DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN INTELIGENTE PARA CARRETERAS DE LA MALLA VIAL EN BUCARAMANGA

MILCIADES DIAZTAGLE GÓMEZ
Estudiante

ANTONIO FAUSTINO MUÑOZ MONER
Tutor

Universidad Autónoma de Bucaramanga
Ingenierías Fisicomecánicas
Ingeniería Mecatrónica
Automatización y Control
Bucaramanga, 19 de Noviembre de 2013

unab

Tabla de Contenido

1 INTRODUCCIÓN 4

2 RESUMEN 5

3 OBJETIVO GENERAL 6

4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 6

5 ANTECEDENTES 8

6 ESTADO DEL ARTE 10

7 MARCO TEORICO 12

7.1 Pavimentos 12

7.2 Tipos de Pavimentos 13

7.2.1 Pavimentos Flexibles o Asfálticos 13

7.2.2 Pavimentos Rígidos 14

7.2.3 Comparación entre los Tipos de Pavimentos 15

7.3 Grietas 16

7.4 Tipos de Grietas 16

7.4.1 Grietas Cocodrilo 16

7.4.2 Grietas de Borde 17

7.4.3 Grietas de Junta de Bordillo 17

7.5 Nanotecnología 18

8 DISEÑO METODOLÓGICO 22

8.1 Modelo del Sensor para el control del tráfico vehicular basado en el método piezoeléctrico 22

8.2 Modelo del Sensor para el control de la temperatura y la humedad basado en el método termoresistivo 26

8.3 Modelo del Sensor para el control de la deformación basado en el método magnetostrictivo 28

9 MODELO DE PAVIMENTOS Y EL MODELO SENSORICO 29

10 MODELO FUZZY 34

10.1 Reglas Planteadas 35

10.2 Simulación de las Reglas Determinadas 36

10.3 Comportamiento de la Acción Piezoeléctrica 37

10.4 Comportamiento de la Acción Magnetostrictiva 38
10.5 Comportamiento de la Acción Termoresistiva 38
11 MODELO MATEMÁTICO 41
12 CONTROL PREDICTIVO 44
12.1 Comportamiento del Sistema 46
13 SELECCIÓN DE LOS SENSORES 48
13.1 Sensor de Humedad 48
13.2 Sensor de Temperatura 50
13.3 Sensor de Deformación 51
13.4 Sensor de Flujo Vehicular 53
14 COMUNICACIÓN INALÁMBRICA 54
15 CONCLUSIONES 59
16 RECOMENDACIONES 60
17 BIBLIOGRAFÍA 61

INTRODUCCIÓN

La optimización de los recursos asignados a la conservación de vías es un objetivo primordial de los entes administrativos del país, los cuales se buscan cumplir implementando sofisticados sistemas de auscultación y modelos de predicción del comportamiento, a través de técnicas que han tenido su origen y desarrollo en países industrializados, tanto en lo relacionado a los conceptos teóricos de su concepción, como al diseño y fabricación de equipos de alta tecnología y al establecimiento de modelos que permiten simular el comportamiento de los pavimentos a lo largo de su vida útil.

En Colombia, donde los recursos financieros son limitados, involucrar esta tecnología obliga a la incorporación en el sistema de equipos fabricados en los países desarrollados, lo que genera un alto costo en la investigación a gran escala, necesaria para la formulación de modelos de deterioro, obligando a la adaptación de los modelos creados por instituciones internacionales. La aplicación de diferentes metodologías de diseño, tanto de estructuras de pavimento rígido como flexible, basadas en resultados de experiencias extranjeras, no necesariamente asegura una predicción del desempeño mecánico esperado de las estructuras, debido al amplio empleo de materiales no convencionales en la construcción y el incremento de las cargas del tránsito circulante en la actualidad, entre otros factores.

RESUMEN

Se hace necesario explorar a través de la instrumentación, el grado de correlación existente entre las técnicas utilizadas para efectos de diseño y los resultados obtenidos al llevar a cabo la aplicación de dichas determinaciones en la realidad, mediante el conocimiento exacto del comportamiento de las obras de ingeniería, frente a las solicitaciones a las que se ven sometidas durante su operación o servicio, verificando a escala real el desempeño de los materiales frente a variables como la humedad, deformación y la temperatura, entre otras. Esto es de fundamental importancia para establecer las condiciones de operación reales y determinar los factores que influyen en la duración y comportamiento de una obra de ingeniería, cuestión que a su vez, introduce mejoras en los métodos de diseño y caracterización de materiales, y provee mayores elementos de juicio para definir el momento en el que se debe dar inicio al proceso de conservación diferente al mantenimiento rutinario, evitando inversiones posteriores mayores y optimizando así los recursos económicos.

Para el análisis de los parámetros asociados a los pavimentos, se definieron las variables humedad, temperatura, deformación y tráfico vehicular en el que se aplicaron modelos para la evaluación del comportamiento y control de los sensores que miden estas variables. El procedimiento establecido para la instrumentación se validó a través del diseño del control inteligente que permite determinar los parámetros asociados al pavimento en tiempo real. Los sistemas de control inteligente serán diseñados y evaluados a través de modelos de simulación en Labview, Comsol y Matlab.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y desarrollar sistemas de control inteligente del tráfico vehicular dotado de instrumentación de alta precisión para el monitoreo y control de parámetros asociados al comportamiento de carreteras de la malla vial de Bucaramanga.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los parámetros asociados a pavimentos flexibles y rígidos en carreteras urbanas, tales como: humedad, temperatura, nivel de deformaciones, número de ejes y carga del eje en tiempo real.

- Desarrollar y diseñar los sistemas de control y monitoreo necesarios para la medición, transformación, almacenamiento y extracción de datos para parámetros identificados.

- Aplicar modelos para observar el comportamiento de los parámetros de la malla vial de Bucaramanga.

Planteamiento del problema y justificación

Las vías y carreteras en los países desarrollados utilizan cámaras, avisos electrónicos inteligentes elevados, llamados Avisos de alerta, que se utilizan con frecuencia para informarle a los automovilistas si hay algún carril cerrado, alguna demora o accidentes en estas carreteras. También cuentan con centros de control conectado las 24 horas con las autoridades para garantizar la seguridad y comunicación con los automovilistas, esta tecnología se compone de un elemento del Sistema de Transporte Inteligente, que es utilizado para reducir el embotellamiento en las carreteras y hacer que las autopistas sean más seguras y resulten más eficientes. De esta manera se puede integrar esta tecnología en el sistema de transporte del país o dentro de una zona de este y en los vehículos mismos ayudando a descongestionar las carreteras. Esto a la vez, optimiza la seguridad e incrementa la productividad, permitiendo que los automovilistas lleguen a su destino con mayor rapidez y seguridad. [8]

¿Por qué se necesitan estudios de tráfico?

- ✓ Mitigación de la congestión
- ✓ Pronóstico del impacto de tráfico creado por el nuevo desarrollo
- ✓ Determinar la vida útil de las carreteras
- ✓ Relacionar decisiones de uso de la tierra con las condiciones del tráfico
- ✓ Ayudar en la distribución eficiente de fondos limitados
- ✓ Uso en estudios de origen/destino
- ✓ Entregar aportes para los esfuerzos de planificación metropolitana

ANTECEDENTES

En todos los campos del desarrollo industrial, para la mejor aceptación de los productos se pretende alcanzar la denominada "calidad total", por ello, no sólo se impulsan las cualidades que presentan frente al consumidor o cliente, para hacerlos más atractivos por su utilidad o precio, si no que, se profundiza sobre sus efectos en el entorno, la seguridad, el medio ambiente, la congestión, la energía consumida... y muy especialmente su reflejo socio-económico.

Los sistemas inteligentes pueden definirse como aquéllos que, optimizando los procesos y recursos para la obtención de un producto deseado, facilitan una permanente información, en tiempo real, para su seguimiento, evaluación y control, permitiendo introducir variaciones durante el curso de su gestión.

Es una combinación de la informática y las telecomunicaciones, o sea la telemática, con ello se multiplica la capacidad humana en las operaciones y se evitan, en gran medida, los fallos de su intervención, se comprende así, el fundamental peso que en estos procesos tiene el desarrollo y aplicación de las innovaciones tecnológicas.

Los sistemas inteligentes de transporte son, pues, los aplicados a este sector y por sus efectos directos en velocidades, tiempos de recorrido, flujos, automatismos, etc., en determinados tramos, aglomeraciones urbanas, aeropuertos y en general terminales, próximos a su saturación, permiten ahorros substanciales en inversiones dedicadas al aumento de sus capacidades y al evitar el freno o colapso del transporte, por la posible falta de recursos, actúan como elementos impulsores del crecimiento económico.

La evolución de los sistemas inteligentes de transporte es permanente, y sus aplicaciones múltiples y variadas, estamos aún en los albores de las posibilidades que pueden ofrecer, por ello tratar de abordarlos no resulta fácil por su inmadurez, tanto si se pretende hacer una clasificación para su ordenada exposición o utilizar una determinada metodología.

En una primera aproximación parecería lógico seguir el curso de estos sistemas, (siempre a través del cliente, viajero o mercancía), dividiéndolos en dos vastos campos, el de las infraestructuras y el de los vehículos, pero normalmente, la interacción entre ambos elementos es tan necesaria y patente que, el análisis de uno de ellos nos llevaría inevitablemente a la reconsideración del otro.

La carretera dada su mayor participación en el mercado del transporte, es la que, lógicamente, más se ha beneficiado de las aplicaciones telemáticas, no es pues extraño utilice la mayor parte de los fondos destinados a I+D en materia de ITS para este sector.

Como se ha citado, tres han sido las principales razones impulsoras del desarrollo de los ITS en los transportes por carretera, la accidentalidad, las congestiones del tráfico y el deterioro del medio ambiente, por ello, estos sistemas han centrado sus actuaciones en los adelantos tecnológicos relativos a: la seguridad, la capacidad de las infraestructuras y los negativos efectos contaminantes de los vehículos.

ESTADO DEL ARTE

La Dirección General de Tráfico (DGT) ha creado un grupo de trabajo que está estudiando la forma en la que instaurar en España sistemas inteligentes que comuniquen a los vehículos con la vía por la que transitan, lo que se conoce como Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS, por sus siglas en ingles), según ha explicado a Europa Press el secretario general de ITS España, Jaime Huerta. [9]

Con estas tecnologías sería posible avisar a un coche que circula por una carretera que unos kilómetros más adelante ha habido un accidente, si el vehículo ha superado la velocidad máxima permitida o proporcionar al conductor información del tráfico que hay en la ruta que se va a seguir.

Para instaurar este tipo de tecnologías, tal y como propone Europa, haría falta tanto adaptar las vías como instalar en los vehículos dispositivos que pudieran comunicarse con Tráfico y con la propia carretera, explica Huerta, quien asegura que las empresas españolas son pioneras en este tipo de tecnologías y han instalado sistemas de transporte inteligentes en otros países como Chile o Australia.

Uno de los proyectos que ha sido impulsado por el grupo de trabajo creado por la DGT es el llamado 'eCall', que consiste en un dispositivo que se instala en el vehículo y que, en caso de accidente, automáticamente realiza una llamada de emergencia para reducir el tiempo que tardan los servicios sanitarios en llegar al lugar del siniestros, y disminuir de esa forma las consecuencias del accidente. Además, el 'eCall' permitiría al conductor hacer una llamada al 112 en caso de que necesite ayuda.

Esta particularidad es precisamente la que más problemas genera en la implantación de los 'eCall', ya que los servicios de emergencias temen que puedan verse colapsados por llamadas que no sean de urgencia. Sin embargo, la DGT se ha comprometido a filtrar este tipo de llamadas para que a los servicios de emergencias le lleguen exclusivamente las que sean realmente urgentes de cara a impulsar la implantación de esta tecnología.

La idea inicial propuesta en Europa, y que también se baraja en España, es que, en un principio, obligar a los coches de gama alta a instalar obligatoriamente estos dispositivos, que serán una opción en los vehículos más baratos, para, más tarde, en una segunda etapa, elaborar una normativa según la cual todos los vehículos que se fabriquen en España tengan que llevar incorporado un 'eCall'.

Importando la idea a nuestro país se tiene la empresa de Corasfaltos, la cual ofrece la caracterización y evaluación de asfaltos naturales, refinados, modificados y extraídos de una mezcla asfáltica, con el fin de observar en ellos, estándares de calidad conforme con las especificaciones nacionales (INVIAS, IDU) e internacionales (SUPERPAVE).

Esta empresa busca brindar información valiosa sobre los asfaltos, con el fin de encontrar propiedades fisicoquímicas de estos, que con sustento científico, permiten predecir la susceptibilidad térmica, la susceptibilidad al envejecimiento después de preparar la mezcla asfáltica y cuando está en servicio en un período superior a 6 años, encontrar las temperaturas óptimas de mezcla y compactación; resistencia al ahuellamiento; resistencia a la fatiga y al fisuramiento por bajas temperaturas, entre otros.

