



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

DISEÑO E INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE
ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA MEDICIÓN DE
PERFILES EN PAVIMENTOS

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE :
M A E S T R O E N I N G E N I E R Í A
ELECTRICA – SISTEMAS ELECTRÓNICOS
P R E S E N T A :
I S R A E L N A V A B R A V O



TUTOR:

M. en I. LAURO SANTIAGO CRUZ

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Por permitirme seguir preparándome.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM

*Por brindarme una vez más la oportunidad de participar en un proyecto,
en especial al M. en I. Lauro Santiago Cruz.*

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Por apoyar económicamente mis estudios de maestría

Dedicatoria

*A Dios por haberme
permitido alcanzar esta nueva meta.*

*A mis padres
Argelia Bravo Gómez y Paulino Nava Becerril,
por apoyarme en este y en cada uno de
los proyectos en mi vida.*

*A mis hermanos
Fabiola, Marbella y Heriberto,
gracias por estar siempre conmigo
en todo momento y apoyarme.*

*A Cecilia
gracias por ser la Crayofita que ilumina mi mundo.*

ÍNDICE TEMÁTICO

| | |
|---|-----|
| RESUMEN | I |
| PRÓLOGO | III |
| INTRODUCCIÓN | VI |
| I. ANTECEDENTES | 1 |
| I.1. Generalidades | 1 |
| I.2. Conceptos básicos | 2 |
| I.2.1. Definición de rugosidad | 2 |
| I.2.2. Definición de perfil | 3 |
| I.2.3. Índice de perfil (PI) | 5 |
| I.2.4. Índice internacional de rugosidad (IRI) | 6 |
| I.2.5. Número de recorrido (RN) | 9 |
| I.3. Sistemas de medición de perfiles de pavimentos | 9 |
| I.3.1. Varilla y nivel | 10 |
| I.3.2. Dipstick | 11 |
| I.3.3. Perfilómetro Ley K.J. | 13 |
| I.3.4. Perfilómetro APL | 15 |
| I.3.5. Perfilómetro Dakota del Sur | 16 |
| I.3.6. Rugosímetro BPR | 17 |
| I.3.7. Perfilómetro de bajo peso | 18 |
| I.3.8. Perfilómetro láser | 20 |
| I.3.9. Perfilómetro California y Rainhart | 22 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| I.4. | Determinación del Índice de Perfil | 24 |
| I.4.1. | Línea de perfil suavizada | 27 |
| I.4.2. | Localización de las irregularidades mayores de 10 mm | 27 |
| I.4.3. | Colocación de la plantilla de medición para el cálculo del PI | 29 |
| I.4.4. | Medición de las irregularidades | 30 |
| I.4.5. | Cálculos y resultados | 32 |
| II. | ANÁLISIS Y SELECCIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA | 34 |
| II.1. | Estructura mecánica | 34 |
| II.1.1. | Características de los perfilógrafos tipo California | 38 |
| II.2. | Consideraciones sobre el diseño | 39 |
| II.3. | Propuesta de diseño de la instrumentación electrónica | 40 |
| II.4. | Métodos de medición de desplazamiento | 43 |
| II.4.1. | Requerimientos de los sensores de desplazamiento del perfilógrafo | 48 |
| II.4.2. | Medición del desplazamiento horizontal | 49 |
| • | Cargas pesadas | 54 |
| • | Corrosivos o rociados | 54 |
| • | Temperaturas extremas | 54 |
| • | Ambientes peligrosos | 55 |
| • | Ambientes húmedos o sucios | 55 |
| • | Ambientes eléctricamente ruidosos | 55 |
| • | Codificador angular incremental | 56 |
| • | Determinación del desplazamiento horizontal | 57 |
| • | Fuente de alimentación | 59 |
| II.4.3. | Medición del desplazamiento vertical | 60 |
| • | Relación entre desplazamiento vertical del ADT y el desplazamiento lineal | 65 |
| • | Procesamiento de la señal de desplazamiento angular | 69 |
| • | Fuente de alimentación | 70 |

| | | |
|---|---|-----|
| II.5. | Sensor de temperatura | 71 |
| II.6. | Tarjeta de adquisición de datos | 71 |
| II.6.1. | Resolución del convertidor A/D | 72 |
| II.6.2. | Margen del convertidor A/D | 73 |
| II.6.3. | Límites de la señal de entrada | 73 |
| II.6.4. | Consideraciones para la definición de las características de la señal de entrada | 74 |
| II.6.5. | Selección de la tarjeta de adquisición de datos | 77 |
| II.6.6. | Módulo y cables de conexión | 79 |
| | • Bloque de terminales de conexión | 79 |
| | • Señales analógicas y LabVIEW | 81 |
| | • Cable de conexión | 83 |
| II.7. | Computadora de uso rudo | 84 |
| II.7.1. | Especificaciones técnicas | 86 |
| II.8. | Módulo de impresión de reportes | 87 |
| II.8.1. | Tarjeta de control de la impresora térmica | 88 |
| II.8.2. | Mecanismo de impresión | 90 |
| II.8.3. | Unidad de enrollamiento de papel | 92 |
| II.8.4. | Fuente de alimentación de energía | 93 |
| II.9. | Módulo de generación de energía | 94 |
| III. ANÁLISIS Y DISEÑO DEL SOFTWARE DEL PERFILÓGRAFO | | 97 |
| III.1. | LABVIEW | 97 |
| III.1.1. | Programación con LabVIEW | 100 |
| III.2. | Panel de control del perfilógrafo | 102 |
| III.2.1. | Controles e indicadores | 103 |
| III.3. | Diagrama de bloques | 108 |
| III.3.1. | Subrutina de calibración vertical | 110 |
| III.3.2. | Subrutina de obtención del número de proyecto | 119 |
| III.3.3. | Subrutina de obtención del número de documento | 121 |

| | |
|---|-----|
| III.3.4. Subrutina de obtención del inicio de sección | 123 |
| III.3.5. Subrutina de obtención de la trayectoria | 126 |
| III.3.6. Subrutina de obtención de la dirección | 127 |
| III.3.7. Subrutina de obtención de la línea | 129 |
| III.3.8. Subrutina de obtención del pavimento | 130 |
| III.3.9. Subrutina de obtención de la ruta | 131 |
| III.3.10. Subrutina de determinación del valor de la banda nula | 132 |
| III.3.11. Subrutina de la obtención de la longitud del segmento | 133 |
| III.3.12. Subrutina de obtención del orden del filtro a emplear | 135 |
| III.3.13. Subrutina de obtención de la altura de la protuberancia | 143 |
| III.3.14. Subrutina de obtención de la altura de referencia | 145 |
| III.3.15. Rutina de adquisición y procesamiento de los datos | 146 |
| III.3.16. Generación y almacenamiento de reportes | 152 |
| III.3.17. Generación de reportes impresos | 154 |
| III.3.18. Cálculo de la banda nula | 161 |
| III.3.19. Cálculo del PI | 166 |
| III.3.20. Programa de instalación | 172 |
| | |
| IV. INTEGRACIÓN Y PRUEBAS | 174 |
| IV.1. Integración | 174 |
| IV.2. Calibración | 180 |
| IV.2.1. Calibración de la escala horizontal | 181 |
| IV.2.2. Calibración vertical | 182 |
| IV.3. Pruebas | 184 |
| | |
| V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES | 191 |
| V.1. Resultados | 191 |
| V.2. Conclusiones | 194 |
| V.3. Recomendaciones | 195 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA | 197 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | | |
|-------|------|---|----|
| Tabla | 1.1. | Clasificación de los equipos de medición de perfiles | 10 |
| Tabla | 2.1. | Criterios de selección del transductor de desplazamiento | 44 |
| Tabla | 2.2. | Características técnicas de la fuente de alimentación del codificador angular | 59 |
| Tabla | 2.3. | Características técnicas de la fuente de alimentación del ADT | 70 |
| Tabla | 2.4. | Precisión del convertidor A/D de acuerdo a los límites de la señal | 76 |
| Tabla | 2.5. | Características técnicas del generador portátil | 96 |
| Tabla | 3.1. | Comparación de un instrumento virtual contra uno tradicional | 99 |

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

| | | |
|--------------|---|----|
| Figura 1.1. | Trayectoria de rodamiento típica de los trenes de aterrizaje | 4 |
| Figura 1.2. | Representación gráfica del modelo “cuarto de carro” | 7 |
| Figura 1.3. | Escala de valores del IRI para diferentes pavimentos | 8 |
| Figura 1.4. | Equipo de varilla y nivel para la determinación del perfil | 11 |
| Figura 1.5. | Obtención del perfil de pavimento empleando el dipstick | 12 |
| Figura 1.6. | Operación del equipo dipstick | 12 |
| Figura 1.7. | Componentes básicos de dipstick | 13 |
| Figura 1.8. | Componentes de un equipo con referencia inercial | 14 |
| Figura 1.9. | Perfilógrafo tipo APL | 15 |
| Figura 1.10. | Esquema del perfilógrafo APL | 16 |
| Figura 1.11. | Rugosímetro BPR | 17 |
| Figura 1.12. | Perfilógrafo de bajo peso | 18 |
| Figura 1.13. | Detalle de la instrumentación del perfilógrafo de bajo peso | 19 |
| Figura 1.14. | Perfilógrafo láser | 20 |
| Figura 1.15. | Perfilógrafo láser | 20 |
| Figura 1.16. | Detalle de la colocación del sensor láser en el perfilógrafo | 22 |
| Figura 1.17. | Vista lateral de un perfilógrafo tipo California | 23 |
| Figura 1.18. | Perfilógrafo comercial tipo California | 23 |
| Figura 1.19. | Perfilógrafo tipo Rainhart | 24 |
| Figura 1.20. | Perfilograma típico de un equipo comercial | 25 |
| Figura 1.21. | Plantilla de medición para el cálculo manual del PI | 26 |
| Figura 1.22. | Plantilla de medición para localizar irregularidades mayores a 10 mm | 26 |
| Figura 1.23. | Línea de perfil suavizada | 27 |
| Figura 1.24. | Localización de irregularidades mayores a 10 mm | 28 |
| Figura 1.25. | Colocación de la plantilla de medición | 29 |
| Figura 1.26. | Posicionamiento de la plantilla en cambios importantes de pendiente | 30 |
| Figura 1.27. | Irregularidades que serán tomadas en cuenta en el cálculo del PI | 31 |
| Figura 1.28. | Forma en que se miden las irregularidades de doble cresta | 31 |
| Figura 1.29. | Forma de registrar las irregularidades comprendidas entre dos subtramos | 32 |
| Figura 1.30. | Procedimiento de medición de irregularidades | 32 |

CAPÍTULO II

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura 2.1. | Estructura del perfilógrafo del Instituto de Ingeniería | 35 |
| Figura 2.2. | Aditamentos mecánicos para el plegado de la estructura | 36 |
| Figura 2.3. | Base de la estructura del perfilógrafo | 36 |
| Figura 2.4. | Fotografía de la estructura del perfilógrafo | 37 |
| Figura 2.5. | Plano de referencia del perfilógrafo tipo California | 39 |
| Figura 2.6. | Opción de diseño del sistema alrededor de un microcontrolador | 41 |
| Figura 2.7. | Bloques principales de los cuales se compone el perfilógrafo longitudinal | 42 |
| Figura 2.8. | Señales en cuadratura del codificador angular | 51 |
| Figura 2.9. | Elementos funcionales del codificador angular | 53 |
| Figura 2.10. | Codificador angular incremental | 56 |
| Figura 2.11. | Montaje de codificador angular en llanta sensora | 58 |
| Figura 2.12. | Fuente de alimentación del codificador angular | 59 |
| Figura 2.13. | Esquema de construcción del ADT | 61 |
| Figura 2.14. | Diagrama de bloques del ADT | 62 |
| Figura 2.15. | Tarjeta de recepción y rotor para dispositivos con rango de $\pm 30^\circ$ | 62 |
| Figura 2.16. | Tarjeta de recepción y rotor para ADT's con rango de $\pm 60^\circ$ | 63 |
| Figura 2.17. | Transductor de desplazamiento angular | 64 |
| Figura 2.18. | Relación entre desplazamiento lineal y la rotación | 65 |
| Figura 2.19. | Desplazamiento vertical de la llanta sensora y desplazamiento de interés | 68 |
| Figura 2.20. | Montaje del ADT | 69 |
| Figura 2.21. | Fuente de alimentación del ADT | 70 |
| Figura 2.22. | Conversión A/D utilizando 3 y 16 bits | 72 |
| Figura 2.23. | Margen del convertidor A/D | 73 |
| Figura 2.24. | Límites de la señal de entrada | 74 |
| Figura 2.25. | Tarjeta de adquisición de datos | 78 |
| Figura 2.26. | Inserción de la tarjeta de adquisición de datos en la computadora | 78 |
| Figura 2.27. | Bloque de terminales empleado | 80 |
| Figura 2.28. | Computadora conectada al bloque de conexión | 81 |
| Figura 2.29. | Señales analógicas | 81 |
| Figura 2.30. | Señal de voltaje referenciada | 82 |
| Figura 2.31. | Señal de voltaje no referenciada | 83 |
| Figura 2.32. | Tecnología de construcción del cable de conexión | 84 |
| Figura 2.33. | Cable de conexión | 84 |
| Figura 2.34. | Computadora utilizada | 87 |
| Figura 2.35. | Tarjeta de control de la impresora térmica | 90 |
| Figura 2.36. | Mecanismo de impresión utilizado | 91 |
| Figura 2.37. | Unidad de enrollamiento de papel | 92 |

| | | |
|--------------|---|----|
| Figura 2.38. | Fuente de alimentación del módulo de impresión de reportes | 94 |
| Figura 2.39. | Terminales de la fuente de alimentación del módulo de impresión | 94 |
| Figura 2.40. | Generador portátil | 96 |

CAPÍTULO III

| | | |
|--------------|--|-----|
| Figura 3.1. | Osciloscopio tradicional | 100 |
| Figura 3.2. | Panel frontal del instrumento virtual | 101 |
| Figura 3.3. | Diagrama de bloques de un instrumento virtual | 102 |
| Figura 3.4. | Panel de control del perfilógrafo | 103 |
| Figura 3.5. | Bloques generales que componen el programa del perfilógrafo | 109 |
| Figura 3.6. | Dispositivo de calibración vertical | 111 |
| Figura 3.7. | Pantalla de calibración del desplazamiento vertical | 112 |
| Figura 3.8. | Inicio de la subrutina de calibración vertical | 113 |
| Figura 3.9. | Cuadro de configuración de la señal de calibración | 114 |
| Figura 3.10. | Segunda secuencia de calibración vertical | 116 |
| Figura 3.11. | Cuadro de texto en la secuencia de calibración vertical | 116 |
| Figura 3.12. | Verificación de tolerancias en la calibración vertical | 117 |
| Figura 3.13. | Creación del archivo de datos del perfilógrafo | 118 |
| Figura 3.14. | Secuencia de adquisición de parámetros | 119 |
| Figura 3.15. | Pantalla de ingreso del número de proyecto | 120 |
| Figura 3.16. | Diagrama de bloques de la subrutina del número de proyecto | 121 |
| Figura 3.17. | Cuadro de diálogo para la obtención del número de documento | 122 |
| Figura 3.18. | Diagrama de bloques de la subrutina de obtención del número de documento | 123 |
| Figura 3.19. | Cuadro de diálogo para especificar el inicio de sección | 124 |
| Figura 3.20. | Diagrama de bloques de la subrutina de inicio de sección | 125 |
| Figura 3.21. | Cuadro de diálogo para la modificación de la trayectoria de la rueda | 126 |
| Figura 3.22. | Diagrama de bloques de la subrutina de modificación de la trayectoria | 127 |
| Figura 3.23. | Cuadro de diálogo para la modificación de la dirección | 128 |
| Figura 3.24. | Diagrama de bloques de la subrutina de selección de la dirección | 128 |
| Figura 3.25. | Cuadro de diálogo para la modificación del número de línea | 129 |
| Figura 3.26. | Diagrama de bloques de la modificación del número de línea | 129 |
| Figura 3.27. | Cuadro de diálogo para la obtención del pavimento | 130 |
| Figura 3.28. | Diagrama de bloques de la subrutina de modificación de pavimento | 130 |
| Figura 3.29. | Cuadro de diálogo para la modificación de la ruta | 131 |
| Figura 3.30. | Diagrama de bloques de la subrutina de modificación de la banda ruta | 131 |
| Figura 3.31. | Cuadro de diálogo para la modificación de la banda nula | 132 |
| Figura 3.32. | Diagrama de bloques de la subrutina de modificación de la banda nula | 133 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Figura 3.33. | Cuadro de diálogo para la modificación de la longitud de sección | 134 |
| Figura 3.34. | Diagrama de bloques de la subrutina de modificación de longitud se sección | 134 |
| Figura 3.35. | Señal del transductor de temperatura sin filtrar | 138 |
| Figura 3.36. | Señal del transductor de temperatura filtrada digitalmente | 139 |
| Figura 3.37. | Señal del transductor de desplazamiento vertical sin filtrar | 140 |
| Figura 3.38. | Señal del transductor de desplazamiento vertical filtrada | 140 |
| Figura 3.39. | Cuadro de diálogo para la selección del orden del filtro | 141 |
| Figura 3.40. | Diagrama de bloque de la selección del orden del filtro | 142 |
| Figura 3.41. | Cuadro de diálogo para la modificación de la altura de la protuberancia | 143 |
| Figura 3.42. | Subrutina de la modificación de la altura de la protuberancia | 144 |
| Figura 3.43. | Obtención de la altura de referencia | 145 |
| Figura 3.44. | Control de disparo en la adquisición de datos | 146 |
| Figura 3.45. | Adquisición de la señal de desplazamiento vertical | 148 |
| Figura 3.46. | Visualización del desplazamiento vertical | 150 |
| Figura 3.47. | Conteo de pulsos y relación con el desplazamiento horizontal | 151 |
| Figura 3.48. | Creación de archivo de datos | 152 |
| Figura 3.49. | Creación del archivo de datos a escribir | 153 |
| Figura 3.50. | Caracteres por línea dependiendo del tamaño de la letra de la impresora | 156 |
| Figura 3.51. | Caracteres en la dirección Y de acuerdo al tamaño | 156 |
| Figura 3.52. | Sección de parámetros de operación en el reporte impreso | 157 |
| Figura 3.53. | Definición de las zonas de impresión e impresión de parámetros de operación | 158 |
| Figura 3.54. | Incorrecta colocación de la banda nula | 162 |
| Figura 3.55. | Regresión lineal de los datos para el cálculo de la banda nula | 163 |
| Figura 3.56. | Cálculo de la banda nula | 164 |
| Figura 3.57. | Gráfica de perfil con pendiente cero con banda nula correctamente colocada | 165 |
| Figura 3.58. | Gráfica de pendiente pronunciada con banda nula colocada correctamente | 166 |
| Figura 3.59. | Crestas y valles consideradas en el cálculo del PI | 167 |
| Figura 3.60. | Cálculo del máximo de una cresta para el cálculo del PI | 168 |
| Figura 3.61. | Acumulación de máximos para el cálculo del PI | 170 |
| Figura 3.62. | Diagrama de flujo para el cálculo del PI | 171 |
| Figura 3.63. | Pantalla de instalación del programa del perfilógrafo | 172 |
| Figura 3.64. | Ubicación del programa del perfilógrafo en la barra de programas | 173 |

