataforma de programación tiene un lenguaje propio o usa alguno de los lenguajes anteriormente mencionados. Los lenguajes de programación se pueden clasificar de acuerdo a su uso, dentro de esta clasificación podemos encontrar:

-  Lenguajes desarrollados para el cálculo numérico. Tales como Mathematica y Matlab entre otras.
-  Lenguajes para sistemas. Como C, C++, entre otros.
-  Lenguajes para Instrumentación Virtual. Como LabVIEW.
-  Entre otros.

3.1.3 Representación de algoritmos

Los algoritmos suelen ser expresados de muchas maneras, una de ellas son el lenguaje humano, esto quiere decir que se representan las tareas por medio de oraciones cortas que permitan representar el algoritmo de manera ordenada y precisa, por más que se quiera acortar en este tipo de expresión, los algoritmos tienden a ser extensos y ambiguos. También es común representarlos con pseudocódigos, diagramas de flujo y en lenguaje de programación, permitiendo elegir al desarrollador la herramienta que más le beneficie o adapte a sus necesidades.

El usar pseudocódigos y diagramas de flujo evita muchas ambigüedades del lenguaje humano, ya que son expresiones estructuradas y definidas exclusivamente para desarrollar algoritmos.

3.1.3.1 Pseudocódigos

Es un lenguaje de especificación de algoritmos y no puede ser ejecutado por una computadora, la ventaja del pseudocódigo es que el programador se puede concentrar en la lógica y en las estructuras de control, y no preocuparse de las reglas de un lenguaje de programación en específico. Es fácil de modificar y puede ser rápidamente traducido a un lenguaje de programación. Representa acciones sucesivas de un lenguaje similar al humano. [30] Presenta la ventaja de ser más compacto que los diagramas de flujo, más fácilmente se pueden escribir instrucciones complejas. El pseudocódigo no está regido por ningún estándar, esto quiere decir es de estructura abierta, pero debe de ser organizado y secuencial.

3.1.3.2 Diagrama de Flujo

Son representaciones graficas de secuencias de pasos a realizar. Cada operación se representa mediante un símbolo normalizado por el Instituto Norteamericano de

Normalización (ANSI por sus siglas en inglés). Dentro de cada símbolo o caja se indican las operaciones que deben ser realizadas. Las líneas de flujo indican el orden de ejecución del algoritmo. Los diagramas de flujo suelen ser usados solo para representar algoritmos pequeños, ya que cada línea de código se representa con el símbolo y abarca mucho espacio. En la Tabla III-1 se representan cada elemento que puede ser utilizado para elaborar el diagrama de flujo. Para ejemplo véase la Figura I.13 del apartado 1.10.2.

Significado	Símbolo	Significado	Símbolo
Datos		Decisión	
Proceso alternativo		Impresión	
Proceso		Conector	
Función o subrutina		Conector externo	
Datos almacenados		Ciclo preparación	
Salida por pantalla		Entrada por teclado	
Terminador		Dirección de flujo	

Tabla III-1 "Símbolos que componen el Diagrama de Flujo" [30]

3.2 Plataforma Informática

Una plataforma es un sistema que sirve como base para ejecutar determinadas aplicaciones compatibles con este sistema. Una plataforma informática puede ser la arquitectura del hardware, son los lenguajes de programación y sus librerías en tiempo de ejecución, etc.

Una plataforma es una herramienta que permite ejecutar una aplicación compatible con esta. Por lo tanto, una plataforma de programación puede ser el mismo lenguaje de programación o una herramienta que permita desarrollar un programa y poder ejecutarlo en esta.

3.2.1 LabVIEW

LabVIEW es una herramienta de programación gráfica. Este programa está orientado para aplicaciones de control de equipos electrónicos usados en el desarrollo sistemas de Instrumentación Virtual. Por este motivo los programas creados en LabVIEW se guardarán en ficheros llamados VI y con la misma extensión. De la misma manera se le da nombre a sus dos ventanas principales como lo es su Panel Frontal (parte que vera el usuario del programa) y el Diagrama de Bloques (parte donde se realiza la programación). Estos elementos están conectados a través de los terminales (elementos de entrada y salida de datos). [26]

La programación en LabVIEW es en un lenguaje Grafico, donde las estructuras de los algoritmos desarrollados en esta plataforma suelen parecerse a un diagrama de flujo, ya que los elementos que constituyen el programa están conectados con forma de circuitería y el procesamiento de la información sigue un orden definido. En la Figura III.1 se muestra la caratula que el usuario del programa puede ver. Mientras que en la Figura III.2 se muestra el Diagrama de bloques donde se pueden ver las conexiones de los componentes del programa que permite el funcionamiento del mismo. Esta parte es la que el programador utiliza durante el diseño del programa para dejarlo a punto y poder ser utilizado por el usuario de manera sencilla y practica por medio del panel frontal.

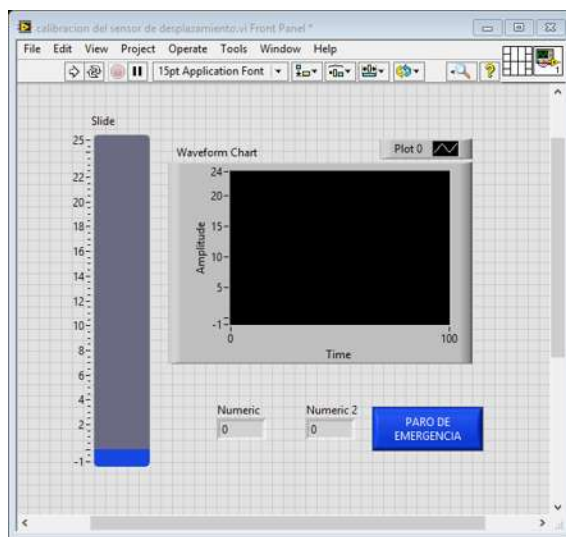


Figura III.1 "Panel Frontal"

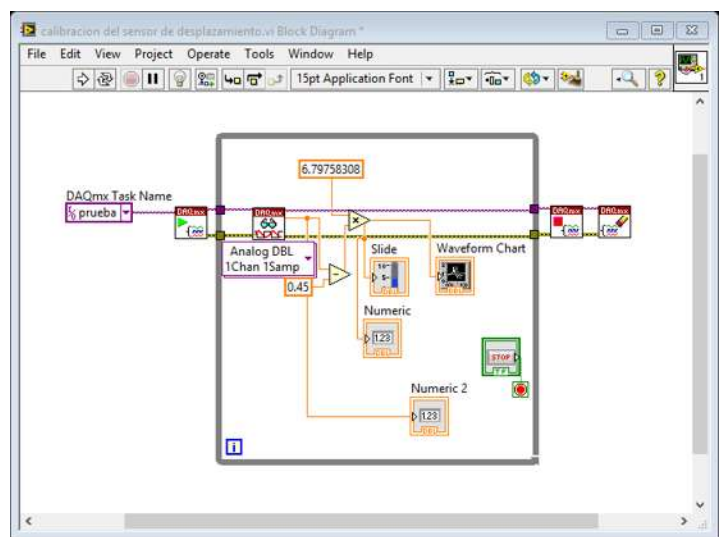


Figura III.2 "Diagrama de Bloques"

En las imágenes anteriores se muestran tanto el panel frontal como el diagrama de bloques, donde ambos elementos del programa están conectados por medio de los terminales y donde el usuario podrá manipular o ver los resultados obtenidos por el programa en proceso.

3.2.1.1 Terminales

Los terminales son elementos del programa que se pueden usar dentro del panel frontal, estos elementos son de dos tipos, indicadores o controladores. Los controladores son elementos que permiten la entrada de datos y los indicadores la salida de información. Estos elementos se clasifican según su funcionalidad y los pueden seleccionar y fijar en el orden que se desee en el panel frontal, permitiendo un mejor manejo de los elementos que componen el programa.

Como se muestra en la Figura III.3 los terminales se obtienen del menú de terminales o Paleta de control, donde en este menú se tienen submenús donde se clasifican los terminales según su función y tipo de dato teniendo una gran variedad de iconos como se muestra en la Figura III.4.

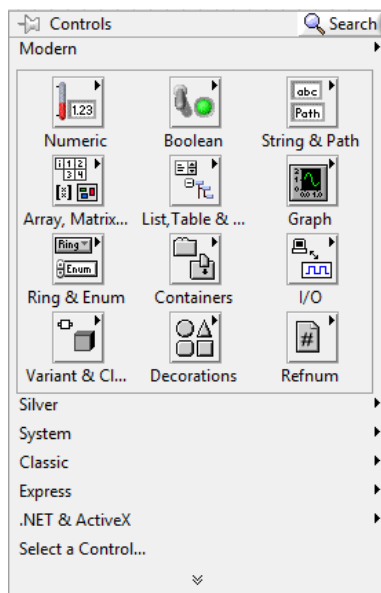


Figura III.3 "Paleta de controles"

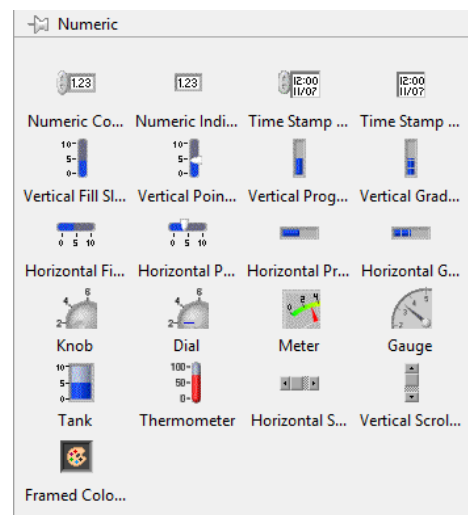


Figura III.4 "Submenú Tipo Numérico"

3.2.1.2 Funciones

Las funciones son los componentes que estructuran al programa, estos elementos solo aparecen en el diagrama de bloques, los cuales se clasifican según su función, son estos los más utilizados, puesto que durante el desarrollo del programa los elementos que hacen funcionar al programa son los que se encuentran dentro del diagrama de bloques. De la misma manera que la paleta de control, existe la paleta de funciones, como se muestra en la Figura III.5 existen los submenús dentro de la paleta según el tipo de elemento. En la Figura III.6 se presentan los submenús y teniendo elementos necesarios para el desarrollo de un programa.

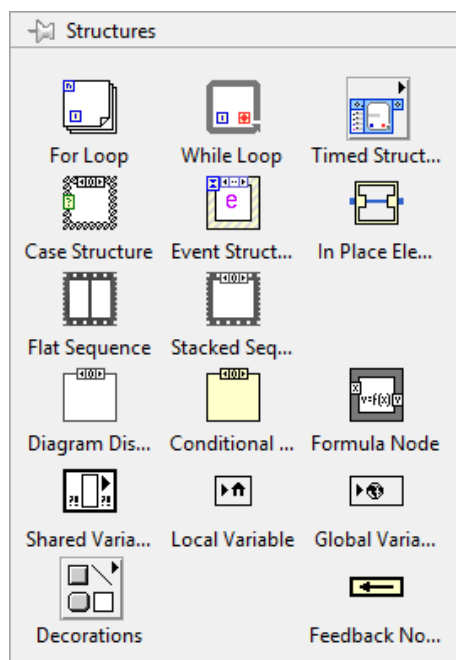


Figura III.5 "Paleta de funciones"

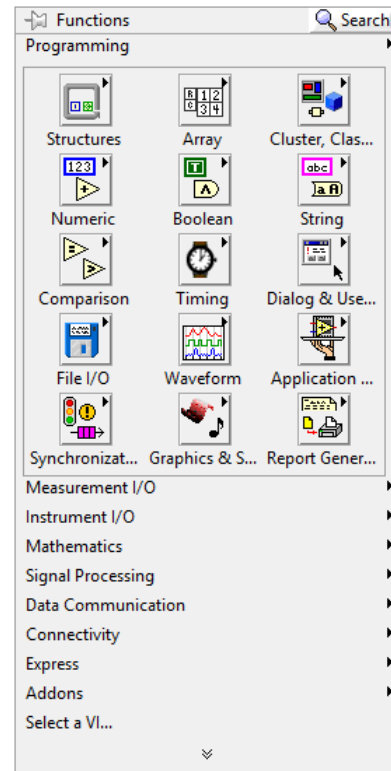


Figura III.6 "Submenú de Estructuras de Control"

3.2.1.3 Flujo de ejecución

Como se mencionó anteriormente LabVIEW usa un lenguaje de programación de tipo gráfico y es llamado lenguaje G. La mayoría de los lenguajes se basan en una programación imperativa que es simplemente una sucesión de operaciones. Sin embargo, el lenguaje G no usa una programación imperativa sino una ejecución basada en el flujo de datos. [24]

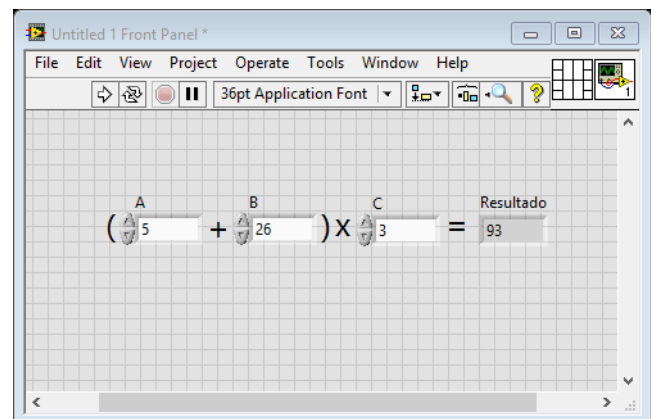


Figura III.7 "Panel Frontal Multiplicación"

Un programa en LabVIEW consiste en una serie de funciones conectadas mediante cables, donde los datos fluyen por los cables. Una función solo podrá ejecutarse cuando este tenga disponibles todos los datos de entrada. Esta forma de ejecución favorece el paralelismo y es más apropiada para sistemas multiprocesador y multihilo. Por lo tanto, al ejecutarse un programa este llamara los valores de los controles que son los datos de entrada, siguiendo por el procesamiento de los datos, el cual depende de acuerdo a las necesidades de cada programa y terminando con los indicadores, esto quiere decir que los terminales inician y terminan el proceso en ejecución.

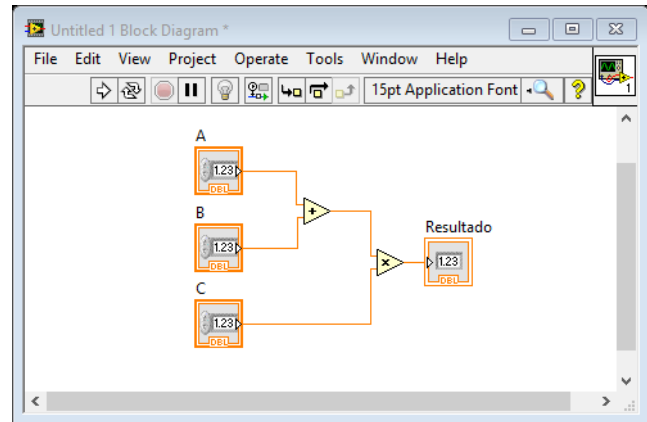


Figura III.8 "Diagrama de Bloques Flujo"

El flujo también está definido según las necesidades del programa es decir si un programa requiere multiplicar el valor de un control por el resultado de dos valores primero se realiza la suma de los valores para posteriormente poder multiplicar dicho valor. Como se muestra en la Figura III.7 el usuario introduce los valores para ejecutar el programa e iniciar para ejecutarlo y en la Figura III.8 se muestra el diagrama de bloques con los controles como valores de arranque y las operaciones suma y multiplicación como el proceso de la información y el resultado como el indicador o información de salida.

3.2.2 Tipos de datos

Los tipos de datos son las propiedades de un valor que determina su dominio, que operaciones se le pueden aplicar y como es representado internamente por la computadora. Todos los valores que aparecen en un programa tienen un tipo. Como se muestra en la Figura III.9 dentro de LabVIEW se clasifican los datos en:

- Booleano, este tipo de datos tiene solo dos posibles valores, verdadero y falso. Suelen usarse en controles con forma de botón o como resultado al evaluar una expresión (estos datos se representan con color verde).
- Numérico, estos datos se deben distinguir entre números enteros (color azul, de 8, 16, 32 y 64 bits), números racionales y números complejos (color naranja, de 32 bits para precisión simple, 64 bits para los de doble precisión).
- String, estos datos son destinados a texto, son cadenas de caracteres (color rosa)
- Path, sirven para indicar rutas a directorios o ficheros.
- Arreglos, son el conjunto de datos ordenados y de tipo determinado.

- Clusters, al igual que los arreglos son conjunto de datos, a diferencia de que puede almacenar varios tipos de datos, entre otros.

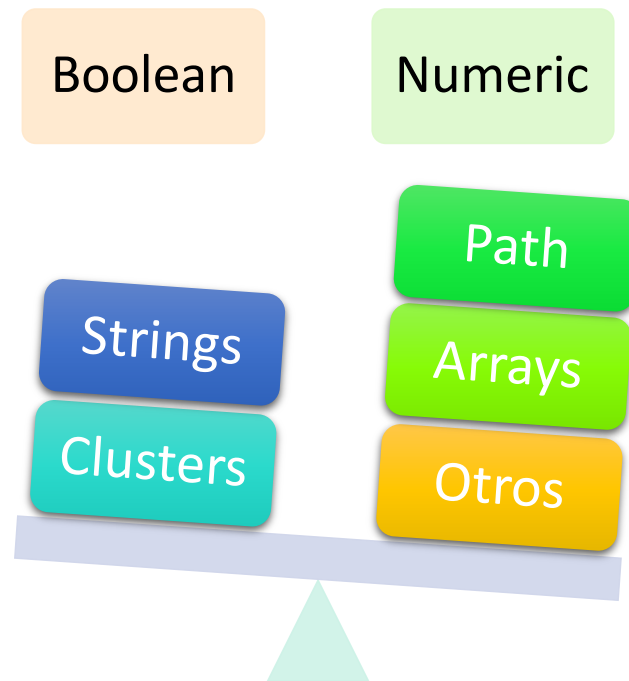


Figura III.9 "Tipos de Datos"

3.2.3 Estructuras de control

Las instrucciones de control son una de las herramientas básicas de todo lenguaje de programación y permiten a un programa ejecutar un código de forma condicional o repetirlo cierto número de veces.

En LabVIEW estas instrucciones son estructuras que encierran en su interior el código que ejecutan. Se encuentran en el menú de Funciones *Programming > Structures*. [26]

3.2.3.1 SEQUENCE

En los lenguajes tradicionales basados en texto, el orden de ejecución se corresponde con el orden en que las instrucciones están escritas. Las estructuras SEQUENCE sirven para establecer el orden de ejecución del código que está en su interior. La estructura secuencia tiene apartados o *frames* ordenados y de orden secuencial, es decir, se ejecutan en orden de secuencia. Para conectar un apartado con otro se utilizan túneles de datos para compartir información.

Existen dos tipos de secuencias STACKED SEQUENCE y FLAT SEQUENCE estos se diferencian por el apartado que muestran, el FLAT SEQUENCE como se muestra en la Figura III.11 permite tener los apartados de manera visible y se ven uno a continuación del siguiente y

el orden de ejecución será de izquierda a derecha, mientras que el STACKED SEQUENCE Figura III.10 en el menú de la parte superior indica la numeración del apartado que se muestra y el número total de apartados y la opción de cambiar a otro, permitiendo mostrar un apartado a la vez.

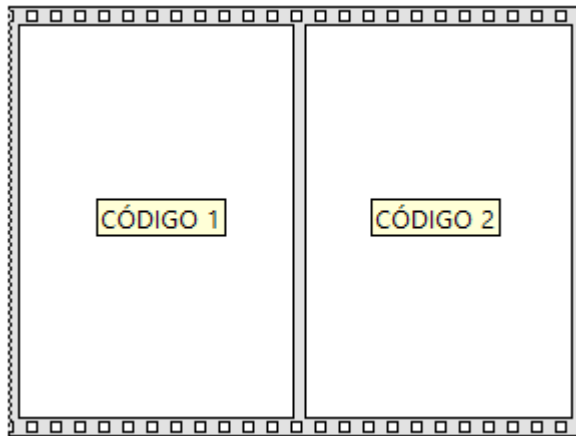


Figura III.11 "FLAT SEQUENCE con dos apartados"

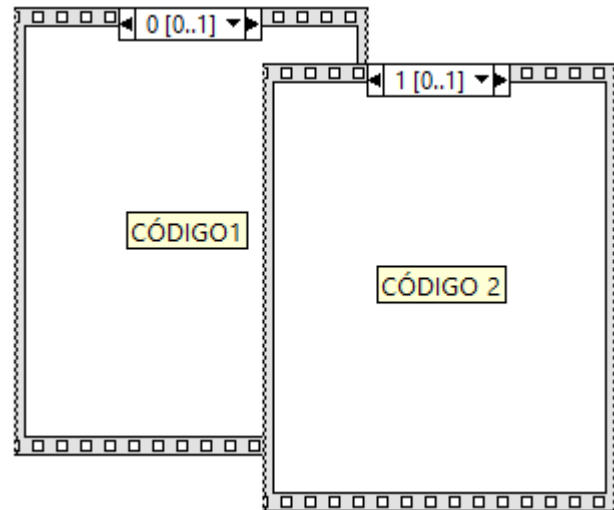


Figura III.10 "STACKED SEQUENCE"

3.2.3.2 CASE

La estructura CASE es el equivalente a varias de los lenguajes basados en texto: *IF*, *SWITCH* y *TRY*. Su utilidad es ejecutar un código u otro dependiendo de una condición. Como se muestra en la Figura III.12 al igual que la estructura Secuencia, la estructura CASE tiene un menú en la parte superior donde se pueden elegir los códigos que se ejecutaran de acuerdo al caso que se elige. Para elegir la opción que se ejecutara se define por el terminal que aparece a lado izquierdo marcado con el símbolo ?. La decisión de la opción a elegir puede ser dato de tipo booleano, numérico, string o clusters de error, pero se requiere ser del mismo tipo de dato que la opción que aparece en el menú de la estructura. También utiliza túneles para conectar el código dentro de la estructura con el exterior.

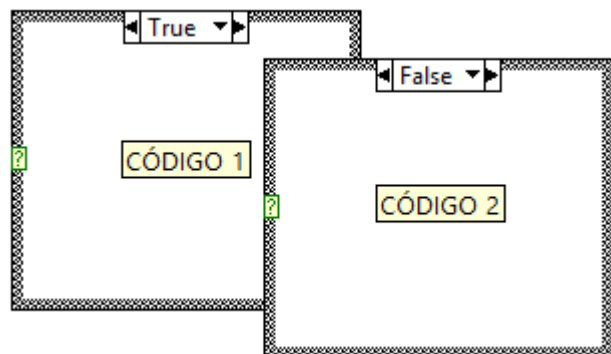


Figura III.12 "Estructura CASE"

3.2.3.3 WHILE

La estructura WHILE es un ciclo recursivo que se ejecutará hasta que el código en su interior cumpla una condición, que será evaluada en cada iteración.

En la Figura III.13 se pueden observar que la estructura cuenta con dos terminales, terminal de iteración y terminal de stop. Siendo el terminal de iteración el cuadrado con la letra i de color azul, donde esta terminal

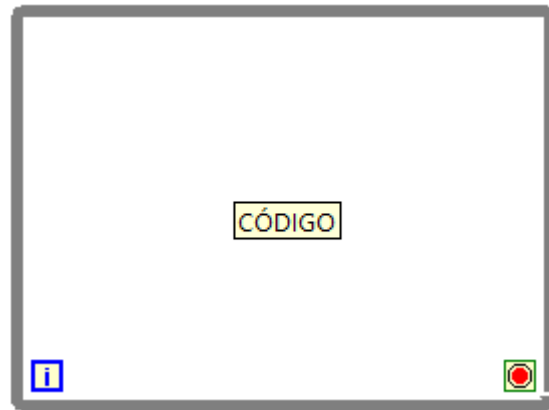


Figura III.13 "Estructura CASE"

tomara el número de las iteraciones del ciclo, con inicio en 0. El terminal de stop es el cuadrado verde con un círculo dentro color rojo, a este terminal se le conecta un valor booleano. Mientras la condición se evalué como verdadero seguirá ejecutándose el ciclo, hasta cambiar a un valor falso el programa finalizará. De la misma manera que las estructuras anteriores, para conectarse con las partes externas a la estructura utiliza túneles. Cabe mencionar que se requiere fijar la condición de paro, ya que sin esta condición el proceso no se ejecutara.

3.2.3.4 FOR

La estructura FOR es muy parecido al ciclo WHILE. Esta estructura ejecuta el código N número de veces, a diferencia del anterior este número de ciclos es fijado por el programador. Como se muestra en la Figura III.14 también cuenta con dos terminales, la terminal de iteración y la terminal de cuenta, la de iteración sigue el mismo principio fijado en la estructura anterior, y el terminal de cuenta es el cuadrado con una N dentro de color azul, es el terminal en el cual se fijará el número de ciclos que se utilizaran en el proceso.

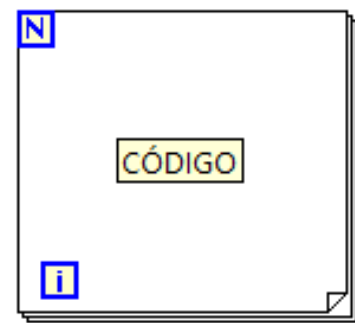


Figura III.14 "Estructura FOR"

Existen más estructuras de control que permiten desarrollar de mejor manera un programa de acuerdo a sus condiciones y a sus necesidades en el proceso, las anteriormente mencionadas son las más usadas. Para conocer más sobre las estructuras de control de LabVIEW se puede consultar la bibliografía de referencia, o en la misma plataforma LabVIEW usando el comando *Help*.

3.2.4 Variables y constantes

Una variable es un objeto o conjunto de datos cuyo valor puede cambiar durante el desarrollo del algoritmo o ejecución del programa. Una variable puede ser de cualquier tipo de dato mencionados en el apartado 3.2.2. Las variables se identifican de acuerdo a su nombre y el tipo que dato.