Dentro del marco nacional, se ha contribuido con investigaciones previas como es el caso de una titulada "Investigación de sistemas de control inteligente del tráfico vehicular y desarrollo de instrumentación para la medición de alta precisión de parámetros asociados al monitoreo, mando y control automáticos de carreteras urbanas", realizado por el PhD. Antonio F. Muñoz y la Ing. Yolanda Carreño, que sirvió de referente para el Proyecto aprobado en el marco de la Convocatoria Nacional 510 del año 2010 del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS.

MARCO TEÓRICO

El pavimento es la base horizontal de una determinada construcción (o las diferentes bases de cada nivel de un edificio) que sirve de apoyo a las personas, animales o cualquier pieza de mobiliario.

También puede definirse como la capa constituida por uno o más materiales que se colocan sobre el terreno natural o nivelado, para aumentar su resistencia y servir para la circulación de personas o vehículos. Entre los materiales utilizados en la pavimentación urbana, industrial o vial están los suelos con mayor capacidad de soporte, los materiales rocosos, el hormigón y las mezclas asfálticas. En la actualidad se encuentra en investigación pavimentos que ayudan al medio ambiente como el formado por noxer.

Una de las primeras formas de pavimentación fue la calzada romana, construida en varias camadas. Esta gran obra de ingeniería logró que varios tramos hayan resistido durante siglos y se puedan encontrar inclusive hoy.

Características:

- Superficie uniforme.
- Superficie impermeable.
- Color y textura adecuados.
- Resistencia a la repetición de cargas.
- Resistencia a la acción del medio ambiente.
- Que no trasmita a la terracería esfuerzos mayores a su resistencia.

Tipos de Pavimentos

- Pavimentos Asfálticos o Flexibles: son aquellos construidos con materiales asfálticos y materiales granulares.
- Pavimentos de Concreto o Rígidos: son construidos con concreto de cemento portland y materiales granulares.
- Otros: adoquines, empedrados, suelo cemento.

Flexibles o Asfálticos

Están constituidos por una capa delgada de mezcla asfáltica construida sobre una capa de base y una capa de sub-base las que usualmente son de material granular.

Estas capas descansan en una capa de suelo compactado, llamada sub-rasante.

- ✓ En las capas superiores donde los esfuerzos son mayores, se utilizan materiales con mayor capacidad de carga y en las capas inferiores donde los esfuerzos son menores, se colocan materiales de menor capacidad.
- ✓ El uso de materiales con menor requerimiento permite el uso de materiales locales, dando como resultado diseños más prácticos.

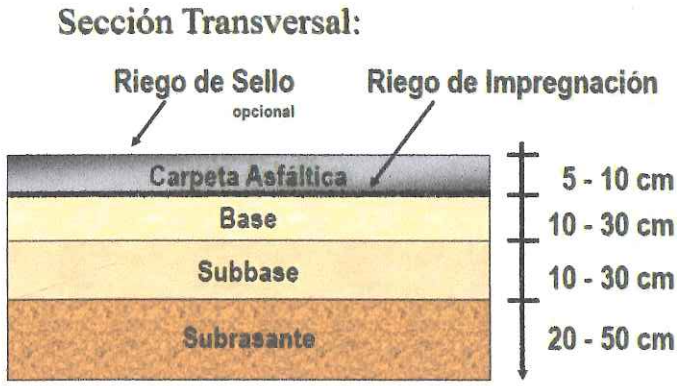


Fig. 1. Pavimentos Flexibles o Asfálticos

Pavimentos Rígidos

Estos se integran por una capa (losa) de concreto de cemento que se apoya en una capa de subbase, constituida por grava; esta capa descansa en una capa de suelo compactado, llamado subrasante. La resistencia estructural depende principalmente de la losa de concreto.

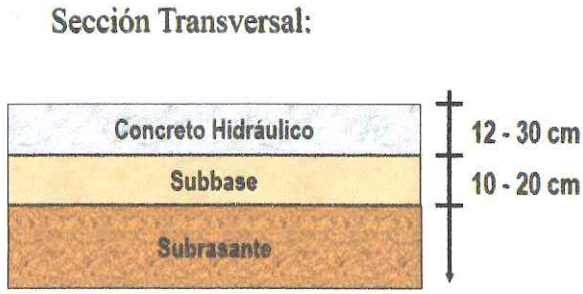


Fig. 2. Pavimentos Rígidos Concreto

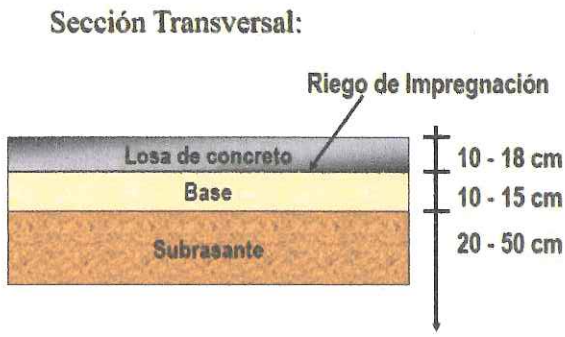


Fig. 3. Pavimentos Rígidos, Losa de Concreto

Diferencias entre los pavimentos rígidos y los de asfalto

Su principal diferencia es cómo cada uno de ellos transmite las cargas a la sub-rasante.

La alta rigidez de la losa de concreto le permite mantenerse como una placa y distribuir las cargas sobre un área mayor de la sub-rasante, transmitiendo presiones muy bajas a las capas inferiores. Por sí misma, la losa proporciona la mayor parte de la capacidad estructural del pavimento rígido.

Pavimento flexible, está construido con materiales débiles y menos rígidos, más deformables, que transmiten a la subrasante las cargas de manera más concentrada, distribuyendo el total de la carga en menos área de apoyo.

Por lo tanto, el pavimento flexible normalmente requiere más capas y mayores espesores para resistir la transmisión de cargas a la subrasante.

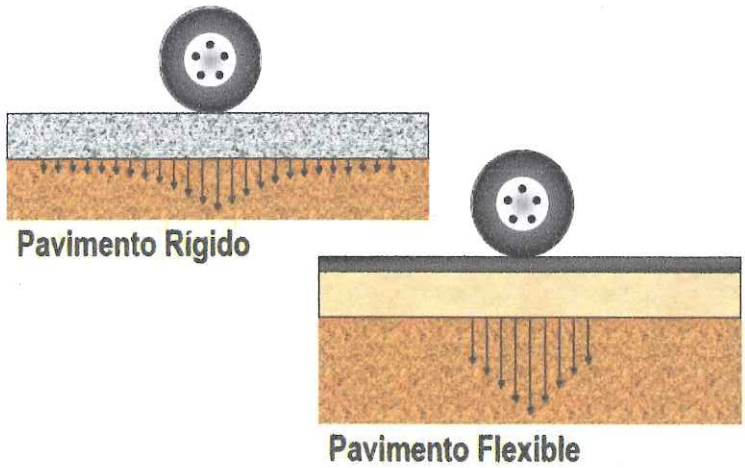


Fig. 4. Pavimentos Flexibles y Rígidos

Grietas

La aparición de grietas en el pavimento asfáltico permite la entrada de humedad en las capas inferiores, lo que contribuye al degradamiento acelerado del mismo.

La humedad en la subbase y base disminuyen su capacidad portante y limitan la capacidad de transferir cargas de forma eficiente a las capas inferiores, facilitando la deformación permanente. De igual manera permite la delaminación de los riegos de adherencia e imprimación, limitando la transferencia de los esfuerzos entre el aglomerado asfáltico y la base granular.

Cuando esta aumenta su temperatura se convierte en vapor de agua multiplicando su volumen. Este vapor de agua puede penetrar en la interfase entre el betún y el árido, conduciendo al stripping o delaminación.

Tipos de Agrietamientos

- Grietas de cocodrilo: Son grietas entrelazadas que forman una serie de cuadrillos parecidos a la piel que cubre a un cocodrilo o tela metálica.

Fig. 5. Grietas cocodrilo [8]

- Grietas de borde: Son grietas longitudinales que ocurren como a un pie del borde del pavimento, con o sin grietas transversales, y que se ramifican hacia el carril de la vía.

Fig. 6. Grietas de borde [8]

- Grietas de la junta bordillo: Esta grieta es la separación de la junta entre el pavimento y el paseo.

Fig. 7. Grietas de junta de bordillo [8]

NANOTECNOLOGÍA

El término nanotecnología se ha empleado con frecuencia de forma errónea y se ha interpretado de muy diferentes maneras. La nanotecnología se identifica, con frecuencia de forma poco precisa, con la ciencia de lo muy pequeño y con el prometedor descubrimiento de materiales y dispositivos con propiedades poco comunes y potencialmente útiles cuando se reducen sus dimensiones a escala de nanómetro.

Los dispositivos de tamaño inferior a 100 nm se aceptan generalmente como nanotecnológicos, aunque no haya ninguna evidencia concreta de que ese límite tenga importancia alguna. Esta concepción de la nanotecnología es aplicable a la mayoría de técnicas y métodos aplicados hoy día en la industria de los semiconductores, y se conoce como aproximación "top down".

La construcción de nanoestructuras por autoensamblaje, lo que para la mayoría de los científicos son conceptos nuevos y prometen propiedades poco usuales y nuevas aplicaciones difíciles de definir. Esta aproximación se denomina "bottom up" o autoensamblado.

Aunque pueda pensarse que estas dos formas de acercarse a la nanotecnología son totalmente distintas e independientes entre sí, son en realidad complementarias y su combinación quizás ofrece la mayor probabilidad de aplicaciones prácticas a corto plazo.

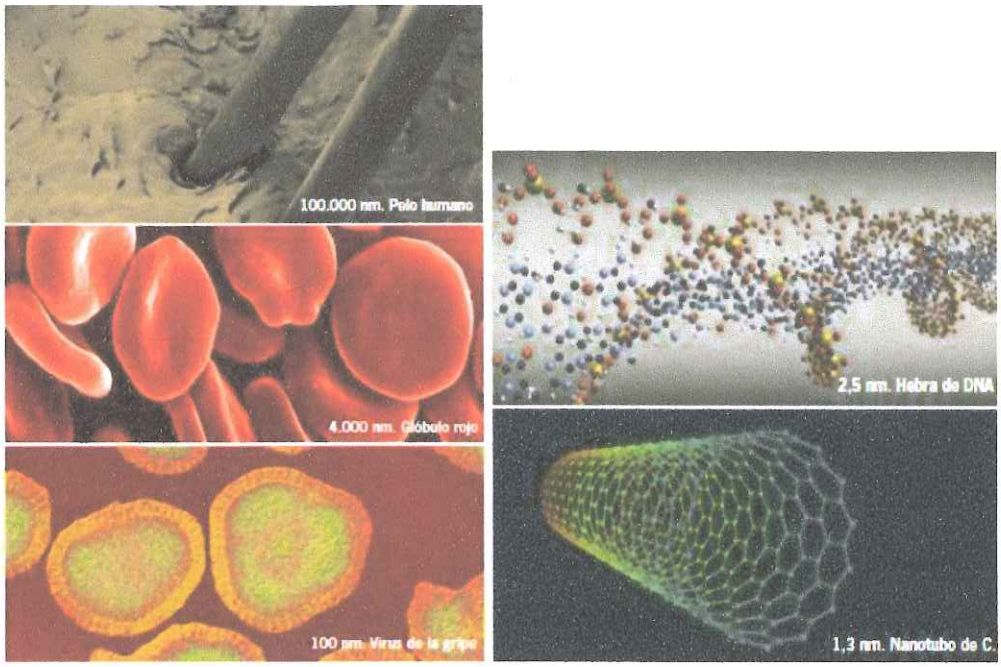


Fig. 8. Condición de sistemas nanotecnológicos

La Investigación de sistemas expertos para pavimentos es de gran utilidad para los centros de monitoreo en tiempo real y control de vías porque permite establecer las condiciones de su funcionamiento. En este proyecto se propone diseñar un sistema de control inteligente difuso que permita integrar tarjetas de adquisición de datos de las señales de los sensores de humedad, temperatura, deformación y flujo vehicular como parte del sistema SCADA que genera alarmas sobre el estado de las vías y el comportamiento de los pavimentos.

La lectura de los sensores y multiplexación de los mismos ocurren en una zona donde todos los canales se unen en un solo canal para ingresar al controlador difuso. En este orden el comportamiento de los sensores se almacenan en tiempo real en una base de datos. La zona fuzzy es la encargada de almacenar los datos de los grupos que controlan las variables definidas del pavimento. La definición de reglas hace referencia a la comparación por medio de un bloque MIMO (múltiples entras múltiples salidas) debido a que se usan varias entradas, es decir varios sensores.

La alerta condiciones óptimas se define en determinadas condiciones de temperatura, con un flujo vehicular definido y una deformación exigida por la norma y se observa que el pavimento cumple con las normas de calidad establecidas por INVIAS cuando se presenta un comportamiento adecuado; además de acuerdo al flujo vehicular se puede definir la etapa de la deformación elástica y se considera como un desgaste normal del pavimento.