CAPÍTULO IV

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figura 4.1. | Estructura final del perfilógrafo del II | 175 |
| Figura 4.2. | Conexiones de alimentación y de los transductores de desplazamiento | 176 |
| Figura 4.3. | Colocación del generador en la estructura del perfilógrafo | 176 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Figura 4.4. | Montaje del sensor de desplazamiento horizontal | 177 |
| Figura 4.5. | Montaje del sensor de desplazamiento vertical | 177 |
| Figura 4.6. | Montaje de los módulo de instrumentación dentro del gabinete | 178 |
| Figura 4.7. | Montaje de la fuente de la impresora | 179 |
| Figura 4.8. | Colocación de la computadora y de la impresora en el gabinete | 179 |
| Figura 4.9. | Vista de la parte superior del gabinete | 180 |
| Figura 4.10. | Bloque de calibración de la escala vertical | 183 |
| Figura 4.11. | Trayectorias de prueba en una pista de aeropuerto | 185 |
| Figura 4.12. | Pruebas de campo del perfilógrafo longitudinal en instalaciones de ASA | 186 |
| Figura 4.13. | Pruebas de campo del perfilógrafo longitudinal en Ciudad Universitaria | 186 |
| Figura 4.14. | Archivos de datos de una prueba de campo en CU | 187 |
| Figura 4.15. | Base de datos del 19 de febrero de 2007 | 188 |
| Figura 4.16. | Pantalla de la computadora en una prueba realizada en CU | 189 |
| Figura 4.17. | Reporte impreso correspondiente al panel de la figura 4.16 | 189 |

RESUMEN

En virtud de las deformaciones que presentan las pistas de los aeropuertos, causadas por su operatividad y exposición al ambiente, y a los daños que éstas ocasionan en pavimentos y estructuras de los aviones (y a personas), es necesario realizar estudios de índices de perfil (PI, por sus siglas en inglés) para evaluar el estado de las superficies de las pistas.

La realización de los estudios mencionados se lleva a cabo en pistas nuevas o reparadas y utilizando la técnica del perfilógrafo longitudinal. Los resultados que arroja la aplicación de esta técnica permiten obtener un PI que refleja las variaciones de las irregularidades en las pistas y determinar con ello las condiciones superficiales de las mismas.

Un perfilógrafo longitudinal se compone de dos sistemas principales: el mecánico y el electrónico. El sistema mecánico es muy importante, ya que a partir de éste es que se determina el PI. En particular la medición del desplazamiento vertical es la base para poder proporcionar dicho índice.

En el presente trabajo se describe la instrumentación electrónica de un perfilógrafo longitudinal desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, así como el desarrollo del *software* para la adquisición y manipulación de los datos; cabe comentar que el diseño del sistema

mecánico no se trata en este trabajo, el cual fue llevado a cabo por personas especializadas en el área de ingeniería mecánica.

Dentro de la instrumentación electrónica del perfilógrafo se tiene tres variables a medir, la primera de ellas es el desplazamiento vertical, la segunda es el desplazamiento horizontal y la tercera es la temperatura. Las dos primeras en conjunto permiten conocer el índice de perfil de la superficie y la tercera es utilizada únicamente para conocer las condiciones de temperatura bajo las cuales opera el equipo, y que deben mantenerse dentro de un margen. Cada una de estas variables es medida con un transductor. El registro de la información proveniente de transductores se lleva a cabo en una computadora portátil, a través de una tarjeta de adquisición de datos (TAD). En el sistema se encuentra también un módulo de generación de energía, mediante el cual se alimentan: las fuentes de voltaje que se encargan de entregar el voltaje necesario a cada uno de los transductores, el convertidor AC/DC de la computadora portátil y la fuente de alimentación de una impresora térmica.

Para el desarrollo de la interfaz de usuario, así como para el procesamiento de la información y su almacenamiento se utilizó un *software* de alto nivel de tipo gráfico. En particular se empleó el software de instrumentación virtual LabVIEW 8.1 diseñado por la compañía *Nacional Instruments*. *Labview* incluye librerías para comunicaciones GPIB y control de instrumentos serial, además de adquisición, análisis, presentación, y almacenamiento de datos. *Labview* incluye también herramientas de desarrollo de programación convencionales, que permiten un desarrollo simple de las aplicaciones. *Labview* es un sistema de programación de propósito general, pero también incluye librerías de funciones y herramientas de desarrollo diseñadas específicamente para la adquisición de datos y el control de instrumentos.

PRÓLOGO

En 1979 se incluyó por primera vez en la estructura de ASA un Departamento de Diseño Industrial, que generó de manera formal los primeros diseños y desarrollos de mobiliario y equipo para la industria aeroportuaria que este organismo necesitaba para la correcta administración y operación de los aeropuertos del país.

En aquellos años se desarrollaron diseños para aeropuertos, utilizando casi en su totalidad materiales y procesos con tecnología media disponible en México, con la finalidad de sustituir importaciones. Con el paso de los años y con la entrada de México a la modernidad comercial internacional, se descuidó el proceso de generación de diseños y productos propios, permitiendo nuevamente el alto consumo de equipo importado que no facilitaba un adecuado mantenimiento. Este rezago hizo necesario el retomar la tarea de generar un desarrollo tecnológico en mobiliario y equipo de nivel internacional que pueda competir con aquellos que se producen en otros países.

El Departamento de Diseño Industrial de ASA, planeó diseñar y desarrollar mobiliario y equipo para la industria aeroportuaria, que cumpliera con los estándares y normas emitidas por autoridades y organizaciones nacionales e internacionales en la materia, y coadyuvar así al fortalecimiento de ASA en el desarrollo de la actividad aeroportuaria. Cabe mencionar que ASA recibió apoyo por parte de CONACYT para llevar a cabo el rescate de esta área.

Los productos esperados por ASA en esta nueva etapa se tienen los siguientes:

- Perfilógrafo: Instrumento de medición que se utiliza para medir la rugosidad de los pavimentos de las pistas, calles de rodaje y plataformas de los aeropuertos.
- Mesas de revisión de equipaje para zonas de seguridad.
- Mostrador para documentación de personas discapacitadas.
- Vehículo de extinción de incendios.
- Equipo para el suministro de combustible de aeronaves.

En el caso del perfilógrafo, los requerimientos solicitados por ASA para el diseño del mismo fueron los siguientes: El equipo propuesto deberá ser remolcado por un vehículo terrestre. El equipo de medición deberá tener una precisión que permita detectar irregularidades verticales como máximo de 2.54 cm. (1 pulg.). Además la cinta de papel deberá estar sincronizada con el desplazamiento longitudinal del vehículo. Todo el equipo de graficación deberá estar protegido contra la intemperie. Se deberá considerar que se harán mediciones periódicas en todos los aeropuertos del país, por lo que el equipo deberá trasladarse por carretera sin protección especial adicional por efecto de sus dimensiones. Los equipos de lectura y graficado propuestos deberán tener una garantía mínima de dos años. La longitud de la cinta del papel deberá permitir lecturas hasta de 10 km y la tinta para graficar tendrá una capacidad mínima igual.

Con base en los requerimientos mencionados, el conjunto ASA-CONACYT lanzó una convocatoria para el desarrollo del equipo, en la cual participaron varias instituciones, resultando ganadora la propuesta presentada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. La propuesta presentada por el Instituto de Ingeniería iba más allá de los requerimientos de ASA, ya que se propuso modernizar el equipo solicitado al incluir instrumentación electrónica en el diseño, misma que permitiría lograr registros de mayor precisión, además de poder almacenarlos en formatos digitales, los cuales pudieran ser revisados en cualquier computadora, sin dejar de generar los reportes gráficos en papel para su estudio por parte de personal calificado.

El diseño del perfilógrafo sería total, es decir se diseñaría el sistema mecánico y la instrumentación electrónica que cumpliera con las especificaciones requeridas. Ambos diseños

fueron realizados completamente en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. En este trabajo se presentará el diseño e integración de la parte correspondiente a la instrumentación electrónica necesaria para la adquisición de la información del perfil en las pistas de aeropuertos.

Ing. Israel Nava Bravo

INTRODUCCIÓN

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México es el centro de investigación en diversas áreas de la ingeniería más productivo del país. Es una comunidad de aproximadamente 900 personas, a saber: investigadores, estudiantes de ingeniería que realizan trabajos de tesis de licenciatura, maestría y doctorado, técnicos académicos, personal secretarial y de servicios. Sus instalaciones ocupan 12 edificios en la zona de Ciudad Universitaria, en Coyoacán, con una extensión de 63,000 metros cuadrados entre laboratorios, cubículos, áreas comunes y un auditorio.

Desde su fundación, la política del Instituto ha sido realizar investigación orientada a problemas generales de la ingeniería, así como colaborar con entidades públicas y privadas para mejorar la práctica de la ingeniería en el ámbito nacional, al aplicar los resultados de las investigaciones a problemas específicos.

Como consecuencia, algunos proyectos son financiados con recursos que la UNAM otorga, y otros, mediante contratos de investigación con empresas privadas o corporaciones solicitantes.

Las actividades que se llevan a cabo en el Instituto son: investigación técnica y aplicada, apoyo al desarrollo tecnológico y análisis de los requerimientos sociales a cuya solución puede aportar la ingeniería. Asimismo, se proporcionan servicios de ingeniería a los diversos sectores de la sociedad con el propósito de contribuir al avance de los objetivos propios de la universidad.

Ante esta situación, la compañía ASA con el apoyo del CONACYT lanzó una convocatoria para el desarrollo de un sistema de medición del índice de perfil en pistas, calles de rodaje y plataformas de los aeropuertos. El Instituto de Ingeniería a través de la Coordinación de Instrumentación generó una serie de propuestas encaminadas a satisfacer las necesidades del equipo solicitado por dicha empresa. Dicha propuesta obtuvo el aval por parte de ASA-CONACYT para generar el sistema de medición conocido en el ámbito aeroportuario como “perfilógrafo longitudinal”.

Este trabajo escrito corresponde a la descripción de la instrumentación electrónica de dicho prototipo y está estructurado de la siguiente manera: en el capítulo I se hace referencia a las generalidades relacionadas con la medición de perfiles, como son los métodos utilizados para la determinación del índice de perfil. Se enfatiza la descripción en el método empleado en el desarrollo de este trabajo de tesis.

En el capítulo II se hace una descripción detallada de las especificaciones de los elementos que componen el *hardware* del sistema, así como la descripción general del mismo, los diferentes módulos que lo integran, y las consideraciones tomadas en cuenta en el diseño y selección.

En el capítulo III se describe el *software* del sistema, primeramente se hace una descripción general del entorno utilizado para el diseño, para después describir los algoritmos con los que se trabajó. Se presentan los diagramas de flujo, así como la implementación de los mismos en LabVIEW.

En el capítulo IV se presenta la integración y las pruebas a las que se sometió el prototipo para verificar el correcto funcionamiento del mismo, se adicionó también un apartado de

calibración, donde se describe los ajustes y procedimientos necesarios para realizar la calibración del sistema y de esta forma obtener resultados óptimos en las mediciones.

Finalmente en el capítulo V se presentan los resultados y las conclusiones alcanzados con el desarrollo de este trabajo, se agregan también algunas recomendaciones para futuros desarrollos o mejoras del sistema aquí presentado.

En la sección de bibliografía se listan los diferentes libros consultados durante el desarrollo de este trabajo y se proporcionan referencias sobre artículos en publicaciones periódicas a los que también se recurrió.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

El presente capítulo tiene por finalidad conocer algunos conceptos básicos relacionados con la determinación de perfiles en pavimentos. Así mismo, se describen los métodos más comunes para llevar a cabo las mediciones de perfiles; uno de los métodos descritos es en el que se basa el desarrollo del equipo de medición de perfiles de pavimentos aquí presentado.

I.1. Generalidades

El índice de perfil es un indicador importante del confort y seguridad del pavimento. Este indicador debe ser considerado cuidadosamente cuando se evalúan los pavimentos. Al mismo tiempo, el uso de mediciones de rugosidad desempeña un papel crítico en el sistema de administración de pavimentos, ya que este dato puede ser empleado para establecer condiciones aceptables del pavimento, o bien establecer aquellas secciones que requieren de mantenimiento y rehabilitación, o en condición crítica, la sustitución. Más importante aún es este indicador en la evaluación de la calidad de pistas de aeropuertos, donde dicho índice debe mantenerse dentro de ciertos límites para asegurar tanto el confort como la seguridad.

La necesidad de medición de perfiles en carreteras y pistas aeroportuarias a propiciado que existan en el mercado una gran cantidad de equipos que pueden llevar a cabo esta determinación, los cuales van desde equipos simples hasta equipos muy complejos.

I.2. Conceptos básicos

A continuación se hará una descripción breve de los términos que comúnmente se utilizan en el ámbito de la medición de perfiles. Esta sinopsis proporciona información sobre los equipamientos, características, capacidades y costos. No se trata de ninguna manera de un tratado profundo sobre los aspectos técnicos de la medición involucrados en cada uno de los sistemas.

I.2.1. Definición de rugosidad

Desde el punto de vista del conductor de un vehículo, la rugosidad del pavimento es un fenómeno experimentado por el pasajero y el operador del vehículo. De acuerdo a la definición número E867 de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASMT, por sus siglas en inglés), “la rugosidad es la desviación de la superficie del pavimento de una superficie plana real con dimensiones características que afecten la dinámica del vehículo, calidad del viaje, dinámica de la carga, y el drene, que pueden ser causadas por el perfil longitudinal, o el perfil transversal”. Esta definición cubre los factores que contribuyen a la rugosidad de un camino o pavimento y es también muy amplia. Sin embargo, no proporciona una definición cuantitativa o una escala estándar para la rugosidad, de tal forma que requiere de una medición y de un método de análisis para cuantificar las distorsiones de la superficie del pavimento.

Una vez que el método de medición y análisis es seleccionado, agencias individuales pueden establecer escalas de interpretación para determinar la severidad del nivel de rugosidad. Cabe comentar que, la rugosidad del pavimento consiste de ondas aleatorias de frecuencias múltiples de varias longitudes de onda y amplitudes. La rugosidad longitudinal se define como: “las desviaciones longitudinales de una superficie de un pavimento de una superficie plana real con dimensiones características que puedan afectar la dinámica del vehículo, la calidad del viaje,

y la dinámica de la carga del pavimento”. Los perfiles de pavimentos son frecuentemente usados para caracterizar la rugosidad.

Existen varias causas para la rugosidad de pavimentos en carreteras y en pistas de aeropuertos; la carga del tráfico, efectos ambientales, materiales de construcción, e irregularidades en la construcción. Todos los pavimentos tienen irregularidades en la superficie que se realizan durante la construcción, de tal forma que incluso pavimentos que no han sido abiertos al tráfico pueden exhibir cierta rugosidad. La rugosidad de un pavimento se incrementa normalmente con la exposición a la carga del tráfico y al ambiente. La rugosidad con una longitud de onda corta es normalmente causada por el sufrimiento del pavimento, esto es, depresión y ruptura, al mismo tiempo la rugosidad con longitud de onda mayor es normalmente causada por procesos ambientales en combinación con las propiedades de las capas del pavimento.

I.2.2. Definición de perfil

La evaluación de la superficie completa de un pavimento es requerida para definir por completo su rugosidad. Sin embargo, para muchos propósitos, la rugosidad puede ser dividida en tres componentes de distorsión del perfil: transversal, longitudinal y horizontal. De particular interés son las variaciones en el perfil que impartan aceleración al vehículo o a sus ocupantes y tengan influencia sobre el confort y la seguridad, y que son proporcionadas principalmente por las distorsiones de perfil longitudinal. De aquí que se enfoque este trabajo en los dispositivos que miden variaciones de perfil longitudinales.

Las distorsiones en la superficie del pavimento pueden generar aceleración vertical y lateral en el vehículo. La aceleración vertical es el factor que mayormente contribuye en el confort de los ocupantes y se deriva de la distorsión longitudinal del perfil del pavimento. Las aceleraciones laterales son el resultado del rodamiento propio del vehículo.