Existen dos tipos de variables, las variables de entrada y las variables en el proceso. En LabVIEW existen las variables locales, que están asociadas a los controles e indicadores presentes en el programa, mediante esta se puede leer y escribir el valor de ese control o indicador. Donde al crear la variable local se debe definir si será de lectura o escritura. También se cuenta con variables globales que se usan para compartir información entre distintos VI que se ejecutaran en la misma máquina. Y por último se cuenta con las variables compartidas que permiten la comunicación entre programas que pueden estar en ordenadores distintos.

3.2.5 NI DAQmx Software

El software de NI DAQmx es un controlador de adquisición de datos y que brinda mayor productividad y rendimiento en el desarrollo de aplicaciones para una DAQ. Este controlador está diseñado para cada aspecto de su sistema DAQ, y es configurable desde la plataforma LabVIEW.

NI DAQmx es el software que permite obtener datos desde una tarjeta de adquisición y puede funcionar con LabVIEW, SignalExpress, LabWindows/CVI, C/C++, Visual Basic, Visual Basic .NET. Este Software agrega Submenús extras para controlar los datos proporcionados por la tarjeta de adquisición de datos. [22]

Esta herramienta es actualizada constantemente con nuevas versiones descargables desde la página de NI, que permite tener un mejor desarrollo de la tarjeta de adquisición de datos, por ello es que NI con esta herramienta y LabVIEW se eligieron para el desarrollo del proyecto, por ser uno de los grandes desarrolladores en la Instrumentación Virtual.

Al instalar el software NI DAQmx se agregan funciones de programación, en específico para adquisición de datos y poder procesar estas señales. Al instalar la aplicación nos aparecerá un nuevo apartado en la barra de funciones como se muestra en la Figura III.15 y Figura III.16, que nos permitirá utilizar las demás funciones

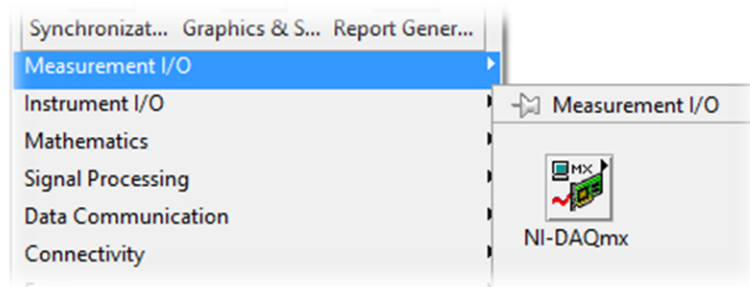


Figura III.15 "NI DAQmx"

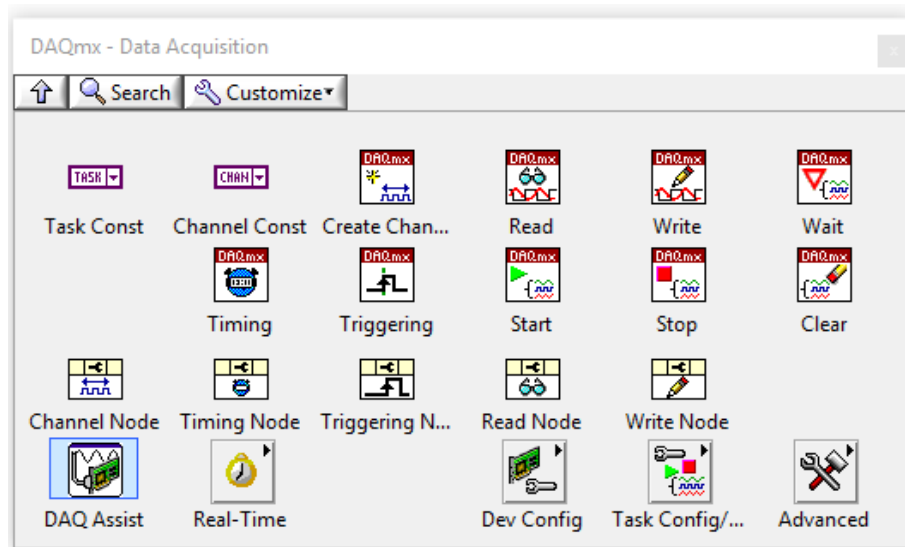


Figura III.16 "Funciones DAQmx - Data Acquisition"

Las funciones más utilizadas en esta investigación son Task Const, Read, Write, Start, Stop y Clear.

A. DAQmx Task Const. Esta función permite configurar la adquisición de datos. Configura los puertos de la DAQ para procesar la información, en esta función se configura el tipo de señal que se desea adquirir y el puerto de la DAQ por el cual se obtendrá esa señal. Al configurar esta función se requiere seleccionar las propiedades deseadas:

- ✓ Adquisición o generación de señal
- ✓ Tipo de señal analógica, digital, contador o TEDS
- ✓ Dependiendo del tipo de señal se puede seleccionar lo que se desea medir (Voltaje, Temperatura, Corriente, Frecuencia, etc.)
- ✓ Seleccionar el puerto de la DAQ por el cual se desea obtener la señal de acuerdo al tipo señal que sea.
- ✓ La creación de un Task permite guardarlo con un nombre deseado, y así tener un menú de Task propios del usuario.

- ✓ Seleccionar rango del voltaje máximo y mínimo de entrada
- ✓ La configuración del Terminal (RSE o Diferencial)
- ✓ La temporización de la adquisición (1 Sample [On Demand], 1 Sample [HW Timed], N Samples y Continuous Sample)

B. DAQmx Read. Con este VI se puede leer la señal proporcionada por el Task, para utilizarla en la tarea especificada. En esta función se requiere seleccionar el tipo de señal que se desea leer, debe de contener la misma configuración que se realizó al Task, el tipo de señal, número de canales, etc.

C. DAQmx Write. El usar este VI permite escribir muestras para la tarea o canal especificado. La generación de la señal puede empezar inmediatamente o retrasarse, en cuyo caso solamente se escriben los datos, no se muestran al exterior.

D. DAQmx Start Task. Transforma explícitamente una tarea al estado de ejecución. En el estado de ejecución, la tarea realiza la adquisición o generación especificada.

E. DAQmx Stop. Detiene la tarea.

F. DAQmx Clear. Libera la tarea especificada.

Además de estos VI, podemos encontrar más, como se muestran en la Figura III.16 "Funciones DAQmx - Data Acquisition". DAQmx tiene una gran cantidad de números de propiedades que permiten tener el control deseado sobre la DAQ.

3.2.6 Tipo de señales

En LabVIEW por medio de la función NI DAQmx usando una tarjeta de adquisición de datos recordando lo mencionado en el apartado 2.3.4 se obtienen y pueden usarse diferentes tipos de señales y en esta investigación nos enfocaremos en la adquisición de señales analógicas y señales digitales.

3.2.6.1 Señales analógicas

Las señales analógicas son variaciones continuas en el tiempo, se pueden percibir en el ambiente, como es el caso de la luz solar, el sonido, el viento, etc.

Las señales eléctricas analógicas son variaciones que evolucionan en el tiempo en forma analógica a alguna variable física. Estas variaciones se presentan en forma de corriente, tensión o carga eléctrica. Varían en forma continua entre un límite inferior y un límite

Los parámetros de las señales digitales son altura de pulso, duración y frecuencia de repetición. La señal básica es una onda cuadrada y las representaciones se realizan en el dominio del tiempo, como se muestra en la Figura III.18.

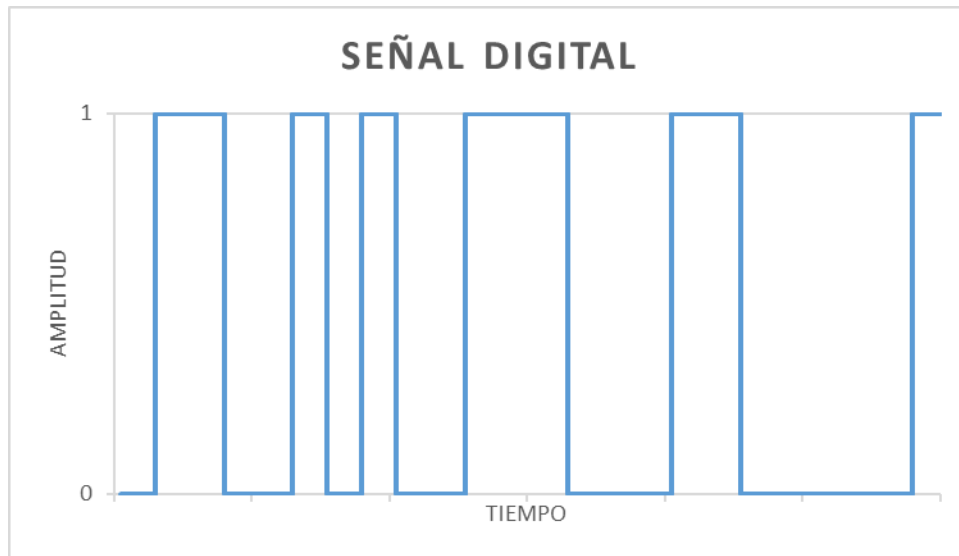


Figura III.18 "Señal Digital"

3.2.6.3 Conversión a digital

Una computadora o cualquier sistema de control basado en un microprocesador no puede interpretar señales analógicas, ya que solo utiliza señales digitales. Por este motivo es necesario transformar las señales analógicas a digitales. [32] En la Figura III.19, se muestra un ejemplo de cómo se transforma una señal analógica a digital, si el valor de la señal al momento de la lectura de información está por debajo de un determinado valor referencial,

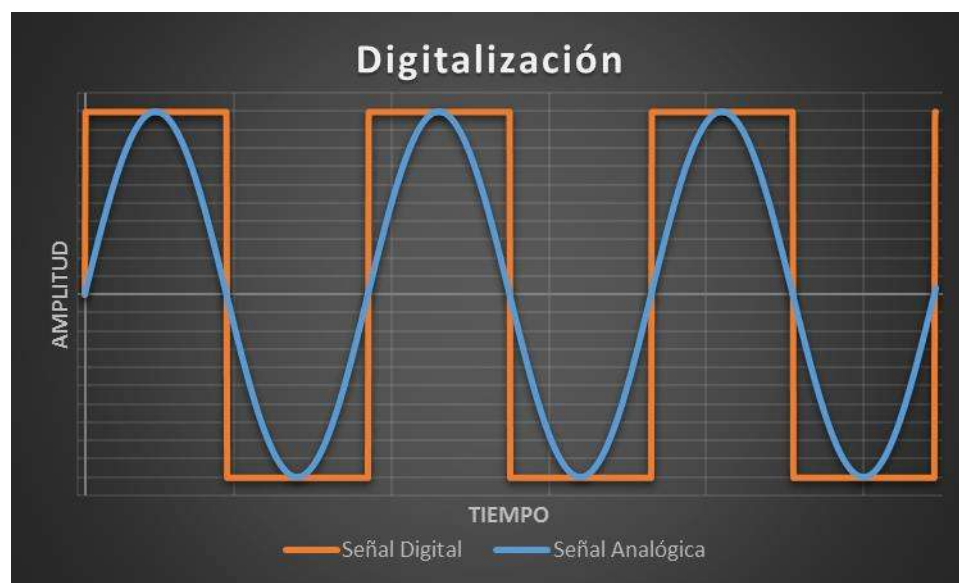


Figura III.19 "Digitalización de Señal"

la señal digital toma un valor mínimo ya sea numérico normalmente 0 o un valor Booleano, según su condición puede ser verdadero o falso. Mientras que al momento que la señal analógica toma un valor mayor o por encima del valor referencial, la señal digital toma el valor máximo comúnmente 1 o el caso contrario del valor booleano.

El paso clave en la adquisición de datos es la digitalización. Para ello, se emplea un circuito de muestreo y retención que captura una tensión de la entrada y la mantiene estable el tiempo necesario para que el conversor analógico a digital pueda calcular el valor de su salida. [26]



Figura III.20 "Digitalización de señal analógica a varios niveles digitales"

Para poder realizar la digitalización se requiere muestrear la señal en un determinado periodo de muestreo. Donde muestrear una señal es obtener un valor de la misma en ciertos momentos, esos valores son muestras de la señal. En una adquisición continua se puede considerar por simplicidad que el tiempo entre una muestra y la siguiente será constante, esto es lo que se denomina frecuencia de muestreo. [26]

Al realizar el muestreo se obtiene el valor de la señal donde depende de los niveles que se configure la señal digital tendrá está en función del número de bits de información. Si el conversor tiene muchos niveles para codificar la señal, necesitará más bits para codificar cada nivel. En la Figura III.20 se muestra un ejemplo de conversión de señal analógica a señal digital de 8 niveles.

3.3 Método de desarrollo de software en espiral y diseño Modular

Un programa es un grupo de instrucciones escritas en un lenguaje especializado, cuya finalidad es indicarle a una maquina como ejecutar una acción, en otras palabras, un algoritmo se puede programar para darle indicaciones a una computadora. Para desarrollar de manera organizada estas indicaciones se requiere de una metodología, es decir, seguir una metodología de desarrollo de software.

Los métodos de desarrollo de software son representaciones simplificadas de la metodología de desarrollo del sistema. Estos modelos no son descripciones definitivas de desarrollo de un software. Sin embargo, son procedimientos que suelen ser útiles para el desarrollo e implementación del sistema. Algunos de los diferentes modelos de desarrollo de software son:

-  Codificar y corregir
-  Modelo en cascada
-  Desarrollo evolutivo
-  Desarrollo formal de sistemas
-  Desarrollo basado en reutilización
-  Desarrollo incremental
-  Desarrollo en espiral

Cada desarrollo de software requiere una metodología particular de resolver el problema central. El modelo en espiral propuesto por Barry Boehm de tipo evolutivo consta de una serie de ciclos. Cuando se han cumplido los objetivos de un ciclo, se pasa al siguiente. Este método consta de cuatro etapas, por cada ciclo como se muestra en la Figura III.21, las cuales son:

-  **Se determina los objetivos** para esa iteración, se proponen alternativas y se detectan posibles restricciones.
-  **Se analiza los riesgos**, se decide las alternativas en el proceso y se valora las situaciones para continuar.
-  **Desarrollo** del prototipo en las primeras iteraciones y en las ultimas se desarrollará el sistema completo con todos los detalles. Al finalizar esta etapa se requiere comprobar que el sistema cumpla con los requisitos programados.
-  **Evaluación de los resultados** obtenidos para la fase en proceso y del sistema obtenido, para planificar la siguiente iteración.

La ventaja de este modelo es que al final de cada iteración se tiene una versión del producto.
[24]

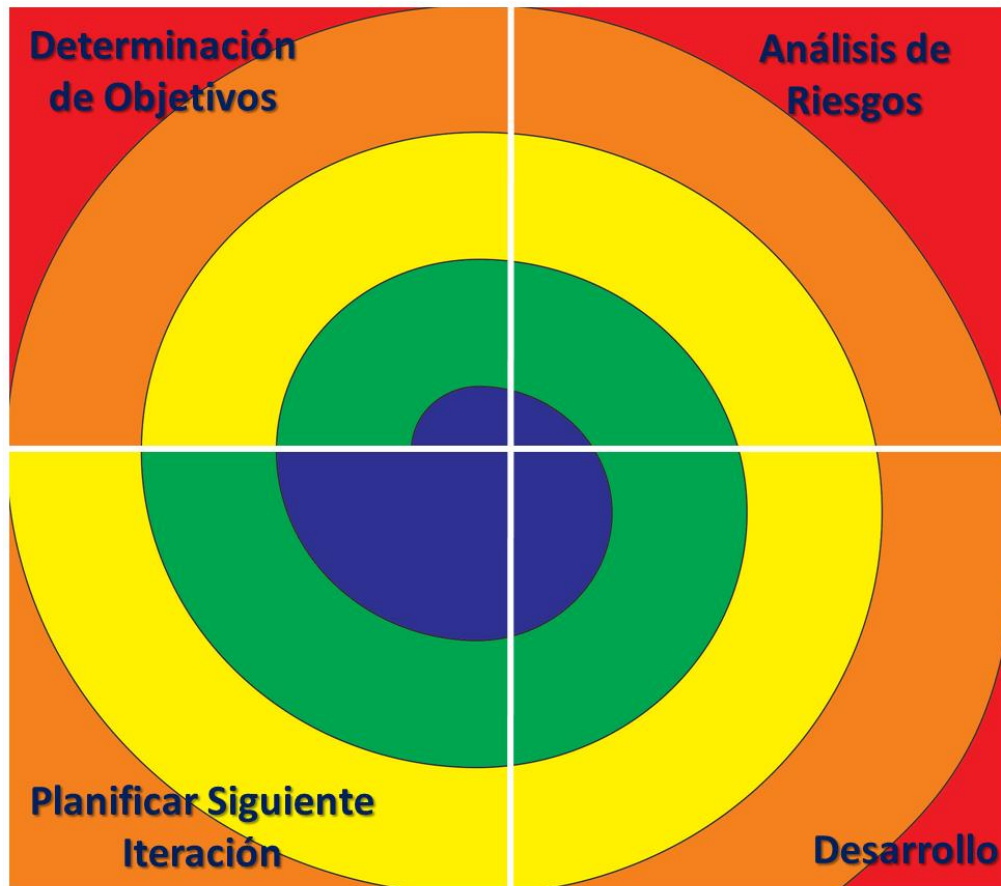


Figura III.21 "Método de desarrollo espiral"

Los problemas complejos se resuelven mejor utilizando un diseño descendente, que usa una estrategia del tipo divide y vencerás, para dividir un problema en un conjunto de sub-problemas más sencillos. Los sub-problemas se resuelven mediante sub-algoritmos que se implementan en sub-programas o módulos. [26]

Este estilo de programación se conoce como diseño modular, en este diseño las unidades de un programa son independientes unas de otras. Esta metodología permite:

- ✚ Localizar más fácilmente los errores, cada módulo se puede probar independientemente.
- ✚ Entender más fácilmente los programas, cada módulo se puede estudiar independientemente.

Por lo tanto, el diseño Modular permite realizar subrutinas de tareas que en conjunto conforman el problema para el cual se desarrolla el algoritmo, para resolver estos sub problemas se utiliza una de las metodologías de desarrollo de programación.

Capítulo IV.

Desarrollo de Algoritmo para la Obtención de IRI

Como se mencionó en la introducción del presente documento, el objetivo central de esta investigación es el desarrollo de un software que permita obtener mediciones del IRI de cualquier vialidad por medio del equipo EMIRI UMICH 001, ya que este equipo cuenta con instrumentación virtual basada en una tarjeta de adquisición de datos de NI DAQ 6009 se utilizará la plataforma de LabVIEW para el desarrollo del software. Siendo esta investigación parte de la primera Etapa de desarrollo del “Proyecto IRI de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo”, en específico de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil, en la Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres.

Donde las Fases de dicho proyecto están conformadas como se muestra en la Figura IV.1 por una primera etapa de desarrollo del equipo EMIRI UMICH 001 para mayor información revisar la referencia [1], el desarrollo del software que se presenta en esta tesis y la calibración del equipo. Una segunda fase es la obtención de lecturas de las vialidades con el equipo ya funcional. Una tercer y cuarta etapa constan en continuar la investigación y agregarle al EMIRI UMICH sensores láser, GPS y procesar la información obtenida con estos sensores y con un acelerómetro para lo cual se desarrollará una segunda versión del software que permita incluir estos sensores, hacer una comparativa entre los valores obtenidos con el mecanismo tipo respuesta y los sensores láser para volver al EMIRI UMICH 001 en un equipo tipo perfilógrafo de alta velocidad. El objetivo central del proyecto es obtener valores de IRI de las vialidades, con una certificación del equipo de alta definición para la medición de IRI.

La metodología utilizada en el desarrollo de esta investigación fue el modelo espiral y se le añadió el diseño modular, mencionados en el Sub capítulo 3.3. En el diseño del algoritmo se establecieron los posibles módulos o sub algoritmos que se utilizarán en el desarrollo del mismo, y juntos pudieran desarrollar la tarea deseada en el desarrollo del mismo, y a la vez se desarrollaron varias iteraciones en la creación de cada módulo hasta llegar a la versión

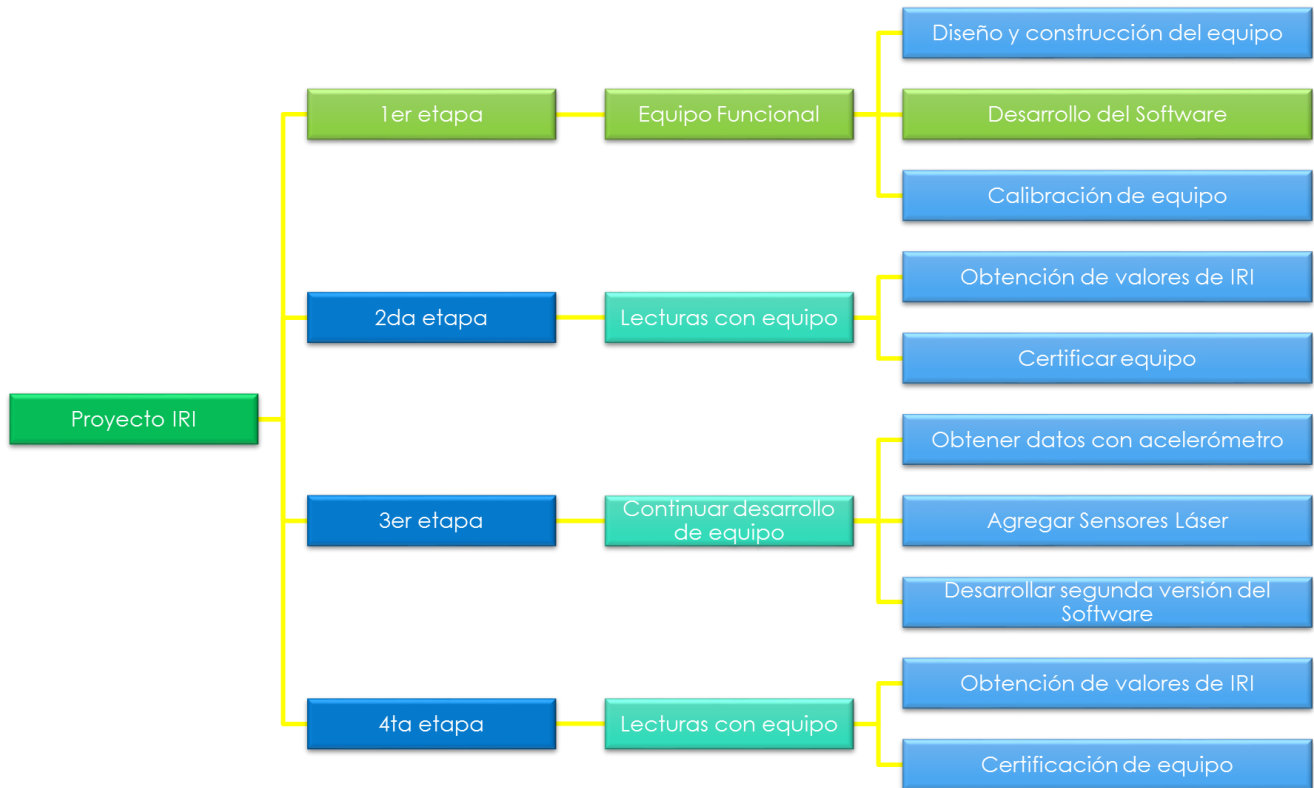


Figura IV.1 "Fases PROYECTO IRI UMICH"

final del proceso, y así conformar de manera completa el algoritmo llegando al funcionamiento deseado del sistema.

Se requiere una serie de pasos a tomar en cuenta para el desarrollo de un programa. En esta investigación se quiere desarrollar un software para la medición del Índice de Rugosidad Internacional por medio del Equipo Medidor de IRI de la Universidad Michoacana para la Primera Etapa del proyecto.

4.1 Determinación de Objetivos

El objetivo de la Investigación es Obtener el valor de IRI con el EMIRI UMICH 001 y con la información presentada en el Capítulo I conocemos que las variables físicas a medir son la respuesta del vehículo al transitar por una vialidad, la longitud de tramo a la que se genera dicha respuesta y la velocidad promedio de circulación del equipo en el tramo anteriormente mencionado, estas variables son también mencionadas en el apartado 2.4.1, estas variables obtenidas con los sensores mencionados en el apartado 2.4.2 que son el sensor de efecto hall y dos sensores de desplazamiento lineal uno por cada rodada del equipo. Cabe recordar que se medirá la respuesta del vehículo ya que el EMIRI UMICH 001 se diseñó para que en la primera etapa del proyecto sea un equipo tipo respuesta para la medición del IRI.

4.2 Planificación y análisis de Riesgos

Ya que el EMIRI UMICH 001 se diseñó como un equipo con Instrumentación Virtual utilizando una tarjeta de adquisición de datos de NI se decidió utilizar LabVIEW como plataforma de desarrollo del programa para la obtención de IRI, siendo esta plataforma desarrollada de la misma manera por NI.

Lo primero que se desarrolló fue la investigación sobre el funcionamiento de LabVIEW mencionada en el apartado 3.2.1, una vez realizada esta investigación fue necesario conocer la información proporcionada por los sensores para hacer el procesamiento de la información. Cabe recordar que en este sistema de Instrumentación Virtual la tarjeta de adquisición de datos alimenta a los sensores con un voltaje y el sensor le regresa a la tarjeta una señal, la cual es obtenida en la plataforma LabVIEW por medio de las funciones Measurement de NI DAQmx. Con el NI DAQmx se puede configurar la señal desde la alimentación que se le proporcionará a los sensores, y acondicionar la señal al tipo deseado.

Una información importante es conocer el tipo de sensor que se utilizará, para conocer sus características de funcionamiento, siendo las más importantes, el voltaje al que trabaja y de qué tipo es la señal que regresa a la tarjeta de adquisición, digital o analógica. Dependiendo de esa información será conectada a la DAQ y se configurará el programa de manera adecuada para obtener la información. Siendo los tres sensores a utilizar en esta investigación alimentados por 5 volts y los mismos regresan una señal analógica.