La alerta de pavimento inseguro se genera a partir de determinadas condiciones de temperatura y flujo vehicular definido y una deformación baja, en el que se considera que el pavimento no cumple con las normas de calidad exigidas en la primera etapa de aplicación del pavimento; para la humedad relativa se considera que el pavimento tiene una baja permeabilidad y sus composición permite facilitar la adherencia de las partículas de agua, se considera que en tiempo reducido de utilización los niveles humedad superan lo establecido en la norma.

Teniendo en cuenta las condiciones anteriores con un aumento de la humedad por encima de la mitad se considera que el pavimento necesita mantenimiento; según pruebas que se han generado en laboratorios, el pavimento se comporta de manera deficiente y por tanto el sistema de control inteligente reconoce la alarma que es interpretada como que el porcentaje de agua en el asfalto generará una tendencia a desgastar el material de manera acelerada.

Según los criterios de expertos, se considera que si el pavimento presenta una deformación estimada, el pavimento tiende a tener una alta deformación por lo que para conservar el estado de la vía se requiere realizar un mantenimiento oportuno para mejorar las condiciones y poder garantizar que el ciclo de vida del pavimento permanezca en condiciones óptimas.

Otro parámetro importante es la incidencia del flujo vehicular debido a que si excede cierto valor experimental inicia la zona plástica, donde la deformación tendrá una pendiente mayor debido a que el pavimento ha cumplido en teoría su ciclo de vía útil, y por tanto el sistema de control establece la acción de emitir una alarma de mantenimiento; de manera similar el criterio de expertos indica que luego de cierta deformación el pavimento no estará en condiciones de utilizarse en la vía y por consiguiente el controlador inteligente envía una alerta de que el pavimento está deteriorado y se debe considerar un cambio significativo en las capas que la componen.

Para el diseño de la interfaz por la cual se podrán ver los resultados obtenidos de los sensores se usó la plataforma gráfica Labview (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) con aplicación de la plataforma de instrumentación y análisis por PCs; para la adquisición de datos y el control de los sistemas. Se utilizaron las funciones de RS-232 / 485, VISA (Virtual Instrument Software Architecture), las librerías de instrumentos de análisis para la generación de señales, filtros de procesamiento de señales, ventanas, estadística, regresión, álgebra lineal y aritmética de arreglos lógicos.

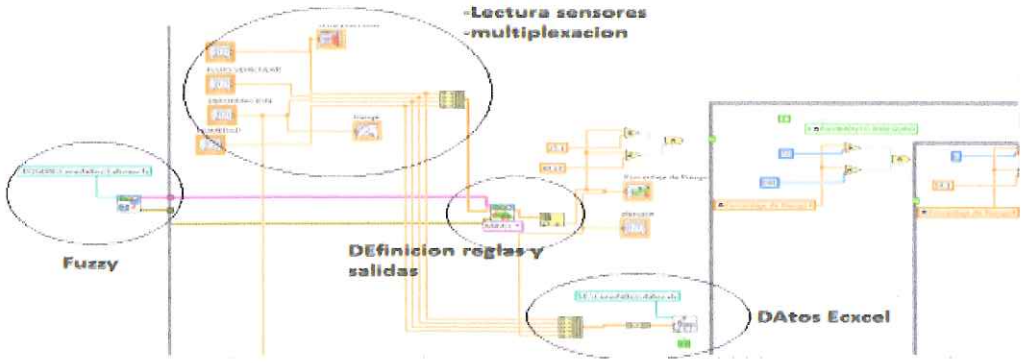


Fig. 9. Lectura de sensores y multiplexación [2]

La herramienta de simulación LABVIEW utilizada como parte del sistema SCADA permite disponer de flexibilidad y facilidad de diseño de controladores difusos interactivos; bajo el entorno de esta herramienta se elaboraron interfaces gráficas con los complementos necesarios para implementar la lógica difusa en sistemas MIMO (múltiples entradas y múltiples salidas) y de monitoreo en tiempo real y almacenamiento de datos. De igual manera se tiene en cuenta el software COMSOL y MATLAB, los cuales me permitirán programar (visualización mediante un lenguaje de programación) y simular en repetidas ocasiones el comportamiento del sistema con cierta temperatura, humedad, deformación y trafico vehicular al cual podría estar sometido, para dar lugar a la solución más adecuada.

DISEÑO METODOLÓGICO

Los sistemas de control se implementan de acuerdo a una secuencia de pasos que permita lograr un modelo adecuado a las condiciones reales del comportamiento de los pavimentos, como caso de estudio se toma el proceso de medición y control de la temperatura, tráfico vehicular, deformación y humedad.

Diseño e implementación de los modelos de los sensores

- *Modelo del Sensor para el control del tráfico vehicular basado en el método piezoeléctrico*

Algunos sólidos al deformarse generan internamente carga eléctrica. Este efecto es reversible si al material se le aplicase una carga eléctrica este se deformaría en respuesta a ello. Este fenómeno se denomina piezoeléctrico, esta conversión de energía eléctrica a mecánica y viceversa tiene varias aplicaciones. Cuando la entrada es mecánica y la salida es eléctrica, es posible medir fuerzas, aceleraciones.

Los materiales que presentan un efecto piezoeléctrico significativo caen dentro de dos categorías: Naturales (como el cuarzo y la sal de Rochelle) o cristales sintéticos (sulfato de litio, fosfato de amonio) y cerámicas ferroeléctricas polarizadas (titanio de bario) las cerámicas ferroeléctricas no presentan este efecto en forma natural y deben ser polarizadas artificialmente, mientras se encuentran a una temperatura superior al punto de Curie del material.

Para compensar el efecto sobre la sensibilidad en la medición es decir la alta impedancia de salida del elemento piezoeléctrico, es necesario un preamplificador con una alta resistencia (R_p) de entrada.

Se ha inducido también la capacitancia C_c del cable entre el piezoeléctrico y el preamplificador y la capacitancia de entrada C_p del preamplificador. La resistencia del cable se desprecia debido a su pequeño valor, en la siguiente figura aparece el circuito de medición.

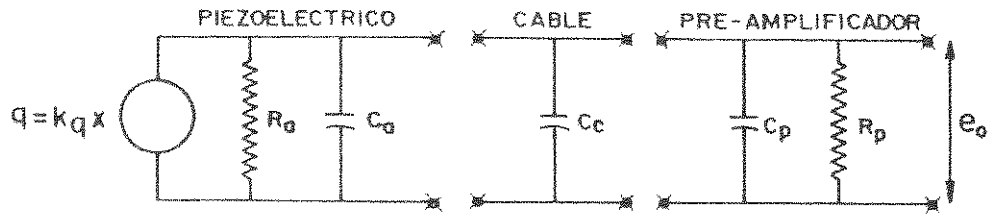


Fig. 10. Circuito de medición para un elemento piezoeléctrico [4]

Las tres capacitancias se suman y por lo tanto,

$$C = C_a + C_c + C_p \quad [F] \tag{1}$$

Para las resistencias se tiene,

$$R = (R_a * R_p) / (R_a + R_p) \quad [\Omega] \tag{2}$$

La impedancia resultante es la suma en paralelo de R y 1/C(s)

$$Z(s) = \frac{R}{1+RC(s)} \tag{3}$$

La corriente que circula por el piezoeléctrico depende de la razón de cambio de la carga q.

$$i_{(t)} = dq/dt = k_q\,(dx/dt) \qquad (4)$$

$$i_{(s)} = k_q{*}Sx_{(s)} \qquad (5)$$

El voltaje de salida se determina,

$$e_{0\,(s)} = i_{(s)} * Z_{(s)} \qquad (6)$$

La constante de tiempo se incrementa si la capacidad C total aumenta, lo que influye sobre la sensibilidad del sistema. La única forma de elevar la constante de tiempo sin afectar la sensibilidad es obtener un elevado valor de resistencia eléctrica R_p en el preamplificador cuyo valor alcanza $R_p = 4.5\ G\Omega$ en paralelo con $C_p = 1pF$. La sensibilidad estática depende de la constante K_q del generador de cargas, pero disminuye con la capacitancia total.

La capacitancia del piezoeléctrico y del preamplificador se controlan en la producción, pero la del cable depende de su longitud (95 pF/m es un valor típico para un cable de buena calidad); entonces, la sensibilidad depende de la longitud del cable lo que se considera en el análisis del modelo matemático, si es posible por cuestiones de espacio, el preamplificador se debe conectar junto al transductor, reduciendo a cero la capacitancia del cable. La sensibilidad estática resulta del cociente de 0,9 C/m, es decir, 0,9 $F*(V/m)$ entre $815*10^{-12}$F, siendo el resultado de $1104*10^{6}$ (V/m), es decir, 1104 $V/\mu m$. La variación relativa en sensibilidad estática debido al cambio de la capacitancia ΔC_c del cable se puede hallar según la expresión:

$$\frac{Cambio\ en\ sensibilidad}{Sensibilidad\ inicial} = -\frac{\Delta C_c}{C+\Delta C_c} \qquad (7)$$

El amplificador operacional, debido a su alta ganancia y su alta impedancia de entrada se comporta como un elemento con un potencial de entrada prácticamente nulo y que sin embargo, no deja pasar la corriente.

La impedancia Z_2 (s) resultante de la resistencia y la capacitancia de retroalimentación del preamplificador operacional es,

$$Z_2(s) = \frac{R_f}{1+ R_f C_f S_f} \qquad (8)$$

Adicional a esto se tiene que la ganancia k del amplificador operacional es relativamente grande.

El siguiente modelo consiste en una membrana cuadrada de 1 mm de lado y 20 micras de espesor, apoyada alrededor de sus bordes de 0,1 mm de ancho, que está destinado a representar el resto de la oblea.

La región de soporte está fijada en su parte inferior (que representa una conexión con el mango más grueso de la matriz del dispositivo). Cerca del borde de la membrana del piezoresistor en forma de X y parte de sus interconexiones son visibles.

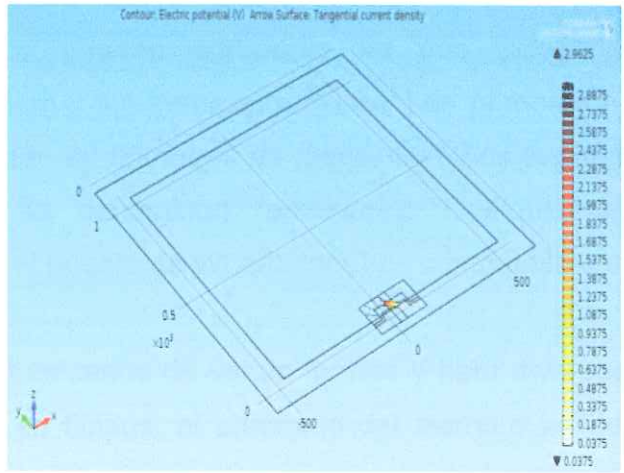


Fig. 11. Representación de la membrana [6]

La conductividad del sensor cambia cuando la membrana en sus proximidades está sujeta a una tensión aplicada. Este efecto es conocido como el efecto piezoresistivo y se asocia generalmente con materiales semiconductores.

La relación entre el campo eléctrico E, y la corriente J, dentro de un piezoresistor es:

$$E = \rho * J + \Delta\rho * J \qquad (9)$$

Donde ρ representa la resistividad y $\Delta\rho$ es el cambio inducido en la resistividad. En caso general, ambos son tensores de rango 2 (matrices). El cambio en la resistencia esta relacionada con el estrés σ, por la relación constitutiva,

$$\Delta\rho = \pi * \sigma \qquad (10)$$

- *Modelo del Sensor para el control de la temperatura y la humedad basado en el método termoresistivo*

La resistencia eléctrica de varios materiales cambia con la temperatura en una forma definida, pudiendo este fenómeno constituir el fundamento de un método para medir temperatura. Los materiales que se utilizan actualmente para medir resistencia eléctrica pueden agruparse en dos categorías principales: los conductores (metales) y los semiconductores. Los primeros fueron desarrollados antes y se denominan *termómetros de resistencia.* Los segundos se desarrollaron posteriormente y se denominan *termistores.* Cualquier técnica para medir resistencias (como el puente de Wheatstone) es compatible con estos elementos.

Los sensores son fabricados de varias formas y para diversos objetivos. Cuando se requiere medir en fluidos, el enrollado del alambre se debe recubrir con un bulbo de acero inoxidable para proteger al sensor de líquidos o gases corrosivos.

Si el enrollado esta al descubierto la respuesta dinámica es más rápida. Los sensores para medir temperaturas superficiales pueden tener como interferencia, la deformación en la superficie, que provoca cambios en la resistencia.

La característica dinámica de un sensor de temperatura está relacionada con la transferencia y acumulación de calor que determinan que el sensor incluya medios protectores, como el encapsulado de los termistores.