En el caso de las carreteras es posible tomar diferentes perfiles a lo largo de diferentes líneas. Sin embargo, debido a que aproximadamente el 70% de los automóviles viajan sobre una

trayectoria de rodamiento bastante definida, con la rueda derecha localizada de 0.76 a 0.91 metros (2.5 a 3.5 pies) del borde del pavimento, y debido a que las ruedas de automóviles y camiones se encuentran separadas entre 1.83 a 2.13 metros (6 y 7 pies), respectivamente, la línea de medición para el perfil longitudinal sobre la trayectoria de la rueda proporciona la mejor muestra de la rugosidad de la superficie del pavimento. Más aún, la comparación entre las trayectorias de la rueda izquierda con la rueda derecha puede proporcionar algunas mediciones de las variaciones transversales que afectan el rodamiento.

En el caso de las pistas de aeropuertos sucede una situación similar, ya que las trayectorias de las ruedas de los trenes de aterrizaje de los aviones son trayectorias que se encuentran también muy bien definidas, generalmente de 3 a 3.5 metros (10 a 12 pies) de la línea central que divide al eje del tren de aterrizaje perpendicularmente, de tal forma que dichas trayectorias proporcionan la mejor muestra de rugosidad de la pista. En la figura 1.1 se muestra esta situación, la línea del centro representa el eje del avión, y a los lados las líneas de rodamiento de los trenes de aterrizaje. Estas dimensiones son las que propone la compañía Boeing en su documento técnico D6-81746 “*Runway roughness measurement quantification, and application – The boeing method*”.

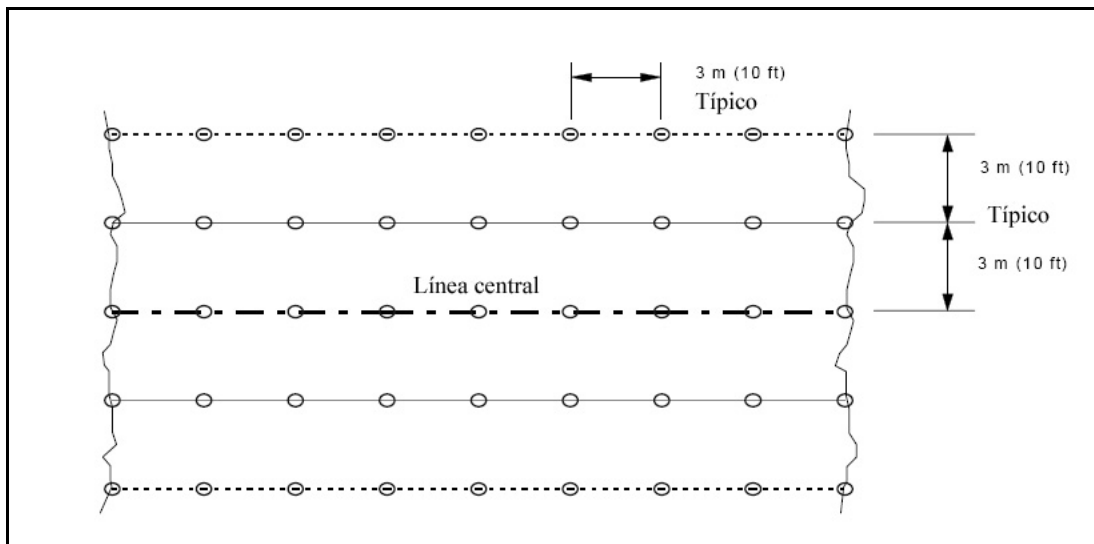


Figura 1.1. Trayectoria de rodamiento típica de los trenes de aterrizaje.

Por lo expuesto anteriormente, se puede concluir que la evaluación de la rugosidad de un pavimento requiere de la medición del perfil longitudinal del pavimento en la trayectoria de la rueda del vehículo para el caso de carreteras, y de la medición del perfil longitudinal en la trayectoria del tren de aterrizaje para el caso de los aviones. El perfil del camino, pavimento o superficie, puede ser medido a lo largo de cualquier línea imaginaria continua sobre la superficie terrestre y en orden para obtener mediciones repetibles.

Para la interpretación de ingeniería civil, por parte del personal encargado de la reparación de las secciones que así lo requieran, las mediciones son usualmente manejadas con modelos matemáticos que generan un resumen estadístico, que van desde un espectro de potencia hasta algún tipo de índice de rugosidad. En la actualidad se manejan tres índices para indicar mediante un valor numérico el estado del pavimento, en las siguientes secciones mencionaremos cada uno de estos índices.

I.2.3. Índice de perfil (PI)

El Índice de Perfil (PI, por sus siglas en inglés) es un número resumen calculado con los datos que se obtuvieron del perfil del camino. La mayoría de los sistemas para realizar medición de perfiles incluyen resúmenes estadísticos de rugosidad como son: Índice Internacional de Rugosidad (IRI, por sus siglas en inglés) y el Número de Recorrido (RN, por sus siglas en inglés), o bien el PI. El PI se deriva de la salida del perfilógrafo, se expresa en unidades de pulgadas por milla o bien milímetros por kilómetro y representa la variación total acumulada en un registro, más allá de una banda de tolerancia previamente definida. En Estados Unidos la mayoría de los Estados ha adoptado al PI como el índice estándar para la medición del perfil en las especificaciones de construcción. Un bajo índice de perfil representa una superficie más lisa. Por lo anterior, el sistema a desarrollar en este trabajo expresará el perfil de pavimento empleado el PI.

I.2.4. El índice internacional de rugosidad (IRI)

Para establecer criterios de calidad y comportamiento de los pavimentos que indicarán las condiciones actuales y futuras del estado superficial de un camino, surgió la necesidad de establecer un índice que permitiera evaluar las deformaciones verticales de un camino, que afectan la dinámica de los vehículos que transitan sobre él. Se trató de unificar los criterios de evaluación con los equipos de medición de rugosidad a nivel mundial, tales como los perfilómetros o los equipos del tipo respuesta, que permite calificar la condición superficial de un camino no sólo en forma subjetiva. El Índice Internacional de Rugosidad, fue propuesto por el Banco Mundial en 1986, como un estándar estadístico de la rugosidad y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino.

El IRI tiene sus orígenes en un programa Norteamericano llamado *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP, por sus siglas en inglés) y está basado en un modelo llamado "Golden Car", descrito en el reporte 228 del NCHRP. El cálculo matemático del IRI está basado en la acumulación de desplazamientos en valor absoluto, de la masa superior con respecto a la masa inferior (en milímetros, metros o pulgadas) de un modelo de vehículo cuarto de carro, como el mostrado en la figura 1.2, dividido entre la distancia recorrida sobre un camino (en m, km o millas) que se produce por los movimientos al vehículo, cuando éste viaja a una velocidad de 80 km/hr. El IRI se expresa en unidades de mm/m, m/km, in/mi, etc.

Así, el IRI es la medición de la respuesta de un vehículo a las condiciones de un camino. El IRI sirve como estándar para calibrar los equipos de medición de la regularidad superficial de un camino. El modelo de Cuarto de Carro utilizado en el algoritmo del IRI debe su nombre a que implica la cuarta parte de un vehículo. El modelo se muestra en la Figura 1.2; que incluye una rueda representada por un resorte vertical, la masa del eje soportada por la llanta, un resorte de la suspensión, un amortiguador, y la masa del vehículo soportada por la suspensión de dicha rueda.

El modelo Cuarto de Carro fue ajustado para poder establecer una correlación con los sistemas de medición de rugosidad del tipo respuesta. El programa que propone el Banco Mundial para el cálculo del IRI a partir del levantamiento topográfico de un tramo carretero, se

describe en la publicación técnica número 884 de la ASMT: Sayers, M.W., “*Development, Implementation, and Application of The Referente Quarter-Car Simulation*”.

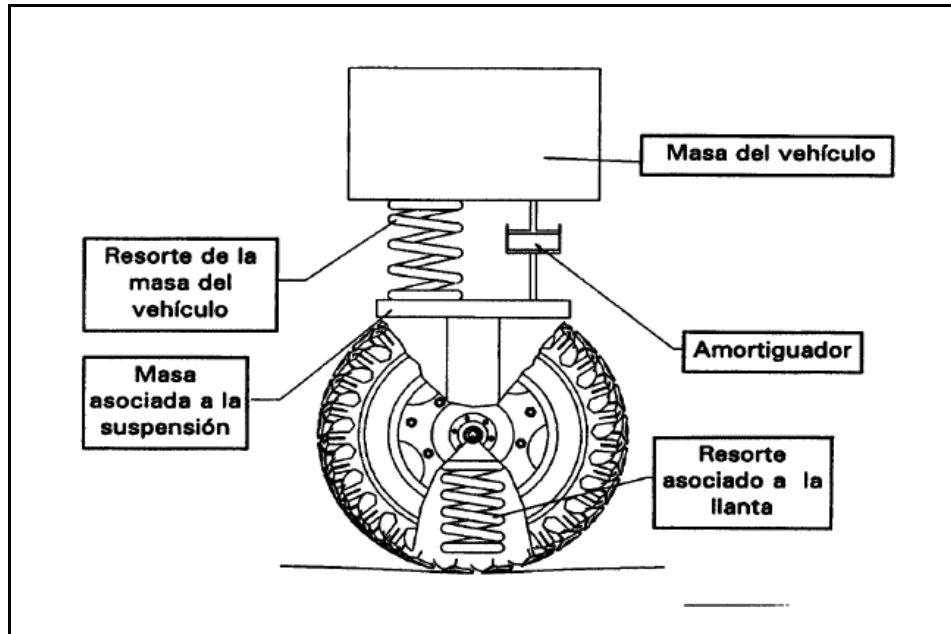


Figura 1.2. Representación gráfica del modelo “cuarto de carro”.

De acuerdo al valor obtenido del IRI, se puede clasificar a los pavimentos; y si se realiza un programa de evaluación anual es posible conocer el deterioro sufrido por éste a través del tiempo. La figura 1.3 muestra una tabla donde se clasifica a los pavimentos de acuerdo al IRI. Como puede observarse en dicha tabla, las pistas de aeropuertos son las que requieren un valor de IRI mucho menor, a medida que este valor crece, la superficie pierde calidad. Con el PI sucede una situación similar, a menor PI se tiene una superficie de mayor calidad.

El IRI es usualmente empleado para evaluar pavimentos de carreteras, donde se requiere evaluar grandes distancias en periodos de tiempo muy cortos, mientras que el PI se utiliza en trabajos donde se requiere de una precisión mucho mayor, como es el caso de las pistas de aeropuertos. Esto debido a que únicamente para evaluación de pistas de aeropuertos se aceptan equipos que entregan el índice de perfil como dato de rugosidad, como se menciona en el apartado 10.3.6.3. “Ensayos de perfiles” del documento técnico IPRF-01-G-002-1 “Mejores

prácticas para la construcción de pavimentos de concreto de cemento Pórtland (Pavimento rígido para aeropuertos)” publicado por la Fundación de Investigaciones de Pavimentos Innovadores (IRPF, por sus siglas en inglés) en su Programa de Tecnología de Pavimentos de Concreto para Aeropuertos.

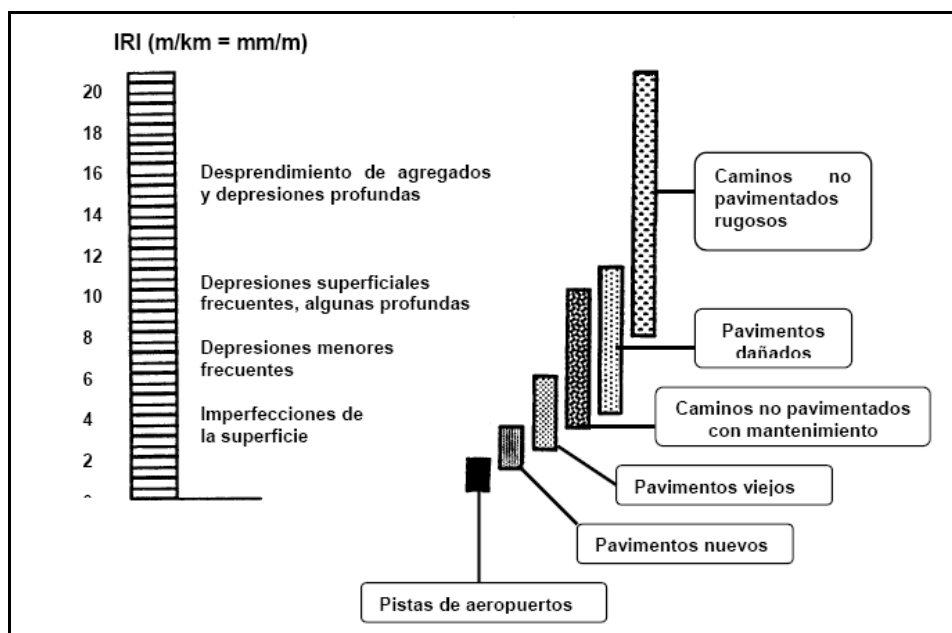


Figura 1.3. Escala de los valores del IRI para diferentes pavimentos.

El empleo del PI para el caso de pistas de aeropuertos se justifica con las desventajas que presenta el IRI, entre las que podemos mencionar:

1. El IRI no es sensible a longitudes de onda más cortas debido al alto *damping* usado en el modelo de cuarto de carro y por lo tanto no correlaciona bien con otros vehículos (por ejemplo camiones comerciales o aviones).
2. No hay uniformidad en el reporte de los valores del IRI para las trayectorias especificadas de las ruedas, ya que la rugosidad varía entre las trayectorias de las ruedas, y el mismo modelo es empleado para las cuatro ruedas.

I.2.5. Número de recorrido

El número de recorrido (RN, por sus siglas en inglés) indica la capacidad para realizar un recorrido sobre una superficie en una escala de 0 a 5. Es calculado por una transformación lineal estadística del PI. Un camino perfectamente liso tiene generalmente un valor de 5, mientras que uno con 0 indica la máxima aspereza posible. El RN fue desarrollado por Sayers y Karamihas, y también utiliza el modelo de cuarto de carro. Sin embargo, no fue utilizado por ninguna agencia para el control de carreteras en los Estados Unidos, y por lo mismo tiende a desaparecer como parámetro del perfil de pavimentos en los instrumentos de medición.

I.3. Sistemas de medición de perfil de pavimentos

El perfil del pavimento debe ser tomado en pruebas de campo y puede ser evaluado o resumido por una computadora, o puede ser procesado a través de la respuesta de algún dispositivo mecánico y determinarse manualmente el PI. La técnica más confiable para medir el perfil de un pavimento es con una varilla de precisión y un estudio de nivel. Sin embargo, este método consume demasiado tiempo, es costoso y se encuentra limitado a la evaluación de pavimentos de corta longitud. Los equipos que se utilizan para la determinación de perfil en pavimentos son clasificados de acuerdo a dos parámetros: el intervalo de almacenamiento de datos y la resolución de la medición vertical, el Banco Mundial en su documento técnico No 46 “*Guidelines for And Calibrating Road Roughness Measurements*” y la norma ASTM E-950-98, presentan la clasificación de la siguiente manera:

| Clasificación Del equipo | Clasificación del Banco Mundial | Clasificación según ASTM E-950-98 | |
|-----------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|
| | Requerimientos | Requerimientos | |
| | | Intervalos de almacenamiento | Resolución vertical |
| Clase 1 | Perfilómetros de precisión. Requiere que el perfil longitudinal de un camino sea medido como una serie de puntos de elevación equidistantes a través de la superficie. Esta distancia no deberá superar los 0.25 m y la precisión en la medición de la elevación deberá ser de 0.5 mm | Menor o igual a 25 mm | Menor o igual a 0.1 mm |
| Clase 2 | Otros métodos perfilométricos. Requieren una frecuencia de puntos de perfil, que no sea superior a 0.5 m y una precisión en la medición de la elevación comprendida entre 1.0 mm y 6.0 mm. | Mayor que 25 mm y hasta 150 mm | Mayor que 0.1 mm y hasta 0.2 mm |
| Clase 3 | La obtención del perfil se hace mediante equipos tipo respuesta (RTRRM, por sus siglas en inglés), los cuales han sido calibrados previamente con perfilómetros de precisión mediante ecuaciones de correlación. | Mayor que 150 mm y hasta 300 mm | Mayor que 0.2 y hasta 0.5 mm |
| Clase 4 | Estimaciones subjetivas y mediciones no calibradas. Incluyen mediciones realizadas con equipos no calibrados, estimaciones subjetivas con base en la calidad del viaje o inspecciones visuales de los pavimentos. | Mayor que 300 mm | Mayor que 0.5 mm |

Tabla 1.1 Clasificación de los equipos de medición de perfiles.

Existen diferentes equipos para determinar el perfil de pavimentos, los cuales han ido evolucionando a lo largo del tiempo, variando unos de otros en la precisión y en la rapidez para la obtención de resultados. A continuación se describirá de manera breve alguno de los equipos más comunes en la obtención de perfiles de pavimentos, finalizando con el tipo de sistema que se empleará en el desarrollo de este trabajo.

I.3.1. Varilla y nivel

La varilla y el nivel (mostrados en la figura 1.4) se encuentran entre los métodos llamados estáticos, debido a que los instrumentos no se encuentran en movimiento mientras las medidas de elevación son tomadas. Es un equipo de topografía convencional, que consiste de una varilla de precisión, un nivel para establecer el dato horizontal y una cinta para marcar la distancia longitudinal para la medición de la elevación.



Figura 1.4. Equipo de varilla y nivel para la determinación del perfil.

Este método es conocido como perfilógrafo manual, es considerado de bajo rendimiento, debido a que el proceso de recolección de datos es relativamente lento, en comparación con otros equipos. Se considera que para la evaluación del perfil de rodamiento de proyectos de gran magnitud es impráctico y de alto costo. Sin embargo, este tipo de equipo tiene una gran precisión y puede obtener una medida exacta del perfil del pavimento.