4.2.1 Sensor de Desplazamiento Lineal

Una vez obtenido lo anterior se requirió programar y calibrar el sensor para la obtención real de la información. En el caso de los sensores de desplazamiento lineal se buscó que el sensor diera los valores obtenidos de acuerdo a las mediciones reales de la variable física. Como se puede observar en la Figura IV.2 se obtuvo el máximo voltaje que puede proporcionar el sensor y el mínimo, es decir conocer entre que umbrales máximo y mínimo nos proporcionaba una lectura dicho sensor. Encontrando como valor mínimo 0.45V como valor mínimo de lectura y 3.76V el valor máximo de lectura. La distancia en la cual el sensor puede captar el campo magnético del imán es de 22.5 cm a lo largo del sensor y a una distancia



Figura IV.2 "Proceso de calibración de Sensor de desplazamiento lineal"

no mayor a 3.5 cm de separación entre el sensor y el imán. Esto quiere decir que el valor donde el sensor registraría un desplazamiento 0 sería cuando el sensor recibiera la señal de 0.45V y el desplazamiento a 22.5cm sería cuando proporcionara 3.76V.

Conociendo lo anterior, se prosiguió a realizar la conversión de Volts a centímetros. Como el valor mínimo de lectura es 0.45V, a la señal recibida por el sensor se le resta 0.45V para obtener el 0 como origen. Esto quiere decir que al máximo valor de 3.76V se le resta 0.45V y se obtiene un valor de 3.31V como la variación que existirá en los valores que proporcione el sensor de desplazamiento lineal, siendo este el valor para 22.5cm. Por lo tanto, realizando una regla de 3 simple:

$$\begin{aligned} 3.31V &= 22.5cm \\ 1V &= x? \end{aligned}$$

De la relación, se despeja x :

$$x = \frac{22.5cm \times 1V}{3.31V}$$

Obteniendo:

$$x = 6.79758308 \text{ cm}$$

Por lo tanto, cada Volt representa 6.79758308 cm, esto quiere decir que, al variar el voltaje dentro de los umbrales antes mencionados, se obtendrá el valor real de desplazamiento en cm.

Para esta investigación es necesario presentar un eje de referencia en el cual exista desplazamiento en dirección sobre y debajo del eje. Por ello, fue necesario fijar este eje lo más cercano posible al centro del sensor y obtener este valor como referencia para partir de ahí y los desplazamientos hacia arriba manejarlos con valor positivo y los desplazamientos hacia abajo como valores negativos. Al colocar al centro del sensor el campo magnético, obtenemos una lectura de 11.125cm o 1.655V, por lo tanto, lo siguiente fue restarle 1.655V al valor obtenido en la lectura antes de convertirlo a centímetros.

Esto quiere decir que si se obtenía una lectura de 2.75V como respuesta del sensor al ser excitado con el campo magnético, para conocer la distancia a la que se encontraba del eje de referencia se realiza el siguiente proceso:

$$DER = RVCM ((SA - UM) - CER)$$

Donde

DER = Distancia al eje de referencia

RVCM = Relación Volts a cm

SA = Señal analógica (señal proporcionada por el sensor)

UM = Umbral para el valor mínimo de variaciones de voltaje

CER = Constante para obtener la distancia al eje de referencia

Sustituyendo:

$$DER = 6.79758308 \text{ cm } ((2.75V - 0.45V) - 1.655V)$$

Obteniendo:

$$\text{Distancia al eje de referencia} = 4.38 \text{ cm}$$

De esta manera es como se obtendrán los desplazamientos que se tendrán durante el movimiento del vehículo, partiendo del eje de referencia.

4.2.2 Sensor de Efecto Hall

Para procesar la información obtenida por el sensor de Efecto Hall, se siguió el mismo principio que los velocímetros de las bicicletas, donde al dar una vuelta la rueda pasa una vez el campo magnético de un imán colocado en el rin y tiene contacto con el sensor. Siguiendo este mismo principio se decidió convertir la señal analógica del sensor de Efecto Hall a señal digital, esto como se mencionó en los apartados 3.2.6.2 y 3.2.6.3. Para esto la información proporcionada por el sensor de Efecto Hall es de tipo analógico en específico valores por debajo de 0.9V como máximo y 0.2V como mínimo. Se requirió acondicionar la señal utilizando un amplificador de señal y colocando un eje de referencia en el promedio del máximo y mínimo voltaje, siendo que si el voltaje era mayor al de referencia se convierten los datos en datos booleanos. Si el valor es menor al umbral se convierte en Verdadero y si es mayor se convierte en Falso. Esto ya que el valor máximo de voltaje es el que registra el sensor de efecto hall cuando no pasa el campo magnético por el sensor.

Resumiendo lo anterior, si la señal analógica obtenida del sensor de Efecto Hall representa su valor máximo, esta señal se convertirá a digital tomando el valor de Falso y por el contrario si toma menor valor, esta señal se convertirá en un valor de Verdadero.

Una vez conociendo la información que se obtendrá de los sensores, se requiere conocer y procesar la información para obtener las variables deseadas para la obtención del IRI.

4.2.3 Respuesta del vehículo

La respuesta del vehículo al transitar por una vialidad se calculará de acuerdo al desplazamiento acumulado obtenido por el vehículo al transitar una vialidad. Ya que el equipo EMIRI UMICH 001 para el cual se desarrollará el software, está diseñado para ser un

vehículo tipo Respuesta en su primera etapa. Este desplazamiento al ser medido por el sensor de desplazamiento lineal, como se describe en el apartado anterior 4.2.1, puede ser hacia arriba y hacia abajo del eje de referencia, siendo los desplazamientos hacia abajo por la configuración asignada en el apartado anteriormente mencionado, como negativo, se requiere tomar los desplazamientos de manera absoluta como se calcula en la investigación del Banco Mundial mencionado en el Capítulo I. Por lo tanto, se requiere realizar el algoritmo de manera que cada desplazamiento que se tenga, sea acumulado, de lo contrario se estaría tomando una lectura errónea, ya que los signos contrarios al sumarlos tenderían a un desplazamiento acumulado cercano a 0. Por ello se toma el absoluto del desplazamiento y se acumula en el tiempo.

El valor acumulado de los desplazamientos, será la respuesta del vehículo al transitar por una vialidad, y esta respuesta será la que se calibrará con los tramos definidos de calibración.

Cabe aclarar que este desplazamiento acumulado no es la medición del perfil longitudinal de la vialidad, si no la medición de la respuesta al transitar por dicha vialidad. Esta respuesta presentará variaciones dentro del mismo tramo, en función de la velocidad a la que circula el vehículo, y la posición de los neumáticos del vehículo, es decir, difícilmente los neumáticos del equipo, pasarán exactamente por donde pasaron anteriormente sin presentar una variación, en la posición transversal al cuerpo de la vialidad en la superficie de esta. Como se muestra en la Figura IV.3 se presenta la vista transversal del vehículo al transitar por una vialidad, donde las marcas amarillas representarían la sección de la superficie de la vialidad por la cual circularía el equipo, mientras que la sombra en gris representaría el mismo equipo, pero en un tiempo diferente, con esto se puede explicar que difícilmente se tendrá el recorrido exacto en cada lectura que se obtenga con dicho equipo.

Con lo mencionado anteriormente, se debe comprender que no quiere decir que los resultados serán muy diferentes de acuerdo al recorrido, ya que la superficie de la vialidad tiende a presentar regularidades de manera transversal. Esto quiere decir que tiende a tener un comportamiento regular. Si se encuentra una vialidad en buenas o malas condiciones de manera general tendrá el mismo comportamiento transversalmente.

Es común que las vialidades presenten una ligera deformación en la parte central del carril, como se comentó en el apartado 1.6, esto ocurre por el paso de los neumáticos de los vehículos, ya que lo correcto es circular al centro del carril y dentro del mismo, respetando los espacios de diseño, para evitar posibles accidentes.

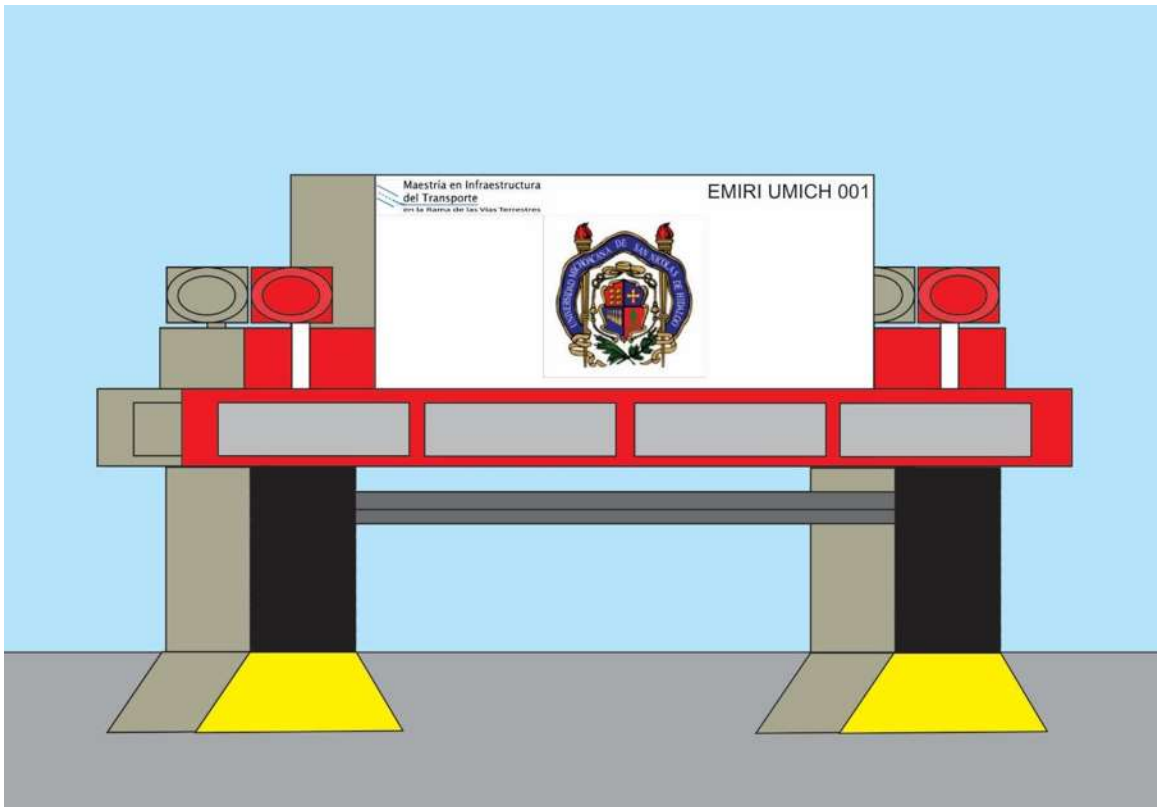


Figura IV.3 "Rodadas del EMIRI UMICH 001"

4.2.4 Longitud de tramo

La medición de la longitud del tramo en la que se genera la respuesta mencionada en el apartado anterior, se realizará con el sensor de Efecto Hall. Este sensor fue colocado dentro del tambor del vehículo EMIRI UMICH 001 para protección del sensor y de los 8 imanes que se utilizarán para registrar las vueltas que se tienen. Con esto se evitaría eliminar las posibles interferencias existentes en el ambiente. Los imanes fueron colocados en la tapa del tambor del eje, donde se colocaron en pares para aumentar el campo magnético y de tal manera que se encontraran distribuidos teniendo 4 segmentos del mismo tamaño que dieran el total de la revolución. Por lo tanto, cada par de imanes registra un cuarto de revolución.

La longitud de tramo se medirá con las revoluciones que presente el neumático a partir de un punto fijo donde se requiera realizar la medición. Para ello es necesario conocer el perímetro del neumático, ya con la presión a la que se circulara el vehículo. Esto debido a que se presentan pequeñas variaciones del perímetro del neumático según el inflado del mismo.

4.2.5 Velocidad de circulación

La velocidad de circulación del EMIRI UMICH 001 se calculará con el sensor de Efecto Hall, de la misma manera como se calculará la distancia, mencionando en el apartado anterior, y se le agregará el tiempo al cálculo, para así obtener la velocidad de circulación del equipo. Esto es utilizado en el programa LabVIEW que nos permitirá obtener el tiempo en proceso, y utilizando la distancia conocida. Es el tiempo que tarda en registrar el sensor un pulso producido por el campo magnético, que divide la distancia conocida a la que se registra el campo magnético producido por cada par de imanes.

Por lo tanto, para obtener la velocidad de circulación, se requiere antes calibrar el sensor longitudinal, para conocer a que distancia se encuentran colocados los pares de imanes, esto es, cada par se encuentra a una distancia de un cuarto de revolución.

Para la obtención del Índice de rugosidad internacional se utiliza la velocidad Promedio de circulación, por lo tanto, es necesario calcular dicha velocidad, y la velocidad de circulación en el proceso, ya que sirve para verificar con el velocímetro de la camioneta que todo está en perfecto funcionamiento y evitar lecturas erróneas.

4.3 Desarrollo del algoritmo

El desarrollo de un algoritmo como se describe en el Subcapítulo 3.1, se desarrolla para la resolución de un problema o alguna tarea por ejecutar, en este apartado se utilizará el diseño modular, desarrollando un pseudocódigo para la obtención de cada una de las tres variables físicas que se requieren obtener para la obtención de IRI.

4.3.1 Cálculo de la Respuesta del Vehículo v.1.0

Para el algoritmo del Cálculo de la Respuesta del Vehículo se requiere conocer el procedimiento del cálculo a partir de la obtención de la señal analógica del sensor, el cual se expresa en el apartado 4.2.1 y tomando las consideraciones mencionadas del apartado 4.2.3, se obtiene el algoritmo adecuado para ejecutar la tarea para el cual es diseñado, que es el cálculo de la Respuesta del Vehículo.

En el siguiente pseudocódigo se desarrolla el proceso para la obtención de la respuesta del vehículo.

FUNCIÓN: *Cálculo de la Respuesta del Vehículo*
ENTRADA: *Señal Analógica, sean valores de tipo racionales, donde $0.45 < SA < 3.76$*
SALIDA: *Respuesta del Vehículo*

INICIO

RVCM = 6.79758308

UM = 0.45

CER = 1.655

SUMDESP = 0

STOP = Falso

MIENTRAS STOP = Falso

DER = RVCM*(SA-UM-CER)

ADER = ABSOLUTO(DER)

SUMDESP = ADER + SUMDESP

FIN MIENTRAS

RESPUESTA = SUMDESP

DESPLEGAR(RESPUESTA)

FIN

Donde:

DER *Distancia al eje de referencia***RVCM** *Relación Volts a cm***SA** *Señal Analógica (señal proporcionada por el sensor)***UM** *Umbral para el valor mínimo de variaciones de voltaje***CER** *Constante para obtener la distancia al eje de referencia***SUMDESP** *Suma de desplazamientos (desplazamientos acumulados)***STOP** *Indicador de cuando parar el proceso***ADER** *Absoluto de la distancia al eje de referencia***RESPUESTA** *La Respuesta del Vehículo***4.3.2 Longitud del tramo v.1.0**

En el desarrollo del algoritmo del cálculo de la longitud del tramo al que se genera la respuesta del vehículo, se requiere conocer las especificaciones mencionadas en el apartado 4.2.4 desde la obtención de la señal del sensor de Efecto Hall, mencionado en el apartado 4.2.2. Con esto se puede desarrollar el siguiente algoritmo:

FUNCIÓN: *Cálculo de la Longitud del tramo***ENTRADA:** *Señal Analógica, sean valores de tipo racionales, donde $0.2 < SA < 0.9$* **SALIDA:** *Longitud de tramo***INICIO**

STOP = Falso

DREV = 189

CPR = DREV / 4

```

MIENTRAS STOP = Falso
    SAMPL = SA * 10
    SI SAMPL < 3
        VB = Verdadero
        CONT = 1 + CONT
    SI NO
        VB = Falso
    FIN SI
FIN MIENTRAS
LONG = CONT*CPR/100
DESPLEGAR(LONG)
FIN

```

Donde:

DREV	<i>Distancia recorrida para dar una revolución la llanta</i>
CPR	<i>Constante de segmento del Perímetro de la Rueda</i>
SA	<i>Señal Analógica (señal proporcionada por el sensor)</i>
SAMPL	<i>Señal Analógica Amplificada</i>
VB	<i>Valor Booleano</i>
CONT	<i>Contador de veces que el sensor genera un pulso</i>
LONG	<i>Longitud del tramo</i>
STOP	<i>Indicador de cuando parar el proceso</i>

4.3.3 Velocidad de circulación v.1.0

Para la obtención de la velocidad de circulación mediante el desarrollo del algoritmo para el cálculo de la misma, se requiere conocer las especificaciones del apartado 4.2.5, con las cuales siguiendo el proceso del cálculo se puede desarrollar el siguiente pseudocódigo:

FUNCIÓN: *Cálculo de la velocidad de circulación*
ENTRADA: *Señal Analógica, sean valores de tipo racionales, donde $0.2 < SA < 0.9$*
SALIDA: *Velocidad de circulación*

INICIO

```

STOP = Falso
DREV = 189
CPR = DREV / 4
MIENTRAS STOP = Falso
    SAMPL = SA * 10
    SI SAMPL < 3
        VB = Verdadero

```

```

T2 = T1
T1 = TC
DT = T1 – T2
VP = CPR / DT
VA = VP + VA
CONT = CONT + 1
DESPLEGAR (VP)
SI NO
    VB = Falso
FIN SI
FIN MIENTRAS
VELPROM = VA / CONT
DESPLEGAR(VELPROM)
FIN

```

Donde:

DREV	<i>Distancia recorrida para dar una revolución la llanta</i>
CPR	<i>Constante de segmento del Perímetro de la Rueda</i>
SA	<i>Señal Analógica (señal proporcionada por el sensor)</i>
SAMPL	<i>Señal Analógica Amplificada</i>
VB	<i>Valor Booleano</i>
CONT	<i>Contador de veces que el sensor genera un pulso</i>
TC	<i>Tiempo proporcionado por la computadora</i>
T1	<i>Tiempo 1</i>
T2	<i>Tiempo 2</i>
DT	<i>Diferencial de tiempo</i>
VP	<i>Velocidad en el proceso</i>
VA	<i>Velocidad Acumulada</i>
VELPROM	<i>Velocidad Promedio en el recorrido del tramo</i>
STOP	<i>Indicador de cuando parar el proceso</i>

4.4 Ejecución del Algoritmo en el lenguaje de Programación

La ejecución del algoritmo en el lenguaje de programación, consiste en utilizar los comandos necesarios para desarrollar un software que permita resolver el problema o la tarea a ejecutar en un lenguaje de programación, en esta investigación se utilizó LabVIEW como plataforma de programación, la cual se mencionó anteriormente en el apartado 3.2. En este apartado se desarrollarán los algoritmos de apartado anterior 4.3 para ejecutarlos en LabVIEW.

Al escribir el algoritmo en una plataforma de programación, se requiere conocer las funciones, comandos, estructuras, etc. en especial el lenguaje en el que se escribirá este algoritmo. Al ser LabVIEW un lenguaje tipo G obtenemos el desarrollo del programa de manera gráfica, por lo tanto, es común ver solo pequeños gráficos que permitan desarrollar el programa.

4.4.1 Programa de la Respuesta del Vehículo

El programa para obtener la Respuesta del Vehículo se desarrollará con el uso del pseudocódigo del apartado 4.2.3, donde se definen las variables y los valores que deben tomar cada variable, además de su proceso. Con lo cual, obtenemos el siguiente VI:

En la Figura IV.5 se muestra la parte del software que verá el usuario, donde se muestran las variables usadas y sus valores, y la respuesta como resultado del proceso.

Cabe recordar que la respuesta del vehículo son los desplazamientos acumulados en un determinado periodo de tiempo, para transitar por un tramo de una vialidad en estudio.

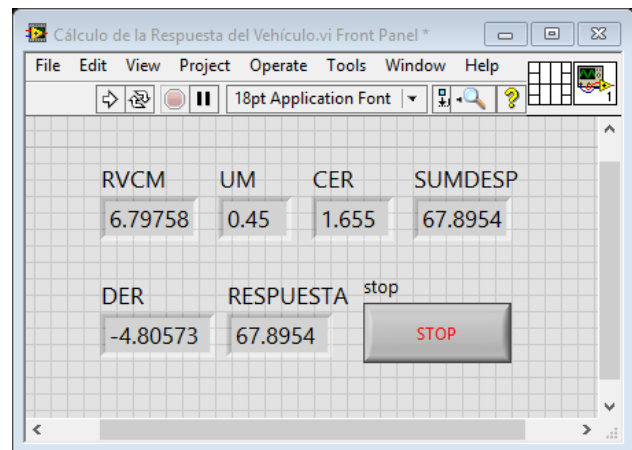


Figura IV.5 "Panel Frontal Cálculo de la Respuesta del Vehículo"

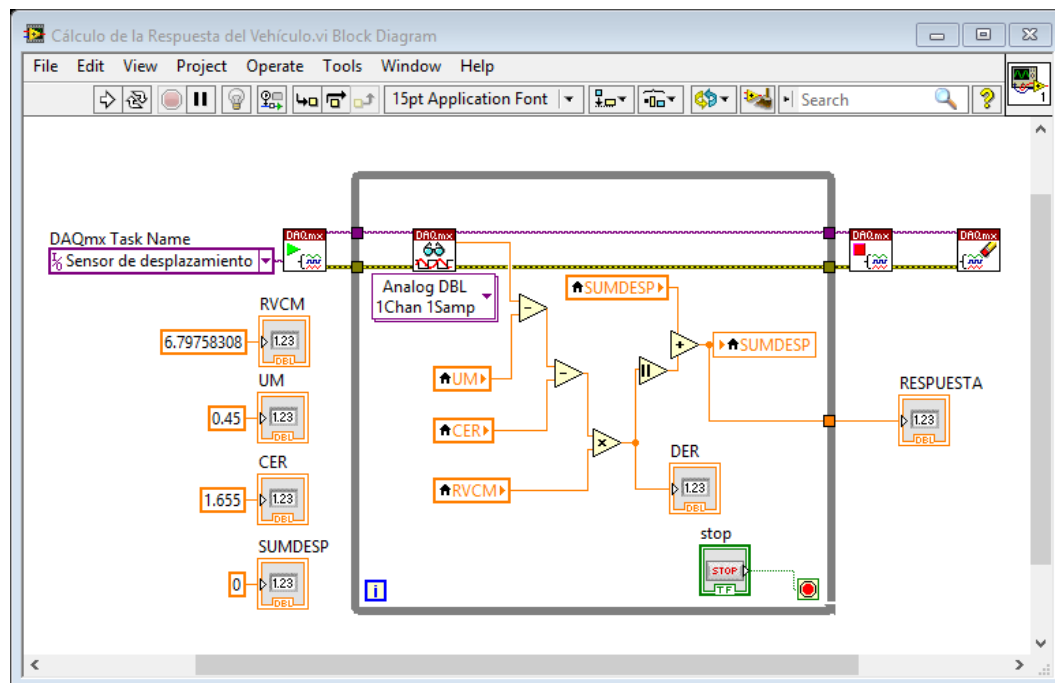


Figura IV.4 "Diagrama de Bloques Cálculo de la Respuesta del Vehículo"

En la Figura IV.4 se muestra el diagrama de bloques donde se puede apreciar los mismos componentes que se muestran en el pseudocódigo del Cálculo de la Respuesta del Vehículo descrito en los apartados anteriores. En el apartado 4.3.1 se describen las variables y el proceso. Los VI de NI DAQmx se describen en el apartado 3.2.5.

4.4.2 Programa Longitud del tramo

El programa para obtener la longitud del tramo en estudio se desarrolló con el uso del pseudocódigo del apartado 4.3.2, donde se definen las variables, así como sus valores correspondientes y el desarrollo del proceso para la ejecución de la tarea.

En la Figura IV.7 se muestra la interfaz que el usuario podrá utilizar para manejar el software, en la cual se muestran las variables que se utilizaron en el programa y sus valores, además del valor de la longitud del tramo en estudio como resultado del proceso.

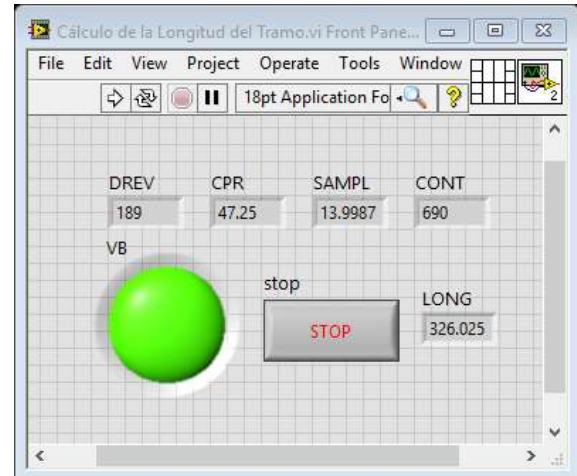


Figura IV.7 "Panel Frontal del Cálculo Longitud del Tramo"

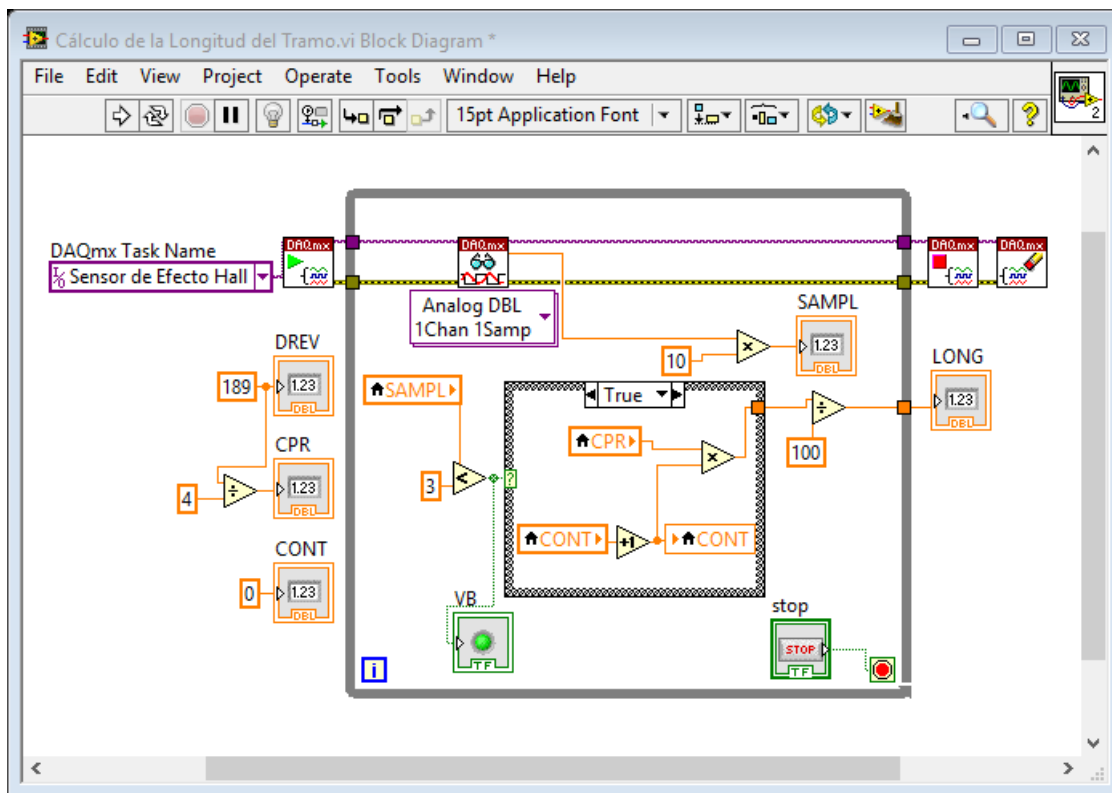


Figura IV.6 "Diagrama de Bloques Cálculo de la Longitud de Tramo"

Cabe recordar que la longitud del tramo, es la distancia recorrida por el equipo a partir de que se inició a correr el programa.