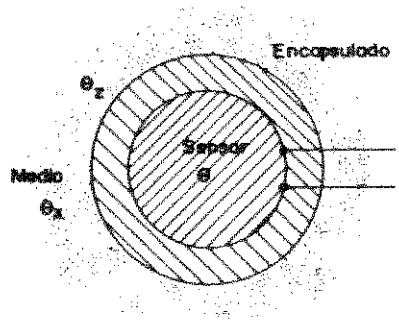


Fig. 12. Dinámica de un sensor térmico encapsulado [4]

Las temperaturas θ_x; θ_z y θ son los cambios de las temperaturas del medio, la pared externa del encapsulado y la del sensor con respecto a la temperatura inicial de equilibrio.

U_w ; U_s los cuales representan al coeficiente global de transferencia de calor entre el medio y el encapsulado y entre el encapsulado y el sensor ($W/m^2 * K$)

A_w ; A_s representando el área de transferencia de calor del encapsulado y del sensor (m^2)

m_w ; m_s representando la masa del encapsulado y del sensor (Kg)

C_w ; C_s haciendo referencia al calor especifico a un volumen constante de la pared y el sensor ($J/kg * K$)

El calor que ingresa al encapsulado es

$q = A_w U_w (\theta_x - \theta_z)$ (11)

El calor que sale del encapsulado es

$q_1 = q - m_w C_w \theta_z$ (12)

El calor que sale del encapsulado es igual al que entra al sensor, el cual se acumula en la masa del sensor, según la expresión,

$$t_w = \frac{m_w C_w}{U_w A_w} \qquad t_s = \frac{m_s C_s}{U_s A_s} \tag{13}$$

El modelo desarrollado es bastante flexible, aunque en algunos casos no es suficientemente exacto. Se puede lograr más exactitud, añadiendo más grados de libertad (incógnitas) al sistema, como por ejemplo, una temperatura θ_y en la pared interna del encapsulado y por lo tanto, considerando la transferencia de calor por conducción a través del encapsulado. Para muchas aplicaciones o para estimar semi-cuantitativamente la influencia de algunos parámetros en la respuesta dinámica de un sensor de temperatura, las ecuaciones desarrolladas rinden resultados satisfactorios.

- *Modelo del Sensor para el control de la deformación basado en el método magnetostrictivo*

La magnetostricción se define como el cambio de dimensiones que experimentan los materiales ferromagnéticos al aplicarles un campo magnético. La máxima deformación magnetostrictiva que es el incremento de longitud en una dirección determinada normalizado a su longitud original, se encuentra alrededor de 10^{-5} en el caso de los materiales convencionales y supera el valor 10^{-3} para ciertas aleaciones (materiales de magnetostricción gigante).

La magnetostricción puede ser positiva, cuando el material se expande al ser magnetizado, o negativa si se contrae. Para los materiales con magnetostricción positiva, la magnetización aumenta con la tensión mecánica, mientras que disminuye si la magnetostricción es negativa. El níquel es el paradigma de material de magnetostricción negativa. Siempre se contrae para valores crecientes del campo magnético. Por contra, el hierro presenta magnetostricción positiva, aunque sólo para campos moderados, ya que para campos altos ésta es negativa.

En la deformación magnetostrictiva, el signo de la deformación es independiente del signo del campo. Así, bajo la acción de un campo alterno moderado, un material de magnetostricción positiva siempre incrementará una de sus dimensiones cuando crezca el valor absoluto del campo instantáneo, y regresará a su posición inicial cuando éste disminuya. Debido a este carácter rectificador, la aplicación de un campo magnético alterno genera en un magnetostrictivo un movimiento de frecuencia doble respecto a la excitación.

MODELO DE PAVIMENTOS Y EL MODELO SENSORICO

Con el propósito de proporcionar seguridad, eficiencia y un diseño balanceado entre los elementos de la vía desde el punto de vista geométrico y físico, es fundamental estudiar la relación existente entre la velocidad y la curvatura. Cuando un vehículo circula sobre una curva horizontal, actúa sobre él una fuerza centrifuga F que tiende a desviarlo radialmente hacia fuera de su trayectoria normal.

$$F = m*a \qquad (14)$$

Donde m es el peso del vehículo y a es la aceleración radial dirigida hacia el centro de curvatura. Pero a su vez tenemos que:

$$m = W/g \qquad a = V^2/R \qquad (15)$$

Donde W representa el peso del vehículo, g la aceleración de la gravedad, V la velocidad del vehículo y R el radio de la curva circular horizontal. Por lo tanto tenemos como resultado que:

$$F = (W * V^2)/(g * R) \tag{16}$$

Teniendo en cuenta la ecuación anterior se puede deducir que para un mismo radio, la fuerza centrífuga es mayor si la velocidad es mayor, por lo que el efecto centrífugo es notable.

La única fuerza que se opone al deslizamiento lateral del vehículo es la fuerza de fricción desarrollada entre las llantas y el pavimento. Esta fuerza por sí sola, no es suficiente para impedir el deslizamiento transversal; por lo tanto será necesario un complemento inclinando transversalmente la calzada, a esta inclinación se le denomina peralte.

Si sobre una curva horizontal de radio R un vehículo circula a una velocidad constante, entonces el peso y la fuerza centrífuga son constantes (teniendo en cuenta la ecuación 16), pero sus componentes en las direcciones normales y paralelas al pavimento varían según la inclinación que tenga la calzada.

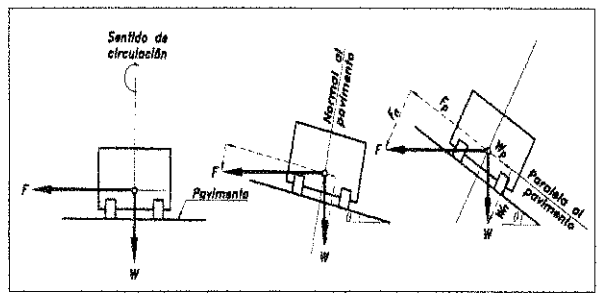


Fig. 13. Efecto de inclinación transversal de la calzada [4]

Mediante investigaciones y pruebas previamente realizadas, se lograron ciertos datos importantes a cerca del comportamiento de las vías o carreteras, las cuales se presentan a continuación.

Las condiciones óptimas se pueden definir cuando se encuentran con una temperatura de 27ºC a 38ºC, con un flujo vehicular menor de 2500 ciclos y una deformación de 3 mm y se observa que el pavimento cumple con las normas de calidad exigidas por INVIAS y presenta un comportamiento adecuado [4].

Fig. 14. Condiciones óptimas [4]

Si el número de ciclos del tráfico vehicular se encuentra por encima de 2500, quiere decir que superó la etapa de la deformación elástica y por tanto se considera un desgaste normal ya que hay deformaciones menores a 1,5 cm [4].

Para condiciones de temperatura de 27ºC a 38º C, un flujo vehicular que no supere los 2500 ciclos y una deformación de 20mm, se considera que el pavimento no cumple con las normas de calidad exigidas ya que la deformación supera los 15 mm permisibles en la primera etapa de ciclos y por tanto es un pavimento inseguro [4].

Para condiciones de temperatura ambiente normales entre 27ºC a 38ºC, una deformación de 3 mm, un flujo vehicular menor a 2500 ciclos y una humedad superior a 45 %, se considera que el pavimento tiene una baja permeabilidad y su composición permite la adherencia del agua a su composición. Se considera que con el poco tiempo que posee no debería permitir ese nivel de humedad, por consiguiente el pavimento se considera inseguro [4].

Las siguientes características son proporcionadas por expertos en el tema y que ayudan a comprender y actuar de una manera más eficiente cuando se implementa "x" situación.

Cuando la variación de la humedad es del 80 %, de forma creciente, se considera que el pavimento necesita mantenimiento, comportándose de manera deficiente y por lo tanto el control difuso envía una alarma indicando que las condiciones en que se encuentra el sistema, puede llegar a un rápido desgaste del material.

Si el pavimento presenta una deformación por encima de 1.5 cm, este tiende a deformarse en grandes cantidades, tanto que lo más adecuado es realizar un mantenimiento oportuno para así "restablecer" el ciclo de vida del sistema. [4]

Cuando el flujo vehicular se encuentra por encima de 15000 ciclos inicia una zona plástica, donde la deformación tendrá una pendiente mayor debido a que el pavimento ha cumplido en teoría su ciclo de vida útil, por lo tanto se envía una señal de mantenimiento o reparación. [4]

De igual manera cuando la deformación supera los 4 cm, el pavimento no se va a encontrar en condiciones adecuadas, por lo tanto se envía una señal de deterioro, es decir, un cambio significativo en las capas que componen determinada vía.

Fig. 15. Falla en el sistema. Alarma significativa [4]

Teniendo en cuenta los parámetros anteriores, se ha realizado una tabla que representa un resumen de las condiciones a las cuales puede estar sometida una vía y la señal o la acción que se realiza para que la central de control este actualizada con respecto a las condiciones en las cuales se encuentra el sistema o la vía en este caso.

Tabla 1. Representación de las condiciones

Interfaz gráfica	Controlador difuso	Significado
CONDICIONES ÓPTIMAS	Alerta Baja	El pavimento cumple con las normas exigidas por INVIAS.
DESGASTE NORMAL	Alerta Media Baja	Por la cantidad del flujo vehicular se considera que el pavimento permanece en un estado normal.
PAVIMENTO INSEGURO	Alerta Media	El pavimento no está en buenas condiciones y por tanto no cumple con las normas de INVIAS. Se determina así porque el flujo vehicular es muy bajo y el pavimento presenta humedad y deformaciones no permitidas para pavimentos recién colocados en la vía.
MANTENIMIENTO	Alerta Media Alta	El pavimento presenta deformaciones y humedad con un flujo vehicular medio o medio alto. Por tanto el pavimento necesita de mantenimiento
FALLA DEL PAVIMENTO	Alerta Alta	El pavimento falla debido a que ha superado un flujo vehicular mayor de 17000 y alteraciones en la humedad y deformación.

Con la culminación de la información necesaria con respecto al comportamiento del sistema, se ha determinado o realizado el siguiente sistema de control. Este realiza un chequeo de las condiciones en las cuales se encuentra la vía y teniendo en cuenta esté, envía una señal o alarma a una central. Esta señal puede ser de alerta baja en donde el sistema se encuentra dentro de las condiciones normales, una alarma intermedia la cual indicará que existe un pequeño desgaste, condiciones inadecuadas, entre otros, que requerirá de un mantenimiento y finalmente una alta alarma, la cual indicará que la vía se encuentra en pésimas condiciones o un "desgaste total" de la vía y deberá ser reconstruida.

MODELO FUZZY

En el sistema Fuzzy, se tienen en cuenta cuales son las variables de entrada y cuales las variables de salida. Donde las variables de entrada representan los parámetros a medir o estudiar y las variables de salida, los métodos que sirven para analizar las condiciones en que se encuentra la vía, que a su vez representa el nivel de alarma que se enviará a la central.

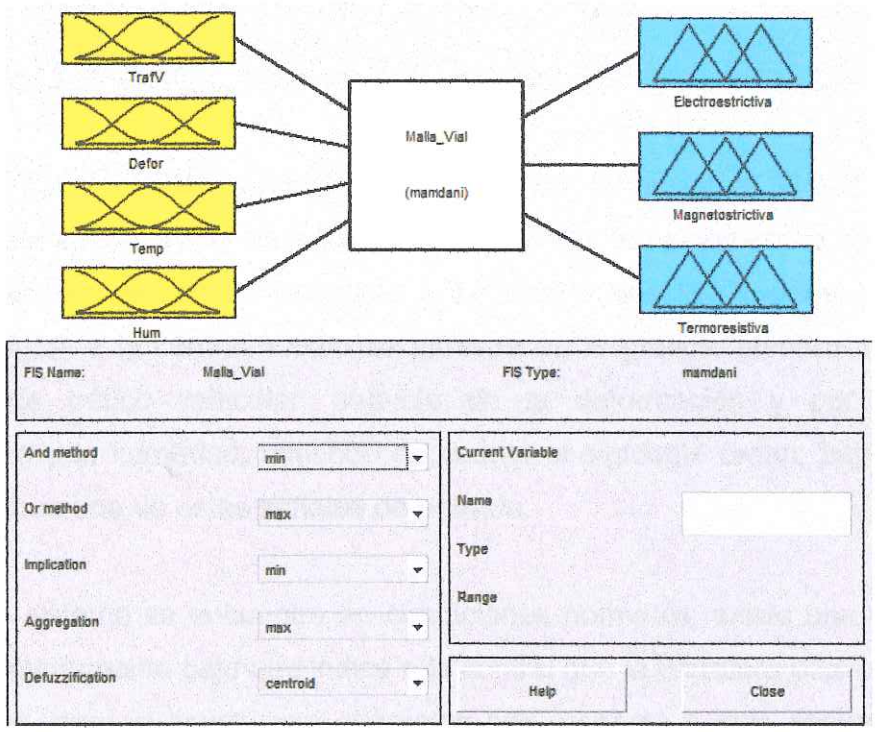
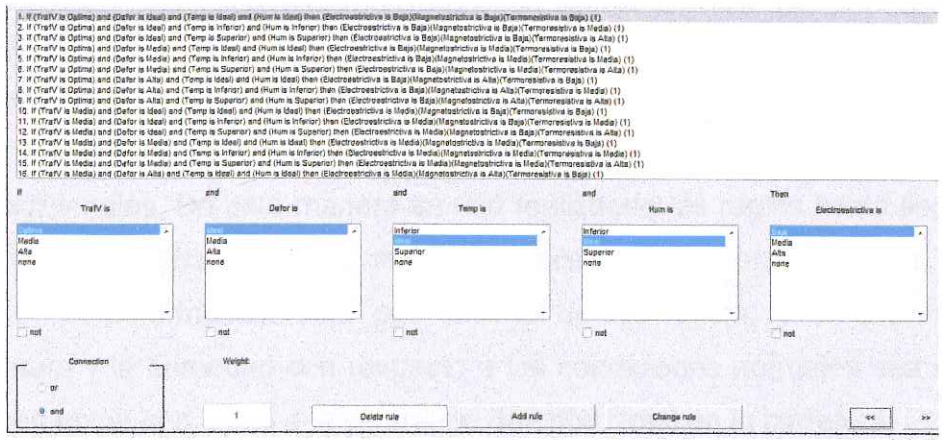


Fig. 16. Sistema Fuzzy, Autor.