I.3.2. Dipstick

El Dipstick es un dispositivo desarrollado y patentado por una compañía norteamericana. Se trata de un dispositivo sencillo para la medición de perfiles de pavimento. Éste consiste de un inclinómetro montado sobre una estructura; es manejado por una microcomputadora que se encuentra montada sobre el equipo. En la figura 1.5 puede observarse una imagen de una prueba realizada con este dispositivo.



Figura 1.5. Obtención del perfil de pavimento empleando el Dipstick.

El Dipstick es desplazado a lo largo de la línea sobre la cual se obtendrá el perfil, la distancia entre los dos soportes es de 350 mm. Para obtener el perfil a lo largo de la superficie, el operador conduce el dispositivo de tal forma que todo su peso se coloque sobre el pie principal, mientras levanta el pie trasero ligeramente de la superficie. Luego se debe girar el dispositivo 180° sobre el pie principal, localizando el pie (que anteriormente se encontraba detrás) delante, a lo largo de la línea sobre la que se obtiene el perfil. La figura 1.6 muestra la operación del equipo. La computadora supervisa el sensor de manera continua. Cuando verifica que el instrumento se encuentra estable, automáticamente almacena el cambio en la elevación e indica mediante un zumbido que la siguiente medición puede ser llevada a cabo.

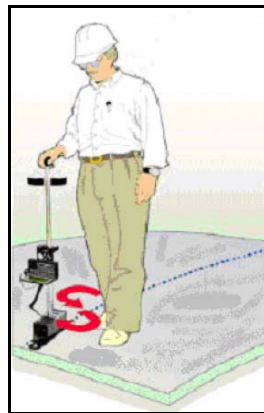


Figura 1.6. Operación del equipo Dipstick.

La elevación de referencia es el valor calculado del punto anterior. La altura relativa a la referencia se deduce por el ángulo del dispositivo relativo a la gravedad, junto con el espacio entre los soportes. La distancia longitudinal es determinada por la multiplicación del número de mediciones hechas con espacio conocido. El análisis de la información para el cálculo del IRI es llevado a cabo por la microcomputadora que puede generar una impresión de la superficie bajo prueba. El Dipstick no tiene la capacidad de calcular el PI. La figura 1.7 muestra los componentes básicos de este equipo.

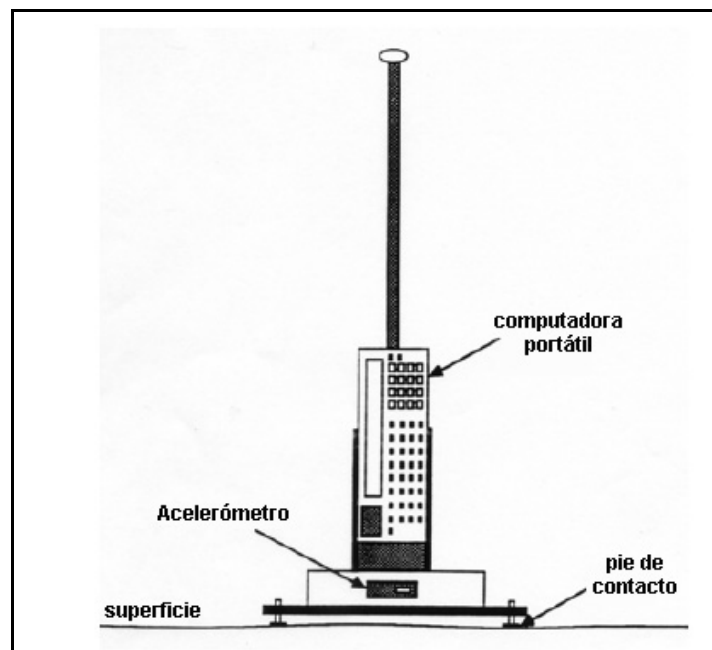


Figura 1.7. Componentes básicos del Dipstick.

I.3.3. Perfilómetro Ley K.J.

El perfilógrafo Ley K.J. es una versión refinada del perfilógrafo inercial. El perfilógrafo inercial original fue desarrollado en los años 60, usando el concepto de referencia inercial, en la figura 1.8 se observa un diagrama con los componentes del perfilógrafo inercial. El modelo original consistía de dos resortes de carga, con dos ruedas montadas como brazos bajo el vehículo. Esos brazos eran mantenidos en contacto con la superficie por un resorte de 300 libras de fuerza. Un potenciómetro lineal mide el desplazamiento entre la superficie del camino y la referencia inercial calculada.

El movimiento del vehículo es medido por la integración de las señales de dos acelerómetros que se encuentran montados por encima de cada una de las ruedas traseras. Estos acelerómetros verifican los movimientos verticales del cuerpo del vehículo relativo a la referencia inercial. La forma del movimiento es sumado al desplazamiento relativo. Resultan de este procedimiento dos perfiles, uno para la rueda con la trayectoria izquierda y otro para la rueda con la trayectoria derecha.

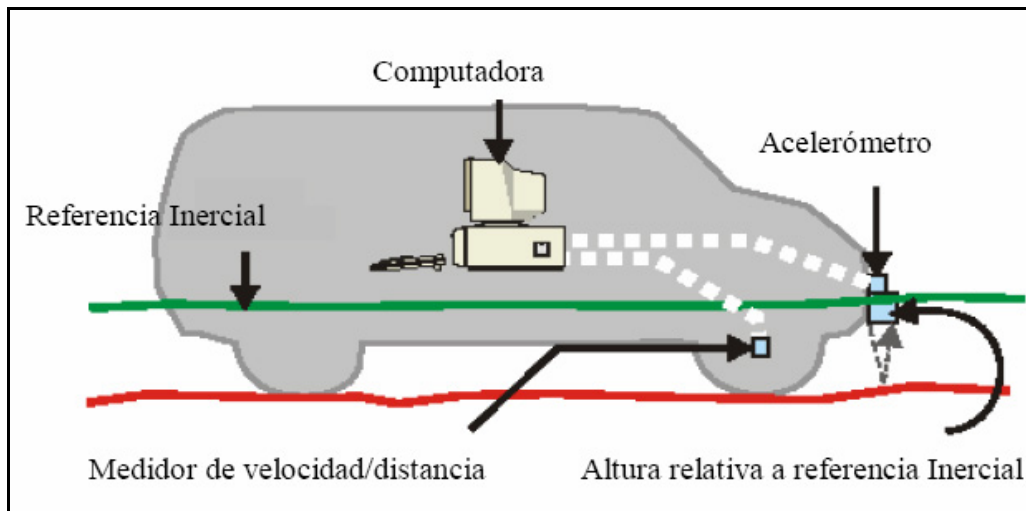


Figura 1.8. Componentes de un equipo con referencia inercial.

Mejoras al perfilógrafo original diseñado por ingenieros de la compañía K.J. Law Engineering Inc. incluyen la conversión a un sistema de instrumentación digital, un sensor sin contacto, y un método de procesamiento digital para el cómputo del perfil medido. El método de procesamiento produce una medición de perfil que es independiente de la velocidad de medición y de los cambios en la velocidad durante la medición.

Los perfiles son medidos en tiempo real mediante un sistema de medición de desplazamiento óptico y por acelerómetros colocados en cada una de las ruedas. Los acelerómetros miden el movimiento del cuerpo del vehículo mientras que el sistema de medición óptico mide los desplazamientos del sistema entre el vehículo y la superficie del pavimento. Esas dos señales son llevadas al sistema y enviadas a una microcomputadora, la cual computa el perfil del pavimento.

I.3.4 Perfilómetro APL

El analizador de perfil longitudinal (APL, por sus siglas en inglés) fue desarrollado por el Laboratorio Francés de Investigación de Caminos. Éste consiste de un remolque que contiene una combinación de instrumentación y propiedades mecánicas que permiten la medición del perfil longitudinal. El perfil de referencia es proporcionado por un péndulo inercial en lugar de un acelerómetro. Este péndulo es centrado magnéticamente por una bobina magnética. Un transductor de desplazamiento de bajo voltaje está localizado en el brazo de la rueda del camino. En la figura 1.9 se muestra una fotografía de este tipo de perfilógrafo.



Figura 1.9. Perfilógrafo tipo APL.

A medida que la rueda del remolque se mueve arriba y abajo, en respuesta a la rugosidad del camino, el ángulo entre el péndulo y el movimiento de la rueda es medido y convertido a una medición de distancia vertical, la cual es almacenada a intervalos de distancia específica. Debido a la naturaleza mecánica del dispositivo, las mediciones deben ser llevadas a cabo a velocidad constante; la respuesta es bastante sensible a la velocidad. Las mediciones de la distorsión del perfil que son significativas para los requerimientos requieren de la operación del perfilógrafo APL a aproximadamente 13 millas por hora. En la figura 1.10 se aprecia un esquema de los elementos que constituyen el perfilógrafo APL.

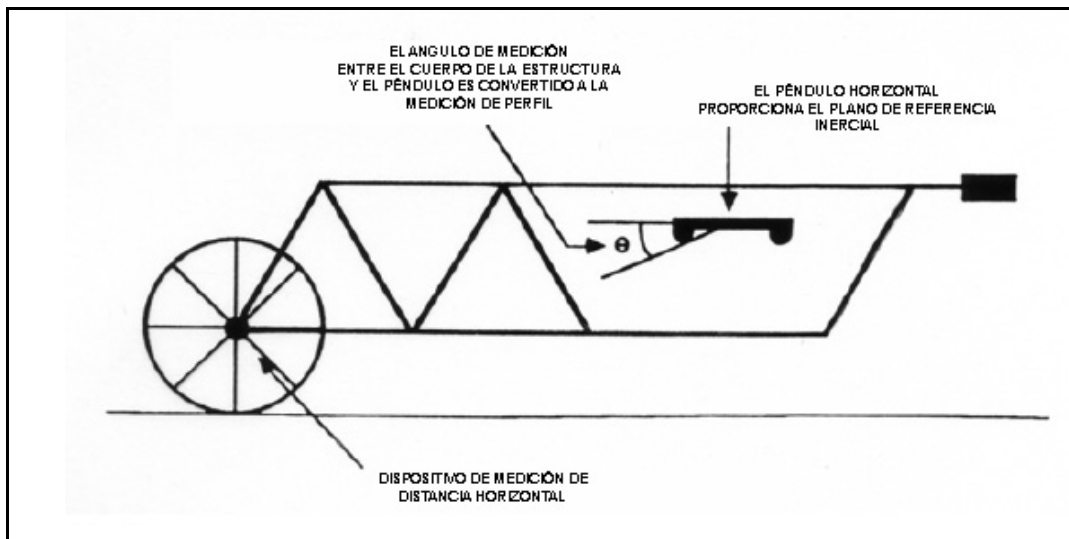


Figura 1.10. Esquema del perfilógrafo APL.

I.3.5. Perfilómetro Dakota del Sur

El perfilógrafo Dakota del Sur fue desarrollado por el Departamento de Transporte de Dakota del Sur en 1981. Se encuentra típicamente montado en un vehículo de tamaño pequeño a tamaño mediano y mide el perfil del pavimento y la profundidad de la ruta. En la parte frontal del vehículo se encuentra montado un acelerómetro y un sensor ultrasónico para la medición del perfil en la trayectoria de la rueda, y tres sensores ultrasónicos para la medición de la profundidad. Las mediciones de elevación del perfil son reportadas a intervalos de 1 pie y la profundidad de la ruta es medida y reportada en intervalos de 2 pies. La velocidad de prueba puede alcanzar hasta las 65 millas por hora.

Los datos del perfil son procesados de manera instantánea, mediante *software* utilizando correlaciones entre los valores de perfil medidos y valores de tablas de estudios llevados a cabo en Dakota de Sur. El sistema también tiene la capacidad de generar los datos del IRI a partir de los perfiles medidos.

I.3.6. Rugosímetro BPR

Existen dos diseños básicos de sistemas de medición de rugosidad del tipo respuesta: los que miden el desplazamiento entre el cuerpo del vehículo y un eje, y aquellos que usan un acelerómetro para medir la respuesta del eje o cuerpo del vehículo. En realidad, estos dos dispositivos miden la respuesta del vehículo a la rugosidad del camino, de aquí el nombre que reciben. Debido a su bajo costo, diseño sencillo, y alta velocidad de operación, estos sistemas son ampliamente utilizados por agencias de carreteras para coleccionar datos de rugosidad para el sistema de administración de pavimentos.

El rugosímetro BPR (Oficina de Caminos Públicos, por sus siglas en inglés), mostrado en la figura 1.11 fue introducido por vez primera en 1925, y fue reconocido como el dispositivo más rápido para la determinación de la rugosidad disponible en su momento. Consiste de un remolque de una sola rueda que se remolca por un automóvil o por un camión ligero a una velocidad de 20 millas por hora. La rueda se encuentra montada en resortes soportados por la estructura del remolque. Los contornos de la superficie del pavimento causan que la rueda sensora oscile verticalmente con respecto a la estructura. El movimiento vertical es acumulado usando un integrador numérico, proporcionando estadísticas de la rugosidad en pulgadas por milla.



Figura 1.11. Rugosímetro BPR.

Después de algún periodo de uso, este sistema se vuelve muy susceptible a los cambios en la temperatura, a la condición de la superficie donde opera y a otros factores mecánicos. En adición, tiene un problema de frecuencia de resonancia que, si es excitado, produce resultados erróneos. Las vibraciones eran notadas a niveles de rugosidad elevados. Como resultado, su uso gradualmente ha ido disminuyendo.

I.3.7. Perfilógrafo de bajo peso

El perfilógrafo de bajo peso sin contacto, mostrado en la figura 1.12, ha surgido para propósitos de control de la calidad del pavimento y evaluación del pavimento. Proporciona el beneficio de poder ser usado inmediatamente después de la construcción del asfalto de mezcla caliente y mucho más rápido de lo que sería posible con la red de dispositivos de nivel tipo varilla en pavimentos nuevos. Sin embargo, tiene una velocidad de operación que va de 8 a 25 millas por hora, lo cual lo hace impráctico para altas velocidades, y para generar una gran cantidad de datos de un camino. En la figura 1.13 se muestra un detalle de la instrumentación de este tipo de perfilógrafos.



Figura 1.12. Perfilógrafo de bajo peso.

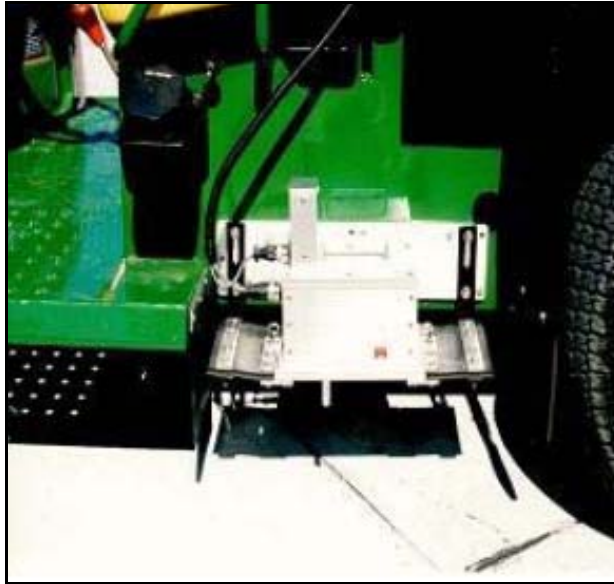


Figura 1.13. Detalle de la instrumentación del perfilógrafo de bajo peso.

El sistema básico consiste de un acelerómetro, un dispositivo de medición de distancia óptico conocido como *encoder*, una computadora portátil, con impresora gráfica. Las señales del acelerómetro y del sensor de medición de distancia son enviadas a la computadora, la cual calcula y almacena la información, se pueden guardar hasta 13,000 millas de datos. Los puntos de datos del perfil del pavimento, tomados cada pulgada, son promediados sobre un intervalo continuo de 12 pulgadas y son almacenados como puntos del perfil cada 6 pulgadas, o cada pulgada si es requerido. El resultado se observa en la pantalla de la computadora o en un reporte impreso. Las mediciones longitudinales son independientes de las variaciones en el peso del vehículo, velocidad, variaciones en la temperatura, viento y color y textura del pavimento. Puede calcular también diferentes índices de rugosidad usando la misma información. El sistema también genera una gráfica del perfil, con localización de los defectos, indicando al operador los lugares donde existe la falla y que acción correctiva debe ser tomada.

I.3.8. Perfilógrafo láser

El perfilógrafo láser utiliza un rayo láser y un acelerómetro de precisión para obtener una medición precisa del perfil a una velocidad de 65 millas por hora. Emplea la medición para el cálculo del PI, IRI y el RN, los cuales como ya se ha mencionado, son empleados para tasar la rugosidad de la superficie. El sistema también genera una gráfica del perfil, con la localización de los defectos mediante líneas que le informan al usuario donde existe la falla y las acciones correctivas a ser tomadas. Existen varias compañías que producen perfilógrafos láser, en la figura 1.14 y 1.15 se muestran dos modelos de diferentes compañías.



Figura 1.14. Perfilógrafo láser.



Figura 1.15. Perfilógrafo láser.

El perfilógrafo láser consiste de una computadora de tipo industrial con una impresora, un acelerómetro de precisión, un sensor de altura láser, un subsistema de adquisición de datos y un instrumento de medición de distancia. El acelerómetro montado en el eje no es sensible a los parámetros del vehículo, como lo son los dispositivos del tipo desplazamiento. El movimiento del eje en respuesta a la rugosidad depende de la cantidad de distorsión del neumático de la fuerza ascendente, generada con los golpes del neumático, y la fuerza vertical descendente de la suspensión del vehículo. Si la fuerza de suspensión del vehículo es mayor que la fuerza ascendente generada por el choque, entonces el neumático mantiene el contacto con el pavimento para que el eje proporcione un rastreo razonable de la superficie del vehículo.