En la Figura IV.6 "Diagrama de Bloques Cálculo de la Longitud de Tramo" podemos observar el proceso realizado para la obtención de la longitud, a partir de la señal proporcionada por el sensor de Efecto Hall, siguiendo la estructura y flujo del pseudocódigo del Cálculo de la Longitud del Tramo, descrito en los apartados anteriores.

En el apartado 4.3.2 se describen las variables y el proceso. Los VI de NI DAQmx se describen en el apartado 3.2.5.

4.4.3 Programa Velocidad de circulación

El programa para la obtención de la velocidad de circulación, fue desarrollado con el uso del algoritmo del apartado 4.3.3, donde se establecen las variables, así como sus valores correspondientes y el proceso para la ejecución de la tarea. Con lo cual, obtenemos el siguiente VI:

En la Figura IV.8 se muestra la parte del software que verá el usuario, donde se muestran las variables usadas y sus valores, y la Velocidad Promedio como resultado del proceso.

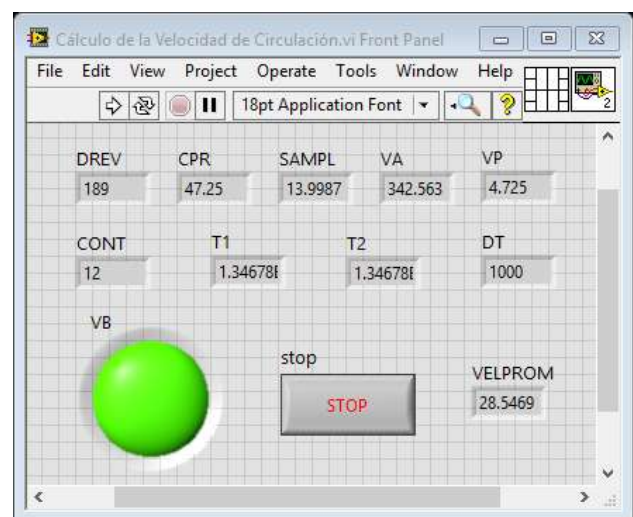


Figura IV.8 "Panel de control Velocidad del recorrido"

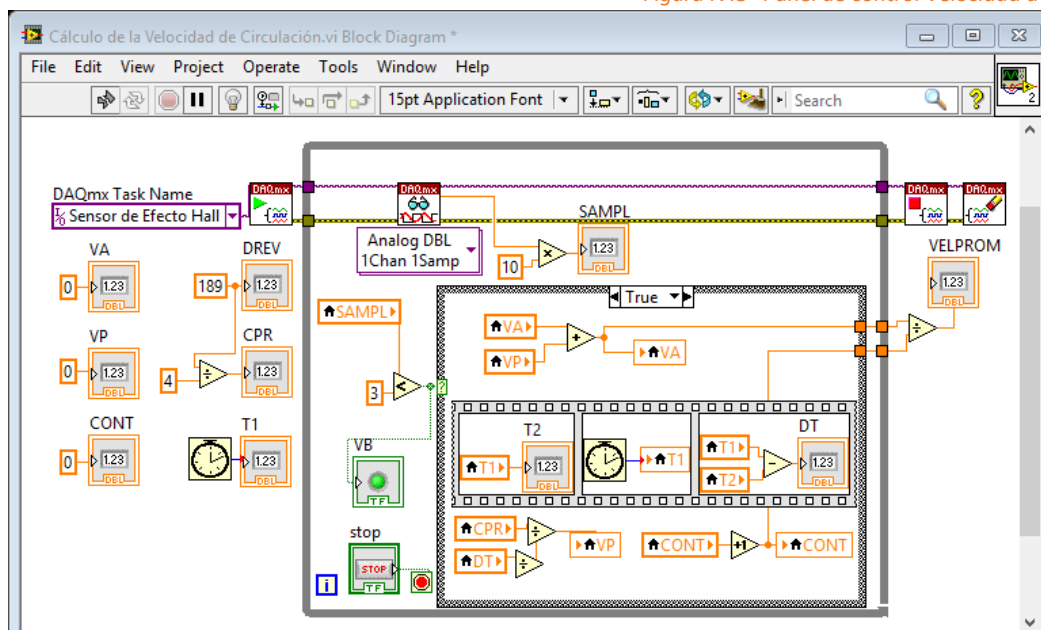


Figura IV.9 "Diagrama de Bloques Cálculo de la Velocidad de recorrido"

Cabe recordar que la Velocidad del recorrido, es la velocidad que se obtiene en promedio en un tramo de una vialidad definido, iniciando la medición de la velocidad en el momento que inicie a correr el programa.

En la Figura IV.9 podemos observar el proceso realizado para la obtención de la Velocidad, a partir de la señal proporcionada por el sensor de Efecto Hall, siguiendo la estructura y flujo del pseudocódigo del Cálculo de la Velocidad de Recorrido, descrito en los apartados anteriores. En el apartado 4.3.3 se describen las variables y el proceso. Los VI de NI DAQmx se describen en el apartado 3.2.5.

4.5 Planificar siguiente Iteración.

La planificación de la siguiente iteración, es el proceso en el cual una vez que se corrió el programa se establece si este proporciona la información que se requiere y como se requiere, en específico sea la respuesta correcta a la tarea a ejecutar. En esta investigación la tarea corresponde a la medición de las variables físicas. Este apartado de la investigación trata de corregir los errores pasando de nuevo por el algoritmo, es decir corregir los errores desde este y siguiendo con el desarrollo del programa en la plataforma de diseño, hasta llegar a un funcionamiento en óptimas condiciones y que nos permita obtener los resultados deseados.

4.5.1 Corrección de errores del programa de la Respuesta del Vehículo

En este programa se obtuvo un error en el acondicionamiento de la señal del sensor de desplazamiento, esto ocurrió ya que como se mencionó en el apartado 3.2.6 la señal analógica es una señal variaciones continuas en el tiempo, donde esas variaciones llegan a presentar un ruido en la señal. Por tal motivo, es importante emplear el uso de un filtrado de datos, para evitar tener un futuro error de medición como los que se describen en el apartado 2.1.3.

El empleo de este filtrado de datos se desarrolló en el programa eliminando las variaciones que no corresponden a las reales medidas en la variable física.

El valor medido en el programa del Cálculo de la Respuesta del Vehículo, es el desplazamiento que tiene el vehículo en el tiempo y en un determinado tiempo mide la respuesta del vehículo. Por lo tanto, si en el tiempo mide el desplazamiento que se tiene para ese tiempo, la señal que se adquiere del sensor tiene variaciones menores a los milivolts, al convertir los Volts a cm, las variaciones son menores al milímetro.

Según la velocidad de la computadora donde se ejecute el programa y la tarjeta de adquisición de datos será la velocidad a la que se realicen los procesos, una de las funciones que se puede aplicar en LabVIEW es configurar el tiempo del proceso, en el cual el mínimo es al milisegundo, quiere decir que al ejecutar el programa de Cálculo de la Respuesta del Vehículo se obtendrán 1000 procesos en un segundo, al tener variaciones menores al milímetro, al acumularlas se tendrán una respuesta acumulada cada vez mayor con el paso del tiempo, sin siquiera estar en movimiento.

Debido a lo anterior, se colocó un filtrado de datos numéricos pos conversión a cm, quiere decir que el filtro consistió en hacer un truncamiento del valor obtenido con el sensor de Efecto Hall al milímetro, por lo tanto, la respuesta en el tiempo tendrá una variación milimétrica en el tiempo. Con esto se llegó a la obtención de la respuesta medida del vehículo.

Como el IRI se mide en m/km la respuesta obtenida estará en unidades métricas al milímetro, y hay que transformarla a metros para un mejor procesamiento. Recalcando que lo que se mide es la respuesta del vehículo y no el perfil longitudinal del terreno, esta respuesta no se puede comparar con la respuesta de otros equipos, ya que cada vehículo tendrá su propia respuesta, por lo tanto, el valor solo obtenido de la respuesta, no nos indica absolutamente nada para la obtención del IRI de una vialidad, ya que se requieren obtener la velocidad de circulación, la longitud del tramo de estudio y una calibración con el *Golden Car* del Banco mundial mencionado en el Capítulo I.

Para verificarlo, se realizaron recorridos en una vialidad definida, en un tramo de esta vialidad, donde se realizaron 10 corridas sobre este tramo, iniciando en el mismo punto y terminando 300 metros después del inicio, donde se recorrió a una misma velocidad de circulación. Procurando en cada corrida seguir el mismo trazado, es decir, pasar por los mismos puntos transitados en la primera corrida. Obteniendo ligeras variaciones no mayores a $\pm 4\%$ del promedio, como se muestra en la Tabla IV-1.

Cabe mencionar que estas variaciones se encuentran en función de la velocidad y las condiciones en las que se encuentra el recorrido por la vialidad. Por lo tanto, para considerar las mediciones como correctas debe obtenerse el valor de IRI de la vialidad, y no debe variar en las corridas en más del 4% el coeficiente de variación y no mayor a 0.25m/km. [30]

Corrida	0+000 a 0+100	% de variación	0+100 a 0+200	% de variación	0+200 a 0+300	% de variación	SUMA	% de variación
1	19.88	2.76	22.01	2.55	25.97	2.98	67.86	2.78
2	20.63	0.92	22.92	1.49	26.61	0.60	70.16	0.52
3	20.96	2.53	22.94	1.61	26.91	0.53	70.82	1.46
4	20.06	1.89	22.31	1.19	26.79	0.06	69.16	0.91
5	20.48	0.16	22.41	0.74	26.29	1.80	69.18	0.88
6	20.63	0.92	22.95	1.64	27.55	2.93	71.14	1.93
7	19.88	2.75	21.76	3.63	25.97	2.99	67.61	3.13
8	20.25	0.95	22.53	0.25	27.04	1.01	69.82	0.03
9	20.99	2.69	22.98	1.76	26.95	0.68	70.92	1.62
10	20.68	1.14	23.00	1.86	27.61	3.15	71.29	2.14
Promedio	20.44		22.58		26.77		69.80	

Tabla IV-1 "Variaciones en las mediciones de la Respuesta del Vehículo"

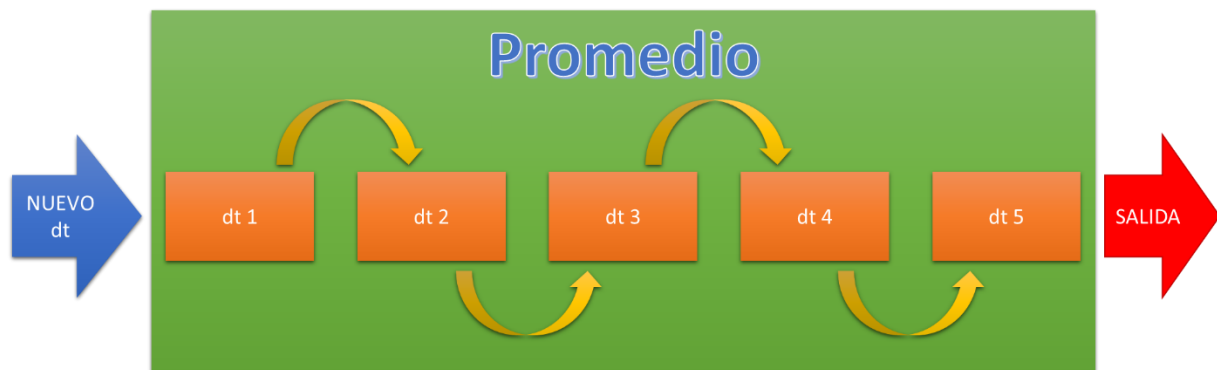
4.5.2 Corrección de errores del programa Longitud del tramo

Este programa no presento errores de programación, sin embargo, no presentaba los valores reales medidos de la variable física, por lo tanto, lo que fue necesario realizar fue la calibración del valor de la longitud obtenido con el cálculo y con un valor conocido de una longitud de un tramo de una vialidad con un valor conocido. Véase en el apartado 4.7.1.

Una vez realizada esta calibración la medición de longitud y realizando las pruebas de las lecturas se corroboró que el programa funcionaba correctamente.

4.5.3 Corrección de errores del programa Velocidad de circulación

El programa de Velocidad de circulación presento un problema a la hora del procesamiento, ya que no se había considerado en que unidades LabVIEW entrega el tiempo, el cual lo entrega en milisegundos. Por lo tanto, se requirió transformar los milisegundos a horas y los centímetros a kilómetros. Esto para utilizar las unidades de la velocidad en kilómetros por hora (km/h). Además, de igual manera que el programa de longitud de tramo se requirió



corregir el valor del desplazamiento de una revolución de la rueda del vehículo, como se mencionó en el apartado anterior.

También se verificó que el programa otorgaba valores de la velocidad en el instante y se buscó hacer más estables los incrementos de las diferencias de velocidad, utilizando un filtro promediador, es decir, tomar un conjunto de los valores del diferencial de tiempo y promediarlos. Según el orden de procedencia estos toman el valor diferencial anterior hasta dejar lugar para el nuevo valor de diferencial, como se muestra en la Figura IV.10 "Filtro Promediador".

Una vez realizadas estas modificaciones el valor de la velocidad de circulación obtenido con el programa, se comparó con el valor registrado en el velocímetro del vehículo. Al comparar los valores obtenidos tanto con el programa como con el velocímetro, no se registraron prácticamente diferencias, se debe tomar en cuenta que el velocímetro del vehículo es analógico y existen pequeñas variaciones por cuestión de perspectiva, y el programa entrega valores digitales, con el que se obtienen lecturas de mayor precisión.

4.6 Documentación

Una vez que se tienen los VI en correcto funcionamiento se es necesario revisar el algoritmo ordenarlo, y dejarlo de tal manera que se tenga las modificaciones realizadas, para así considerar los algoritmos como finales, ya rectificados y en correcto funcionamiento.

4.6.1 Cálculo Respuesta del Vehículo v.2.0

FUNCIÓN: *Cálculo de la Respuesta del Vehículo*

ENTRADA: *Señal Analógica, sean valores de tipo racionales, donde $0.45 < SA < 3.76$*

SALIDA: *Respuesta del Vehículo en metros*

INICIO

RVCM = 6.79758308

UM = 0.45

CER = 1.655

STOP = Falso

MIENTRAS STOP = Falso

DER = RVCM * (SA – UM – CER)

DER = TRUNCAR (10 * DER)

ADER = ABSOLUTO (DER)

SUMDESP = ADER + SUMDESP

FIN MIENTRAS

RESPUESTA = SUMDESP / 1000

DESPLEGAR(RESPUESTA)

FIN

Donde:

DER	<i>Distancia al eje de referencia</i>
RVCM	<i>Relación Volts a cm</i>
SA	<i>Señal Analógica (señal proporcionada por el sensor)</i>
UM	<i>Umbral para el valor mínimo de variaciones de voltaje</i>
CER	<i>Constante para obtener la distancia al eje de referencia</i>
SUMDESP	<i>Suma de desplazamientos (desplazamientos acumulados)</i>
STOP	<i>Indicador de cuando parar el proceso</i>
ADER	<i>Absoluto de la distancia al eje de referencia</i>
RESPUESTA	<i>La Respuesta del Vehículo en metros</i>

4.6.2 Longitud del tramo v.2.0

FUNCIÓN:	<i>Cálculo de la Longitud del tramo</i>
ENTRADA:	<i>Señal Analógica, sean valores de tipo racionales, donde $0.2 < SA < 0.9$</i>
SALIDA:	<i>Longitud de tramo</i>

INICIO

```

STOP = Falso
DREV = 175.5
CPR = DREV / 4
MIENTRAS STOP = Falso
    SAMPL = SA * 10
    SI SAMPL < 3
        CONT = 1 + CONT
    SI NO
        FIN SI
FIN MIENTRAS
LONG = CONT*CPR/100
DESPLEGAR(LONG)

```

FIN

Donde:

DREV	<i>Distancia recorrida para dar una revolución la llanta</i>
CPR	<i>Constante de segmento del Perímetro de la Rueda</i>
SA	<i>Señal Analógica (señal proporcionada por el sensor)</i>
SAMPL	<i>Señal analógica Amplificada</i>
VB	<i>Valor Booleano</i>
CONT	<i>Contador de veces que el sensor genera un pulso</i>
LONG	<i>Longitud del tramo</i>

STOP *Indicador de cuando parar el proceso*

4.6.3 Velocidad de circulación v.2.0

FUNCIÓN: *Cálculo de la velocidad de circulación*

ENTRADA: *Señal Analógica, sean valores de tipo racionales, donde $0.2 < SA < 0.9$*

SALIDA: *Velocidad de circulación*

INICIO

STOP = Falso

DREV = 175.5

CPR = DREV / 4

DT4 = 0

DT3 = 0

DT2 = 0

DT1 = 0

MIENTRAS STOP = Falso

SAMPL = SA * 10

SI SAMPL < 3

T2 = T1

T1 = TC

DT5 = DT4

DT4 = DT3

DT3 = DT2

DT2 = DT1

DT1 = T1 – T2

PDT = (DT1 + DT2 + DT3 + DT4 + DT5) / 180

VP = CPR / PDT

VA = VP + VA

CONT = CONT + 1

DESPLEGAR (VP)

SI NO

FIN SI

FIN MIENTRAS

VELPROM = VA / CONT

DESPLEGAR(VELPROM)

FIN

Donde:

DREV *Distancia recorrida para dar una revolución la llanta*

CPR *Constante de segmento del Perímetro de la Rueda*

SA *Señal Analógica (señal proporcionada por el sensor)*

SAMPL	<i>Señal analógica Amplificada</i>
CONT	<i>Contador de veces que el sensor genera un pulso</i>
TC	<i>Tiempo proporcionado por la computadora en milisegundos</i>
T1	<i>Tiempo 1</i>
T2	<i>Tiempo 2</i>
DT1	<i>Diferencial de Tiempo 1</i>
DT2	<i>Diferencial de Tiempo 2</i>
DT3	<i>Diferencial de Tiempo 3</i>
DT4	<i>Diferencial de Tiempo 4</i>
DT5	<i>Diferencial de Tiempo 5</i>
PDT	<i>Promedio de Diferencial de Tiempo</i>
VP	<i>Velocidad en el proceso</i>
VA	<i>Velocidad Acumulada</i>
VELPROM	<i>Velocidad Promedio en el recorrido del tramo</i>
STOP	<i>Indicador de cuando parar el proceso</i>

4.7 Calibración de Sensores

El equipo EMIRI UMICH 001 de acuerdo a los componentes mecánicos para la adquisición de datos del sensor de desplazamiento, revisar en la referencia [12], requiere dársele mantenimiento para su óptimo funcionamiento mecánico y obtención de la información deseada y que sea confiable. Por ello se requiere calibrar los sensores cada que se le realice mantenimiento al equipo (sistema mecánico de adquisición, cambio de llantas, mantenimiento a la suspensión del vehículo, etc.).

Suele llamársele a calibración de los sensores, al proceso de calibración de los valores obtenidos con el instrumento virtual, al medir la variable física y compararlos con valores conocidos, hasta llegar a la obtención de los valores reales de la variable física, es decir que la medición tenga fidelidad en los resultados obtenidos por el sistema.

4.7.1 Sensor de desplazamiento longitudinal

Al realizar la medición del perímetro del neumático colocado en el vehículo, se obtuvo un valor perimetral de 189cm. Contando con este valor se prosiguió a realizar mediciones en un tramo carretero, donde se conocía la distancia de recorrido del tramo de 300m. Este tramo es uno de los que se utilizaran para calibración. Se realizaron mediciones donde se fue cambiando el valor del perímetro de la llanta según fuera necesario, debido a que al tomar la medición del perímetro de la llanta no se consideró el peso del vehículo, ya que se requiere conocer la distancia real de una revolución del neumático.

Se realizaron 8 lecturas de los valores obtenidos con el programa “Cálculo de la Longitud del tramo” en el cual se utilizó el sensor de efecto Hall para la adquisición de datos. En este caso al sensor de efecto Hall le llamaremos el sensor de desplazamiento longitudinal. Con la información obtenida por las lecturas se desarrolló la Tabla VI-2 y se fue desarrollando en el momento la gráfica mostrada en la Figura IV.11, para ir obteniendo la constante a usar en el cálculo de la distancia recorrida. Obteniendo como constante de calibración 1.755 metros como el desplazamiento necesario para recorrer una revolución de la rueda en una superficie.

Lectura	Distancia Recorrida	Perímetro Llanta
1	323.19	1.890
2	307.80	1.800
3	299.25	1.750
4	290.70	1.700
5	297.11	1.740
6	298.56	1.749
7	299.26	1.753
8	300.11	1.755

Tabla IV-2 "Lecturas de calibración del Sensor Longitudinal"

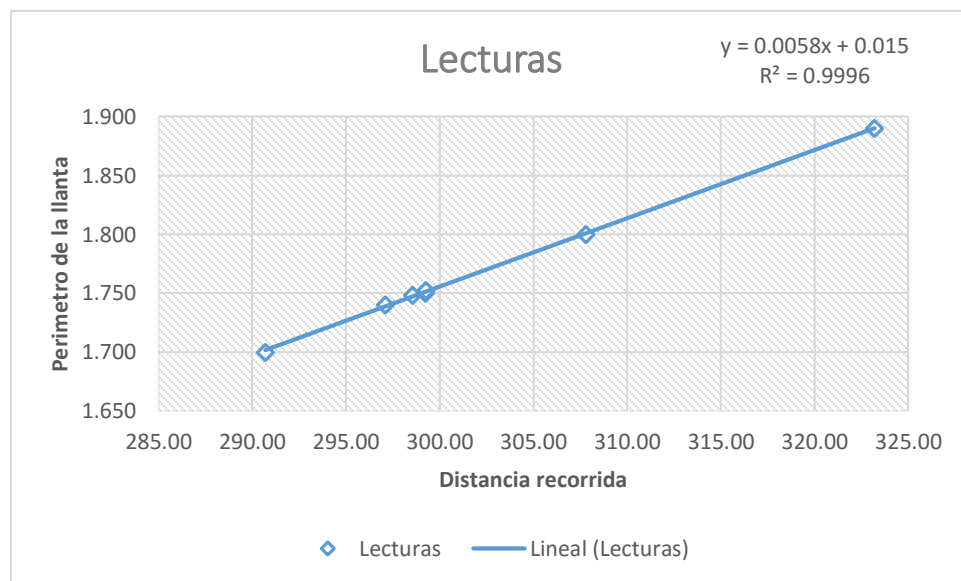


Figura IV.11 "Gráfica línea de tendencia del sensor de Desplazamiento Longitudinal"

Una vez que se obtuvo la constante de calibración se realizaron 10 lecturas en el mismo tramo de la vialidad con dimensiones conocidas para verificar la calibración. Obteniendo los valores mostrados en la Tabla IV-3, donde se obtuvo una media de 300.04m en los datos obtenidos.

Se puede apreciar que existen solo tres valores variantes en estas lecturas, es decir, la frecuencia de datos solo existe en dos tres valores diferentes. Esto debido a al sistema que se utiliza para la medición de la distancia, como se mencionó anteriormente el sensor de efecto hall registra las veces que un campo magnético pasa dentro de su alcance, donde se utilizaron 4 pares de imanes, para dar lectura a una revolución de rueda. Donde tenemos que al dar una revolución la rueda, se obtendrá un desplazamiento de 1.755m, quiere decir que al dividir la distancia entre los cuatro pares de imanes cada par de imán representa un desplazamiento de 0.43875m. Con lo cual permite tener las variaciones mostradas en la tabla siguiente, ya que es difícil colocar la llanta del equipo exactamente donde se encuentra el campo magnético. Lo cual nos arroja un margen de error de $\pm 0.44\text{m}$ en distancias totales, esto quiere decir que no incrementa el error, conforme avanza la distancia, sino que en la distancia total se puede llegar a tener ese margen de error, ya sea distancias largas o distancias cortas. Por ejemplo, en una distancia de 500m se tendría una lectura de $500.17\text{m} \pm 0.44\text{m}$ y en una distancia de 8,000m se obtendría una lectura de $8,000.17\text{m} \pm 0.44\text{m}$.

Lectura	Distancia Recorrida	Lectura	Distancia Recorrida
1	300.11	7	300.11
2	300.11	8	300.54
3	300.54	9	299.67
4	299.67	10	300.11
5	300.11		
6	299.67	Media	300.04

Tabla IV-3 "Lecturas de la longitud de tramo"

Como se explicó anteriormente, el error que se obtiene en la lectura es consecuencia del sistema utilizado para la medición, una manera para disminuir el error, es aumentando el número de imanes, para disminuir la distancia entre cada campo magnético. Cabe mencionar que esta característica, es cuestión de la instrumentación del equipo, es decir el error se arrastra de la instrumentación y no es un error del funcionamiento del software. Al disminuir la distancia entre los campos magnéticos solo es necesario cambiar las constantes que se utilizaron para este proceso, no cambiará el funcionamiento del sistema, pero si hará más precisa la medición de la longitud del tramo.