Tabla 2. Reglas planteadas, Autor.



Como se ha planteado anteriormente, tenemos un sistema MIMO, es decir, múltiples entradas y múltiples salidas, de las cuales tomamos como entradas las señales que nos envían los sensores y las salidas son las acciones o nivel de alarma dirigido a la central. Como se muestra en la grafica, primero tenemos la cantidad de tráfico vehicular, seguido de la deformación y por ultimo la temperatura y la humedad, teniendo en cuenta el siguiente orden: bajo, medio y alto para cada una de estas señales de entrada.

Cuando el sistema se encuentra en condiciones normales, existe una alarma de nivel extremadamente bajo que indica a la central que la carretera esta en optimas condiciones, pero si ocurre una alteración con respecto a este comportamiento debe elevarse el nivel de alarma y para esto se realizaron las anteriores reglas, teniendo en cuenta la siguiente lógica. Cuando la deformación y el trafico vehicular se mantienen constantes pero la humedad y la temperatura cambian a un rango medio, es decir, cuando el diferencial de temperatura es mediano con respecto a las condiciones normales, ocurre una alarma del mismo nivel por parte del termoresistivo, pero la acción por parte del magnetostrictivo y del piezoeléctrico va a ser baja. Si la temperatura y la humedad aumentan a un rango alto, ocurre la misma acción pero la alarma por parte del termoresistivo va a ser alta.

Las anteriores reglas se encuentran planteadas como las primeras condiciones. Luego de esto se varía la deformación a un nivel medio y se varían la temperatura en rangos bajo, medio y alto, es decir, la señal enviada a la central va consistir en una alarma baja por parte del piezoeléctrico, media por parte del magnetostrictivo, y una alarma del termoresistivo baja, media y alta, logrando tres condiciones o tres reglas adicionales. De esta manera se van realizando las reglas hasta llegar a un punto final, que sería cuando el trafico vehicular halla superado el nivel máximo permitido, la deformación este por encima de los 4 cm, y el diferencial de temperatura y la humedad con respecto a las condiciones normales sea elevado, lo cual me envía una señal a la central de deterioro total en la carretera.

La siguiente grafica representa el rango de alarma enviada a la central, teniendo en cuenta las reglas planteadas previamente, es decir, se simulan las condiciones en las cuales puede estar la carretera y dependiendo de estas características se envía una señal con determinado rango, la cual indicará que el sistema ha sido alterado y que se realice la acción correspondiente.

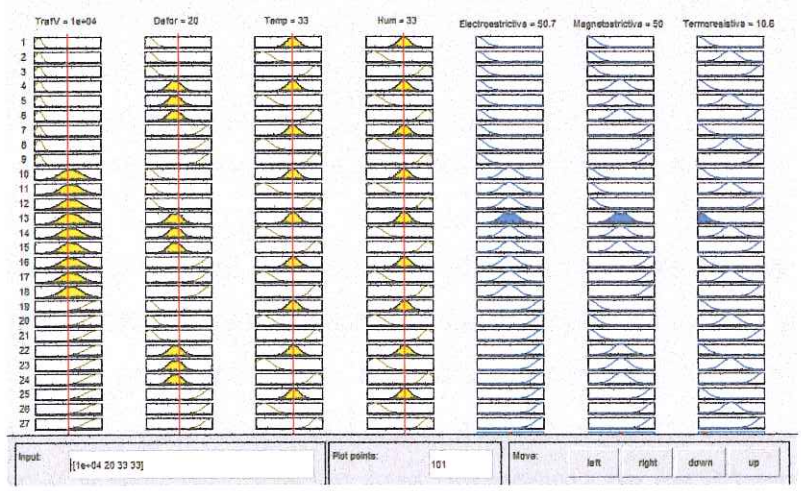


Fig. 17. Representación de las reglas, Autor.

A continuación se muestra el comportamiento de las señales de alarma por parte del piezoeléctrico, del magnetostrictivo y del termoresistivo que van dirigidas a la central dependiendo de las condiciones en que se encuentra la carretera.

Como primera medida tenemos el comportamiento de la acción piezoeléctrica, en donde se muestra la acción generada de está dependiendo del rango de vehículos que han transitado por la vía. Cuando se tiene un tráfico vehicular por debajo de los 2500 ciclos la señal de alarma va a ser baja (azul), cuando se supera esta cantidad se incrementa el nivel de alarma a un rango medio y si esta cantidad es mayor a 15000 ciclos, la señal de alarma va a ser alta (verde-amarillo), lo que significa que la carretera ha cumplido con su vida útil y por lo tanto se requiere una completa reparación de está.

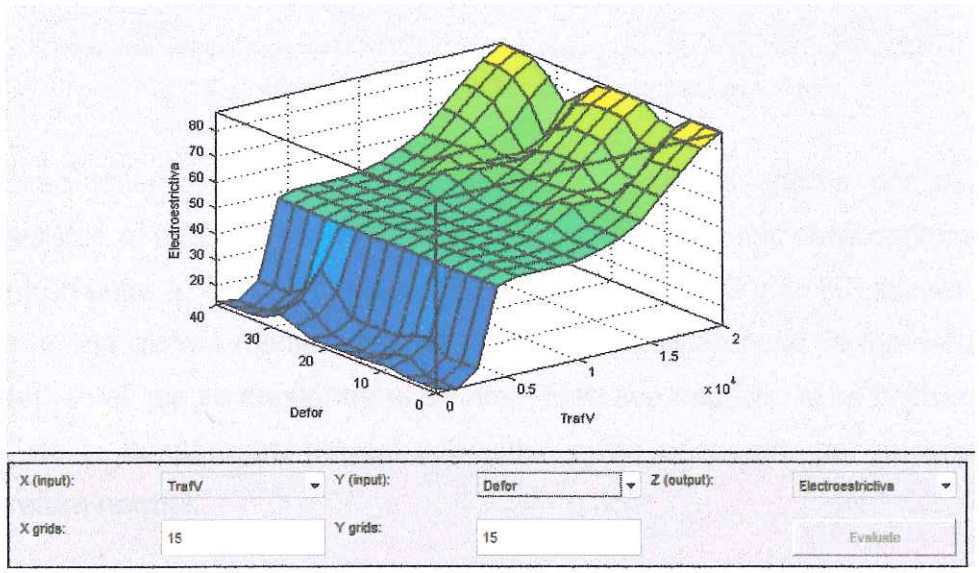


Fig. 18. Comportamiento de la acción piezoeléctrica, Autor.

En esta gráfica se muestra el comportamiento de la señal de alarma por parte de la acción magnetostrictiva que teniendo en cuenta las condiciones anteriormente mencionadas así va ser su conducta. Para una deformación por entre los 3 mm y 15 mm va a ser una alarma baja, al superar este valor se incrementa la alarma a un nivel medio y si esta deformación esta por encima de los 40 mm, existe una alarma alta, lo cual me indica que la carretera se ha deformado totalmente.

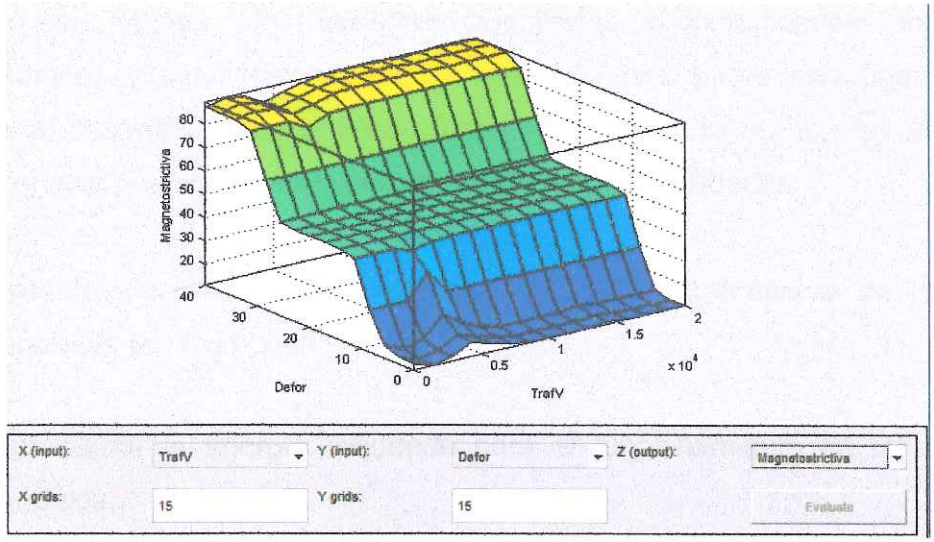


Fig. 19. Comportamiento de la acción Magnetostrictiva, Autor.

Por último tenemos el comportamiento de la señal de alarma por parte del termoresistor, el cual a diferencia de los anteriores sus condiciones optimas no se encuentran entre 0 °C y 10 °C por ejemplo sino entre 27 °C y 38 °C, lo cual me va a generar una alarma media o alta dependiendo del diferencial de temperatura y humedad en el que se encuentre el sistema, bien sea negativo si se encuentra por debajo de la temperatura normal o positivo si se encuentre por encima de la temperatura normal.

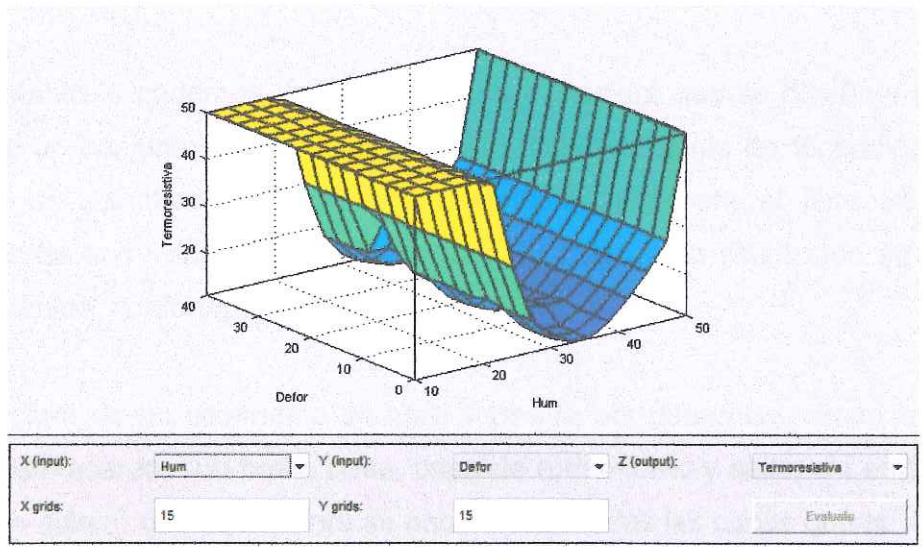


Fig. 20. Comportamiento de la acción Termoresistiva, Autor.

Teniendo en cuenta los anteriores resultados proporcionados por datos experimentales y simulaciones, se ha realizado una breve investigación con respecto al hardware que se puede implementar para lograr la realización del proyecto y este a su vez tendría las siguientes responsabilidades:

- ✓ Proporcionar la interfaz necesaria para la programación del software requerido por los nodos.
- ✓ Suministrar la energía requerida para el funcionamiento de los distintos módulos.
- ✓ Incluir dispositivos para la transmisión y recepción de datos formando una red inalámbrica.
- ✓ Permitir la interacción de los terminales con los transmisores de corriente de dos hilos que adquieren señales analógicas desde sensores industriales.

Con esto se ha finalizado la primera etapa del proyecto y proseguimos para la segunda, la cual se muestra a continuación.

Modelos de los pavimentos

Un pavimento lo podemos definir como una estructura que se diseña y se forma mediante un conjunto de capas construidas sobre el suelo de fundación, con la finalidad de ser utilizado como una superficie apta para el libre tránsito de vehículos de tipo liviano, pesado y comercial; y donde la circulación se hace de manera rápida, confortable, segura y económica.