La salida del acelerómetro puede ser doblemente integrada para obtener un estimado del movimiento vertical de eje. Sin embargo, este proceso de integración puede incrementar el efecto de ruido no deseado en la señal. Los datos colectados no son afectados por variaciones del vehículo, tales como: la velocidad, el peso y la suspensión, o por los cambios de color del pavimento o textura, viento y velocidad.

Este tipo de perfilómetro ofrece varias ventajas sobre los métodos convencionales de medición. No requiere de calibración ni de mantenimiento y puede operar a velocidades de hasta 65 millas por hora. Esto permite obtener mediciones rápidas en tiempo real. Esto elimina también la necesidad de cerrar caminos cuando se están realizando las pruebas. La información es procesada y enviada en unidades estándar a la pantalla gráfica de la computadora o bien al reporte impreso.

El software del perfilómetro láser incluye filtros digitales pasa banda con longitudes de onda de 1 a 300 pies, filtros digitales pasa altas para longitudes de onda de 2 pies o menos, y modelos estadísticos para la generación de los datos de IRI y del RN. En la figura 1.16 se observa un detalle de la instrumentación de este tipo de perfilógrafos.



Figura 1.16. Detalle de la colocación del sensor láser en el perfilógrafo.

I.3.9. Perfilógrafo California y Rainhart

Estos perfilógrafos son relativamente baratos, simples de operar y con mantenimiento mínimo, y proporcionan un trazo de la superficie que los operadores pueden interpretar fácilmente. Ambos son operados manualmente por una persona a velocidad de una caminata normal; sin embargo, debido a sus uniones de ruedas, no pueden ser empleados para adquisición de datos a alta velocidad, en contraparte, después del método de varilla y nivel, es el más preciso. Las ruedas de soporte del perfilógrafo tipo California tienen un número variado, y van desde 4 hasta 12, la mayoría utilizan 12 ruedas. Estas ruedas se encuentran unidas a los extremos del perfilógrafo a 25 pies (7.6 metros) y se encuentran montadas en ejes múltiples que incluyen cuatro ruedas separadas 17 pulgadas (432 mm), las ruedas de soporte se encuentran comúnmente

espaciadas a intervalos de 2.7 pies (0.82 m), resultando en un largo de perfilógrafo total de aproximadamente 33 pies (10 metros). En la figura 1.17 se muestra un esquema de este tipo de perfilógrafo, y en la figura 1.18 una fotografía de un equipo comercial.

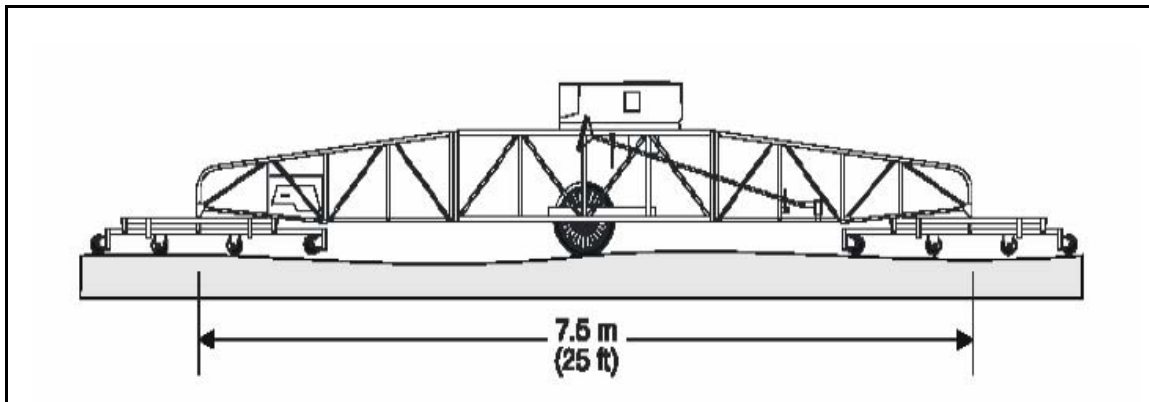


Figura 1.17. Vista lateral del perfilógrafo tipo California.



Figura 1.18. Perfilógrafo comercial modelo California.

El perfilógrafo Rainhart opera de manera similar al California. La principal diferencia es que el perfilógrafo Rainhart utiliza doce ruedas arregladas en cuatro grupos de tres. Este arreglo de ruedas asegura que cada una viaje en trayectorias diferentes. Esto permite la medición de doce

trayectorias en lugar de solamente tres como lo hace el perfilógrafo tipo California. Existen varias compañías que ofrecen este tipo de perfilógrafos, el costo aproximado es de \$25,000 dólares dependiendo del fabricante. En la figura 1.19 se observa un esquema del perfilógrafo Rainhart, donde también se muestra la distribución de las ruedas.

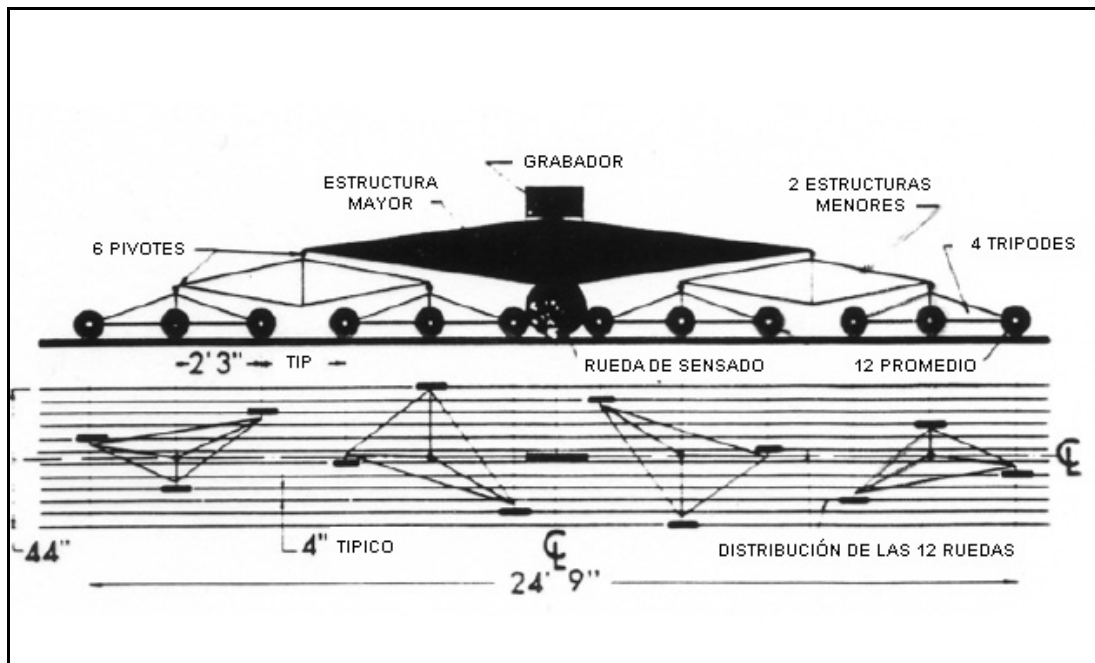


Figura 1.19 Perfilógrafo tipo Rainhart.

El perfilógrafo a instrumentar será del tipo California, debido a sus dimensiones, al principio de medición que utilizará, y a la distribución de las ruedas en su estructura; por esta razón, se ahondará en la obtención del PI haciendo uso de este tipo de equipos, como se mencionó anteriormente, el PI es el índice a utilizar en la evaluación de pistas de aeropuertos.

I.4. Determinación del Índice de Perfil

Un perfilograma es la representación gráfica de la variación del pavimento a lo largo de su superficie, ubicando de manera clara la variación vertical en milímetros y el desplazamiento horizontal en metros. El índice de perfil para el caso de los perfilógrafos de tipo California se determina a partir del perfilograma levantado para cada una de las secciones que se analizarán, estas secciones están divididas en distancia fijas, que usualmente suelen ser de 160 metros, según

datos proporcionados por el personal que opera este tipo de instrumentos en los aeropuertos. En la figura 1.20 se muestra un perfilograma típico obtenido con un equipo comercial. De manera tradicional el cálculo se realizaba de manera manual empleando para ello dos plantillas de plástico. En equipos modernos el cálculo del PI se lleva a cabo de manera automática mediante un programa de cómputo, o bien mediante dispositivos electrónicos. Para comprender el proceso de obtención del PI empleando un perfilógrafo tipo California, se describirá el procedimiento manual, y en la descripción de la instrumentación del equipo, la forma en la cual se automatizó dicho proceso.

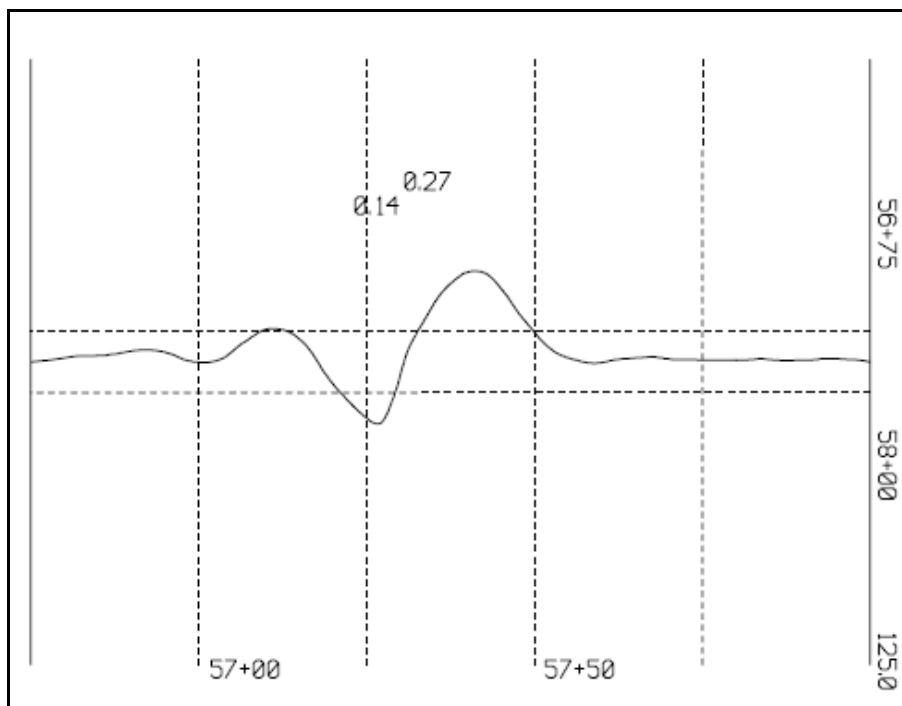


Figura 1.20. Perfilograma típico de un equipo comercial.

Para el cálculo del PI a partir de un perfilograma obtenido con un perfilógrafo de tipo California, se utiliza una plantilla de plástico transparente similar a la mostrada en la figura 1.21, la cual es de 3.7 centímetros de ancho y de 66.7 centímetros de largo, equivalente a un tramo de 200 metros de longitud, en una escala 1:300, que es la escala empleada en los perfilógrafos de tipo California comerciales. La parte central de la plantilla está marcada con una franja semitransparente de 5 milímetros de ancho, a lo largo de toda su longitud, que representa la banda de tolerancia, o banda nula. En ambos lados de esta franja se cuenta con líneas paralelas

separadas 2 milímetros (0.1 pulgadas), que sirven para identificar y medir la magnitud de las irregularidades de la línea del perfilograma fuera de la franja semitransparente de la plantilla.

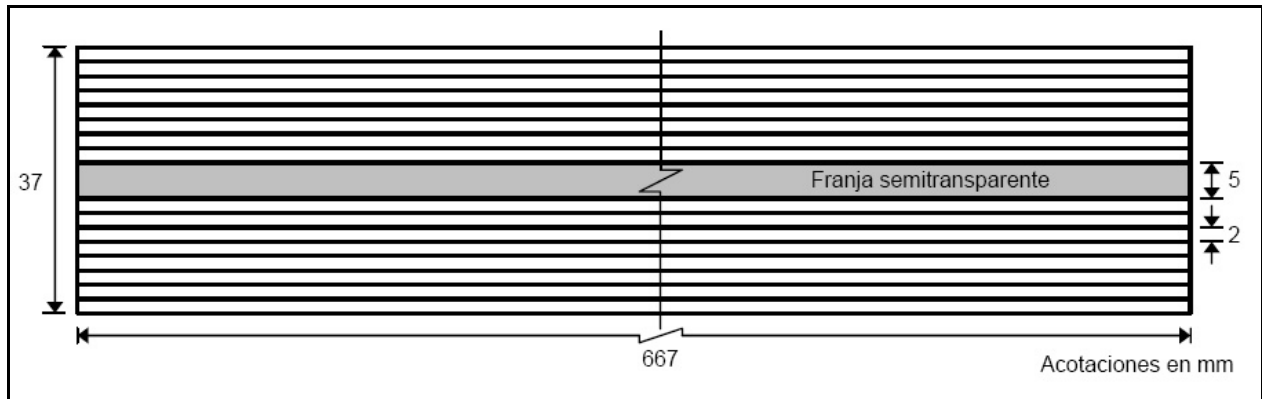


Figura 1.21. Plantilla de medición para el cálculo manual del PI.

Las irregularidades mayores a 10 mm y con una longitud igual a 7.5 metros o menor deben ser eliminadas de la superficie de rodadura, por lo cual es de vital importancia el poder ubicarlas en el perfilograma. Para localizar irregularidades mayores a 10 milímetros una segunda plantilla rectangular de plástico transparente es utilizada, con una línea de referencia de 25.0 ± 0.5 milímetros de longitud, ubicada a 10 milímetros del borde superior de la plantilla de plástico, como se muestra en la figura 1.22. Los extremos de la línea cuentan con dos pequeños orificios o marcas que sirven para precisar los puntos de intersección con la línea del perfilograma.

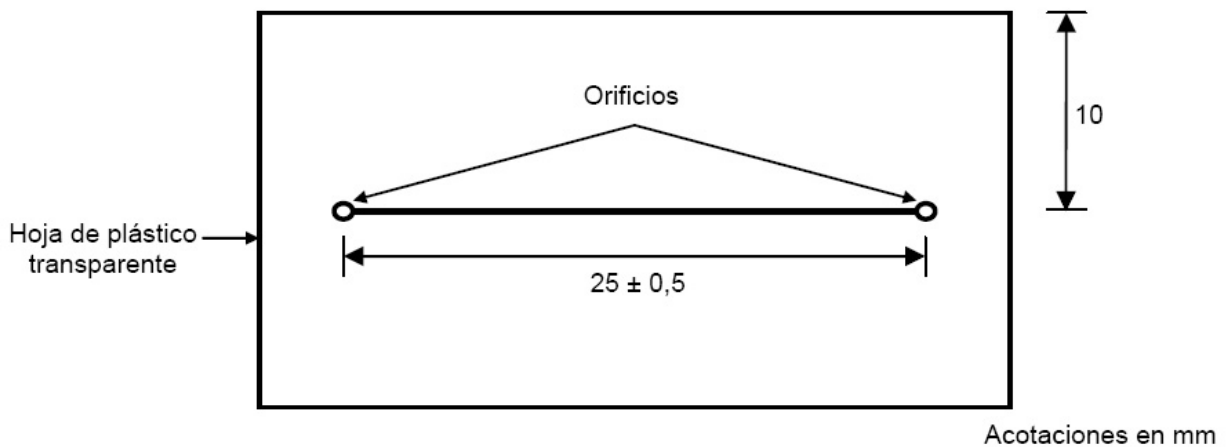


Figura 1.22. Plantilla para localizar irregularidades mayores a 10 mm.

I.4.1. Línea de perfil suavizada

Generalmente los perfilogramas, que se obtienen con los perfilógrafos de tipo California, suelen venir acompañados de señales que no forman parte del perfil, sino de la misma rugosidad de la superficie, o bien de la vibración propia del equipo; otras de estas irregularidades se deben a que se encuentra en el camino con pequeñas piedras que de igual forma no forman parte del perfil de la superficie. Razón por la cual es necesario eliminar dichas variaciones antes de proceder al cálculo del índice de perfil. Esta eliminación, en sistemas no automatizados, se realiza de forma manual dibujando una línea de perfil suavizada, que es una línea continua, cuyo propósito como se mencionó ya, es suavizar el trazo del perfilograma, atenuando los picos y desviaciones menores provocadas por piedras, tierra, objetos extraños, etc. En la figura 1.23 se observa un perfilograma típico y su línea de perfil suavizada.

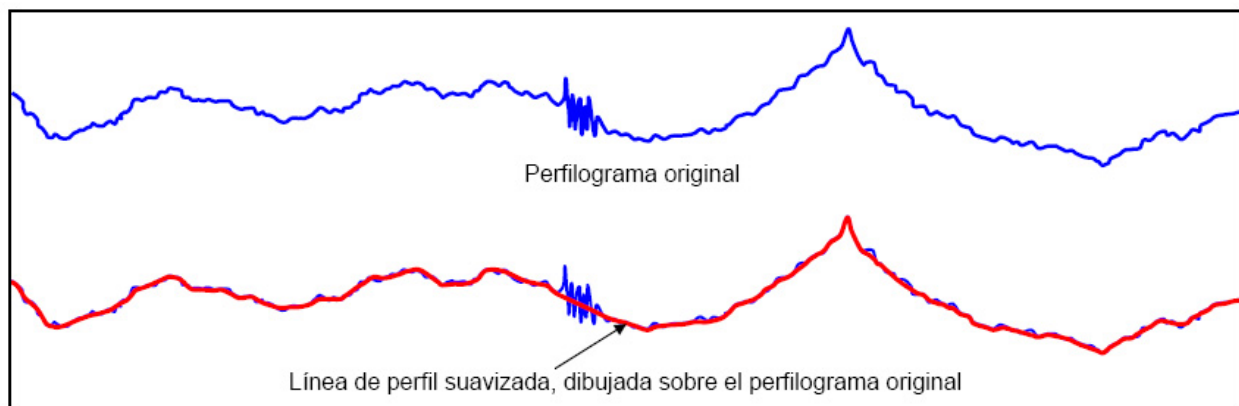


Figura 1.23. Línea de perfil suavizada.

