

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

Investigación en Curso

Milciades Othon Diaz Tagle Gomez
Programa Ingeniería Mecatrónica y Facultad Ing. Físicomecánicas
mdiaz17@unab.edu.co

Universidad Autónoma de Bucaramanga

RESUMEN

En el artículo se presenta una metodología para implementar sistemas de control inteligente basado en lógica difusa y evaluar el comportamiento de los pavimentos en tiempo real mediante sensores de deformación, la humedad, la temperatura y tráfico de vehículos; en este proyecto de investigación se diseñaron sistemas control inteligente para supervisar la instrumentación asociada a las variables más importantes en las vías urbanas, con el fin de predecir los daños en pavimentos para el apoyo al mantenimiento de estos; tomando como punto de referencia las pruebas diseñadas con normas Inviás en el laboratorio de CORASFALTOS

ABSTRACT

This article presents a methodology to implement intelligent control systems based on fuzzy logic to evaluate the behavior of the pavements in real time through strain sensors, humidity, temperature and vehicular traffic; in this research project has been designing a intelligent control to monitor the associated instrumentation to the most important variables in the urban roads, in order to predict the damage on the road to the staff responsible for the maintenance of these; taking as a point of reference the tests designed with standards INVIAS in the laboratory of CORASFALTOS .

Área de Conocimiento

Ingenierías.

Palabras Clave

Control de tráfico vehicular, deformación, la temperatura, la humedad, Controlador por lógica fuzzy

Este material es presentado al *VI Encuentro Institucional de Semilleros de Investigación UNAB*, una actividad carácter formativo. La Universidad Autónoma de Bucaramanga se reserva los derechos de divulgación con fines académicos, respetando en todo caso los derechos morales de los autores y bajo discrecionalidad del grupo de investigación que respalda cada trabajo para definir los derechos de autor.

1. INTRODUCCIÓN

Las nuevas autopistas de 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. La integración de dicha tecnología en el sistema de transporte dentro de una zona y en los vehículos mismos ayuda 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.

El modelo difuso implementado es de tipo Takagi-Sugeno, cuyos procedimientos aplicados del modelo difuso son: fusificación de las entradas, evaluar las funciones de pertenencia de cada entrada de acuerdo con el valor fusificado, evaluación de las reglas, cálculo y defuzificación de la salida para la fusificación y defuzificación se tuvo en cuenta los valores de entrada y salida a una escala definida en el sistema difuso de acuerdo a la metodología adoptada.

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 estudio se toma el proceso de medición y control de la temperatura, tráfico vehicular, deformación y humedad.

2. OBJETIVOS

Investigar y desarrollar sistemas de control inteligente para el control del tráfico vehicular dotado de instrumentación de alta precisión para el monitoreo y control de parámetros asociados al comportamiento de carreteras urbanas

Identificar variables y parámetros asociados al control de carreteras y realización e implementación del diseño de los sistemas distribuidos de monitoreo y control utilizando

herramientas flexibles que permitan integrarse a un sistema operativo en tiempo real.

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El presente proyecto se llevará a cabo teniendo en cuenta los siguientes lineamientos:

- Definir el concepto y diseño del controlador a implementar
- Simulación
- Prototipo virtual
- Análisis del diseño
- Optimización del diseño
- Montaje físico (a largo plazo)

4. MATERIALES Y MÉTODOS

DISEÑO Y APLICACIÓN DEL CONTROL DIFUSO

Para el diseño de la interfaz por el 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 [3] 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.

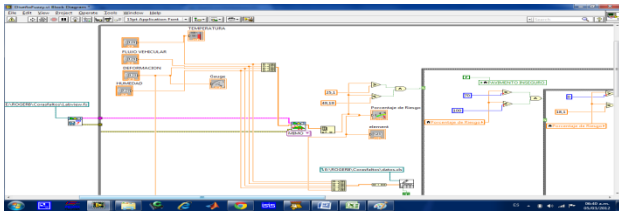


Figura 1. Lectura de sensores y multiplexación.