4.7.2 Autocalibración de sensores

La autocalibración de los sensores se refiere en esta investigación al proceso de calibración de manera automática de los sensores, con un eje de referencia para la señal de cada sensor. En esta investigación como ya se mencionó en el Subcapítulo 2.4 en el apartado 2.4.2 se utiliza el sensor de efecto Hall y dos sensores de desplazamiento lineal, además de estos dos sensores se utilizó un acelerómetro para adquisición de datos, el procesamiento

de los datos obtenidos con este sensor no se desarrolla en esta investigación, pero si se agrega a la autocalibración en la obtención de un eje de referencia.

El proceso de la obtención del eje de referencia se mencionó en el apartado 4.2.1, donde se busca sea el centro del sensor el eje de referencia, lo cual el colocarlo exactamente en el centro es algo muy complicado, además de que cada que se le da mantenimiento al sistema mecánico de la instrumentación virtual, se requiere tomar nuevamente el eje de referencia, por ello, el hacer constante este eje de referencia es inservible para el funcionamiento adecuado del equipo. El tener que calibrar los sensores cada que se requiera se necesitaría también del programador para calibrar estos sensores. Para esta deficiencia anteriormente mencionada se requiere obtener una autocalibración de los sensores, cada que el usuario lo requiera.

Los sensores que se autocalibrarán, serán los sensores de desplazamiento lineal y el acelerómetro. El proceso para desarrollar esta autocalibración es el siguiente:

FUNCIÓN: *Autocalibración*
ENTRADA: *5 Señales Analógica, sean valores de tipo racionales*
SALIDA: *Constantes de calibración*

INICIO

```

ITER = 0
RVCM = 6.42857143
UM = 0.5
SD1 = 0
SD2 = 0
SAX = 0
SAY = 0
SAZ = 0
MIENTRAS    ITER <= 9999
    SD1 = SD1 + RVCM * (SA1 - 0.5)
    SD2 = SD2 + RVCM * (SA2 - 0.5)
    SAX = SA3 + SAX
    SAY = SA4 + SAY
    SAZ = SA5 + SAZ
    ITER = 1 + ITER
FIN MIENTRAS
CD1 = SD1 / ITER
CD2 = SD2 / ITER
  
```

$$CAX = SAX / ITER$$

$$CAY = SAY / ITER$$

$$CAZ = SAZ / ITER$$

FIN

Donde:

ITER	<i>Iteración</i>
RVCM	<i>Relación Volts a cm</i>
UM	<i>Umbral para el valor mínimo de variaciones de voltaje</i>
SD1	<i>Señal sensor de Desplazamiento 1</i>
SD2	<i>Señal sensor de Desplazamiento 2</i>
SAX	<i>Señal Acelerómetro eje X</i>
SAY	<i>Señal Acelerómetro eje Y</i>
SAZ	<i>Señal Acelerómetro eje Z</i>
SA1	<i>Señal analógica 1</i>
SA2	<i>Señal analógica 2</i>
SA3	<i>Señal analógica 3</i>
SA4	<i>Señal analógica 4</i>
SA5	<i>Señal analógica 5</i>
CD1	<i>Constante Desplazamiento 1</i>
CD2	<i>Constante Desplazamiento 2</i>
CAX	<i>Constante Acelerómetro eje X</i>
CAY	<i>Constante Acelerómetro eje Y</i>
CAZ	<i>Constante Acelerómetro eje Z</i>

Este algoritmo será activado, cuando se requiera calibrar los sensores, esto será cuando se le realice cualquier modificación o mantenimiento al funcionamiento mecánico de la Instrumentación Virtual o al sistema de suspensión del Equipo, y solo cuando esto ocurra.

4.8 Algoritmo para la medición de IRI en LabVIEW

El tema central de esta investigación es el Diseño e Implementación de un Algoritmo para la Medición de IRI en LabVIEW, el cual se basa en obtener el valor medido de IRI de cualquier vialidad por medio de un equipo de Instrumentación Virtual, como se muestra en el apartado 2.4. En el Capítulo II se establecieron las partes de la instrumentación Virtual, donde el Software tiene una gran relevancia, ya que este es el que da las instrucciones al instrumento, y procesa los datos obtenidos de las variables medidas, para convertirlos en la información deseada.

En el apartado 2.4.1 se establecieron cuáles fueron las variables que se obtienen con el equipo EMIRI UMich 001. Estas variables se tienen que medir de acuerdo al tipo de equipo que se utiliza para la obtención de IRI. Podemos ver las variables físicas medidas como los datos de entrada, y el Índice de Rugosidad Internacional como la Información de Salida. Recordando lo que se vio en la parte introductoria a este capítulo en el PROYECTO IRI UMich el tema central, es la obtención del IRI, por lo tanto, siendo esta investigación una de las partes de este proyecto, se comparte el objetivo general del proyecto, la obtención del IRI. Para esto, se requiere de un proceso que convierta las variables físicas medidas de una vialidad con el equipo en un valor de IRI, es decir, al transitar por una vialidad, el equipo debe proporcionar el valor de IRI de dicha vialidad. En la Figura IV.12 se muestra el esquema de cómo se llega a obtener el IRI.



Figura IV.12 "Fases para la obtención de IRI con el EMIRI UMich 001"

En los apartados anteriores se establecieron los algoritmos para la obtención de las mediciones de las variables físicas, pero estas variables solas no nos indican el IRI de una vialidad. Para obtener el IRI es necesario procesar estos datos.

El proceso para la obtención de IRI una vez medidas las variables físicas describe en el Capítulo V. Una vez conocido el proceso para la obtención de IRI, se puede desarrollar el Algoritmo completo para la obtención de IRI, el cual se describirá a continuación.

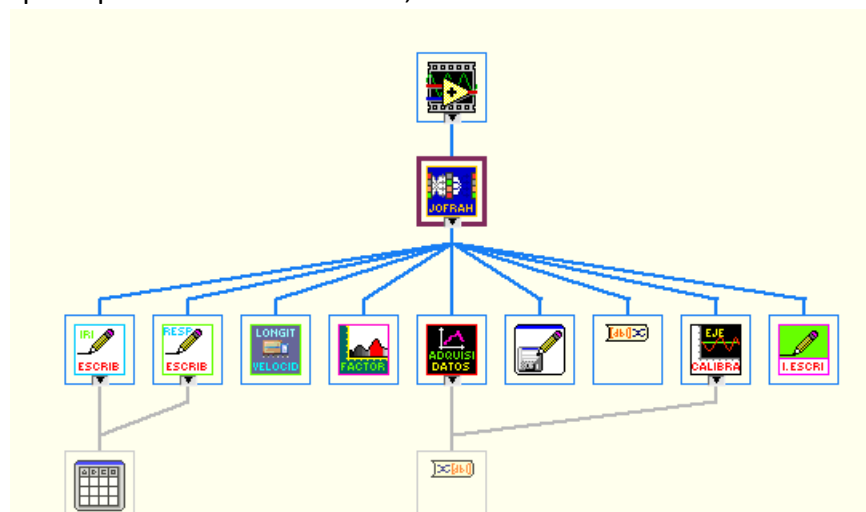


Figura IV.13 "Diagrama de Jerarquía de JOFRAH"

Para efectos de la investigación y trabajos futuros se presentarán las subrutinas del algoritmo y su función debido a lo mencionado anteriormente se utilizó el sistema modular, pero se reservará la estructura del procesamiento de las mismas. Mencionando que los algoritmos mostrados en los apartados anteriores fueron la base central para la creación del programa final, pero se le realizaron modificaciones al algoritmo. Aun con las modificaciones en el procesamiento de la información, se sigue los algoritmos anteriores como la base de la metodología utilizada en esta investigación. En la Figura IV.13 se muestran los SubVI con los que cuenta el programa para la obtención de IRI desarrollado en LabVIEW llamado JOFRA.

4.8.1 Generador de Archivo de Medición

El SubVI “Generador de Archivos de Medición” es la Subrutina que genera el documento en el cual se presentaran los resultados de las Mediciones en las vialidades, además de realizar el procesamiento de la información de entrada que son las variables físicas y transformarla en el Índice de Rugosidad Internacional, son la respuesta del vehículo, la velocidad y la longitud del tramo, donde la Subrutina realiza registros de las mediciones a cada 100m.

Este SubVI se muestra en la Figura IV.14 y se puede apreciar que cuenta con datos de entrada y datos de salida.

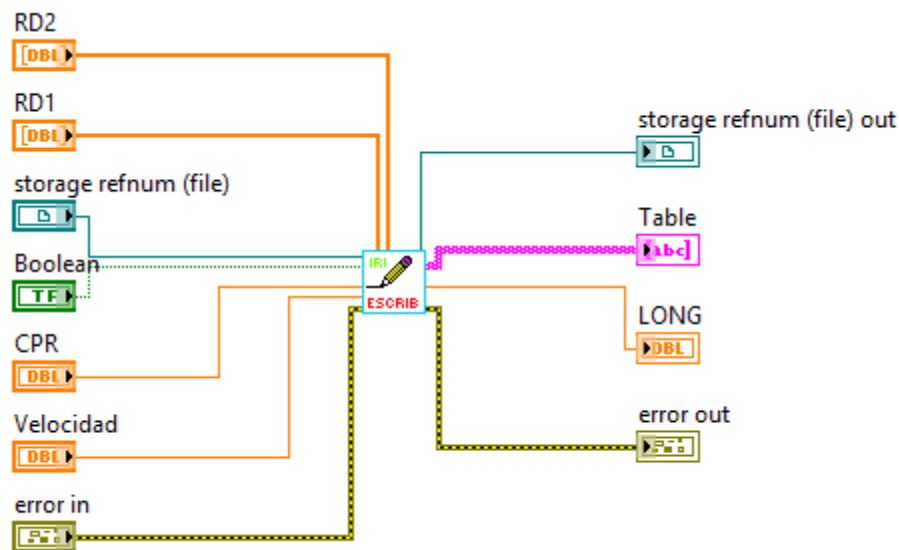


Figura IV.14 "Generador de Archivos de Medición"

Los datos de entrada son:

RD2 Es la variable de tipo array numérico racional, correspondiente a la **Respuesta en el proceso** con el sensor de desplazamiento lineal 2.

RD1 *Es la variable de tipo array numérico racional, correspondiente a la **Respuesta en el proceso** con el sensor de desplazamiento lineal 1.*

storage refnum (file) *Esta variable de entrada, es el **nombre del documento** en el cual se **almacena la información** procesada.*

Boolean *Esta variable de entrada de tipo booleano, es el indicador para **iniciar o no la Subrutina**, es decir, iniciar o no la escritura de la información.*

CPR *Esta variable de entrada de tipo numérico racional, es la **constante de segmento del perímetro de la rueda**, es decir es el desplazamiento que produce la rueda entre el registro de un campo magnético y otro.*

Velocidad *Esta variable de entrada de tipo numérico racional, es la **velocidad** registrada en el proceso de la medición, es decir, es la velocidad al momento.*

error in *Esta variable de entrada es la **señal** de registro de **error**, es decir, es la variable que indica cuando ocurre un error en el sistema y permite localizar en que momento ocurrió este error.*

Los datos de salida son:

storage refnum (file) out *Esta variable de salida, es el **nombre del documento** en el cual se **almacena la información** procesada.*

Table *Esta variable de salida es un array de tipo string, en la cual se **registra la información procesada** en el momento. Se registra cada 100m de desplazamiento.*

LONG *Esta variable de salida de tipo numérico, es la **longitud recorrida** por el equipo a partir de que se **inició la Subrutina**.*

error out *Esta variable de salida es la **señal** de registro de **error**, es decir, es la variable que indica cuando ocurre un error en el sistema y permite localizar en que momento ocurrió este error.*

Esta Subrutina desarrolla el proceso de conversión de los datos obtenidos en las mediciones de las variables físicas, en valores de IRI de las variables en estudio. Para desarrollar este proceso se requiere introducir las constantes en las ecuaciones de los planos mencionados en el *Capítulo V. Proceso de Calibración del equipo EMIRI UMICH 001*, dentro del proceso establecido en la Subrutina, estos valores no se le permiten meter al usuario, ya que el

modificarlos alterara los valores obtenidos en las mediciones. Por lo tanto, para poder realizar estas modificaciones se requiere del programador.

4.8.2 Generador de Archivo de Levantamiento de Calibración

Este SubVI genera el archivo en el cual se escribirá la información obtenida en un levantamiento para calibración, es decir, la respuesta del vehículo, la longitud del levantamiento, y la velocidad promedio. Tanto la respuesta del vehículo como la velocidad promedio se registra cada 100m, es decir son las mediciones correspondientes para un segmento de 100m.

Esta subrutina se puede apreciar en la Figura IV.15 comparte las mismas variables de entrada y de salida que el SubVI anterior, la diferencia es la información proporcionada por el proceso. Es decir, el proceso que se realiza en el presente SubVI es para la obtención de las variables obtenidas. Esta subrutina se utiliza durante el proceso de calibración del equipo.

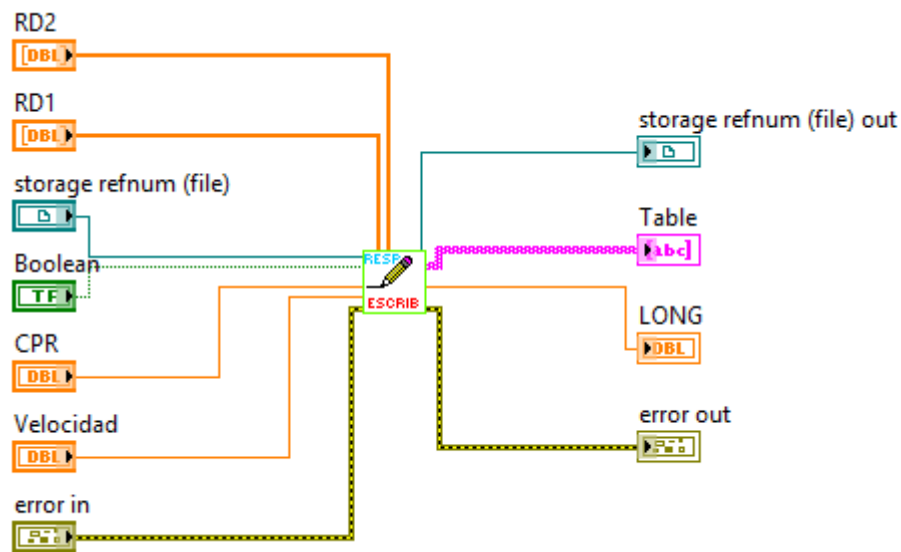


Figura IV.15 "Generador de Archivo de Levantamiento de Calibración"

Los datos de entrada y de salida se pueden ver en el apartado 4.8.1, ya que comparten el tipo de datos utilizados durante el proceso.

4.3.3 Cálculo de la Velocidad de Circulación y longitud de tramo

Este SubVI calcula la velocidad de Circulación del equipo en el proceso, como se muestra en la Figura IV.16 esta subrutina requiere como valor de entrada la distancia que se desplaza el vehículo al dar una revolución la llanta, la subrutina realiza la adquisición de datos del

sensor de efecto hall, los procesa y convierte en la velocidad en el proceso, y entrega la distancia que lleva recorrer al neumático entre un campo magnético y otro.

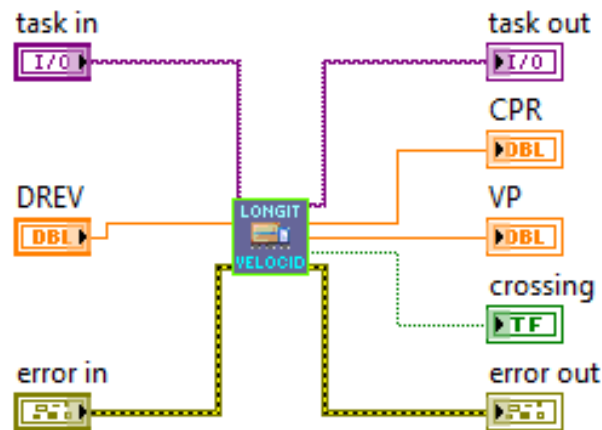


Figura IV.16 "Cálculo de la Velocidad de Circulación y longitud de tramo"

Los datos de entrada son:

task in Esta variable de entrada de tipo task, es la función que transmite la **configuración** de la **adquisición de datos**.

DREV Esta variable de entrada de tipo numérico racional, es la **distancia recorrida para dar una revolución la llanta**.

error in Esta variable de entrada es la **señal** de registro de **error**, es decir, es la variable que indica cuando ocurre un error en el sistema y permite localizar en que momento ocurrió este error.

Los datos de salida son:

task out Esta variable de salida de tipo task, es la función que transmite la **configuración** de la **adquisición de datos**.

CPR Esta variable de salida de tipo numérico racional, es la **constante de segmento del perímetro de la rueda**, es decir es el desplazamiento que produce la rueda entre el registro de un campo magnético y otro.

VP Esta variable de salida de tipo numérico racional, es la **velocidad** registrada en el proceso de la medición, es decir, es la velocidad al momento.

Crossing Esta variable de salida de tipo booleano, es el **indicador** que registra el paso de un campo magnético, es decir, indica cuando se registra un **desplazamiento** que produce la rueda entre un campo magnético y otro.

error out Esta variable de salida es la **señal** de registro de **error**, es decir, es la variable que indica cuando ocurre un error en el sistema y permite localizar en que momento ocurrió este error.

4.8.4 Filtro de factores que Influyen en la medición de IRI

Este SubVI permite eliminar la respuesta del equipo al pasar por factores que influyen en la medición de IRI, ya que estos elementos pueden elevar los valores de IRI en un pequeño segmento de la vialidad y alterar los resultados de la lectura. En esta subrutina se tienen la respuesta del vehículo y los registros de alguno de estos factores como valores de entrada y la respuesta filtrada como valores de salida.

En la Figura IV.17 "Filtro de factores que influyen en la medición de IRI" se muestra la

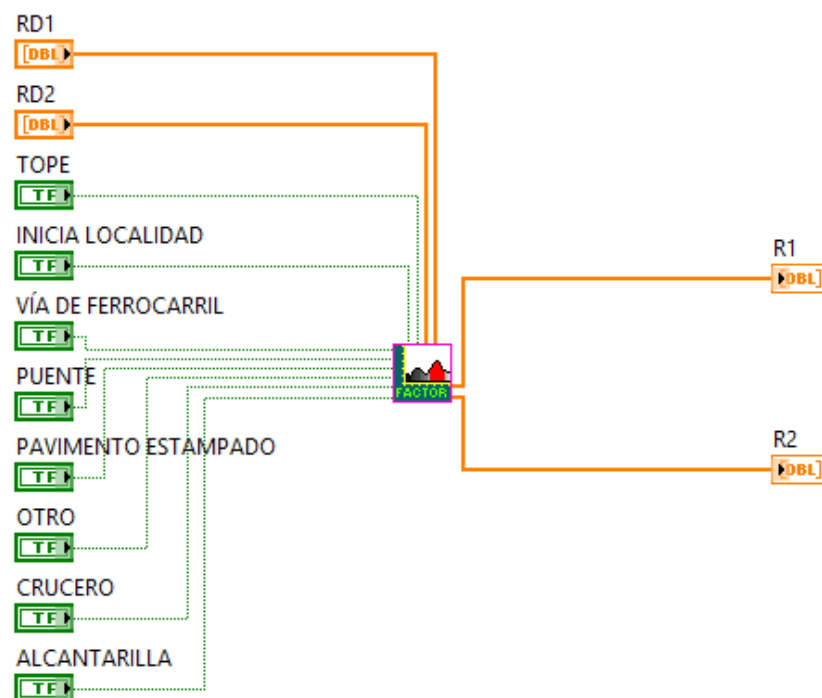


Figura IV.17 "Filtro de factores que influyen en la medición de IRI"

subrutina y sus elementos de entrada y de salida.

Los datos de entrada son:

RD1 Es la variable de tipo array numérico racional, correspondiente a la **Respuesta en el proceso** con el sensor de desplazamiento lineal 1.

RD2 Es la variable de tipo array numérico racional, correspondiente a la **Respuesta en el proceso** con el sensor de desplazamiento lineal **2**.

TOPE, INICIO LOCALIDAD, VÍA DE FERROCARRIL, PUENTE, PAVIMENTO ESTAMPADO, CRUCERO, ALCANTARILLA Y OTRO Son variables de entrada de tipo booleano, es el **indicador** que esta por pasar por uno de estos **factores** que **alteran la información**.

Los datos de salida son:

RD1 Es la variable de tipo array numérico racional, correspondiente a la **Respuesta en el proceso** con el sensor de desplazamiento lineal **1** filtrada.

RD2 Es la variable de tipo array numérico racional, correspondiente a la **Respuesta en el proceso** con el sensor de desplazamiento lineal **2** filtrada.

4.8.5 Adquisición de la Respuesta del Vehículo

Este SubVI realiza la adquisición de datos de los sensores de desplazamiento lineal y del acelerómetro, procesa y convierte la señal de los sensores y la convierte en respuesta medida. En esta investigación, por ahora solo convierte la señal de los sensores de desplazamiento lineal. Como se muestra en la Figura IV.18 los datos de entrada son las constantes de cada señal, para obtener un eje de referencia en cada una de estas. Esta subrutina procesa los datos obtenidos en la adquisición y entrega como resultado la respuesta obtenida por cada señal.

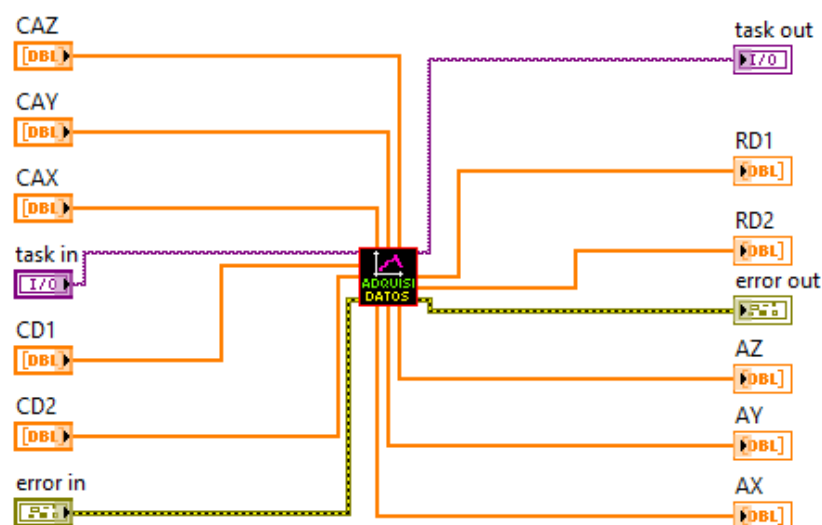


Figura IV.18 "Adquisición de la Respuesta del Vehículo"

Los datos de entrada son:

CAZ Esta variable de entrada array de tipo numérico racional, es la **constante** para obtener el **eje de referencia** en el **eje Z** de la señal obtenida con el acelerómetro.

CAY Esta variable de entrada array de tipo numérico racional, es la **constante** para obtener el **eje de referencia** en el **eje Y** de la señal obtenida con el acelerómetro.

CAX Esta variable de entrada array de tipo numérico racional, es la **constante** para obtener el **eje de referencia** en el **eje X** de la señal obtenida con el acelerómetro.

task in Esta variable de entrada de tipo task, es la función que transmite la **configuración** de la **adquisición de datos**.

CD1 Esta variable de entrada array de tipo numérico racional, es la **constante** para obtener el **eje de referencia** en el sensor de **desplazamiento lineal 1**.

CD2 Esta variable de entrada array de tipo numérico racional, es la **constante** para obtener el **eje de referencia** en el sensor de **desplazamiento lineal 2**.

error in Esta variable de entrada es la **señal** de registro de **error**, es decir, es la variable que indica cuando ocurre un error en el sistema y permite localizar en que momento ocurrió este error.

Los datos de salida son:

task out Esta variable de salida de tipo task, es la función que transmite la **configuración** de la **adquisición de datos**.

RD1 Esta variable de salida de tipo array numérico racional, correspondiente a la **Respuesta en el proceso** con el sensor de desplazamiento lineal 1.

RD2 Esta variable de salida de tipo array numérico racional, correspondiente a la **Respuesta en el proceso** con el sensor de desplazamiento lineal 2.

error out Esta variable de salida es la **señal** de registro de **error**, es decir, es la variable que indica cuando ocurre un error en el sistema y permite localizar en que momento ocurrió este error.

AZ, AY y AX Son las variables de salida array de tipo numérico racional, son las señales correspondientes a cada eje del acelerómetro con un eje de referencia por cada señal.

4.8.6 Autocalibración de Sensores

Este SubVI realiza la adquisición de datos de la respuesta procesando la información obtenida y encontrando el eje de referencia para los sensores de desplazamiento lineal y el acelerómetro. Como se muestra en la Figura IV.19 los datos de salida son las constantes con la cual se encuentra el eje de referencia de cada sensor en el estudio.

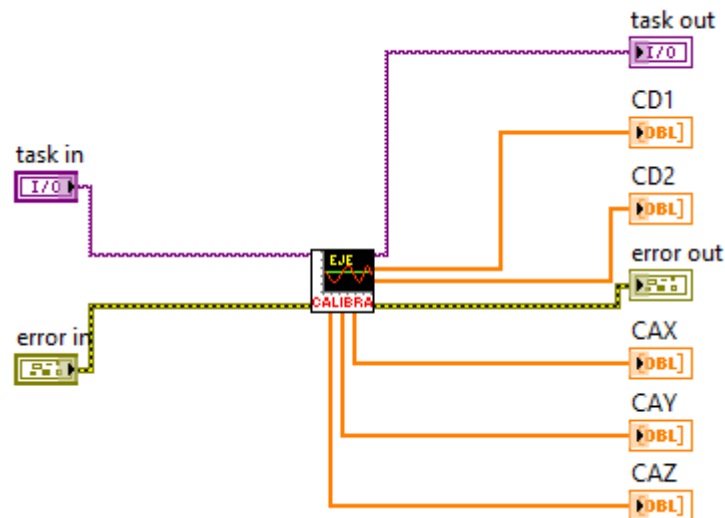


Figura IV.19 "Autocalibración de sensores"

Los datos de entrada son:

task in Esta variable de entrada de tipo task, es la función que transmite la **configuración** de la **adquisición de datos**.

error in Esta variable de entrada es la **señal** de registro de **error**, es decir, es la variable que indica cuando ocurre un error en el sistema y permite localizar en que momento ocurrió este error.

Los datos de salida son:

task out Esta variable de salida de tipo task, es la función que transmite la **configuración** de la **adquisición de datos**.