I.4.2. Localización de las irregularidades mayores a 10 mm

Cuando se tiene lista la línea de perfil suavizada, en el cálculo manual del índice de perfil se debe utilizar una plantilla como la que se muestra en la figura 1.22. Esta plantilla debe ser colocada sobre cada una de las protuberancias o picos que sean excepcionalmente altos de la línea de perfil suavizada, de tal forma que la línea de referencia de la plantilla intercepte la línea de perfil, formando una especie de triángulo. Se debe localizar y marcar todas las protuberancias

mayores de 10 milímetros en una longitud igual a 7.5 metros o menos, mismas que serán identificadas en campo para ser eliminadas de la superficie de rodadura.

La eliminación de las protuberancias se hará tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- La base de dicho triángulo puede ser menor o igual que la línea de referencia de la plantilla, sin embargo nunca podrá ser mayor.
- La línea de referencia de la plantilla puede colocarse en forma inclinada sobre la línea de perfil.
- Cuando la base de la irregularidad es mayor que la línea de referencia de la plantilla, esta última se coloca en forma sensiblemente horizontal mientras se desliza hacia arriba por la irregularidad hasta que los orificios o las marcas de referencia se ubiquen sobre la línea de perfil.

Utilizando como guía el borde superior de la plantilla se traza una línea delgada sobre la línea de perfil suavizada. Cualquier porción de la línea de perfil que sobresalga de la línea trazada con la plantilla, indica la protuberancia que debe ser eliminada de la superficie de rodadura. En la figura 1.24 se muestran diferentes casos para la localización de irregularidades mayores de 10 milímetros en el perfilograma.

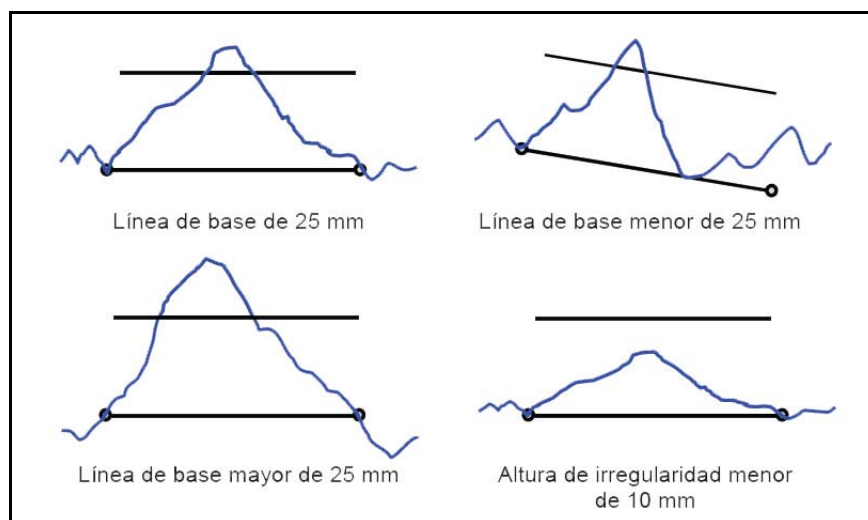


Figura 1.24. Localización de irregularidades mayores de 10 mm.

I.4.3. Colocación de la plantilla de medición para el cálculo del PI

Una vez identificadas en la línea de perfil suavizada las protuberancias mayores de 10 milímetros, se utiliza la plantilla de medición mostrada en la figura 1.21, para identificar en la línea de perfil y medir, los picos que sobresalgan por arriba o por debajo de la franja semitransparente de la plantilla, como se indica enseguida.

1. La plantilla de medición se coloca sobre la línea de perfil suavizada, de tal forma que la franja semitransparente cubra lo más posible dicha línea, y en la medida de lo posible procurar que las magnitudes de las irregularidades que sobresalgan por arriba y por debajo de la franja queden balanceadas, como se indica en el ejemplo mostrado en la figura 1.25.

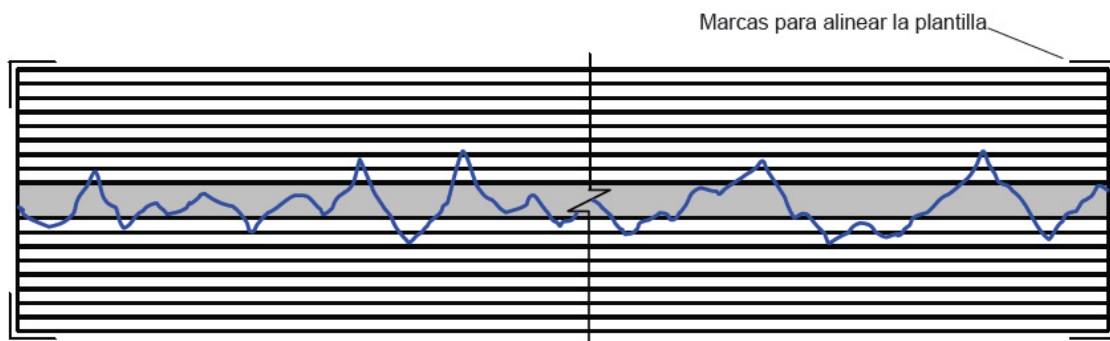


Figura 1.25. Colocación de la plantilla de medición.

2. Una vez colocada la plantilla de medición en la mejor posición posible, se marcan sus esquinas sobre el perfilograma, para que pueda reubicarse nuevamente en la misma posición en caso de una revisión o para alinear la plantilla cuando se evalúe el siguiente subtramo, como se muestra en la figura 1.25.
3. En el caso de curvas verticales o sobreelevaciones de curvas horizontales, donde se observen cambios importantes de la pendiente en la rasante del subtramo bajo prueba, es necesario dividir la línea de perfil suavizada en secciones de menor longitud y girar la plantilla de medición, como se indica en la figura 1.26.

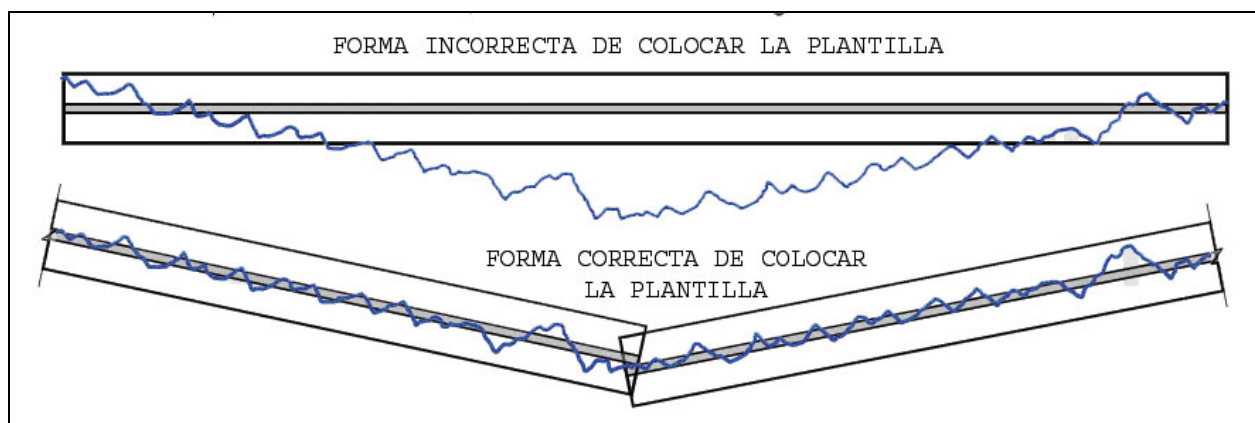


Figura 1.26. Posicionamiento de la plantilla en cambios importantes de pendiente.

1.4.4. Medición de las irregularidades

Una vez colocada la plantilla de medición sobre la línea de perfil suavizada, utilizando las líneas paralelas a la franja semitransparente de la plantilla como referencias, se determina la magnitud de cada una de las irregularidades, es decir, la distancia entre su cresta o su valle máximo que sobresalga de la franja semitransparente y el límite que corresponda de la franja, con aproximación al milímetro, considerando los siguientes puntos:

- a) Sólo se considerarán las irregularidades que sobresalgan de la franja semitransparente más de 0.5 milímetros, y que se extiendan longitudinalmente sobre el perfilograma por al menos 2 milímetros, como se muestra en la figura 1.27. No se considerarán los picos repentinos que se presenten en el perfilograma, ya que generalmente son causados por brincos provocados por piedras sueltas o material ajeno a la superficie de rodadura del pavimento.
- b) Las magnitudes de las irregularidades con doble cresta o doble valle, que no regresen a la franja semitransparente, se considerarán una sola vez, tomando la distancia máxima, como se indica en la figura 1.28.

- c) Las magnitudes de irregularidades mayores a 10 milímetros, en todos los casos se tomarán iguales a 10 milímetros, considerando que en los casos más desfavorables sólo se eliminaría en el subtramo las partes de las irregularidades que excedan esa magnitud.
- d) Si una irregularidad queda registrada entre dos perfilogramas de subtramos subsecuentes, se considerará una sola vez como parte del subtramo donde se presente la magnitud máxima, como se muestra en la figura 1.29.

Se anotará en forma clara la magnitud de cada irregularidad junto a ella, en milímetros con aproximación a la unidad.

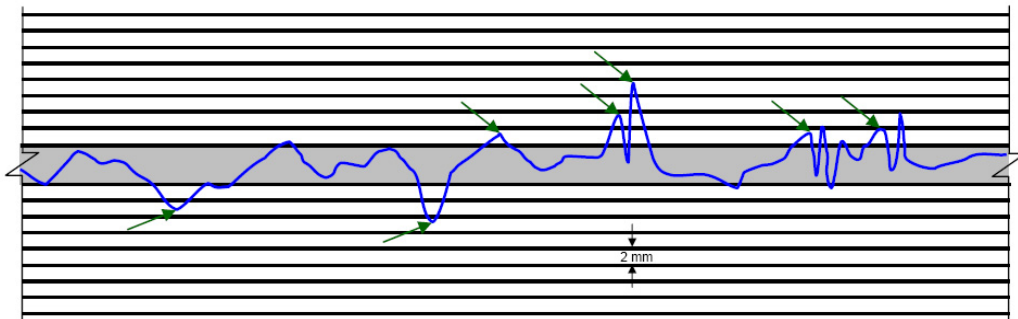
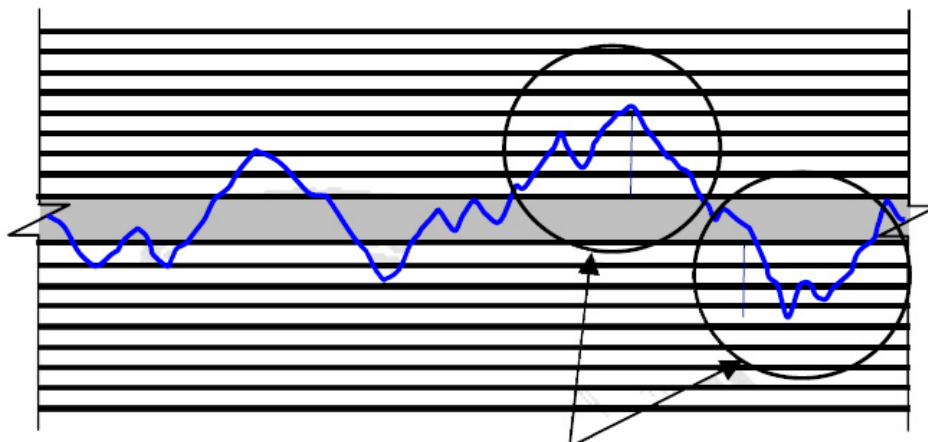


Figura 1.27. Irregularidades que serán consideradas para el cálculo del PI.



En estas irregularidades solo se consideran las distancias de las crestas y valles máximos

Figura 1.28. Forma en que se miden las irregularidades de doble cresta.

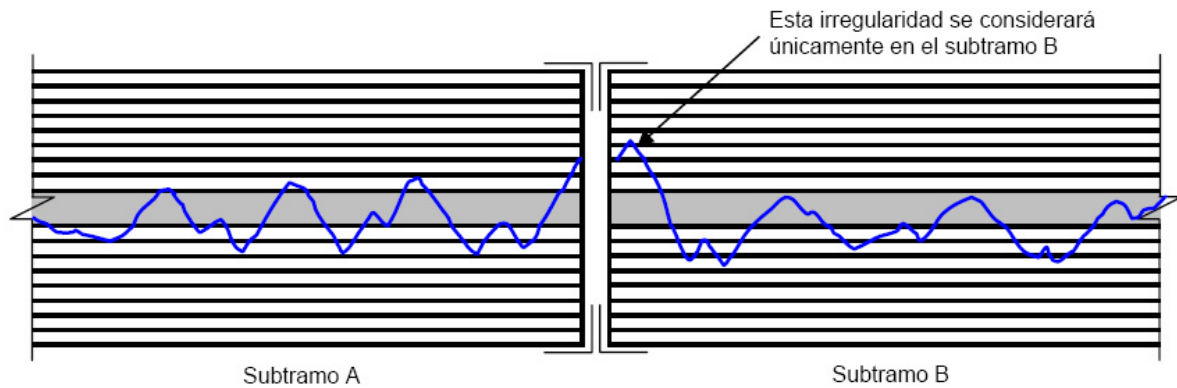


Figura 1.29. Forma de registrar las irregularidades comprendidas entre dos subtramos.

1.4.5. Cálculos y resultados

Una vez que se han registrado las magnitudes de todas las irregularidades de un mismo subtramo, se calcula la suma de éstas, anotado el resultado en la parte superior central del perfilograma, en milímetros con aproximación a la unidad y encerrándolo en un círculo para su fácil identificación, como se ejemplifica en la figura 1.30.

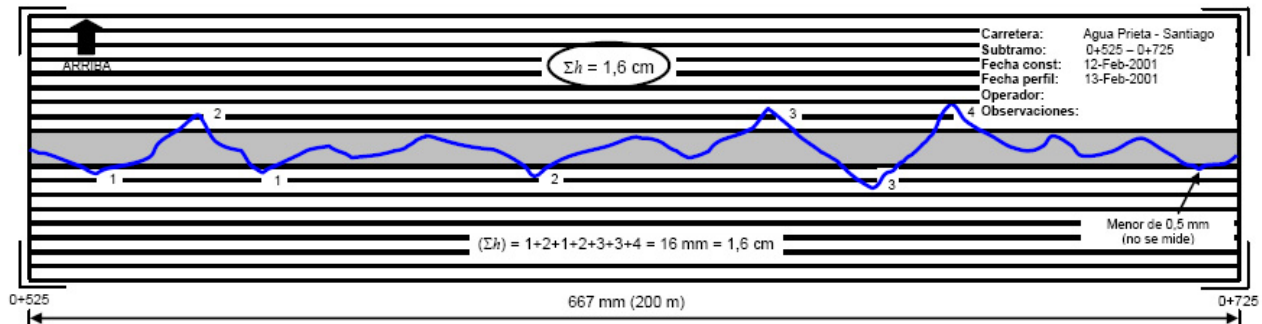


Figura 1.30. Procedimiento de medición de irregularidades.

Se debe calcular junto con los perfilogramas, el índice de perfil (PI) de cada subtramo, mediante la siguiente ecuación:

$$PI = \frac{\sum h}{L} \times 1,000 \quad (1.1)$$

Donde: PI = Índice de perfil del subtramo en milímetros/kilómetro.
 Σh = Suma de las magnitudes de las irregularidades en el subtramo en mm.
 L = Longitud del subtramo en metros.

Haciendo referencia al ejemplo mostrado en la figura 1.30, puede observarse que se tiene siete valores que se deben tomar en cuenta para el cálculo del índice de perfil ya que exceden en cuando menos 0.5 milímetros a la banda nula y que además cuentan con una extensión longitudinal de cuando menos 2 milímetros. De acuerdo a dicho perfilograma se tiene:

$$\Sigma h = 1 + 2 + 1 + 2 + 3 + 3 + 4 = 16mm$$

$$PI = \frac{16}{200} \times 1000 = 80(mm/km)$$

Que corresponde al índice de perfil de la sección de 200 metros mostrada en la figura. Para obtener el índice total de una sección formada por varios subtramos se suma el total de los índices de perfil correspondientes a cada uno de los subtramos y se divide el resultado entre la distancia total comprendida por dichos subtramos, esto entregará el PI de toda la sección.

Habiendo descrito de manera general los métodos más usuales para la determinación de perfiles, definidos algunos de los términos de uso común en esta rama, y ejemplificado el método manual para la determinación del PI a partir de un perfilograma, se precederá a la descripción del perfilógrafo a instrumentar, y cada uno de los elementos que lo componen.

CAPÍTULO II

ANÁLISIS Y SELECCIÓN

DEL HARDWARE

DEL PERFILÓGRAFO

En el presente capítulo se describe de manera general la estructura mecánica que será empleada en el perfilógrafo. Se hace mención también de las consideraciones que se tomaron en cuenta en la instrumentación del mismo, tanto de las que fueron solicitadas como de las que el mismo diseño hace necesarias. Se realiza una descripción detallada de cada uno de los elementos que integrarán la instrumentación electrónica del perfilógrafo, justificando la selección de cada uno de ellos; dicha instrumentación se divide en dos partes principales: *hardware* y *software*, ya que la instrumentación es llevada a cabo mediante instrumentación virtual y se tiene interacción de *hardware* con *software*.