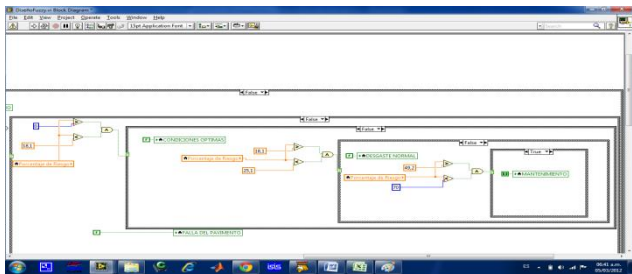


Figura 2. Identificación de salidas.

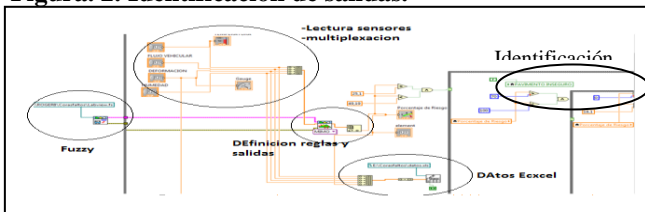


Figura 3. Controlador difuso. (CARREÑO, 2012).

La lectura de los sensores y multiplexación de los mismos ocurren en la zona superior izquierda 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, 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 entradas múltiples salidas) debido a que se usaron varias entradas, es decir varios sensores. La interfaz gráfica se puede explicar mediante las siguientes imágenes las cuales están constituidas principalmente por el manejo y visualización de variables tales como los valores mínimos y máximos establecidos por el PID, el control manual para el manejo de valores de la gráfica, el indicador visual y las alarmas que visualizan el comportamiento variable del pavimento.

Tabla 1. Definición de las alarmas

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.

5. SIMULACIÓN DE LOS SISTEMAS

La alerta “Condiciones Optimas” se define en condiciones de temperatura de 27 °C a 38 °C (temperatura ambiente), con un flujo vehicular menor que 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.

Sí 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.

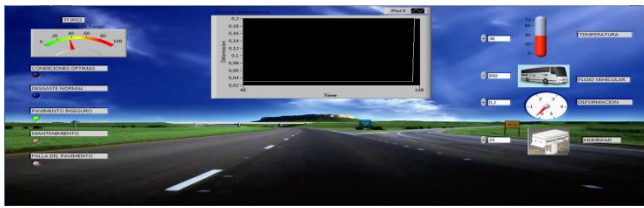


Figura 4. Interfaz Gráfica – Desgaste Normal.

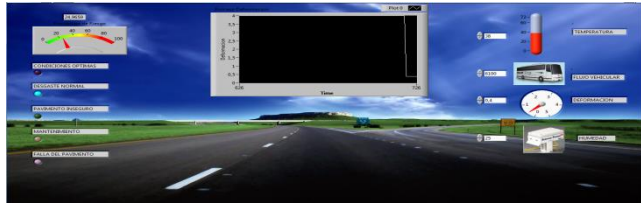


Figura 5. Interfaz Gráfica – Pavimento Inseguro por el efecto de la deformación.

Para condiciones de temperatura de 27 - 40 grados Celsius, un flujo vehicular que no supere los 2500 ciclos y una deformación de 20 mm, 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.

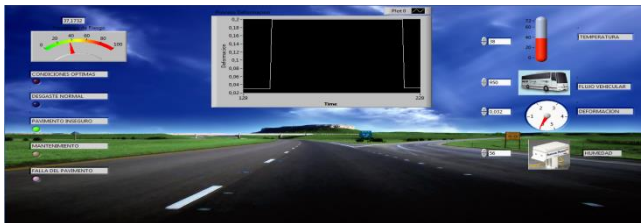


Figura 6. Interfaz Gráfica – Pavimento Inseguro por el efecto de la humedad.

Para condiciones de temperatura ambiente normales entre 27-38 grados Celsius, 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 sus composición permite fácilmente la adherencia del agua a su composición. Se considera que en tan poco tiempo de uso no debería permitir tanta humedad y por tanto el pavimento es inseguro.