CD1 Esta variable de salida array de tipo numérico racional, es la **constante** para obtener el **eje de referencia** en el sensor de **desplazamiento lineal 1**.

CD2 Esta variable de salida array de tipo numérico racional, es la **constante** para obtener el **eje de referencia** en el sensor de **desplazamiento lineal 2**.

CAX, CAY y CAZ Estas variables de salida array de tipo numérico racional, son las **constantes** para obtener el **eje de referencia** en el **eje X, Y y Z** respectivamente de las señales obtenidas con el acelerómetro.

error out Esta variable de salida es la **señal** de registro de **error**, es decir, es la variable que indica cuando ocurre un error en el sistema y permite localizar en que momento ocurrió este error.

4.8.7 Inicializador de Escritura

En este SubVI se inicia la escritura de la información, donde las características de la vialidad, son los primeros datos escritos en el documento que se generara a partir del inicio de la lectura de la información. Como se puede apreciar en la Figura IV.20 los datos de entrada son estas características y los de salida es el documento en el cual se continuará con la escritura de información.

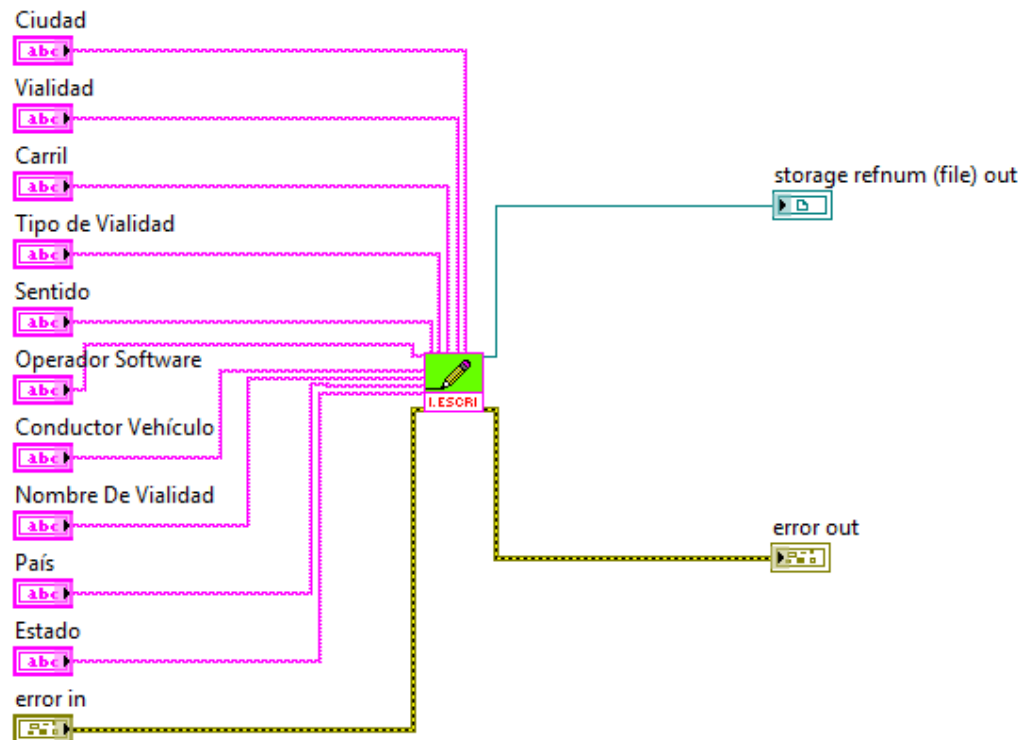


Figura IV.20 "Inicializador de Escritura"

Los datos de entrada son:

Las características de la vialidad son variables de entrada de tipo string, que **introducen la información** necesaria de las **características de la vialidad** en estudio para realizar el levantamiento.

error in Esta variable de entrada es la **señal** de registro de **error**, es decir, es la variable que indica cuando ocurre un error en el sistema y permite localizar en que momento ocurrió este error.

Los datos de salida son:

storage refnum (file) out Esta variable de salida, es el **nombre del documento** en el cual se **almacena la información** procesada.

error out Esta variable de salida es la **señal** de registro de **error**, es decir, es la variable que indica cuando ocurre un error en el sistema y permite localizar en que momento ocurrió este error. Las subrutinas mencionadas y definidas con anterioridad son los componentes base del algoritmo para la obtención del IRI.

El algoritmo desarrollado en LabVIEW para la medición de IRI llamado JOFRA, se basa en una estructura programable que procesa la información proporcionada por el usuario del software y, por la adquisición de datos obtenidos de las variables medidas por el equipo, una vez realizado el procesamiento entrega los valores de IRI de las vialidades en estudio. El Icono del VI se muestra en la Figura IV.21.

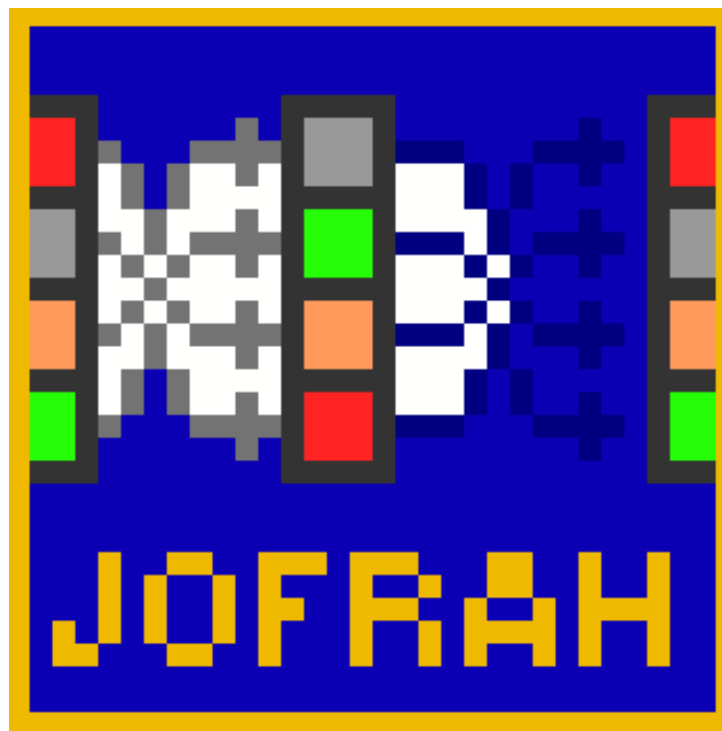


Figura IV.21 "Icono del VI JOFRAH"

Este VI como se muestra en la Figura IV.22 cuenta con datos de entrada como las características de la vialidad donde se realizará la medición. Tres variables de entrada de tipo numérico y botones que ejecutan acciones durante la ejecución del programa, además de tener dos indicadores que transmiten la información obtenida con la medición.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Facultad de Ingeniería Civil
Programa JOFRAH para la Obtención del Índice Internacional
de Rugosidad con el equipo EMIRI UMICH 001

Diseñado y desarrollado por Jose Francisco Ramos Herrera



Operator Software	País	Ciudad		
Paco	México	Morelia		
Conductor Vehículo	Estado	Vialidad		
César	Michoacán	Carretera Libre		
Nombre De Vialidad	Carril	Sentido	Tipo de Vialidad	
Presa Cointzio	1	S1	Pavimento Flexible	
Comentarios				
Ninguna				

TOPE	INICIA LOCALIDAD	VIA DE FERROCARRIL
PUENTE	PAVIMENTO ESTAMPADO	OTRO
CRUCERO	ALCANTARILLA	Iniciador de lectura
PARAR CALIBRACIÓN	PARAR MEDICIÓN	

DREV	Tabla de Resultados		
175.5			
CD1			
10.9331			
CD2			
10.2885			

Doctores Investigadores:

Jorge Alarcón Ibarra y Nelio Pastor Gómez

Equipo Primer Etapa de proyecto:

Yesenia Rodríguez Méndez, Jose Francisco Ramos Herrera

César Abel Andrade Salado y Cristóbal Uriel Magaña Díaz

Morelia, Michoacán Agosto 2016

Figura IV.22 "Interfaz del VI JOFRAH"

Una vez que se introdujeron los datos de entrada se puede iniciar la ejecución del programa, el cual inicia con una selección del usuario como se muestra en la Figura IV.23, si el equipo se encuentra calibrado se selecciona la opción SI o de lo contrario la opción NO.

Al seleccionar la opción si el Software desarrollara una opción definida, la cual dependerá si el Equipo se encuentra calibrado o no. Cada que se ejecuta el programa, lo primero que realiza el software es generar el archivo en el cual se escribirá la información obtenida en la medición ejecutando el SubVI *Inicializador de Escritura*.

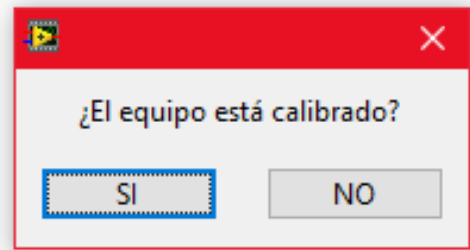


Figura IV.23 "Seleccionador de opciones 1"

Si el equipo no se encuentra calibrado el software le permitirá al usuario nuevamente elegir entre dos opciones como se muestra en la Figura IV.24, si los sensores se encuentran calibrados el programa usa los valores proporcionados por el usuario antes de ejecutar el programa, de lo contrario ejecuta el SubVI *Autocalibración de Sensores* para obtener las constantes de calibración de los sensores como se muestra en la Figura IV.25, y este Genera un archivo llamado Datos de Calibración con los resultados de la autocalibración.

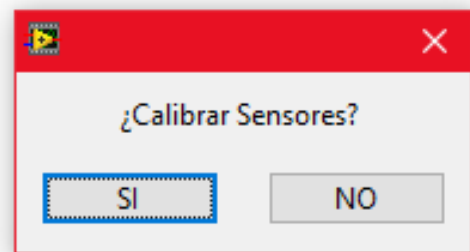


Figura IV.24 "Seleccionador de opciones 2"

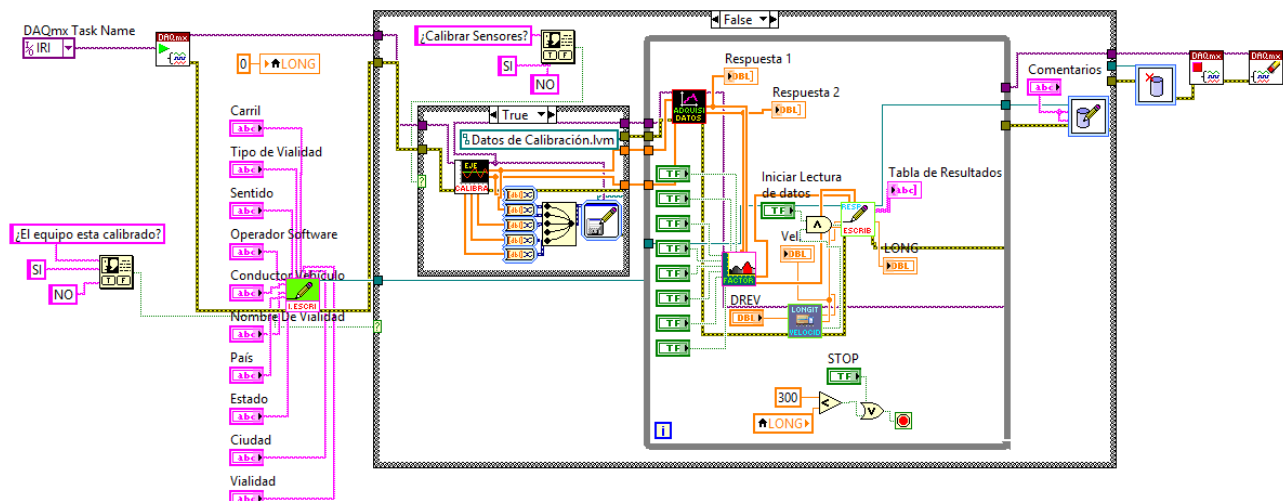


Figura IV.25 "Diagrama de Bloques del VI JOFRAH"

Una vez que el software cuenta con las constantes de calibración de los sensores, comienza con la ejecución de un ciclo While y dentro de este con la ejecución de un SubVI *Adquisición de la Respuesta del Vehículo* obteniendo los datos proporcionados por esta subrutina se ejecuta el SubVI *Filtro de factores que influyen en la medición de IRI*. Se ejecuta de manera conjunta el SubVI *Cálculo de la velocidad de circulación y longitud del tramo*. Una vez obtenidos los datos de los dos últimos SubVIs mencionados se ejecuta el SubVI *Generador de Archivos de Levantamiento de Calibración*. Este proceso dentro del ciclo while se repite hasta que se cumple con el recorrido mayor de 300 metros, o se presiona la opción **PARAR CALIBRACIÓN**.

Si al inicio del programa se selecciona la opción el equipo se encuentra calibrado, el software ejecutara la misma acción mencionada dentro del ciclo While obteniendo las constantes de calibración de los sensores, por los datos proporcionados por el usuario. A diferencia del proceso de calibración, no se usa el SubVI *Generador de Archivos de Levantamiento de Calibración*, en su lugar se utiliza el SubVI *Generador de Archivos de Medición*.

Cualquiera de las dos opciones anteriormente mencionadas si el equipo se encuentra calibrado o no, el software generara un archivo con los resultados de las lecturas generadas en las vialidades en estudio. Lo anteriormente descrito se puede comprender mejor con el diagrama de flujo del software representado en la Figura IV.25.

Una vez finalizado el programa, para acceder a la información obtenida con la medición es necesario abrir el archivo donde se escriben los resultados del procesamiento de los datos obtenidos con las mediciones. Véase como en Apéndice A “Manual de usuario de programa JOFRAH.

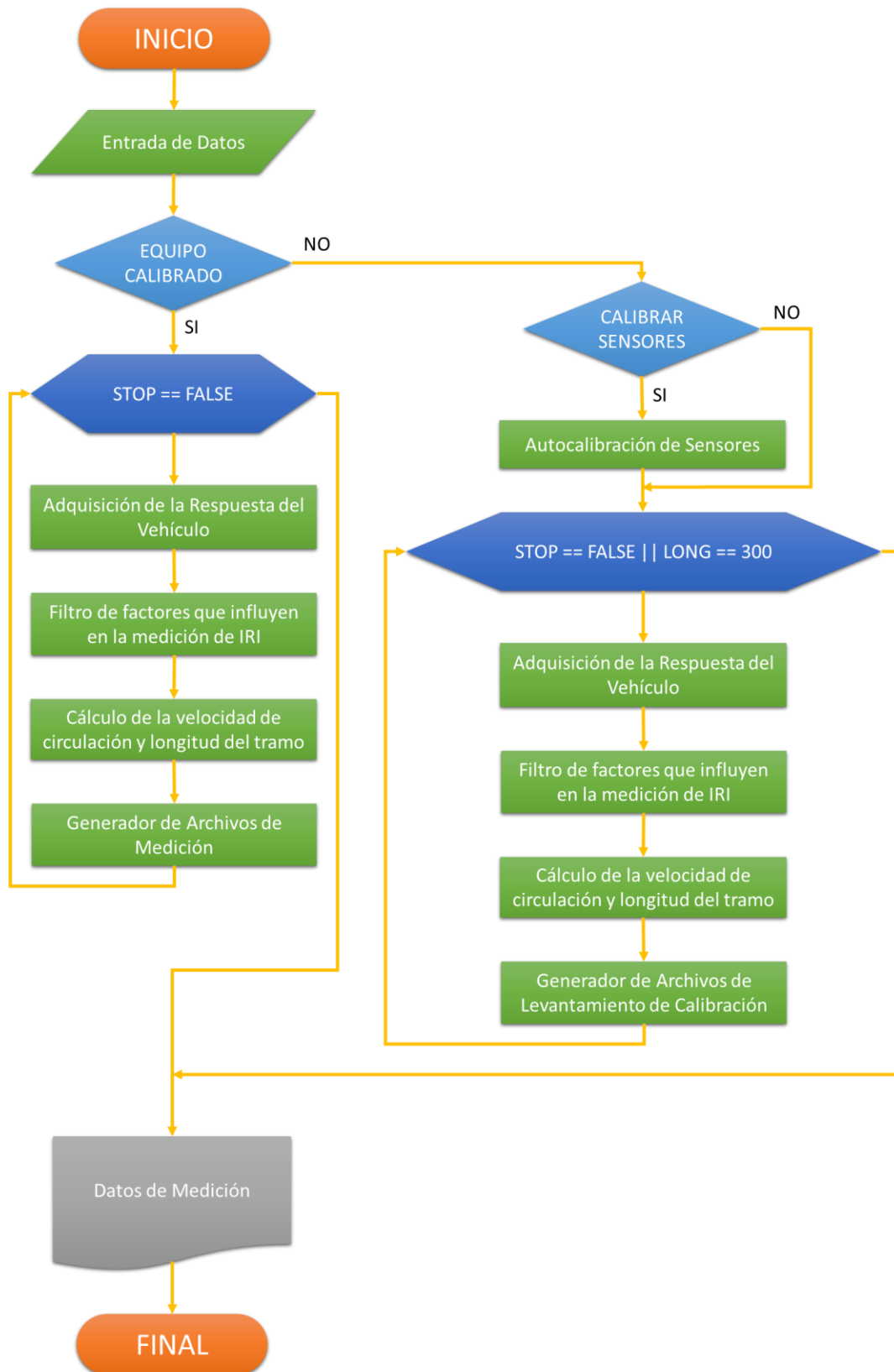


Figura IV.26 "Diagrama de flujo de Algoritmo JOFRAH"

Capítulo V.

Proceso de Calibración del equipo EMIRI UMICH 001

El proceso de calibración de un equipo tipo respuesta para la medición de IRI, sigue el método derivado de la Investigación del Banco Mundial mencionada en el Capítulo I. El método consiste en elegir tramos para calibración en bueno, regular y mal estado de la capa superficial de la vialidad, como se menciona en el apartado 1.10.1. Para definir si la vialidad se encuentra en buenas, regulares o malas condiciones se requiere utilizar algún equipo para la obtención de IRI de los mencionados en el Subcapítulo 1.12, si no existen registros de los valores de IRI de las vialidades o se cuenta con algún equipo de medición de IRI se puede utilizar la clasificación de ISA, y verificarlo posteriormente con el IRI calculado con las elevaciones obtenidas en el levantamiento topográfico del perfil longitudinal de la superficie de la vialidad.

Para el desarrollo de esta investigación se realizó una pre calibración del equipo, ya que los tramos de los cuales se cuenta información de IRI, son tramos de alta velocidad y de alto tráfico, en donde se requiere utilizar altas medidas de seguridad para poder realizar los levantamientos topográficos. Ya que se requiere cerrar en su totalidad un carril en el tramo elegido para calibración, se decidió calibrar el equipo con los datos proporcionados por equipos de medición de IRI de manera indirecta y no con el valor de IRI obtenido con la simulación del cuarto de carro por medio de las elevaciones del perfil longitudinal. Para obtener los valores de IRI y posteriormente llevarlos a calibrar al Instituto Mexicano de Transporte, es la dependencia encargada de Calibración y certificación de los equipos de medición de IRI.

Esta pre calibración consta en utilizar los valores de IRI obtenidos por el *Mays Ride Meter*, utilizado por la Unidad Regional de la SCT. Cabe mencionar que este equipo es calibrado y certificado cada año por el IMT. Los datos proporcionados por la SCT de los valores de IRI para cada tramo, se utilizaron como se mencionó anteriormente, debido a que son vialidades en las que el grado de dificultad para la obtención del perfil longitudinal del tramo, es alto. Por esto, para futuras calibraciones se debe ubicar tramos de calibración que

ocasionen menor dificultad a la hora del levantamiento del perfil longitudinal de la vialidad, es decir, sean de un tráfico medio a bajo, y cumplan con las características necesarias mencionadas en el apartado 1.10.1.

5.1 Tramos de Calibración

Los tramos que se utilizaron para esta calibración se presentan en la Tabla V-1. La elección de estos tramos y la información de éstos fue proporcionada por la SCT.

No. de Tramo	Nombre de Vialidad	TRAMO		Sentido	IRI
		Inicia	Termina		
1	Morelia - Jiquilpan (1)	7+450	7+750	1	7.7
2	Morelia – Salamanca	7+400	7+700	1	2.5
3	Morelia – Jiquilpan (2)	9+200	9+500	1	4.6
4	Morelia – Tzurumutaro	5+000	5+300	1	2.4
5	Morelia - Pátzcuaro (Carretera Vieja)	12+900	13+200	1	3.1
6	Camino a Teremendo	7+300	7+600	2	3.6

Tabla V-1 "Tramos de Calibración"

Una vez que se localizan los tramos, se realiza una visita previa para conocer su ubicación y ubicar las condiciones para poder retornar con el equipo, se continúa tomando lecturas con el equipo por estos tramos, obteniendo como resultado la medición de la respuesta del vehículo.

5.2 Obtención y Procesamiento de datos registrados por el EMIRI UMICH 001

Una vez obteniendo valores de la respuesta registrada por el equipo, la longitud y la velocidad promedio de circulación al transitar por estos tramos, se realiza un post procesamiento de la información. En el presente documento se muestran los resultados obtenidos en el tramo de calibración de Morelia – Pátzcuaro del km 12+900 al 13+200. En la Tabla V-2 se logra apreciar que se realizaron 5 lecturas por tramo para cada velocidad de lectura, donde existe un registro a cada 100 metros de la respuesta del vehículo, se encuentran la respuesta 1 y la respuesta 2, son la respuesta del vehículo del lado exterior e interior de la vialidad, respectivamente, a una velocidad de 30 km/h. En esta investigación por cada tramo se realizaron lecturas a 30, 50 y 80 km/h.

Una vez organizada la información obtenida con el equipo, se obtiene la respuesta promedio de cada lectura por cada una de las roderas, así como la velocidad promedio.

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. Se realiza una tabla, en la primera columna se escribe el número de lectura, en la segunda columna la velocidad promedio de cada lectura, y en una tercera columna la respuesta del vehículo en la rodera en estudio, es decir, se realiza una tabla por cada rodera (exterior e interior) como se muestra en la Tabla V-3.

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Obteniendo la Tabla V-3 se prosigue a graficar los valores de velocidad promedio de cada lectura en el eje X, contra la respuesta promedio de cada lectura en el eje Y. En la Figura V.1 se muestra graficados los puntos de la Tabla V-3, usando la función de Excel línea de tendencia seleccionando la opción lineal, se obtiene la ecuación de la recta que satisface el ajuste de la función.

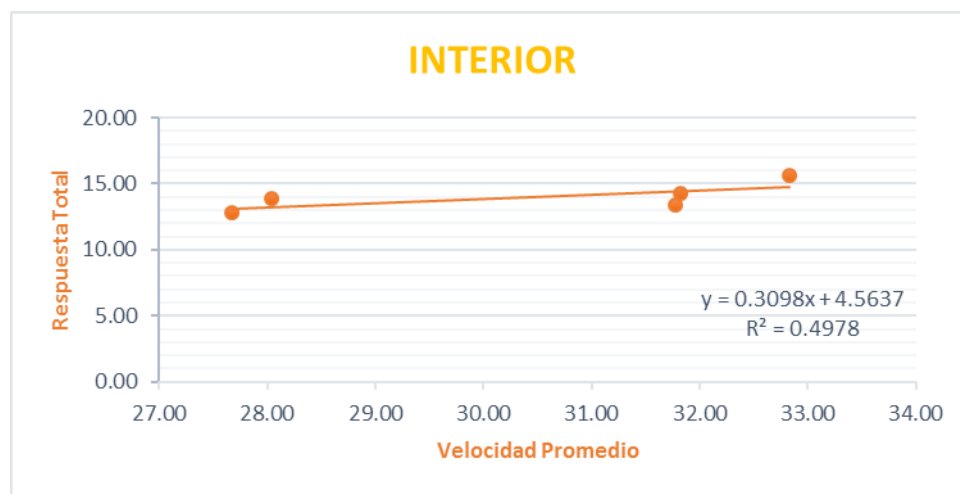


Figura V.1 "Grafica de los datos de la Tabla V-3"

La ecuación se obtiene para cada respuesta (interior y exterior) y por cada velocidad a las que se realizaron las mediciones, en el caso de esta investigación se realizó la medición en 30, 50, y 80 km/h por cada tramo de calibración. Como se muestra en la Tabla V-4 se obtiene la respuesta de cada velocidad en el tramo, sustituyendo la velocidad a la cual se quiere obtener su respuesta en su respectiva ecuación. Es decir, se requiere conocer la respuesta a cada velocidad de medición, de graficar los datos de la Tabla V-3 se obtuvo una ecuación de tendencia lineal que se muestra en la Figura V.1, obteniendo la siguiente ecuación para una velocidad de 30 km/h:

$$y = 0.4479x + 0.5648$$

Sustituyendo:

$$\text{Respuesta a 30 km/h} = (0.4479 \times 30) + 0.5648$$

Como resultado:

Respuesta a 30 km/h = 14.0018

INTERIOR		EXTERIOR	
Ecuación	Respuesta a 30 km/h	Ecuación	Respuesta a 30 km/h
$y = 0.4479x + 0.5648$	14.0018	$y = -0.0045x + 29.771$	29.636

Tabla V-2 "Ecuaciones y Respuesta a 30 km/h, tramo 7"

En la Tabla V-4 se muestran las ecuaciones y el valor obtenido de la respuesta en una velocidad de 30 km/h en el tramo de calibración 5. En la Tabla V-5 se muestra el resumen de la respuesta obtenida con las ecuaciones resultado del procesamiento de la información, con los datos del levantamiento para cada velocidad, por cada respuesta, exterior e interior, en el tramo de calibración 5.