La estructura de un pavimento se halla formada por diferentes capas las cuales son: la sub-rasante, sub-base, base, capa de rodamiento y sello; sin embargo, es necesario aclarar que no siempre se encontrarán todas las capas que se detallan.

En tales casos, la ausencia de una o varias de ellas dependerá de factores como la capacidad de soporte del terreno de fundación, la clase de material a utilizarse, el tipo de pavimento, intensidad de tránsito, carga de diseño, etc.

Suelo sub-rasante: es el suelo que sirve de fundación para todo el paquete estructural, se define como el suelo preparado y compactado para soportar la estructura del pavimento; es decir, que es el terreno de cimentación del mismo. Puede ser también el suelo natural, pero si éste es deficiente se debe seleccionar un material con mejores propiedades.

Existen dos condiciones básicas que debe cumplir el suelo de soporte, y son:

- ✓ Debe mantener el mayor valor posible de soporte, ya que entre más fuerte se considere ésta superficie menor será el costo de las capas superiores.
- ✓ El movimiento diferencial vertical debe ser mínimo, de ésta forma las ondulaciones en la superficie serán menores y el rodamiento vehicular será más suave.

Sub-base: es una capa de materiales pétreos de buena graduación construida sobre la sub-rasante, este elemento subyace a la capa base cuando esta es necesaria, como en el caso de los pavimentos flexibles. En el caso de los pavimentos rígidos, en ocasiones resulta conveniente colocar una sub-base cuando las especificaciones son más exigentes.

Base: constituye la capa intermedia entre la capa de rodamiento y la sub-base. Generalmente se usa en los pavimentos flexibles y se compone de materiales pétreos con buena distribución granulométrica.

Capa de rodamiento: formada por una o varias capas que se colocan sobre la base, dichas capas consisten en materiales granulares con o sin liga, y por lo general son de concreto asfáltico o hidráulico. Este es el elemento del pavimento sobre el cual circulan directamente los vehículos y peatones.

Sello: se coloca en algunas ocasiones sobre la capa de rodamiento y está formado por una mezcla bituminosa de asfalto o alquitrán. Sobre esta carpeta se coloca a veces, un riego de arena o chispa, y su función es la de lograr la impermeabilización de la capa de rodamiento, a fin de evitar la infiltración de las aguas de lluvia.

MODELO MATEMÁTICO

Para la realización del modelo de los pavimentos se ha contado con las siguientes ecuaciones, las cuales han sido determinadas con anterioridad, pero que a su vez se verán simplificadas a continuación:

Tomando la transformada de Laplace de estas dos ecuaciones y suponiendo condiciones iniciales de cero, tenemos:

$$b_1[sX_i(s) - sX_0(s)] + k_1[X_i(s) - X_0(s)] = b_2[sX_0(s) - sY(s)] \quad (17)$$

$$b_2[sX_0(s) - sY(s)] = k_2Y(s) \quad (18)$$

Simplificando las dos ecuaciones anteriores tenemos:

$$(b_1s + k_1)X_i(s) = (b_1s + k_1 + b_2s - b_2s\frac{b_2s}{b_2s+k_2}) \quad (19)$$

Se obtiene como:

$$\frac{X_0(s)}{X_i(s)} = \frac{\left(\frac{b_1}{k_1}s+1\right)\left(\frac{b_2}{k_2}s+1\right)}{\left(\frac{b_1}{k_1}s+1\right)\left(\frac{b_2}{k_2}s+1\right)+\frac{b_2}{k_1}s} \tag{20}$$

$$\frac{X_0(s)}{X_i(s)} = \frac{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2}s^2+\left(\frac{b_1}{k_1}+\frac{b_2}{k_2}\right)s+1}{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2}s^2+\left(\frac{b_1}{k_1}+\frac{b_2}{k_2}+\frac{b_2}{k_1}\right)s+1} \tag{21}$$

$$\frac{X_0(s)}{X_i(s)} = \frac{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2}s^2+\left(\frac{k_2 b_1+k_1 b_2}{k_1 k_2}\right)s+1}{\frac{b_1 b_2}{k_1 k_2}s^2+\left(\frac{k_2 b_1+k_1 b_2+k_2 b_2}{k_1 k_2}\right)s+1} \tag{22}$$

Según el conocimiento adquirido el coeficiente de s^2 determina la constante de tiempo (T) y el coeficiente de s es la relación de amortiguamiento. Esto se puede representar por la siguiente formula:

$$\frac{1}{T^2 s^2+2\zeta T s+1} \tag{23}$$

Donde T representa la constante de tiempo y ζ la relación de amortiguamiento, se ha calculado el resultado de la función de transferencia representada anteriormente.

Además con datos previamente adquiridos mediante tablas que fueron realizadas por la empresa de corasfaltos, se han tomado los siguientes valores:

K_1 puede trabajar como 0,2-2-20-200 pero en nuestro caso se va a implementar con 2. K_2 va a ser igual a 2,2. b_1 tiene el valor de $126{,}5e10^{-2}$ (kgm/s) y b_2 el valor de $127{,}31e10^{-2}$ (kgm/s). Teniendo en cuenta los anteriores datos, ya podemos hallar los coeficientes y simular el comportamiento del sistema.

$$T = \sqrt{\frac{(126{,}5x10^{-2} \times 127{,}31x10^{-2})}{(2 \times 2{,}2)}} = 60{,}4987x10^{-2} \text{ ó } 0{,}604987 \qquad (24)$$

Ya que el coeficiente que representa a T en el numerador como en el denominador de la función de transferencia es el mismo, entonces existe un solo valor para la constante de tiempo. Pero con respecto al valor del coeficiente de amortiguamiento es diferente el del numerador con respecto al denominador, por ende se ha hecho el cálculo que determina cada uno de estos valores a continuación:

- ✓ Numerador

$$\left(\frac{k_2 b_1 + k_1 b_2}{k_1 k_2}\right) = 1{,}21118 \qquad (25)$$

$$2\zeta T = 1{,}21118 \qquad (26)$$

$$\zeta = \frac{1{,}21118}{2 \times 0{,}604987} = 1{,}0009967 \qquad (27)$$

- ✓ Denominador

$$\left(\frac{k_2 b_1 + k_1 b_2 + k_2 b_2}{k_1 k_2}\right) = 1{,}847731 \qquad (28)$$

$$2\zeta T = 1{,}847731 \qquad (29)$$

$$\zeta = \frac{1{,}847731}{2 \times 0{,}604987} = 1{,}52708 \qquad (30)$$

Teniendo en cuenta que los valores de los coeficientes de amortiguamiento son mayores a 1, entonces se puede determinar que se comporta como un sistema sobreamortiguado.

CONTROL PREDICTIVO

Se presenta como un modelo neuronal proporciona la respuesta futura de la planta durante el horizonte especificado. Las predicciones hechas por la red son pasadas a una rutina de optimización numérica, la cual trata de minimizar un criterio de comportamiento deseado durante el cálculo de la señal de control adecuada.

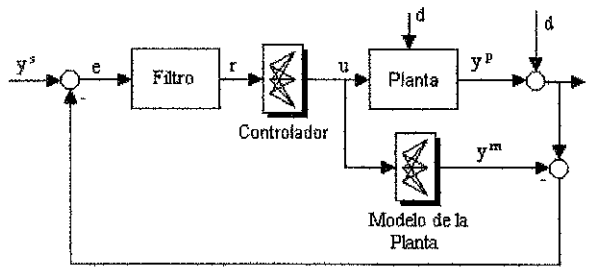


Fig. 21. Control por Modelo Interno

Otra posibilidad, como se muestra en la figura es entrenar otra red para imitar la acción de la rutina de optimización, una ventaja de esta aproximación es que el lazo exterior, que consiste en el modelo de la planta y la rutina de optimización, no es necesario después que el entrenamiento se ha completado.

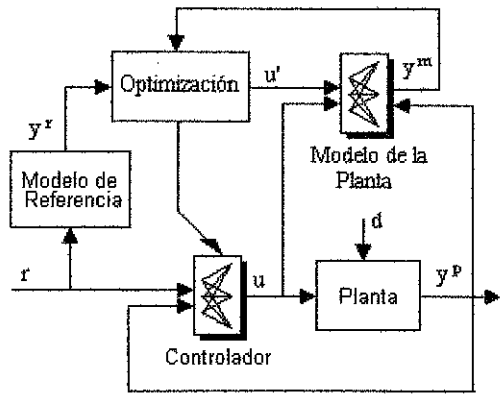


Fig. 22. Control Predictivo

Con todos los datos necesarios calculados, procedemos a la simulación del sistema mediante simulink. Se utiliza para el análisis dinamico el modelo *predcstr* que aplica el bloque del controlador neuronal NN Predictive controller base del diseño para el sistema de diagnóstico de carreteras de la malla vial.

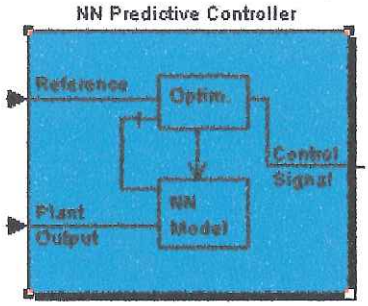


Fig. 23. Control Predictivo en Simulink

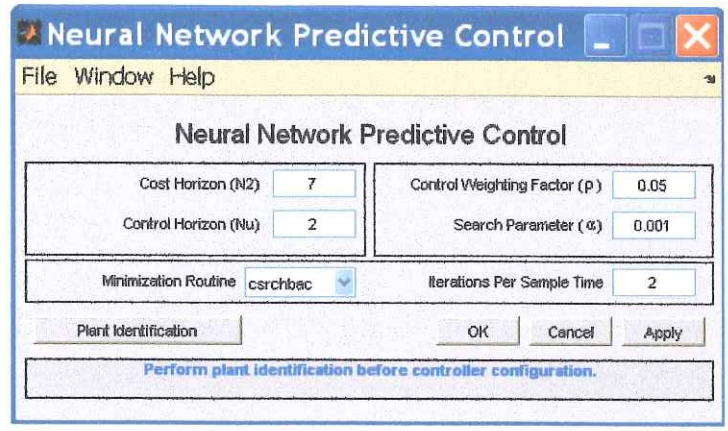


Fig. 24. Características

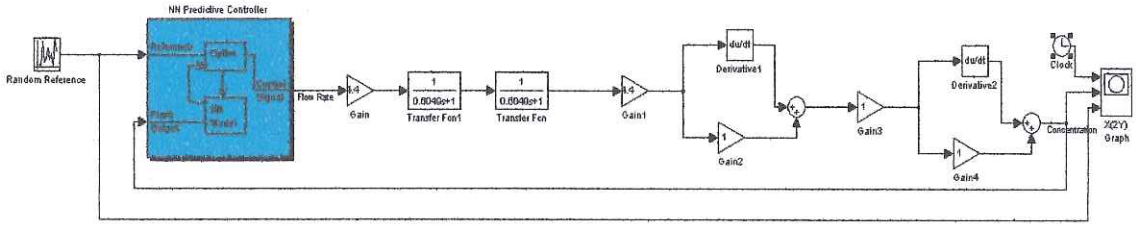


Fig. 25. Modelo en Simulink

Al realizar esta simulación obtenemos los siguientes resultados:

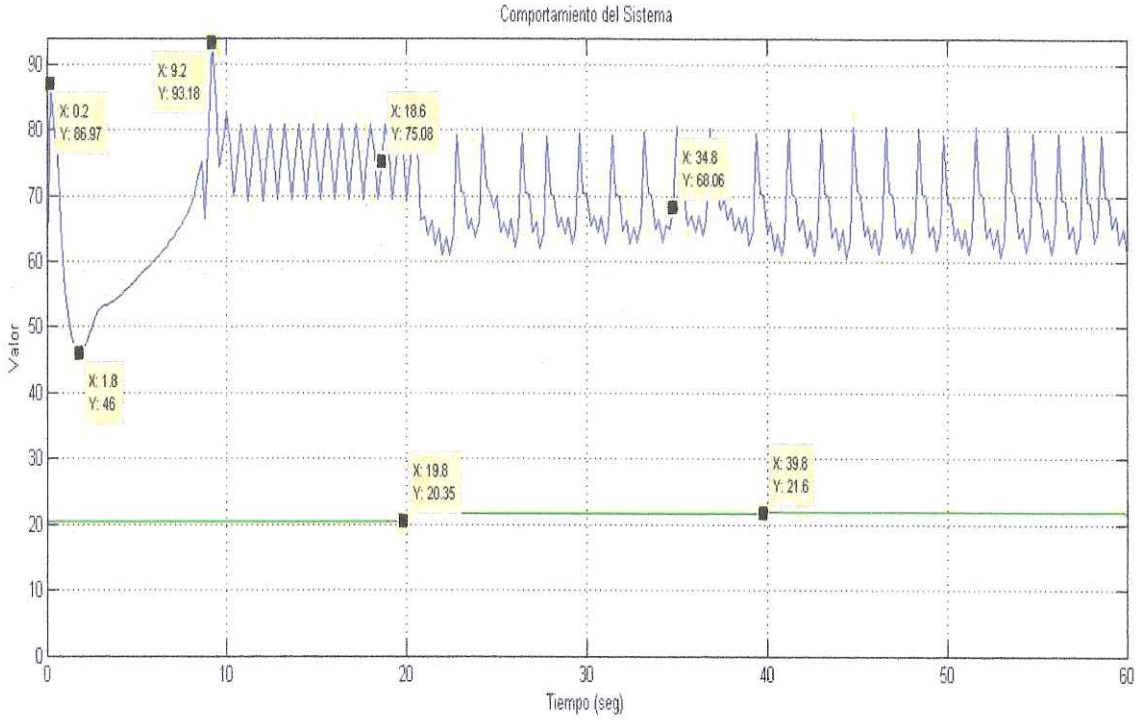


Fig. 26. Comportamiento del Sistema (60seg)