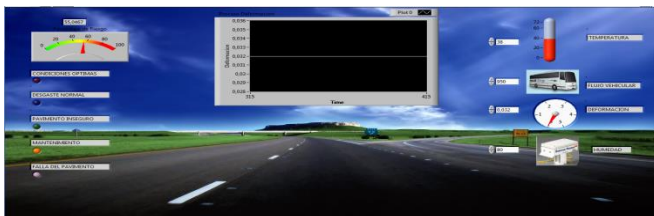


Figura7. Interfaz Gráfica – Mantenimiento por el efecto de la humedad.

Teniendo en cuenta las condiciones anteriores con una variación de aumento en la humedad del 80 %, se considera que el pavimento necesita mantenimiento. Según pruebas del laboratorio

el pavimento se comporta de manera deficiente y por tanto el control difuso envía una alarma de que el porcentaje de agua en el asfalto generara una tendencia a desgastar el material de manera rápida.



Figura 8. Interfaz Gráfica – Mantenimiento por el efecto de la deformación.

Según la información del experto se considera que si el pavimento presenta una deformación por encima de 1,5 cm. El pavimento tiende a deformarse [4] en grandes cantidades tanto que lo más conveniente para conservar el estado de la vía es realizarle un mantenimiento oportuno para así mejorar las condiciones actuales y poder garantizar que el ciclo de vida del pavimento permanezca en condiciones óptimas.

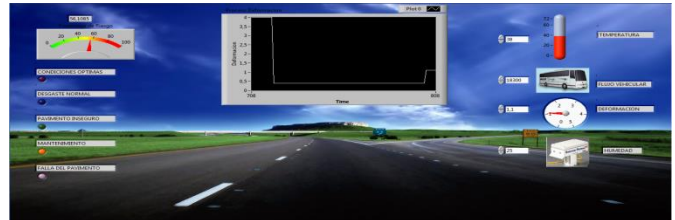


Figura 9. Interfaz gráfica – Mantenimiento por efecto del flujo vehicular.

Otra condición importante es el flujo vehicular ya que sí está por encima de 15000 ciclos 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 controlador inspecciona que se debe revisar el pavimento emitiendo una alarma de “mantenimiento” así como se muestra en la interfaz gráfica.

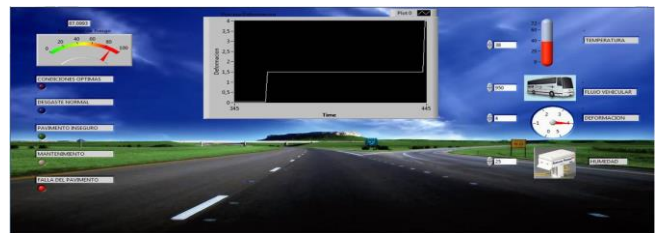


Figura 10. Interfaz gráfica – Falla del Pavimento.

De manera similar el experto indica que luego de una deformación de 4 cm el pavimento no estará en condiciones de servir como vía y por tanto el controlador inteligente toma envía una alerta de que el pavimento esta deteriorado y se debe considerar un cambio significativo en las capas que componen la vía..

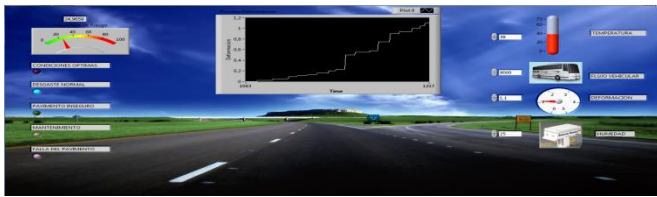


Figura 11. Inicio gráfica de la Deformación en el tiempo

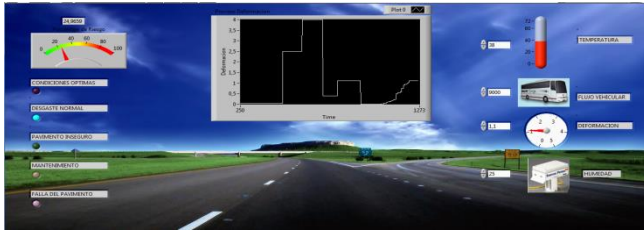


Figura 12. Seguimiento del comportamiento de la deformación en tiempo real.