VELOCIDAD	RESPUESTA	
	INTERIOR	EXTERIOR
30	13.86	29.25
50	12.53	26.42
80	11.16	23.85

Tabla V-3 "Resumen de Respuesta obtenida en el Tramo 7"

Una vez obtenidos estos valores de la respuesta de cada tramo y organizadas las lecturas de acuerdo a su velocidad. Se pueden establecer los siguientes registros mostrados en la Tabla V-6, en los cuales se presentan el nombre del tramo, las condiciones de su estado superficial, el valor de IRI actual, y la respuesta generada del vehículo, estos datos por cada rodada del neumático del equipo interna y externa a la vía, por cada velocidad a la que se realizó la lectura, en la Tabla V-6 se muestra la respuesta obtenida a una velocidad de 30 km/h, y el valor de IRI de cada vialidad, por cada rodada

30 km/h						
REGISTRO		INTERIOR		EXTERIOR		
Tramo	Estado Vialidad	IRI	Respuesta	Estado Vialidad	IRI	Respuesta
Morelia - Patzcuaro (Carretera Vieja)	Regular	3.62	13.86	Regular	3.62	29.25
Camino a Teremendo	Regular	3.12	12.05	Regular	3.12	26.55
Morelia - Tzurumutaro	Bueno	2.40	11.92	Bueno	2.40	19.69
Morelia – Jiquilpan (2)	Malo	4.60	20.15	Malo	4.60	47.98
Morelia – Salamanca	Bueno	2.50	11.09	Bueno	2.50	20.45
Morelia - Jiquilpan (1)	Malo	7.70	37.85	Malo	7.70	94.53

Tabla V-4 "Resumen Respuesta obtenida en tramos a 30 km/h"

5.2.1 Obtención de las ecuaciones de cada velocidad a la que se realizó la lectura

Una vez que se cuenta con los registros anteriores, se realiza una gráfica de los valores de IRI contra Respuesta obtenida por cada tramo, como se muestra en la Tabla V-7 y en la Figura V.3 se muestra los valores graficados y la línea de tendencia polinómica que es la ecuación que más ajusta.

EXTERIOR 30 km/h	
IRI	Respuesta
3.10	13.86
2.60	12.05
2.40	11.92
4.60	20.15
2.50	11.09
7.70	37.85

Tabla V-5 "IRI y Respuesta a 30 km/h, Exterior"



Figura V.3 "Grafica IRI contra Respuesta a 30 km/h"

Una vez graficados los puntos se requiere encontrar la ecuación de tendencia que más ajuste, para lo cual en esta investigación se realizó la función del programa Excel línea de tendencia, la cual consiste en ajustar datos discretos a una línea recta, o modelos no lineales que mediante un tratamiento matemático pueden adquirir un comportamiento lineal,

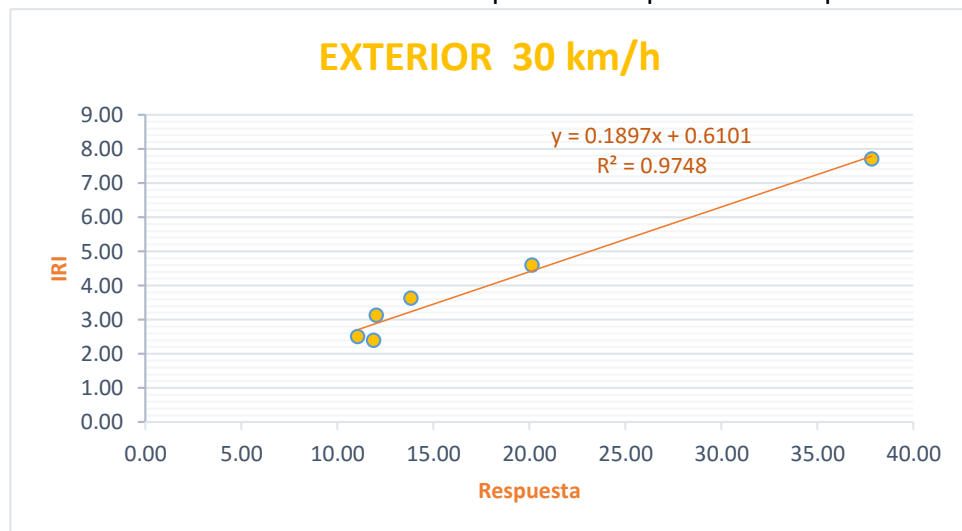


Figura V.2 "Grafica IRI contra Respuesta a 30 km/h y línea de tendencia"

como el modelo exponencial, potencial, logarítmica, polinómica y la media móvil. [33]

Se puede apreciar en la Figura V.3 que la línea ajusta en más del 97%. Obteniendo con esto la ecuación de ajuste lineal $y = 0.1897x + 0.6101$, esta ecuación es la que satisface la relación que existe entre la respuesta y el valor de IRI para una velocidad de 30 km/h. Estas ecuaciones se obtienen con los registros mencionados anteriormente para cada rodada y por cada velocidad a la que se realice la lectura. Mientras más lecturas se tomen por velocidad, el sistema será más preciso. Por lo tanto, mientras más datos se obtengan para

calibrar, mayor eficiencia y precisión existirá en las mediciones con el Equipo Tipo Respuesta.

El procedimiento anterior se realizó para calibrar la medición del valor de IRI en cualquier vialidad obtenido con el equipo EMIRI UMICH 001, en diferentes velocidades, es decir, no estar restringido a utilizar una sola velocidad, ya que no se puede circular bajo una misma velocidad en todas las vialidades debido a los límites de velocidad (velocidad mínima y máxima permitida en la vía). Sin embargo, es necesario mencionar que se requiere realizar la medición lo más exacto posible en la velocidad de medición, es decir, en el caso de 30 km/h mientras más sea la diferencia en la velocidad de circulación, más aumentará la variación en resultados de la medición.

El EMIRI UMICH 001 por medio de esta metodología de calibración puede tomar lecturas de IRI de cualquier vialidad a 30, 50 y 80 km/h, según a la velocidad que se requiera realizar la medición. Considerando la investigación del Banco Mundial sobre el Índice de Rugosidad Internacional, la velocidad idónea para realizar la medición de IRI de una vialidad es de 80 km/h.

Capítulo VI.

Presentación de Resultados

Una vez que se calibró el equipo y se concluyó con el desarrollo del software, se puede continuar a realizar mediciones en las vialidades para la obtención de los valores de IRI, que es el tema central de esta investigación. En el Capítulo I se mencionó la importancia de la obtención de este parámetro, para conocer las condiciones actuales en las que se encuentra una red vial, es decir, se requiere estar en continuo estudio realizando auscultaciones de las vialidades, para obtener la información necesaria para tomar decisiones en cuestión de mantenimiento de la red vial.

En esta investigación el tema central es el diseño e implementación de un algoritmo para la medición del IRI en LabVIEW, si se tiene error o variación en las mediciones, es debido al tipo de medición que se realiza o a una mala calibración del mismo, el error que se pueda llegar a obtener en la medición se elimina realizando una calibración correcta, cambiando las constantes utilizadas en esta investigación, donde no se altera el funcionamiento del software, pero si puede aumentar la precisión de las mediciones realizadas con el equipo. Es decir, el objetivo general de la tesis fue alcanzado, ya que se desarrolló el algoritmo para la medición de IRI, con el EMIRI UMich 001 en la plataforma informática LabVIEW. La resolución y sensibilidad del instrumento, radica en el hardware de la instrumentación Virtual, ya que el software es el encargado de procesar los datos proporcionados por el hardware.

Para esta presentación de resultados se realizaron dos mediciones de IRI, comparándolo contra valores de IRI proporcionados por la Secretaría de Comunicaciones y transportes, obtenidos con una auscultación de los pavimentos realizada con perfilógrafo de alta velocidad de unos tramos carreteros.

El primer tramo carretero en el que se realizó la medición fue en el de la carretera Morelia – Salamanca km 7+400 al 8+100, obteniendo como resultado de la medición valores de IRI a cada 100m como se muestra en la Tabla VI-1.

INICIA	TERMINA	IRI MEDIDO	IRI SCT	% VARIACIÓN
7+400	7+500	2.19	2.00	9%
7+500	7+600	1.59	1.45	9%
7+600	7+700	1.82	1.70	6%
7+700	7+800	1.56	1.47	6%
7+800	7+900	1.67	1.57	6%
7+900	8+000	1.78	1.70	5%
8+000	8+100	2.64	2.53	4%

Tabla VI-1 "Resultados Carretera Morelia - Salamanca"

El segundo tramo carretero en el que se realizó la medición fue en el de la carretera Morelia – Pátzcuaro km 5+180 al 5+280, obteniendo como resultado de la medición valores de IRI a cada 100m como se muestra en la Tabla VI-2.

INICIA	TERMINA	IRI MEDIDO	IRI SCT	% VARIACIÓN
5+180	5+280	1.70	1.58	7%
5+280	5+380	2.24	2.11	6%
5+380	5+480	1.46	1.34	8%
5+480	5+580	1.75	1.60	9%
5+580	5+680	1.35	1.28	5%
5+680	5+780	1.54	1.47	4%
5+780	5+880	1.21	1.15	5%

Tabla VI-2 "Resultados Tramo Carretero Morelia- Pátzcuaro"

Estas variaciones se deben a la pre calibración, donde se utilizaron valores obtenidos con un equipo de medición tipo respuesta, el cual con el tiempo tiende a tener una variación en la medición, además de esto, la variación de IRI también incide en los puntos del camino que se toma la lectura, es decir puede ser que un equipo u otro, no tomo algunas variaciones en la regularidad, pero como se puede apreciar, no son valores que se consideren con alto % de variación, en ambas lecturas se tiene variaciones no máximas a 10%. Los valores también están sujetos en el tiempo de la realización del estudio, debido a que los valores de IRI van cambiando con el tiempo de acuerdo al tráfico y las cargas vehiculares que son sometidos a diario.

La sensibilidad y precisión de las mediciones se pueden mejorar al momento de realizar la calibración y certificación en el IMT. El objetivo de la presente Tesis fue alcanzado al obtener valores de IRI con el algoritmo desarrollado.

Capítulo VII.

Conclusiones y Trabajo Futuro

Una vez finalizada la investigación con el desarrollo y funcionamiento en punto del algoritmo para la medición del Índice de Rugosidad Internacional con el EMIRI UMICH 001, siendo este el objetivo central del presente proyecto, se puede concluir con que se alcanzaron los objetivos planteados al inicio de la investigación y presentando las siguientes conclusiones:

- Al realizar una recopilación exhaustiva, de la información necesaria para el desarrollo adecuado de la investigación, se considera que la metodología utilizada en la presente investigación es la más adecuada en la actualidad para el desarrollo de un software de instrumentación virtual, y en específico para llevar al óptimo funcionamiento el EMIRI UMICH 001. Debido a que el equipo se diseñó bajo el principio de instrumentación virtual, este es un instrumento de arquitectura abierta, puede ser modificado de acuerdo a las necesidades que se presenten en el desarrollo del PROYECTO IRI UMICH
- Una vez realizado el software para la medición del IRI en la plataforma LabVIEW, y realizando pruebas del manejo del programa por usuarios, se concluye que la interfaz final del software es precisa y concisa, lo cual limita la dificultad de comprensión del software.
- Al comparar los resultados obtenidos con la pre calibración del Equipo contra valores de IRI conocidos, se concluye que existe variaciones en los resultados de las mediciones de acuerdo al tipo de instrumento, debido a que la medición utilizada se conoce como medición indirecta, ya que los valores de IRI están en función de la resolución y sensibilidad del instrumento.
- El desarrollo de la presente investigación es fundamental para la continuación del PROYECTO IRI UMICH, por lo cual se concluye que se realizó un gran avance en este proyecto, permitiendo junto con la Construcción del EMIRI UMICH 001 la apertura para

realizar mediciones de IRI de las vialidades y con un procesamiento de esta información obtener factores como los Costos de Operación del usuario.

- ✚ Siendo el Objetivo General la obtención del título de Ingeniero Civil, esta investigación permitió aprender e incursionar en áreas que no son de la Ingeniería Civil, lo cual tuvo su grado de dificultad, permitiendo usar y aumentar las capacidades ya adquiridas en la licenciatura, concluyendo que terminar esta investigación fue un gran reto y una gran satisfacción obtenida, por todo el trabajo y esfuerzo empleado por todo el gran grupo de trabajo. Ya que el EMIRI UMICH 001 es completamente una creación Nicolaita.

Las líneas de Trabajo futuro se basan en la continuación del PROYECTO IRI UMICH donde sus fases de investigación se mencionaron en el *Capítulo IV. Desarrollo del Algoritmo para la Obtención del IRI*, las cuales son:

- ✚ La Calibración y Certificación del Equipo, la cual se realizará en los tramos de prueba del IMT siguiente el proceso mencionado en el Capítulo V, de la presente investigación.
- ✚ Obtención de los valores de IRI, de la red Vial de Morelia para tener un catálogo con los valores de IRI de las vialidades y con estos obtener los Costos de Operación de la red Vial de Morelia, para que el usuario conozca lo que le cuesta transitar por la red vial, y la administración pueda tomar mejores decisiones de rehabilitación y mantenimiento de las vialidades, de acuerdo a su demanda de tránsito y sus costos de operación.
- ✚ Procesamiento de los datos obtenidos con el acelerómetro, ya que en esta investigación solo se llegó a la adquisición de los datos, pero no se procesaron.
- ✚ Agregar al equipo los Sensores Láser, GPS, cámaras, entre otras, que permitan subir de nivel al EMIRI UMICH 001 a un perfilógrafo de alta velocidad y hacer la comparativa entre los datos obtenidos con el sistema Tipo Respuesta y el sistema perfilógrafo de alta velocidad en el mismo vehículo.
- ✚ Realizar una Segunda Versión del Software desarrollado para la presente tesis, que permita incluir lo anteriormente mencionado.

Anexos

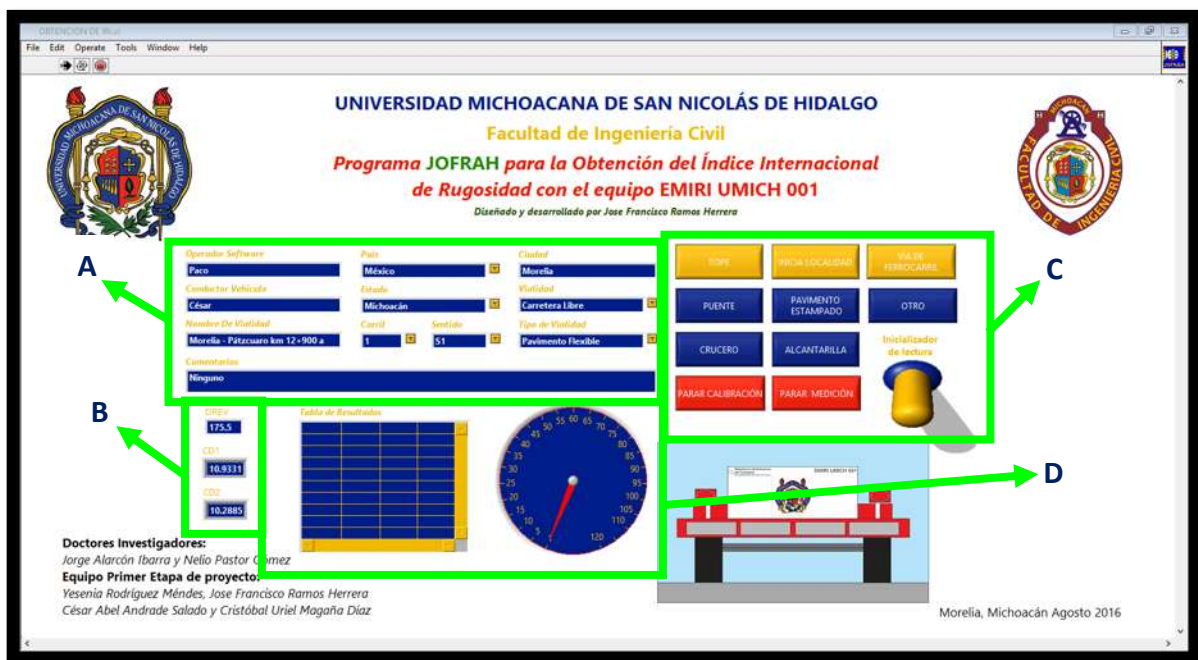
Apéndice A “Manual de usuario de programa JOFRAH”

Manual de Instalación

1. Teniendo ubicado el archivo de tipo .rar se requiere extraer los ficheros en la carpeta donde se quiera guardar la carpeta de instalación del programa JOFRAH.
2. Una vez extraídos los ficheros se continúa ejecutando el archivo tipo .exe
3. Seguir instrucciones.
4. Ya instalado el programa, se puede continuar con su ejecución.

Partes del Panel Frontal del software

Las partes componentes del panel frontal del software son:



- A. Información de la vialidad.
- B. Constantes de calibración de sensores.
- C. Botones de factores que influyen en la medición, inicializador de lectura y botones para finalizar la ejecución del programa.
- D. Indicadores de la velocidad y de resultados obtenidos con la lectura.

Procedimiento para utilizar el software

1. Ir al menú de programas, buscar la aplicación JOFRAH y ejecutar, el equipo requiere estar sin movimiento, es decir, requiere estar fijo en una velocidad 0 hasta que se indique.
2. Una vez iniciado el programa aparecerá el panel de control del software.



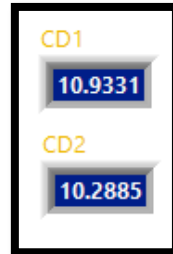
3. Lo primero es introducir los datos de las características de la vialidad en estudio.

Operador Software	País	Ciudad
Paco	México	Morelia
Conductor Vehículo	Estado	Vialidad
César	Michoacán	Carretera Libre
Nombre De Vialidad	Carril	Tipo de Vialidad
Morelia - Pátzcuaro km 12+900 a	1	Pavimento Flexible
Comentarios		
Ninguno		

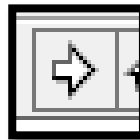
4. Si la constante de calibración del sensor longitudinal es diferente al valor por default, introducir el valor correcto.



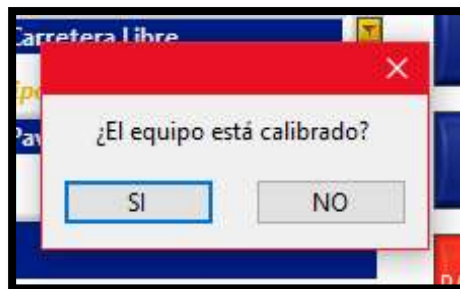
- Si los sensores de desplazamiento lineal se encuentran calibrados, introducir los valores de las constantes de calibración, CD1 es la constante del Sensor de desplazamiento lineal 1 y CD2 es la constante de calibración del Sensor de desplazamiento lineal 2.



- Una vez que se introdujeron los datos necesarios para la ejecutar el programa, se puede continuar corriendo la rutina presionando el botón RUN.



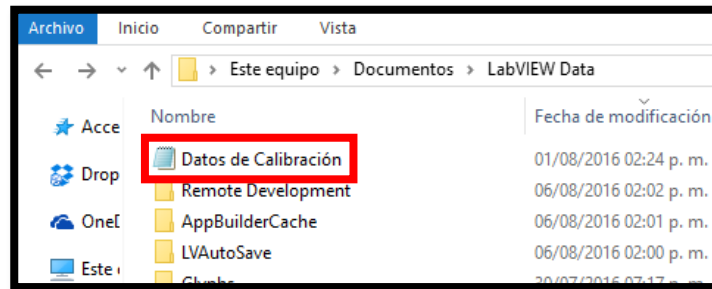
- Al ejecutar la rutina, se seleccionará la opción que se quiera realizar, si el equipo se encuentra calibrado se realizará una medición de los valores de IRI de las vialidades en estudio, si el equipo no se encuentra calibrado se realizará una medición de las variables Respuesta, longitud de tramo, y velocidad promedio de circulación, para realizar la calibración del Equipo.



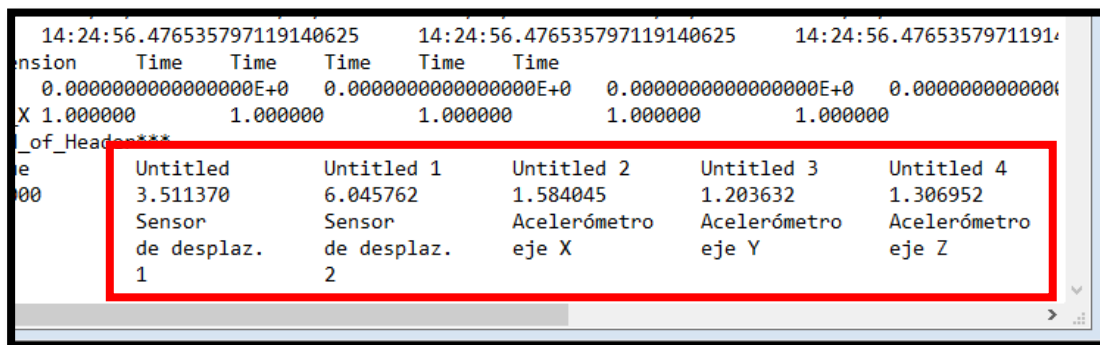
- Si se eligió la opción donde el equipo no se encuentra calibrado, aparecerá otra decisión, la cual implica seleccionar si se cuenta con las constantes de calibración o no.



Si no se encuentran calibrados los sensores, el programa obtendrá las constantes de calibración. Para ello, es necesario que el equipo se encuentre en paro total, es decir no se encuentre en movimiento. Una vez que el software realiza el proceso de calibración un archivo en la librería *Documentos>LabVIEW Data>Datos de Calibración.lvm*



Estas constantes serán utilizadas cada que se vuelva a correr el programa, el utilizar constantes distintas implica iniciar desde 0 la calibración del equipo.



Una vez que el software termina el proceso de calibración, comienza a obtener lecturas de las variables físicas. Este proceso ocurre de igual manera cuando se elige que los sensores están calibrados y cuando el equipo se encuentra calibrado. La diferencia al elegir la opción de si el equipo se encuentra calibrado o no, es la información que se obtiene al respecto.

- Una vez que se seleccionó la opción deseada del programa y se realizó el proceso de calibración de sensores si es el caso, se continua con la medición de la vialidad en la que se quiere realizar la de IRI. Una vez que deseada y se llega vialidad en estudio lectura.



calibración o la obtención se obtiene la velocidad al punto de inicio de la se activa el inicializador de

Al activar el inicializador de lectura, se comienza a obtener valores de la medición, los cuales son registrados en un archivo que se genera a partir de que se inicia el programa, este se puede abrir una vez que se paró el programa.

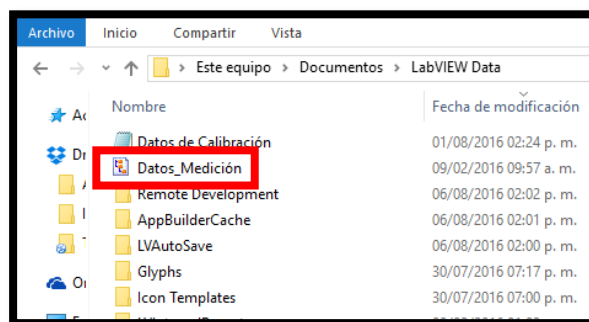
Durante la medición de IRI se puede pasar con el equipo sobre factores que influyen y alteran los datos obtenidos con la lectura, presentando alteraciones en los valores de IRI obtenidos, es por ello que al pasar por alguno de estos factores se requiere activar el botón unos cuantos metros antes de que pase el vehículo sobre de este, y de la misma manera desactivarlo unos metros después de que se pasó ese factor.



Para detener el programa, si se seleccionó la opción calibración este programa parará de manera automática al completar el registro de los 300 metros, si se seleccionó la opción medición de IRI el programa finalizará en el momento que se presione el botón **PARAR MEDICIÓN**.



Se requiere dirigirse a la carpeta *Documentos>LabVIEW Data>Datos_Medición.tdm*



El software realiza registros de información a cada 100 metros, los cuales contienen información de la velocidad promedio y de la respuesta del vehículo o del IRI según sea el caso, obtenido en ese segmento de la vialidad.

	A	B	C	D
1	Time*	Respuesta Interna	Respuesta Externa	Velocidad Promedio
2	0+000 - 0+100	9.321	7.556	29.703196
3	0+100 - 0+200	8.994	7.253	31.278186
4	0+200 - 0+300	10.875	9.072	30.664658
5				

Los datos obtenidos para calibración son los correspondientes para un tramo de 300 metros de una vialidad.

	A	B	C	D
1	Time*	IRI interno	IRI externo	IRI Promedio
2	0+000 - 0+100	3.45	3.76	3.61
3	0+100 - 0+200	3.68	3.94	3.81
4	0+200 - 0+300	3.29	3.57	3.43
5	0+300 - 0+400	2.98	3.16	3.07
6	0+400 - 0+500	3.17	3.42	3.30
7				

Los datos obtenidos en una medición de IRI son los que se produjeron durante el tramo de la medición, es decir, es la información a cada 100 metros a partir de que se inició la lectura de la medición y hasta que se paró el programa.

Apéndice B “Obtención de IRI por medio de las elevaciones del perfil longitudinal”

Como se mencionó en el apartado de esta investigación 1.10.1 , el proceso para la obtención de este valor de IRI consiste en realizar un levantamiento topográfico o utilizar un equipo de medición del perfil longitudinal del terreno, esto es una vez que se seleccionaron los tramos de calibración.

Ya ubicados los tramos que se usaran para la calibración y teniéndolos marcados en segmentos de tramo a cada 250 o 500mm según sea el caso, se continúa realizando el levantamiento longitudinal de elevaciones del perfil, por donde pasará cada rodada del vehículo, interior y exterior. Obteniendo 1200 puntos por rodada si se realiza a cada 250mm o 600 a cada 500mm de las elevaciones por rodada, en un tramo de 300 metros. Como se puede apreciar en la Figura A los datos se obtienen al milímetro tomando un banco de nivel como referencia.

Una vez que se cuenta con todos los puntos del levantamiento topográfico se continua con el procesamiento de la información.

Se obtienen el perfil de nivel de terreno, como se muestra en la Figura B, verificando que no exista algún error en la medición. Siendo esto correcto, se calculan las diferencias de elevaciones entre cada lectura (véase Figura C).

Una vez que se verifico que el levantamiento del perfil longitudinal fue correctamente obtenido, se continúa sometiendo estos datos en un primer filtrado, el cual es un análisis estadístico (media móvil) con adecuaciones matemáticas para poder generar un perfil que permita ser analizado desde el punto de vista de las irregularidades que se puedan observar (véase Figura

D). Esto se realiza para simular el comportamiento entre las llantas de los vehículos y la carretera, y para reducir la sensibilidad del algoritmo del IRI al intervalo de muestreo.