II.1. Estructura mecánica

El perfilógrafo desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, cuenta con una estructura que lo asemeja a un perfilógrafo de tipo California, por la longitud del mismo y por el

principio de medición utilizado, en la figura 2.1 se observa un esquema de la estructura desarrollada. El perfilógrafo cuenta con una estructura principal (abatible), dos bases para montar la estructura y un sistema de dirección, además de la instrumentación electrónica.

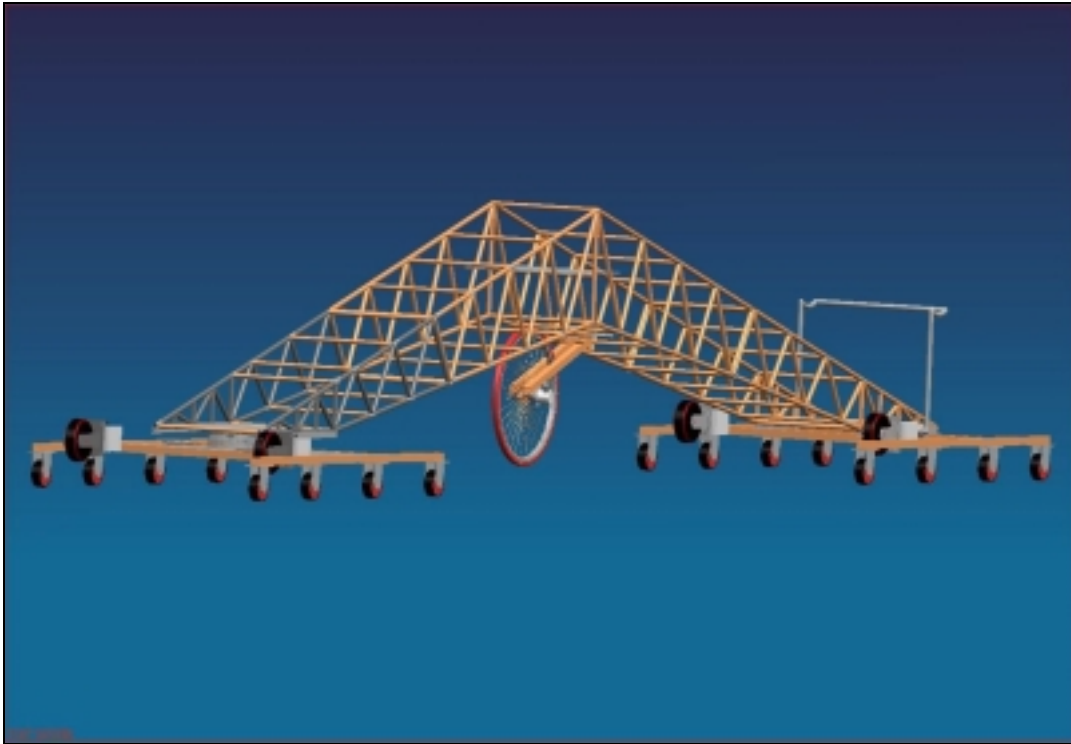


Figura 2.1. Estructura del perfilógrafo del Instituto de Ingeniería UNAM.

La fabricación de la estructura consiste de tubos y ensamble con soldadura de las partes que lo componen, además se agregarán aditamentos de sujeción. La estructura es plegable y permite su transporte, en un vehículo, para poder llevarlo a diferentes aeropuertos. En la figura 2.2 se muestran los aditamentos mecánicos que permiten el plegado de la estructura.

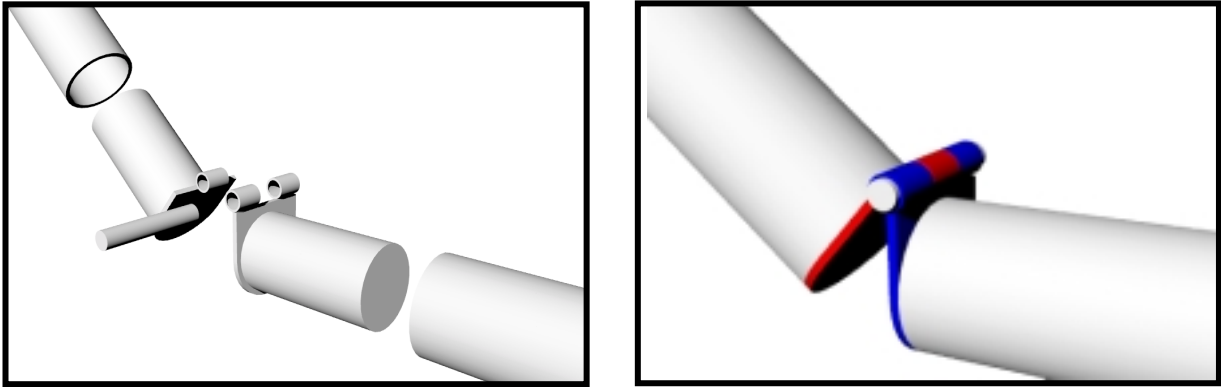


Figura 2.2. Aditamentos mecánicos para el plegado de la estructura.

Las bases para montar la estructura cuentan con 8 ruedas cada una y se arman con tramos de PTR soldados. Las 8 ruedas de una de las bases son locas y de la otra base 4 son locas y las restantes 4, que son las delanteras, están controladas por un sistema de dirección que permite realizar ajustes sobre la pista de la trayectoria del perfilógrafo. En la figura 2.3 se observa un esquema de lo que es el ensamblado de la estructura con una de las bases.

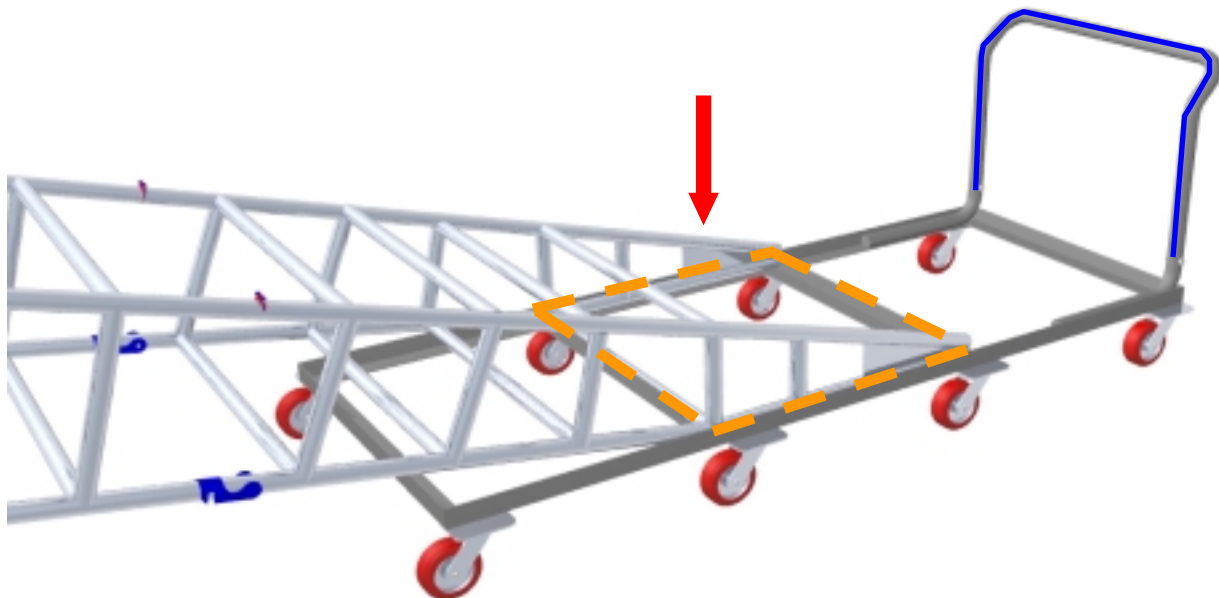


Figura 2.3. Base de la estructura del perfilógrafo.

En la figura 2.4 se observa una imagen de la estructura final del perfilógrafo, ya con la instrumentación electrónica montada. Cabe mencionar que en el diseño de la estructura se llevaron a cabo pruebas de elemento finito. El elemento finito es una herramienta importante que permite a los ingenieros de diseño mecánico predecir comportamientos que pueden presentar los elementos de estudio al estar sujetos a diferentes esfuerzos, estos esfuerzos pueden ser cargas a tensión y a compresión, cargas puntuales o distribuidas, desplazamientos, deformaciones y esfuerzos, y como resultado de dicho análisis se puede obtener esfuerzos, deformaciones y desplazamientos.



Figura 2.4. Fotografía de la estructura final del perfilógrafo.

Las pruebas de elemento finito son simulaciones por computadora que generalmente muestran cuadros de colores, que muestra valores de acuerdo a los resultados obtenidos de los esfuerzos aplicados, es decir el máximo, el mínimo y valores intermedios, éstos se presentan en el elemento de acuerdo al color que se observe. En estas simulaciones es posible observar el

comportamiento a través de animaciones, donde es posible apreciar las variaciones que se tiene al aplicar y retirar los esfuerzos.

A lo largo del desarrollo de este trabajo de tesis la estructura sufrió adecuaciones, pero el principio de operación permaneció sin alteración.

Dado que el objetivo de este trabajo es presentar la instrumentación electrónica, no se hará mención sobre las adecuaciones mecánicas que fue sufriendo la estructura, aunque en las recomendaciones al final del trabajo se harán algunos comentarios dadas las experiencias adquiridas al manipular dicha estructura.

II.1.1. Características de los perfilógrafos tipo California

Este tipo de perfilógrafos son fáciles de operar y de mantener, y proporcionan trazos de superficie que los operadores pueden interpretar de manera simple. Los perfilógrafos de tipo California son operados por una sola persona, la cual lo debe empujar a una velocidad de caminata (5 km/hr aproximadamente), y a medida que la estructura se desplaza sobre la superficie se va obteniendo la información del perfil de la misma.

La idea de la distribución de las ruedas radica en la eliminación de posibles variaciones en el apoyo de la estructura al caer alguna de las ruedas en una depresión, en todo momento la estructura se encuentre firmemente apoyada en el pavimento, esto se verá reflejado en una lectura del perfil más precisa. En la figura 2.5 se muestra una imagen que ejemplifica dicha situación. Como se observa en la figura 2.5, en el extremo izquierdo de la estructura, la cuarta rueda de izquierda a derecha no se encuentra apoyada sobre la superficie, sin embargo las ruedas restantes si lo hacen, misma situación se observa con las ruedas del extremo derecho de la estructura, en la tercera rueda de izquierda a derecha. Esto justifica el elevado número de ruedas necesarias en la estructura del perfilógrafo.

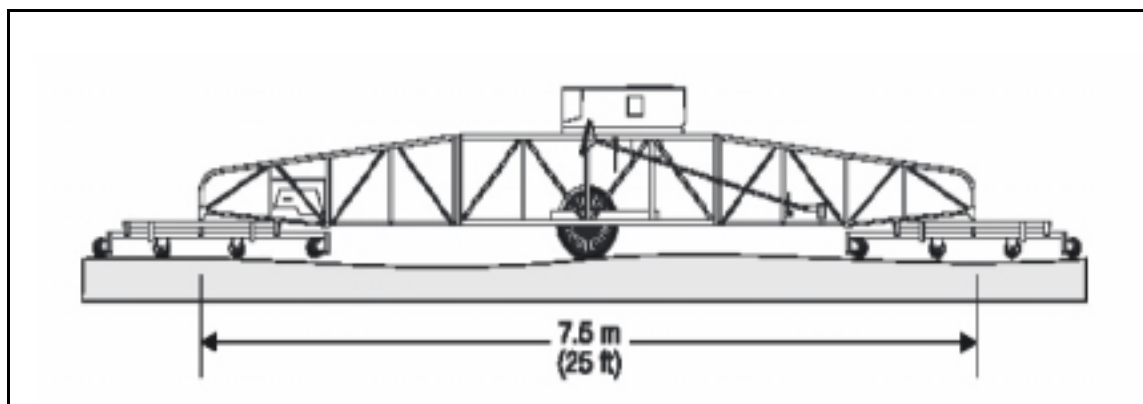


Figura 2.5. Plano de referencia en el perfilógrafo tipo California.

En el centro de la estructura se colocó una llanta de bicicleta rodada 26, la cual se une a través de un brazo a la estructura del perfilógrafo. Al existir variaciones en el pavimento la llanta se hunde o se levanta, dependiendo de estas variaciones, el movimiento es transmitido a través del brazo al sensor de desplazamiento vertical. Para medir el desplazamiento horizontal, se colocó un dispositivo de medición de desplazamiento en una extensión del eje de la llanta sensora. La rueda al girar transmite el movimiento al sensor, el cual envía la señal de desplazamiento en forma de pulsos de voltaje a la tarjeta de adquisición de datos. El programa en la computadora se encargará de adquirir y procesar las señales enviadas por ambos sensores.

En el centro de la estructura, y por encima de la llanta sensora, se colocó una placa sobre la cual se colocará un gabinete que contendrá todos los elementos relacionados con la instrumentación electrónica.

A continuación se mencionará las consideraciones tomadas en cuenta en el diseño de la perfilógrafo.

II.2. Consideraciones sobre el diseño

Como se mencionó en el prólogo de este trabajo, ASA en conjunto con CONACYT, lanzaron una convocatoria, solicitando el desarrollo de un perfilógrafo, con elementos mecánicos principalmente, en el cual la graficación de los perfiles se llevara a cabo sobre un rollo de papel mediante una plumilla de tinta. Dichos equipos hoy en día han sido sustituidos casi en su

totalidad por sistemas electrónicos capaces de realizar las mismas funciones y con características adicionales. Por lo que con base en los requerimientos de medición solicitados por ASA-CONACYT, se trabajó sobre en el desarrollo de un sistema electromecánico. Estos requerimientos son los siguientes:

- Resolución en la medición del desplazamiento vertical de 0.25 mm (0.01 pulgada).
- Resolución en el desplazamiento horizontal de 2.54 cm (1 pulgada).
- El sistema deberá permitir almacenar lecturas por hasta 10 km.
- Todo el equipo deberá estar protegido contra la intemperie.

El sistema electrónico que se propone diseñar contará con una instrumentación que permitirá obtener una resolución vertical de 0.1 mm, una resolución horizontal de 1 centímetro y se propone almacenar e imprimir lecturas. Como se aprecia, el sistema propuesto va más allá de los requerimientos solicitados. A continuación se describirá los módulos que componen la instrumentación del perfilógrafo longitudinal.

II.3. Propuesta de diseño de la instrumentación electrónica

Se plantearon dos propuestas para solucionar la etapa de instrumentación electrónica que se colocará en el perfilógrafo. La primera de ellas corresponde al desarrollo del sistema alrededor de un microcontrolador, como elemento principal de control. Además de incorporar varios módulos al sistema para poder llevar a cabo el desarrollo del mismo, en la figura 2.6 se muestra el diagrama de bloques que se propone para esta primera opción de desarrollo. En esta propuesta se trabajaría por completo en el desarrollo del *software* a grabar en el microcontrolador y que será el encargado de regular las funciones de todos los periféricos, además de la generación de los reportes impresos.

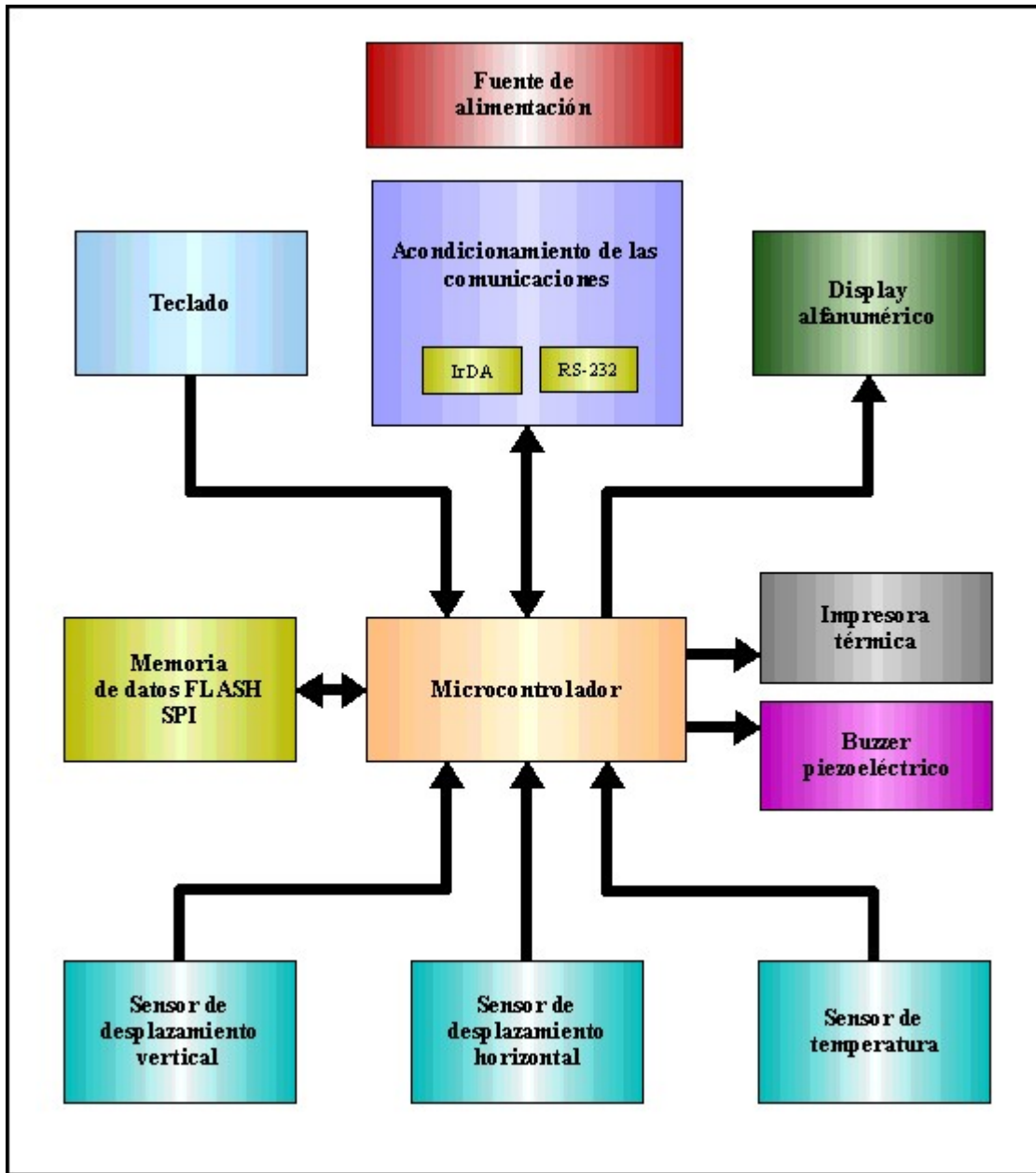


Figura 2.6. Opción de diseño del sistema alrededor de un microcontrolador.