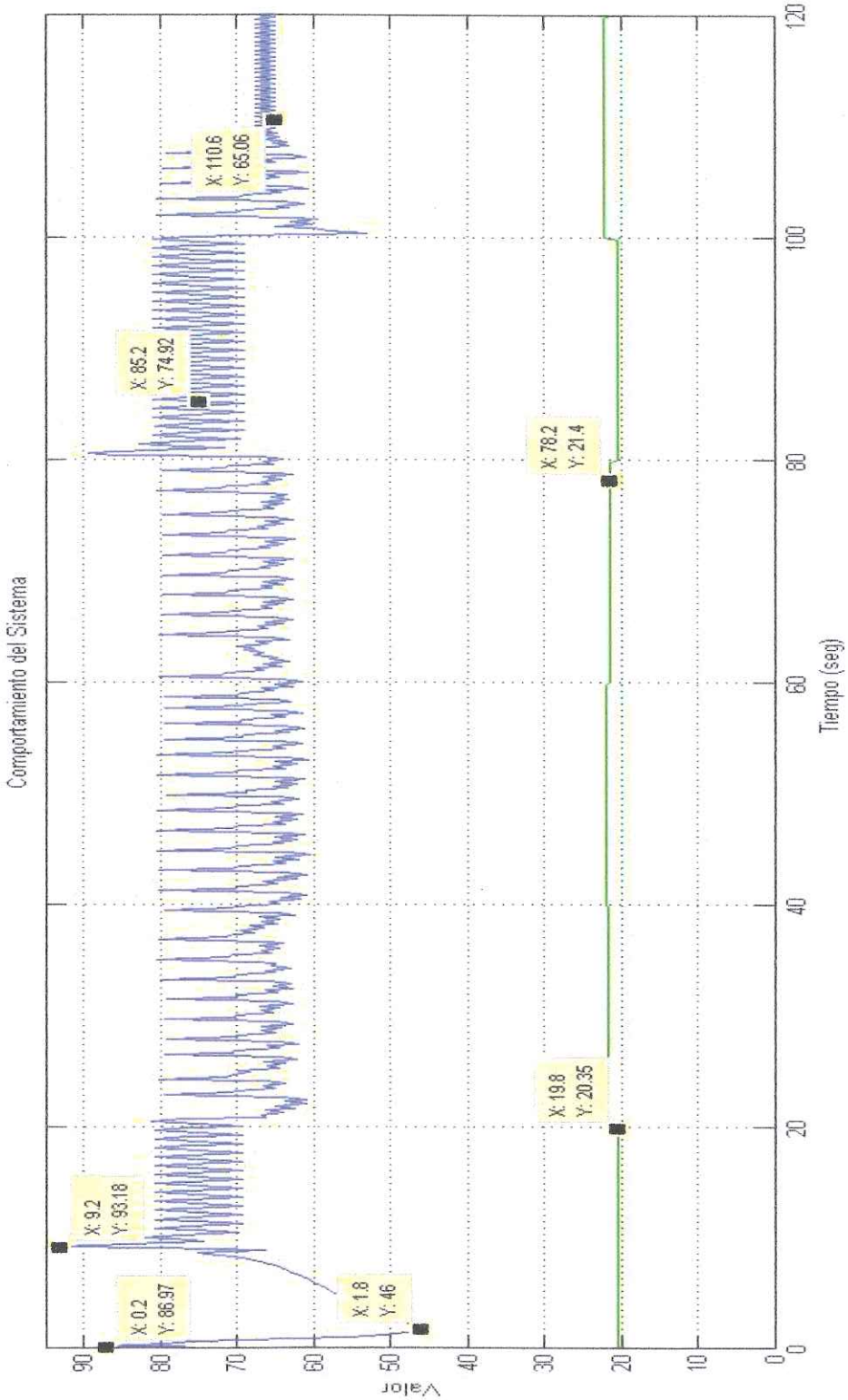


Fig. 27. Comportamiento del Sistema (120seg)

En el comportamiento se aprecia un pico de 86,97 en un tiempo de 0,2 segundos, después de este baja hasta 46 para nuevamente subir de forma proporcional y generando un nuevo pico de 93,18 (más alto que el anterior). A partir de este momento en el sistema se generan oscilaciones entre los valores de 70 y 80, pero después de los 20 segundos estas oscilaciones aumentan su rango, pasando a ser de 60 a 80.

Al realizar todo lo planteado, se ha procedido a hacer una pequeña selección de los dispositivos que pueden generar los mejores resultados para verificar las condiciones en las que se puede encontrar la carretera y estos se encuentran a continuación.

SELECCIÓN DE LOS SENSORES

- Sensor de Humedad

El sensor de humedad se selecciono teniendo en cuenta la normativa Invías (INV E 725-07), donde dice que el porcentaje de humedad debe estar entre 55 y 80%. Cuando el agua entra a la mezcla asfáltica se rompe la unión que hay entre el asfalto y el agregado y cuando esto ocurre se presenta ahuellamiento, desprendimiento del agregado de la mezcla (formación de grietas, hundimientos y desplazamientos laterales del pavimento), oxidación en el asfalto, ya que el oxigeno del agua hace que haya un deterioro en las propiedades del asfalto.

Según estudios realizados en laboratorios se dice que estas fallas están asociadas a la excesiva plasticidad de uno de los componentes del pavimento y que entre más humedad haya es más determinante la falla del material.

Se ha elegido el sensor inteligente de pavimento modelo GEO-ARS31 de la marca Geónica S.A. El sensor activo ARS31 se instala a ras de la superficie de la carretera y calcula la temperatura de congelación por medio de una refrigeración activa y el calentamiento de la superficie del sensor. La medición de la temperatura de congelación es independiente de la mezcla. El diseño de la carcasa de dos secciones permite que la unidad del sensor sea retirada para fines de mantenimiento en cualquier momento, quizás en minutos.

Fig. 28. Sensor de Humedad

Tabla 3. Especificaciones Técnicas

Dimensiones	Diámetro 120mm, altura 50 mm
Peso	Aproximadamente 900 g
Temperatura de almacenamiento	-30.....70ºC
Tipo de protección	IP68
Fuente de alimentación	9.....36V VDC
Conector	Por resorte, wago (sección transversal < 0.5 mm2)
Temperatura de funcionamiento	-30.....70ºC
Humedad relativa de funcionamiento	0.....100% RH
Consumo de energía	Aproximadamente 30 W
Interfaz	RS485, baud rate: 2,400...38,400 bit/s (defecto 19,200). Longitud del cable: 50m

- Sensor de Temperatura

El sensor activo para pavimentos DRP110 SSI, es una combinación de sensor activo y pasivo para pavimento. El sensor insertado en el pavimento mide la temperatura actual de la superficie, el punto de congelación de cualquier líquido en el pavimento y determina si la superficie está húmeda o seca. El DRP110 usa tecnología de sensor activo, es decir, enfría el líquido del pavimento para determinar el punto real de congelación. Este método se lleva a cabo sin importar el tipo o la mezcla de químicos en el pavimento.

Fig. 29. Sensor de Temperatura

Tabla 4. Especificaciones Técnicas

Elemento activo	Unión Peltier Sensor de temperatura de la tapa de recolección
Elemento pasivo	Cable de conexión "pigtail", o conexión en espiral, de la sonda externa para medir la temperatura de la superficie.
Longitud de la sonda para pavimento:	43,18 cm / 20 pulgadas
Especificaciones del rango de funcionamiento ✓ Rango de punto de congelación ✓ Temperatura de la superficie a ✓ Rango de la capacidad de supervivencia	Clavijas de conductancia eléctrica -20 °C a +0,5 °C (-4 °F a +32,9 °F) -55 °C a 85 °C (-67 °F a 185 °F) -55 °C a 85 °C (-67 °F a 185 °F)
Especificaciones electrónicas ✓ Microprocesador ✓ Módulo central	Módulo central de procesador a 22,1 MHz Incluye 256 K de memoria flash y 128 K de RAM estática
Comunicación	RS-485
Distancia máxima desde el origen de datos	>950 pies (290 metros)
Alimentación del sensor	18 V a 28 V

Corriente	0,5 A a 28 V
Rango de temperatura de funcionamiento	-40 ºC a +85 ºC (-40 ºF a +185 ºF)
Cumple con la normativa CE	EN-55011:2003 Clase A; EN-61000-3-2:2000; EN-61000-3-3:2001.

- Sensor de Deformación

Este tipo de sensores funcionan de la siguiente manera: el cabezal envía a través de la guía de ondas un pulso de interrogación (impulso eléctrico) que genera un campo electromagnético alrededor de ella y se desplaza alejándose de la electrónica. Cuando el campo electromagnético se encuentra con el campo magnético del imán, la guía de onda sufre una torsión (efecto de Weidemann) la que provoca un pulso sónico que viaja en sentido opuesto al de interrogación y que es recogido y procesado por la electrónica.

Como se conoce la velocidad de propagación del impulso en la guía de onda (gradiente) y el tiempo que transcurre entre la emisión del pulso de interrogación y el retorno del pulso sónico, la electrónica es capaz de determinar la posición del imán con una exactitud micrométrica.

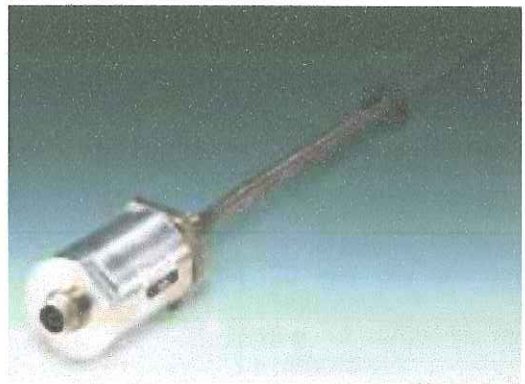


Fig. 30. Sensor de Deformación

Este sensor es fabricado con los siguientes componentes:

- ✓ Guía de Onda: Elemento magnetostrictivo donde es generado el pulso sónico. Es la guía para dirigir el pulso al punto de detección en el cabezal.

- ✓ Recolector (cinta): Su geometría convierte el pulso de torsión en pulso longitudinal, es decir, la energía mecánica en energía magnética.

- ✓ Bobina de recolección: Convierte la energía magnética en energía eléctrica, la cual es enviada hacia la electrónica.

- ✓ Imán de posición: Se ubica sobre la guía de onda en el punto de medición

Tabla 5. Especificaciones Técnicas

Salidas	Voltaje: 0 – 10V a 3 hilos Corriente: 4 – 20 mA a 3 hilos
Resolución	Básicamente infinita
Frecuencia de muestreo	0.5 .....5 kHz dependiendo del rango de medida
Linealidad	+/- 0.1mm para rangos <= 500 mm +/- 0.02 % f.s. para rangos > 500 mm
Cubierta del material	Acero inoxidable 1.4401
Montaje	Hilo M18x1,5
Presión de funcionamiento	300 bar, otros valores a petición
Clase de protección	IP67 (conector de salida: con conector de acoplamiento)
Temperatura de funcionamiento	-40.....+85°C
EMC, inmunidad a las interferencias	EN61326: 1998, Tabla A1
EMC, las emisiones de radiofrecuencia	EN55011 grupo 1 Clase A
Descarga	100 g/6 ms de acuerdo con la norma EN60068-2-27
Vibración	15 g, 10....2000 Hz de acuerdo con la norma EN60068-2-6
Conexión	Enchufe macho 8 pines DIN 45326/cable 3 m (estándar)

- Sensor de Flujo Vehicular

El sensor piezoeléctrico de tráfico vehicular BL de la marca Roadtrax para pesaje en movimiento WIM (weigh in motion), ha sido diseñado para la instalación permanente o temporal en o sobre la superficie de la carretera para la medición de datos del tráfico vehicular. La construcción única que tiene este sensor permite la instalación directa en la carretera con un formato flexible que puede ajustarse al perfil de la vía.

La construcción plana del sensor da un rechazo inherente de ruido de la carretera debido a la flexión de carriles, carreteras adyacentes, y a los vehículos que se aproximan. El pequeño corte que se debe hacer en la carretera para la instalación reduce al mínimo cualquier daño en ella, acelerando la instalación y reduciendo la cantidad de cemento que se utiliza en la instalación.