Cadenamiento	Elevaciones mm	
	Exterior	Interior
0+000.00	100064	100120
0+000.25	100069	100121
0+000.50	100072	100128
0+000.75	100074	100131
0+001.00	100080	100137
0+001.25	100080	100140
0+001.50	100081	100141
0+001.75	100081	100144
0+002.00	100084	100148
0+002.25	100089	100151
0+002.50	100090	100152
0+002.75	100091	100157
0+003.00	100097	100160
0+003.25	100099	100161
0+003.50	100100	100165
0+003.75	100103	100168
0+004.00	100106	100171
0+004.25	100109	100173
0+004.50	100111	100180
0+004.75	100112	100181
0+005.00	100117	100181
0+005.25	100119	100182
0+005.50	100122	100183
0+005.75	100124	100190
0+006.00	100130	100191

Figura A "Parte del levantamiento topográfico del perfil longitudinal de elevaciones de un tramo de calibración"

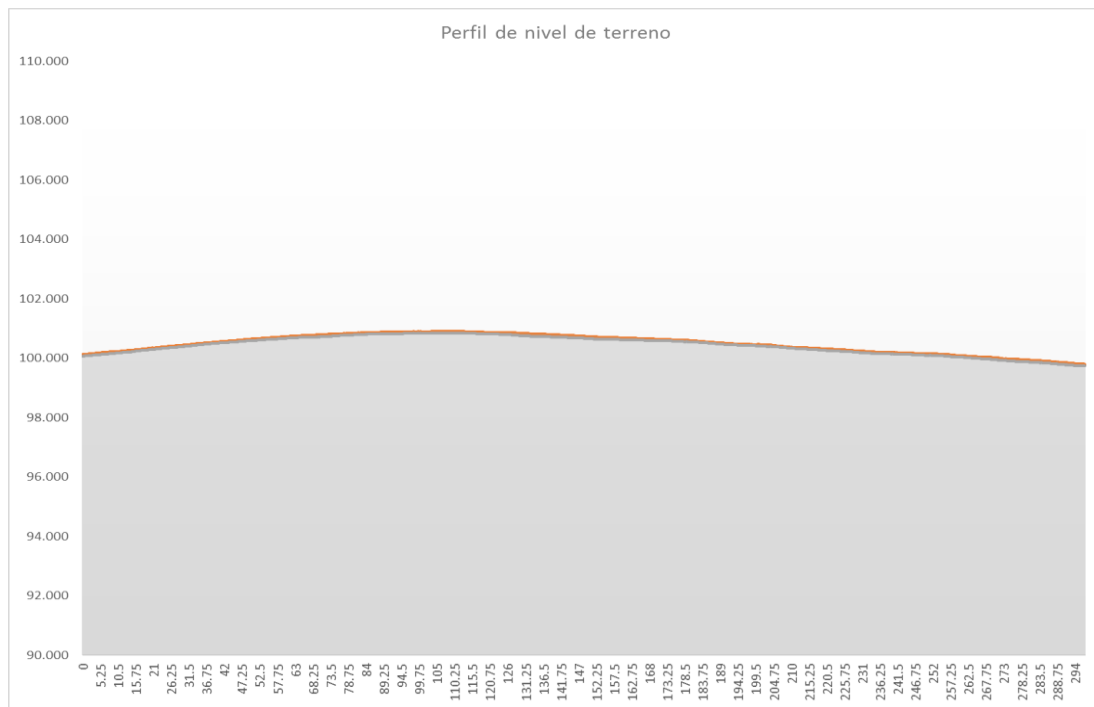


Figura B "Perfil de nivel de terreno"

El nuevo perfil generado se introducirá dentro de un segundo filtro, este segundo filtro es la simulación del cuarto de carro que se desplaza a diferentes velocidades. Esta simulación se realiza con el algoritmo del Banco Mundial, introduciendo el perfil de elevaciones, la distancia entre cada lectura (recomendada 250mm) y la velocidad a la que se quiere realizar

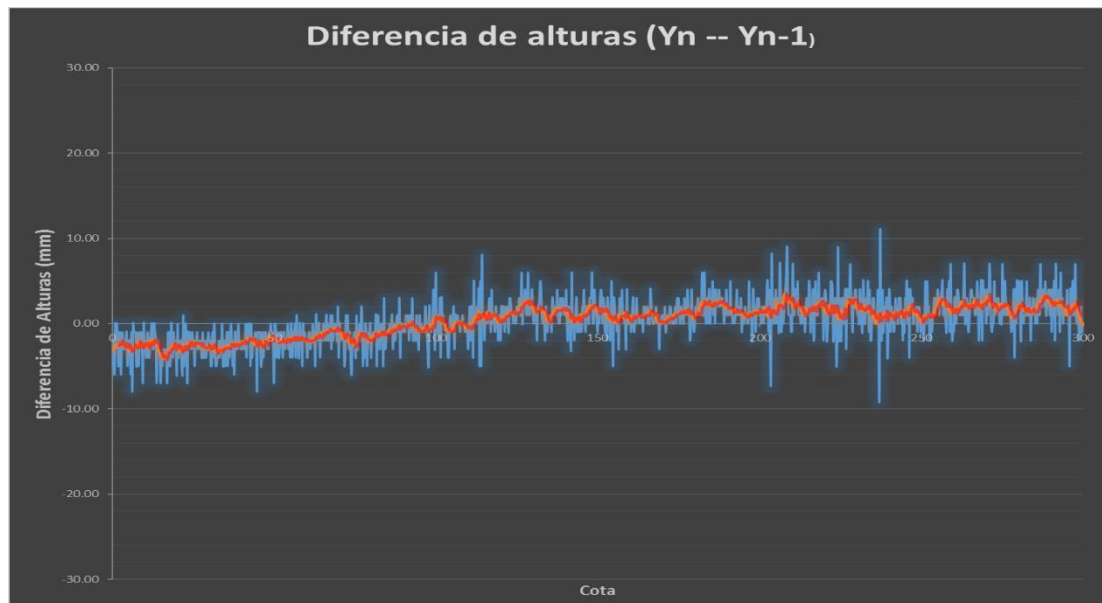


Figura C "Diferencia de Elevaciones del perfil longitudinal"

la simulación (el Banco Mundial estableció 80 km/h como la mejor velocidad para medición de IRI).

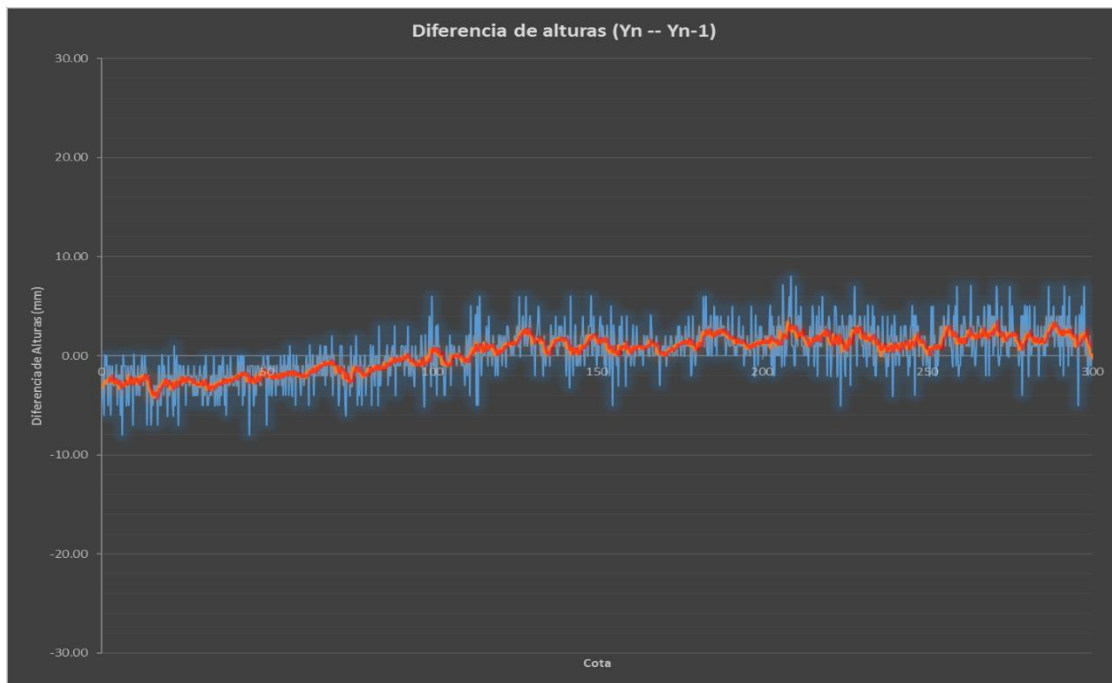


Figura D "Diferencia de Elevaciones del perfil longitudinal Filtrado"

El valor de IRI es el valor obtenido en la simulación en la última elevación, debido a que el cálculo de IRI es una variación acumulada al pasar por la vialidad (véase Figura E).

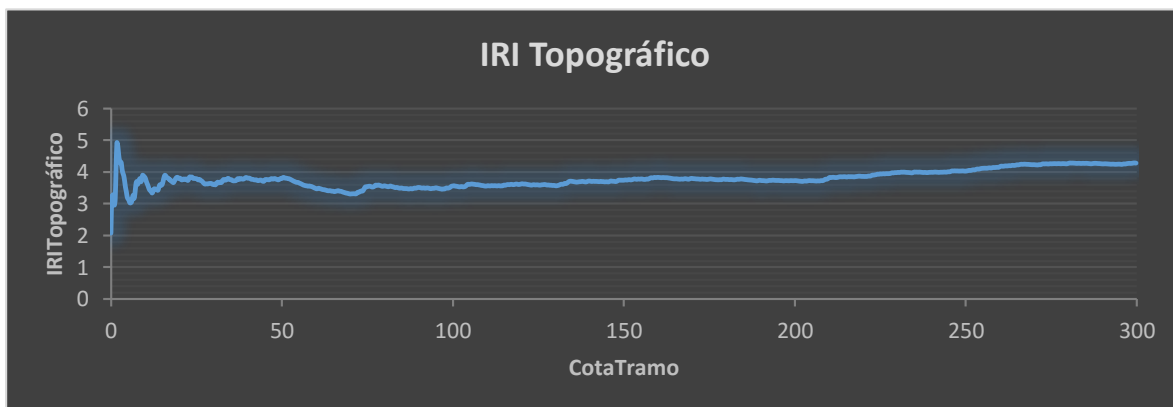


Figura E "IRI obtenido con la simulación del cuarto de carro del perfil longitudinal Filtrado"

Apéndice C “Algunos Conceptos”

Índice de Perfil

Este indicador se utiliza para determinar la calidad del acabado en la superficie de rodamiento durante la construcción de una vialidad y se realiza con un perfilógrafo tipo California, que cumple con la norma ASTM E1274. El valor máximo admisible del IP que establece la Norma es de 31 cm/Km para construcciones de carpetas de granulometría densa en pavimentos en operación, y en carreteras nuevas su valor máximo admisible es de 14 cm/km.

PCI bus

Una de las conectividades que encontramos observando en la Tarjeta Madre es justamente la de PCI, y que consiste en una conjunción de circuitos integrados o bien de tarjetas de expansión que se ajustan a los conectores de este tipo (contacto o conector).

FPGA

Es un dispositivo semiconductor que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada 'in situ' mediante un lenguaje de descripción especializado. Los FPGAs son chips de silicio reprogramables. El silicio reprogramable tiene la misma capacidad de ajustarse que un software que se ejecuta en un sistema basado en procesadores, pero no está limitado por el número de núcleos disponibles.

Magnitudes

Las Magnitudes son atributos con los que medimos determinadas propiedades físicas, por ejemplo, una longitud, corriente eléctrica, etc. Se tienen dos tipos de magnitudes escalares y vectoriales. Las escalares tienen únicamente como variable a un número que representa una determinada cantidad. Por ejemplo, la masa de un cuerpo se mide en kilogramos. Las vectoriales contienen magnitud y sentido, como la velocidad y fuerza.

Efecto Hall

Es la aparición de un campo electrónico por separación de cargas en el interior de un conductor, por el que circula una corriente en presencia de un campo magnético con componente perpendicular al movimiento de las cargas. Este campo eléctrico es perpendicular al movimiento de las cargas y a la componente perpendicular del campo magnético aplicado.

TDPA

Transito Diario Promedio Anual registrado en un punto de una vialidad.

Índice de Tablas

Tabla I-1 "Clasificación de los tipos de textura de los pavimentos [9]"	8
Tabla I-2 "Principales problemas de Ahuellamiento [11]"	11
Tabla I-3 "Tipos de Textura y Regularidad Superficial"	17
Tabla I-4 "Valores de IRI en Uruguay" [4]	24
Tabla I-5 "Datos de Auscultación proporcionados por SCT en agosto 2016"	25
Tabla I-6 "Factores influyentes en la medición de IRI" [1]	32
Tabla III-1 "Símbolos que componen el Diagrama de Flujo" [30]	57
Tabla IV-1 "Variaciones en las mediciones de la Respuesta del Vehículo"	89
Tabla IV-2 "Lecturas de calibración del Sensor Longitudinal"	94
Tabla IV-3 "Lecturas de la longitud de tramo"	95
Tabla V-1 "Tramos de Calibración"	114
Tabla V-2 "Datos obtenidos de la medición de las variables físicas del tramo 7 a 30 km/h "	
.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla V-3 "Datos Exterior para graficar"	¡Error! Marcador no definido.
Tabla V-4 "Ecuaciones y Respuesta a 30 km/h, tramo 7"	116
Tabla V-5 "Resumen de Respuesta obtenida en el Tramo 7"	116
Tabla V-6 "Resumen Respuesta obtenida en tramos a 30 km/h"	116
Tabla V-7 "IRI y Respuesta a 30 km/h, Exterior"	117
Tabla VI-1 "Resultados Carretera Morelia - Salamanca"	121
Tabla VI-2 "Resultados Tramo Carretero Morelia- Pátzcuaro"	121

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura I.1 "Áreas que componen la infraestructura de un País"	1
Figura I.2 "Porcentajes del transporte de pasajeros en México [2]"	2
Figura I.3 "Porcentaje de Transporte de Carga en los diferentes medios en México [2]"	3
Figura I.4 "Relación costo de operación y costo de conservación"	4
Figura I.5 "Costos que influyen en el costo de operación"	5
Figura I.6 "Análisis de Ciclo de Vida de un Pavimento [5]"	6
Figura I.7 "Esquema de deterioros de pavimentos 1ra y 2da fase" [7].....	8
Figura I.8 "Escala de valores de ISA"	9
Figura I.9 "Masas que se consideran para la obtención del IRI"	14
Figura I.10 "Sistema de suspensión de vehículo"	16
Figura I.11 "Componentes y constantes del Cuarto de Carro"	16
Figura I.12 "Escala de valores de IRI y características de los pavimentos"	19
Figura I.13 "Diagrama de Flujo de Algoritmo de Calibración del Banco Mundial"	23
Figura I.14 "Clasificación de la Superficie de las vialidades en el estado de Michoacán según su valor de IRI"	25
Figura I.15 "Perfilómetro de alta velocidad"	26
Figura I.16 "Perfilógrafo tipo California"	27
Figura I.17 "Perfilador de peso ligero"	27
Figura I.18 "May's Ride Meter" [1]	28
Figura I.19 "Rugosímetro BPR"	29
Figura I.20 "Nivel Topográfico"	29
Figura I.21 "Dipstick IRI"	29

Capítulo 2

Figura II.1 "Requisitos de una Unidad de Medida"	34
Figura II.2 "Partes esenciales de una instrumentación"	36
Figura II.3 "Clasificación de instrumentos"	37
Figura II.4 "Estructura de un instrumento tradicional"	38
Figura II.5 "Estructura de un Instrumento Virtual" [19]	39
Figura II.6 "Componentes del Hardware de la instrumentación virtual"	40
Figura II.7 "Bornera"	44
Figura II.8 "Borne" Imagen obtenida de http://www.ndu.cl	44
Figura II.9 "Esquema de bloques de una tarjeta de adquisición de datos" [24]	46
Figura II.10 "Proceso de datos"	46
Figura II.11 "Proceso central de un Instrumento virtual"	48
Figura II.12 "EMIRI UMICH 001" [1].....	49

Figura II.13 "Variables Físicas medidas por el EMIRI UMICH 001"	49
Figura II.14 "Sensor de Efecto Hall"	50
Figura II.15 "Sensor de desplazamiento lineal"	50
Figura II.16 "Cable Multiconductor Blindado"	51
Figura II.17 "Equipo para soldar (electrónica) utilizado en el EMIRI UMICH 001"	51
Figura II.18 "Borne utilizado en el EMIRI UMICH 001"	51
Figura II.19 "Conectores de NI accesorio de la Serie NI USB-600"	52
Figura II.20 "DAQ NI USB-6009"	52
Figura II.21 "Cable USB 2.0 de 5m, USB A - USB B"	53
Figura II.22 "Computadora y Software utilizado en el EMIRI UMICH 001"	53

Capítulo 3

Figura III.1 "Panel Frontal"	58
Figura III.2 "Diagrama de Bloques"	58
Figura III.3 "Paleta de controles"	59
Figura III.4 "Submenú Tipo Numérico"	59
Figura III.5 "Paleta de funciones"	60
Figura III.6 "Submenú de Estructuras de Control"	60
Figura III.7 "Panel Frontal Multiplicación"	60
Figura III.8 "Diagrama de Bloques Flujo"	61
Figura III.9 "Tipos de Datos"	62
Figura III.10 "STACKED SEQUENCE"	63
Figura III.11 "FLAT SEQUENCE con dos apartados"	63
Figura III.12 "Estructura CASE"	63
Figura III.13 "Estructura CASE"	64
Figura III.14 "Estructura FOR"	64
Figura III.15 "NI DAQmx"	66
Figura III.16 "Funciones DAQmx - Data Acquisition"	66
Figura III.17 "Señal Analógica"	68
Figura III.18 "Señal Digital"	69
Figura III.19 "Digitalización de Señal"	69
Figura III.20 "Digitalización de señal analógica a varios niveles digitales"	70
Figura III.21 "Método de desarrollo espiral"	72

Capítulo 4

Figura IV.1 "Fases PROYECTO IRI UMICH"	74
Figura IV.2 "Proceso de calibración de Sensor de desplazamiento lineal"	75
Figura IV.3 "Rodadas del EMIRI UMICH 001"	79
Figura IV.4 "Panel Frontal Cálculo de la Respuesta del Vehículo"	84
Figura IV.5 "Diagrama de Bloques Cálculo de la Respuesta del Vehículo"	84
Figura IV.6 "Panel Frontal del Cálculo Longitud del Tramo"	85
Figura IV.7 "Diagrama de Bloques Cálculo de la Longitud de Tramo"	85

Figura IV.8 "Panel de control Velocidad del recorrido"	86
Figura IV.9 "Diagrama de Bloques Cálculo de la Velocidad de recorrido"	86
Figura IV.10 "Filtro Promediador"	89
Figura IV.11 "Grafica línea de tendencia del sensor de Desplazamiento Longitudinal"	94
Figura IV.12 "Fases para la obtención de IRI con el EMIRI UMICH 001"	98
Figura IV.13 "Diagrama de Jerarquía de JOFRAH"	98
Figura IV.14 "Generador de Archivos de Medición"	99
Figura IV.15 "Generador de Archivo de Levantamiento de Calibración"	101
Figura IV.16 "Cálculo de la Velocidad de Circulación y longitud de tramo"	102
Figura IV.17 "Filtro de factores que influyen en la medición de IRI"	103
Figura IV.18 "Adquisición de la Respuesta del Vehículo"	104
Figura IV.19 "Autocalibración de sensores"	106
Figura IV.20 "Inicializador de Escritura"	107
Figura IV.21 "Icono del VI JOFRAH"	108
Figura IV.22 "Interfaz del VI JOFRAH"	109
Figura IV.23 "Seleccionador de opciones 1"	110
Figura IV.24 "Seleccionador de opciones 2"	110
Figura IV.25 "Diagrama de Bloques del VI JOFRAH"	110
Figura IV.26 "Diagrama de flujo de Algoritmo JOFRAH"	112

Capítulo 5

Figura V.1 "Grafica de los datos de la Tabla V-3"	115
Figura V.2 "Grafica IRI contra Respuesta a 30 km/h"	118
Figura V.3 "Grafica IRI contra Respuesta a 30 km/h y línea de tendencia"	118

Referencias

- [1] Y. Rodríguez Méndez, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TIPO RESPUESTA DE BAJO COSTO PARA LA MEDICIÓN DE IRI BASADO EN UNA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS, Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2016.
- [2] SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, «INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE 2013-2018,» Febrero 2013. [En línea]. Available: http://www.sct.gob.mx/uploads/media/Presentacion_RMC_Infraestructura_de_Transporte_2013-2018.pdf.
- [3] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, UNA ESTRATEGIA PARA LA CONSERVACION DE LA RED CARRETERA, Sanfabdila, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte, 1995.
- [4] M. C. Arriaga Patiño, P. Garnica Anguas y A. Rico Rodríguez, ÍNDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD EN LA RED CARRETERA DE MÉXICO, Sanfandila, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte, 1998.
- [5] Dirección general de Servicios Técnicos, Guía de Procedimientos y Técnicas para la Conservación de Carreteras en México, México, D.F.: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2014.
- [6] Á. Sampedro Rodríguez, Desarrollo de una metodología de análisis de ciclo de vida integral específica para carreteras, Madrid: Plataforma Tecnológica Española de la Carretera, 2011.
- [7] H. De Solminihaç T., R. Salsilli M., J. P. Covarrubias T. y M. Vidal M., «Desarrollo de Modelos de Deterioro Incrementales de Segunda Fase para Pavimentos de Hormigón.,» *Ingeniería de Construcción*, Vols. %1 de %2Enero - Junio, nº 17, pp. 34-46, 1998.
- [8] P. O. Sandoval de León, CONSIDERACIONES SOBRE LA APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE FRICCIÓN INTERNACIONAL (IFI) EN LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD EN CARRETERAS, Monterrey, Nuevo León: Universidad Autonoma de Nuevo León, 2000.
- [9] D. Pérez Madrigal, Análisis del Índice de Perfil en Tramos Carreteros y Algunas Recomendaciones para Manejarlo, México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [10] A. Mendoza Díaz, E. Abarca Pérez y M. G. Saucedo Rojas, Prácticas para evaluar la calidad de infraestructura carretera de cuota, Sanfandila, Queretaro: Instituto Mexicano del Transporte, 2011.
- [11] G. Thenoux Z. y H. Carrillo O., ANALISIS DE CASOS DE AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFALTICAS CHILENAS, Chile: Centro de Ingeniería e Investigación Vial .
- [12] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Manual de Capacidad Vial de 1985 (Una Visión Ejecutiva), Querétaro, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte, 1991.
- [13] T. D. G. a. C. A. V. Q. Michael W. Sayers, The International Road Roughness Experiment, Washington, D.C.: The World Bank , 1986.
- [14] I. G. Badilla Vargas, «Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI),» *Infraestructura Vial*, vol. 21, nº 2, pp. 31-37, 2009.
- [15] F. Caro Rivera y G. A. Peña Castro, «Análisis y criterios para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en vías urbanas colombianas que orienten la elaboración de una especificación técnica.,» *Intekhnia*, vol. 7, nº 1, pp. 57-72, 2012.
- [16] J. Montenegro, Evaluación de las condiciones superficiales de una carretera por medio de un equipo de respues mecánica, Morelia Michoacán : Instituto Tecnológico de Morelia, 1999.
- [17] S. M. Karamihas, T. D. Guillespie y S. K., Guidelines for longitudinal pavement profile measurement., National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Research Council, 1999.
- [18] N. Arias, «<http://www.fisica.ru>,» [En línea]. Available: <http://www.fisica.ru/dfmg/teacher/archivos/instrumentos2.pdf>.

- [19] R. Chacón Rugeles, «La instrumentación virtual en la enseñanza de la Ingeniería Electrónica,» *ACCIÓN PEDAGÓGICA*, vol. 11, nº 1, pp. 74-84, 2002.
- [20] A. Creus Solé, «INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL,» de *Instrumentación Industrial*, México, D.F., ALFOMEGA S.A., 1998, p. 644.
- [21] Definición.DE, «<http://definicion.de>,» [En línea]. Available: <http://definicion.de/virtual/>.
- [22] National Instruments, «National Instruments,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/4757/es/>. [Último acceso: 2015].
- [23] R. Pallás Areny, «SENSORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL,» de *Sensores y Acondicionadores de Señal*, BARCELONA (ESPAÑA), MARCOMBO, S.A., 2003, p. 478.
- [24] I. y. Control.net, «instrumentacionycontrol.net,» [En línea]. Available: <http://www.instrumentacionycontrol.net/cursos-libres/instrumentacion/curso-practico-de-instrumentacion/item/343-conexiones-borneras-y-terminales-de-cables-wiring-de-instrumentaci%C3%B3n-parte-1-2.html>.
- [25] A. Luis Farina, «BORNERAS PARTE 1,» *Notas técnicas; Avance Electrónico*.
- [26] J. R. Lajara Vizcaíno y J. Pelegrí Sebastián, LabVIEW Entorno gráfico de programación, México: Alfaomega, 2011.
- [27] L. I. Lugo Ramírez, INTRODUCCION A LAS COMPUTADORAS, Mayagüez, Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico.
- [28] <http://robotica.uv.es/>, «robotica,» [En línea]. Available: <http://robotica.uv.es/pub/Libro/PDFs/CAP11.pdf>. [Último acceso: 2016].
- [29] G. Brassard y P. Bratley, Fundamentals of Algorithmics, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1996.
- [30] N. Pastor Gómez,, «Vision FIC UMICH,» FIC UMICH, 2013. [En línea]. Available: <http://vision.fic.umich.mx/~programacion/programacion.htm>.
- [31] F. Miyara, CONVERSORES D/A Y A/D, Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario, 2004.
- [32] Departamento de Sistemas Informaticos y Computación, «Laboratorio Docente de Computación,» [En línea]. Available: <http://ldc.usb.ve/~abianc/materias/ci4712/ProcesoSW-Letelier.pdf>. [Último acceso: Marzo 2016].
- [33] P. Quintana y E. Villalobos, Métodos Numéricos, con aplicaciones en Excel, Celaya Gto.: REVERTÉ, 2005.
- [34] Real Academia Española, «<http://www.rae.es>,» Octubre 2014. [En línea]. [Último acceso: 2016].
- [35] PIARC, «WORLD ROAD ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE,» [En línea]. Available: <http://www.piarc.org>.