Tabla 2. Pruebas del registro en la base de datos de la deformación plástica.

País No.	TIEMPO (min)	Dist. Deformación	51mm	40mm	40mm	30mm	32mm	20mm	20mm	15mm	12mm	8mm	4mm	8mm	32mm	20mm	24mm	20mm	24mm	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0.18	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
2	0	0.26	0.26	0.26	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
3	0	0.36	0.36	0.36	0.36	0.37	0.37	0.38	0.37	0.38	0.37	0.38	0.37	0.38	0.37	0.38	0.37	0.38	0.37	0.38
4	0	0.47	0.47	0.48	0.48	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
5	0	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
6	0	0.56	0.56	0.56	0.56	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
7	0	0.6	0.6	0.6	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
8	0	0.62	0.62	0.62	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
9	0	0.64	0.64	0.64	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
10	0	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
11	0	0.7	0.7	0.7	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
12	0	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
13	0	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
14	0	0.8	0.8	0.8	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
15	0	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
16	0	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
17	0	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
18	0	0.85	0.86	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
19	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
20	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
21	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
22	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
23	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
24	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
25	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
26	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
27	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
28	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
29	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
30	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
31	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
32	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
33	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
34	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
35	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
36	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
37	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
38	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
39	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
40	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
41	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
42	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
43	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
44	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
45	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
46	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
47	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
48	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
49	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
50	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
51	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
52	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
53	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
54	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
55	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
56	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
57	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
58	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
59	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
60	0	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86

Se observa que el comportamiento de la deformación en el tiempo de la figura 13 es similar a la gráfica que se registra en la base de datos y los datos de los sensores de temperatura, humedad y flujo vehicular también son iguales, debido a que los datos se almacenan simultáneamente.

1.2 Reglas del conjunto difuso

Se utiliza la técnica de defuzzificación por centroide y a continuación se presentan las reglas más importantes del sistema.

Si la Temperatura es mayor que 57 °C y el Flujo Vehicular es menor que 2520 y la Deformación es mayor que 15 mm se genera una alerta media que quiere decir que el pavimento no está en buenas condiciones es decir que no cumple con las normas exigidas por INVIAS.

Si la Humedad está entre el 46% y el 78%, y el Flujo Vehicular es menor que 25

6.1. CRONOGRAMA DEL PROYECTO

ACTIVIDAD		DURACIÓN (MESES)					
		1	2	3	4	5	6
Concepto y Diseño	Recopilación Bibliográfica.	■					
	Analizar el comportamiento		■				
Diseño, Análisis y Optimización	Estudiar y analizar las técnicas de control.		■				
	Implementar el prototipo simulado.			■	■		
Prototipo Físico	Diseño y evaluación del Modelo de control de los sistemas.			■	■		
Producto Final	Elaboración de un modelo a escala para estudiar comportamiento de los sistemas				■	■	
	Documentación del Proyecto sobre la metodología de diseño de los sistemas de control					■	■

7. REFERENCIAS

[1] CARREÑO, Y., 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.

- [2] KUO, B. "Sistemas de Control Automático". Séptima Edición, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. México, 1996
- [3] FIGUEROA M. Informes de Investigación ,2012
- [4] MARTÍNEZ, L. Sensores de fibra óptica codificados en frecuencia medida de voltaje y corriente. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia. España, 2002.
- [5] MONTEJO, A., Ingeniería de Pavimentos. Fundamentos, Estudios Básicos y Diseño, Tercera Edición, Tomo 1, Universidad Católica de Colombia, 2010.
- [6] MUÑOZ, A., Medición del movimiento. En: Sensórica e instrumentación de alta precisión. Editorial MES. República de Cuba, 2002.
- [7] OGATA, K. "Ingeniería de Control Moderna". Prentice-Hall Internacional. Englewood Cliffs. N.J., 1974.
- SANABRIA LUIS E. Documentos del Diplomado "Tecnología de Asfaltos" 2012.