El sensor piezoeléctrico de Roadtrax BL está disponible tanto como un sensor para la Clase I que es el más alto nivel de uniformidad necesaria para aplicaciones de pesaje en movimiento y, como un sensor de Clase II, que es más rentable para contar, clasificar, cabinas de alta velocidad de peaje, detección de velocidad y de Red Cámaras de luz.

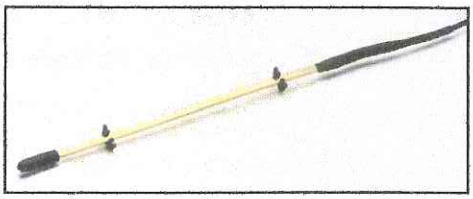


Fig. 31. Sensor de Flujo Vehicular

Tabla 6. Especificaciones Técnicas

Salida uniforme	+/- 20% en sensores tipo II (clasificación) +/- 7% en sensores tipo I (peso en movimiento – WIM)
Rango de operación de Temperatura	-40ºF a 160ºF (-40ºC a 70ºC)
Sensibilidad de la Temperatura	0.2% por ºF típico, dependiendo del **grout** usado
Nivel de salida típica	La carga de una rueda de 400 libras (180 kg) produce una potencia mínima de 250 mV a 70 º F (21 º C) y 55 mph (89kph) para su correcta instalación.
Señal pasiva en cable	RG58C/U clasificado por entierro directo; 3/16" (4.75mm) O.D.
Vida del producto	400 millones ESAL's dependiendo de la instalación.
Resistencia de aislamiento	>500U
Soportes de instalación	incluidos, utilice uno o por cada 6 "(150mm)

Comunicación Inalámbrica

Una de las problemáticas a resolver se basa en la autonomía del sistema así como la eliminación de cualquier cable conductor debido a las distancias a las que pueden ser expuestos los sensores respecto al sistema de monitoreo. A partir de esta problemática se requiere el uso de receptores y emisores inalámbricos que puedan suplir la necesidad de enviar y recibir información de forma continua y confiable, para esta tarea se opta por usar el protocolo de comunicación zigbee.

La antena del módulo xbee, es el dispositivo que convierte la señal eléctrica del trasmisor en una onda electromagnética. Se utiliza como la interfaz entre un transmisor y el espacio libre o el espacio libre y el receptor. Es de tipo pasivo y como la Frecuencia de operación es muy grande, permite que sea factible usar antenas de chip o antena de látigo. El módulo Xbee usado transmite a 2.4GHz, lo cual hace posible que use antenas tipo chip o antenas dipolo, debido a que sus dimensiones son pequeñas. Para el caso de la antena dipolo, la teoría dice que debe ser de ¼ de la longitud de onda. Es decir, la longitud del dipolo se calcula con la siguiente ecuación:

$$\iota = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f}$$

Dónde:

λ = longitud de onda en metros.

ι = la longitud de la antena dipolo en metros.

c = Velocidad de la luz en m/s ($3x10^8$m/s).

f = frecuencia en Hz (2.4 Ghz).

La tasa de transferencia de datos corresponde a la velocidad media con que los datos son transferidos desde la red al usuario conectado a éste, durante períodos de tiempo determinados, medida en bits por segundo y presentada en tres parámetros: promedio, máxima, mínima. Estas pueden ser medidas en unidades como el baudio. En cuanto a la transferencia de información dentro de Internet, un baudio es el número de veces que se modifica el "estado" del medio que transmite en un segundo. El tiempo de descarga de la información se ve afectado directamente por esto la tasa de bits de datos transferidos en ocasiones puede ser superior a la correspondiente tasa de baudios.

Para que una tarjeta pueda procesar datos analógicos y presentarlos a una computadora, necesariamente debe contar con al menos un convertidor analógico/digital (ADC). Un ADC (Convertidor Analógico - Digital por sus siglas en inglés) se encarga de convertir un valor analógico de voltaje a su correspondiente combinación binaria. Para realizar esta operación se requiere un sensor, que es el encargado de leer el estado de una variable física de naturaleza analógica y de representar el valor de dicha variable en su apropiado valor de voltaje. En la actualidad existen muchas variables analógicas que podemos leer de manera directa a través del sensor adecuado. En otras ocasiones, al no existir un sensor diseñado de manera explícita para determinada variable, se ocupa un sensor para medir una variable física diferente, pero que se relaciona con la que nos interesa por medio de una relación matemática, lo cual nos da la posibilidad de que para cualquier proceso industrial, exista un sensor involucrado.

El sensor lee la variable física y entrega una señal eléctrica que está dentro de un rango de valores de voltaje, siendo éste el que tenemos que hacer llegar al ADC del microcontrolador. Teniendo en cuenta que el ADC mide variaciones de voltaje, el sensor tiene que adecuarse con respecto del rango mínimo y máximo (valores estandarizados de la señal de entrada.) que puede leer la entrada del ADC.

Para que el ADC pueda realizar una conversión del valor analógico, se le tiene que agregar un voltaje de referencia, porque éste es el que indica precisamente cuál es el rango de operación de la entrada del ADC. Todos los ADC de los microcontroladores PIC aceptan, como máximo, un rango de operación que llega hasta 5 Volts, por lo que podemos establecer rangos de operación de cualquier valor de voltaje, siempre y cuando no rebasemos los 5 volt. El rango de operación expresado en volts sea de la magnitud que sea, se divide en tantas partes como número de bits posea el ADC. La cantidad de valores analógicos que el ADC puede digitalizar, está en función del número de muestras que puede adquirir. Para ello se establece, de manera automática, un período estable de tiempo durante el cual el ADC obtendrá las muestras.

El número de muestras mínimas que se tienen que tomar se encuentran de acuerdo con el valor de la frecuencia de operación de la señal a digitalizar, y en función del "Teorema del Muestreo" establecido por Nyquist, la frecuencia de muestreo (número de muestras por segundo) se establece de acuerdo con la siguiente expresión matemática:

$$B = 2F$$

Donde:

B: frecuencia de muestreo (número de muestras por segundo).

F: frecuencia de operación de la señal a digitalizar.

El teorema del muestreo se ocupa, principalmente, del caso en que la señal a digitalizar posea una frecuencia alta de operación. Por lo tanto, se tiene que tomar un buen número de muestras y digitalizarlas, como para que en un proceso posterior se tenga que reproducir la señal original, como es el caso de un reproductor de CD o un osciloscopio digital.

Por ejemplo, si la señal analógica trabaja a una frecuencia de 1kHz, se le tiene que aplicar una frecuencia de muestreo de 2kHz, o sea, se deben tomar 2000 muestras por segundo, y cada una de estas muestras se tiene que digitalizar, para lo que es necesario poseer, además del ADC, una memoria de por lo menos 2000localidades para poder guardar la información de las 2000 combinaciones binarias que arroje la digitalización de la señal analógica. Todo este proceso se tiene que realizar para garantizar que si se hace el proceso inverso, se pueda recuperar la señal analógica original.

Para el caso de una aplicación del tipo industrial, donde se tenga que digitalizar el valor de una señal analógica, como puede ser, por ejemplo, la temperatura; el número de muestras por segundo "B" no tiene que ser muy grande, ya que la temperatura no cambia tan rápido de valor, teniéndose cambios en una caldera que consideraremos como un caso demasiado critico, del orden de aproximadamente 10 segundos para tener cambios en rangos de cada 100°C. En la medición de temperatura podemos establecer períodos de muestreo de cada segundo y por lo tanto el espacio de la memoria en donde debemos almacenar los valores digitalizados no tiene que ser tan grande. Por lo tanto, dependerá de la naturaleza de la variable física el establecer la cantidad de muestras a tomar y la cantidad de memoria que necesitemos, así como el proceso para guardar la información en el microcontrolador o serial USB a una PC.

La modulación por ancho de pulsos o PWM, siglas del inglés (Pulse- Width Modulation) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una sinusoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período. Expresado matemáticamente:

$$D = \frac{\tau}{\mathrm{T}}$$

Donde:

D: representa el ciclo de trabajo

τ : representa el tiempo en que la función es positiva (ancho de pulso)

T: representa el periodo de la función

La construcción típica de un circuito PWM se lleva a cabo mediante un comparador con dos entradas y una salida. Una de las entradas se conecta a un oscilador de onda dientes de sierra, mientras que la otra queda disponible para la señal moduladora. En la salida la frecuencia es generalmente igual a la de la señal dientes de sierra, y el ciclo de trabajo está en función de la portadora.

La principal desventaja que presentan los circuitos PWM es la posibilidad de que haya interferencias generadas por radiofrecuencia. Éstas pueden minimizarse ubicando el controlador cerca de la carga y realizando un filtrado de la fuente de alimentación. En la actualidad existen muchos circuitos integrados en los que se implementa la modulación PWM, además de otros muy particulares para lograr circuitos funcionales que puedan controlar fuentes conmutadas, controles de motores, controles de elementos termoeléctricos, chopper para sensores en ambientes ruidosos y algunas otras aplicaciones.

CONCLUSIONES

- En nuestro pensamiento tenemos una idea del comportamiento en el cual puede encontrarse una carretera, y mediante el control predictivo podemos afirmar ese comportamiento, el cual es muy variante, es decir, se ve representado con movimientos oscilatorios, ya que en la mayor parte del tiempo la carrera va a tener una carga encima, lo cual interviene en el sistema elástico y plástico del pavimento, los cambios de temperatura drásticos a los cuales puede verse sometido, el horario al cual este sometida la malla, ya que existen horarios "pico" los cuales proporcionan un mayor cambio con respecto a fuerzas a las cuales se encuentra sometida la carrera, lo cual se puede interpretar como las oscilaciones que vemos en los resultados del comportamiento predictivo.

- Al realizar los cálculos matemáticos se obtuvo una ecuación de segundo orden, la cual se puede representar como dos de primer orden. Esto con el fin de encontrar la función de transferencia que me represente el sistema y adicional a esto permita el funcionamiento del control predictivo.

- Adicional a los cálculos se obtuvo que la relación de amortiguamiento es mayor a 1, lo cual significa que es sistema es sobreamortiguado y por ende se comportará de forma más lenta.

RECOMENDACIONES

- Este proyecto puede ser adoptado por un nuevo estudiante de forma que se avance al siguiente el nivel, es decir, la posible etapa simulación física y una posible implementación a una pequeña escala, de manera que se pueda comprender mejor el funcionamiento de los sensores, los cuales envían las señales de alarma a una central de control y con esto se logre una pequeña interpretación visual del sistema.

- El presente documento puede llegar a ser presentado en alguna determinada empresa que trabaje en este campo, permitiéndole quizás una mejor comprensión de las condiciones en las cuales se puede encontrar una carretera, de manera que de una u otra manera se logre aumentar la vida útil del pavimento, la facilidad al momento del mantenimiento, determinar con anticipación el momento de una cambio total en una carretera determinada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ponencias Evento IEEE para el transporte – Antonio Faustino Muñoz Moner, Ponente

2. Medición del movimiento. En: Sensórica e instrumentación de alta precisión. Editorial MES. República de Cuba, 2002 – Antonio Faustino Muñoz

3. Instrumentación para Pavimentos – Proyecto IDU

4. Investigación de Sistemas de Control Inteligente del Tráfico Vehicular y Desarrollo de Instrumentación de Alta Precisión de Parámetros Asociados al Monitoreo, Mando y Control Automáticos de Carreteras Urbanas. Programa Jóvenes Investigadores e Innovadores "Virginia Gutiérrez de Pineda Colciencias, Colombia 2012 – Yolanda Carreño

5. Sensores de fibra óptica codificados en frecuencia medida de voltaje y corriente. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia. España, 2002 – Martínez, L

6. Investigación de nuevos sistemas de medición y control basado en modelos de nano instrumentación para prótesis de manos.

7. Automatización de las vías, carreteras e inteligencia de automoviles – Pölliita Fänii
   http://pollitafannimecatronica.wordpress.com/2011/12/08/automatizacion-de-las-vias-carreteras-e-inteligencia-de-automoviles/

8. Carreteras, Análisis de Tráfico – Vaisala
   http://es.vaisala.com/sp/roads/applications/trafficanalysis/Pages/default.aspx

9. La DGT trabaja en un proyecto para instaurar en España sistemas inteligentes de comunicación entre el vehículo y la vía – Lukor
   http://www.lukor.com/ordenadores/11012301.htm

10. Sistemas inteligentes de transporte ¿Realidad o Ficción? – Circula Seguro
http://www.circulaseguro.com/vehiculos-y-tecnologia/sistemas-inteligentes-de-transporte-ficcion-o-realidad

11. Sistemas inteligentes de transporte
http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=0CFEQFjAH&url=http%3A%2F%2Fwww.iies.es%2Fattachment%2F115765%2F&ei=yS5GUfTzLIrW0gGF3YDIBw&usg=AFQjCNF2RLjXUUjDjor9B-xqi5tlblePbw&bvm=bv.43828540,d.eWU&cad=rja

12. CICNetwork – Ciencia y Tecnología
http://www.cicnetwork.es/upload/pdf/revistas/CN1.pdf