Esta opción de diseño es económica, pero requiere de un tiempo de diseño muy grande, los tiempos que se establecieron para el desarrollo del proyecto no permitían un diseño de este tipo, razón por la cual se optó por la integración alrededor de elementos comerciales.

La segunda propuesta corresponde a la integración del sistema alrededor de una computadora, empleando una tarjeta de adquisición de datos para la lectura de los sensores de

desplazamiento. Mediante el empleo de un lenguaje de programación de alto nivel es posible controlar la adquisición y generar los reportes, que en este caso se almacenarán en la memoria de la computadora, o bien generar los reportes impresos empleando ya sea el puerto serie o el puerto paralelo de la computadora.

El lenguaje de programación puede ser cualquiera que nos permita una fácil interacción con los periféricos de la computadora y con la tarjeta de adquisición de datos a emplear, se optó por emplear el entorno de desarrollo gráfico LabVIEW, ya que cuenta con las herramientas necesarias para facilitar la etapa de diseño. En la figura 2.7 se muestra la propuesta de diseño alrededor de la computadora.

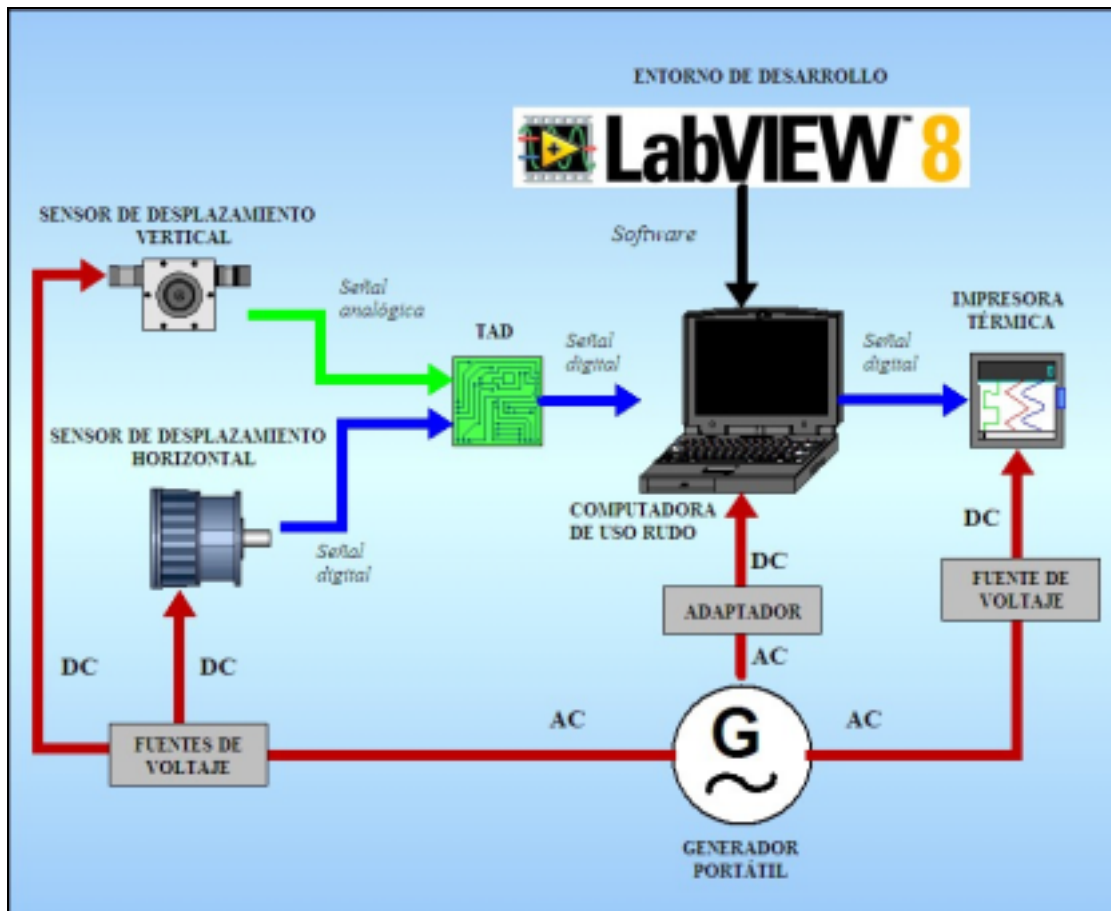


Figura 2.7. Bloques principales de los cuales se compone el perfilógrafo longitudinal.

Además de la computadora y la tarjeta de adquisición de datos se requerirá de un sensor de desplazamiento horizontal, un sensor de desplazamiento vertical, una impresora para generar los reportes, y fuentes de alimentación para cada uno de estos elementos. En el siguiente apartado comenzaremos por discutir las opciones para cada uno de los elementos, iniciando con los transductores de desplazamiento.

II.4. Métodos de medición de desplazamiento

Las mediciones de posición usualmente pueden ser resueltas empleando una amplia variedad de soluciones, pero no siempre es fácil determinar cual es la mejor. Existen muchas posibles opciones en el mercado para medir la posición que cualquier otra variable. Existen alrededor de trece categorías relacionadas con la medición de posición o desplazamiento, comparadas con solamente cuatro categorías de medición de presión, por ejemplo. En la siguiente lista se muestran estas categorías:

1. Transductores resistivos de desplazamiento
2. Transductores inductivos de desplazamiento
3. Transductores capacitivos de desplazamiento
4. Transductores y transductores piezoeléctricos
5. Transductores láser de desplazamiento
6. Transductores ultrasónicos de desplazamiento
7. Codificadores angulares ópticos
8. Transductores magnéticos de desplazamiento
9. Transductores de desplazamiento de fibra óptica
10. Deflexión de haz óptico

Para poder seleccionar un transductor de posición, hay que tomar en cuenta los parámetros que se muestran en la tabla 2.1. Aunque la tabla no es completamente inclusiva, ayuda a decidir que parámetros son relevantes en una aplicación.

| Parámetro | ¿Relevante? | Opciones |
|-------------------------------------|--|---|
| Contacto | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Contacto <input type="radio"/> Sin contacto |
| Tipo de movimiento | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Lineal <input type="radio"/> Rotacional |
| Dimensiones | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Una dimensión <input type="radio"/> Multidimensional |
| Tipo de medición | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Absoluto <input type="radio"/> Incremental |
| Rango | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Menor a 1 pulgada <input type="radio"/> Mayor a 1 pulgada |
| Tamaño y peso físico | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Restricción en el tamaño <input type="radio"/> Restricción en el peso |
| Protección contra el medio ambiente | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Humedad <input type="radio"/> Temperatura |
| Instalación/montaje | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Movable |
| Precisión | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Linealidad <input type="radio"/> Repetibilidad <input type="radio"/> Histéresis |
| Tiempo de vida | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Ciclos de operación continua |
| Costo | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Menos de 500 dólares <input type="radio"/> Más de \$500 dólares |
| Salida | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Voltaje <input type="radio"/> Corriente <input type="radio"/> Digital <input type="radio"/> Visual |
| Respuesta en frecuencia | <input type="radio"/> Sí <input type="radio"/> No | <input type="radio"/> Menor a 5 Hz <input type="radio"/> Mayor a 5 Hz |

Tabla 2.1. Criterios de selección del transductor de desplazamiento.

Tal vez el primer parámetro a considerar en una aplicación es si el transductor estará en contacto físico con el objeto a ser monitoreado. Si la aplicación es sensible a influencias externas, un transductor sin contacto puede ser el más apropiado. Por otro lado, un sensor con contacto puede ofrecer ciertas ventajas que no se encuentran en un sensor sin contacto.

Los sensores sin contacto pueden emitir señales peligrosas, ya sean basadas en láser o ultrasónicas. Estos productos también dependen de tener una visión clara del entorno donde operan. La respuesta en frecuencia no es siempre tan alta como con los sensores de contacto, pero los costos son generalmente más altos. Finalmente, los rangos de temperatura de operación típicamente no son tan amplios.

Otro de los parámetros a considerar es si se requiere medir movimiento rotacional o lineal. Debemos tener en cuenta que existen varios métodos para realizar mediciones de desplazamientos lineales con transductores angulares y viceversa. La falta de espacio, el costo y la facilidad del montaje son algunas razones para llevar a cabo esto.

Una vez que se decidió que el tipo de transductor a emplear, de contacto o sin contacto y si se medirá un movimiento lineal o rotatorio, la selección de la tecnología a emplear es mucho más sencilla.

Lo siguiente es determinar si el monitoreo del movimiento será unidimensional o multidimensional. Si el movimiento es multidimensional, ver si se necesita medir múltiples dimensiones o si el objeto se está moviendo en múltiples dimensiones y solamente se requiere medir una de ellas. En ocasiones el movimiento multidimensional es medido con múltiples transductores unidimensionales.

También, hay que pensar acerca del tipo de señal que se requiere obtener. Si se requiere de una señal que especifique una posición única, hay que asegurarse de especificar un transductor con salida absoluta. Sin embargo, si todo lo que se requiere es una posición relativa anterior a otra posición, o un simple interruptor de encendido apagado, entonces la tecnología incremental o de umbral son más apropiadas.

Una diferencia importante entre los transductores incrementales y absolutos es que los transductores incrementales necesitan típicamente de ser re inicializados después de que se retira la energía regresando el objeto monitoreado a la posición de inicio en el encendido. Esta limitación es inaceptable en ciertas aplicaciones. Las mediciones de umbral son en naturaleza de encendido/apagado y usualmente involucran interruptores limitadores o dispositivos similares. También como es de imaginar, los dispositivos absolutos son más caros que los incrementales o de umbral.

El margen, también conocido como viaje, varía de unos cuantos micrones a cientos de pies. El margen de varios transductores de precisión está limitado a 10 pulgadas o menos.

Si la aplicación requiere operar en alguna plataforma sensible al tamaño o al peso, se deberán especificar los máximos valores para el peso y las dimensiones del transductor.

El ambiente en el cual operará la aplicación también puede tener un gran impacto en la elección de la tecnología. Se requiere determinar en que temperaturas de operación y de almacenamiento se encontrará el dispositivo y estar seguro de la necesidad de cumplir con requerimientos de ambiente comercial, industrial o militar.

También se debe considerar el exceso de humedad, golpes, vibración, o campos electromagnéticos que pueden ser encontrados. Hay que verificar si el ambiente donde operará cuenta con otros aspectos únicos, tales como alta o baja presión o la presencia de químicos peligrosos o corrosivos.

Otro parámetro que no suele tomarse en cuenta al momento de selección es el método y el tiempo requerido para la instalación y el montaje del transductor. Para aplicaciones de prueba este parámetro puede no ser importante. Sin embargo, para aplicaciones de largos volúmenes, frecuentemente se requiere de que la instalación y la remoción del transductor sea lo más simple posible para reducir los costos de esta labor y permitir un mantenimiento simple. Hay que verificar si el transductor puede únicamente ser montado con bases especiales del fabricante o si una variedad de técnicas de montaje puede ser empleada.

Aunque que la precisión es ciertamente un parámetro importante y algunas veces crítico, es regularmente el último grado de libertad en la selección del transductor. Con la disponibilidad de herramientas de calibración por *software*, la linealidad no es tan importante como lo fue antes. Para muchas aplicaciones, de hecho, la repetibilidad es el componente más importante.

La precisión es especificada típicamente en unidades absolutas como milipulgadas o micrones o en unidades relativas como un porcentaje a la escala completa de medición. Si se compara la precisión de un dispositivo contra otro, hay que asegurarse que se están comparando las mismas cosas. Por ejemplo, hay que ver si las precisiones siendo citadas son a una

temperatura fija o sobre un margen de temperaturas. Si se requiere, informarse si hay disponible una compensación de temperatura.

Si se espera que haya un número significativo de ciclos o si el transductor estará en servicio por un periodo de tiempo prolongado, hay que especificar los requerimientos del tiempo de vida y la fiabilidad. Cuando se escoge el transductor, hay que informarse sobre las garantías que son ofrecidas así como cuanto mantenimiento y reparaciones son posibles.

Un transductor que puede ser reparado en casa puede reducir costos significativamente. También se deberá considerar qué tipo de recalibración periódica es recomendada y qué procedimientos de calibración son proporcionados.

Es también una buena práctica investigar sobre los tipos de transductores más comunes para ciertas aplicaciones, tales como control industrial, comercial, pruebas y medición.

Otro parámetro a considerar es el tiempo que toma que el producto sea entregado después de haber sido ordenado. La naturaleza del volumen de ventas de algunos transductores combinado con los procesos de producción y manufactura requiere de tiempos de liberación de incluso ocho semanas o más.

Obviamente, el transductor va a ser parte de un sistema, por lo tanto, hay que determinar los requerimientos eléctricos de la entrada y salida. Opciones comunes incluyen voltaje analógico de AC o DC, resistivo, corriente (4-20 mA), digital, y visual.

Finalmente, para aplicaciones de movimiento rápido, hay que determinar la máxima velocidad o aceleración que requiere ser monitoreada. Asegurarse que el sistema de adquisición de datos o el sistema de control cuenta con una adecuada tasa de muestreo para registrar los datos resultantes.

Una vez que se está seguro de los parámetros clave, es necesario determinar cual de ellos es relevante para la aplicación y de esos parámetros relevantes, cual es el más crítico.

Si no se hace prioridad sobre los requerimientos, es difícil tomar la decisión de la selección. Puede llegarse a la conclusión de que no hay un transductor que cumpla con las necesidades requeridas. Esto puede ser cierto, pero puede ser que los requerimientos sean muy estrictos y que se requiera replantear algunos de ellos para llegar a la selección óptima.

II.4.1. Requerimientos de los sensores de desplazamiento del perfilógrafo

Para el diseño del perfilógrafo se requiere de dos transductores de desplazamiento, y de acuerdo al diseño de la estructura, ambos transductores deben de ser angulares. El transductor que medirá el desplazamiento horizontal se montará sobre una extensión del eje de la llanta sensora, de tal forma que al desplazarse la estructura y girar la llanta, se obtenga una señal proporcional a dicho desplazamiento. Como se mencionó anteriormente, se requiere detectar 1 centímetro de desplazamiento y no es necesario conocer distancias intermedias, es decir, no son relevantes desplazamientos menores a 1 centímetro, esto nos permite seleccionar un codificador angular óptico, y dado que no nos interesará una posición absoluta, se optó por trabajar con un codificador angular incremental. Otro parámetro importante es que se encontrará operando a la intemperie y bajo condiciones ambientales que pueden ser extremas, se requiere por lo tanto de un dispositivo robusto.

En cuanto al transductor que medirá el desplazamiento angular se plantearon dos opciones, la primera de ellas correspondiendo a un Transformador Diferencial Variable Lineal (LVDT, por sus siglas en inglés), este tipo de dispositivos son transductores electromecánicos que producen una salida eléctrica proporcional al desplazamiento de un núcleo movible separado. El LVDT tiene varias características encomiables que lo hacen ideal para una gran variedad de aplicaciones. Entre estas se pueden citar la medición libre de fricción, de manera ordinaria no existe contacto entre el núcleo móvil y la estructura de la bobina, lo cual implica que el LVDT es un dispositivo libre de fricción. Esto permite su uso en mediciones críticas que pueden tolerar la adición de un núcleo con una baja masa, pero que no pueden tolerar fricción en la carga. La ausencia de fricción entre el núcleo y la bobina de un LVDT implica que no existe desgaste entre ellos, esto otorga una vida mecánica infinita.

La operación sin fricción del LVDT combinada con el principio de inducción en el cual se basa el LVDT otorga al dispositivo dos características sobresalientes. La primera es una resolución verdaderamente infinita. Esto significa que el LVDT puede responder aún a los cambios más reducidos del movimiento del núcleo y entregar una salida proporcional. La restricción en cuanto a la lectura de la salida se encuentra únicamente en la electrónica asociada.

La simetría inherente en la construcción de un LVDT produce otra característica: la repetición en la posición de la posición cero. La posición nula o de cero es extremadamente estable y repetible. De esta forma el LVDT puede ser empleado como un excelente indicador de posición nula en sistemas de control de lazo cerrado de alta ganancia.

La desventaja del empleo del LVDT en el perfilógrafo es su montaje en la estructura, ya que como se describió anteriormente, la estructura se encuentra unida a la llanta sensora a través de un brazo, que al desplazarse la llanta por deformaciones del pavimento, el desplazamiento que sufre es angular, no lineal, esto no permite el empleo del LVDT de forma directa sin realizar adecuaciones en el diseño de la estructura.

Por esta razón se prefirió un transductor de desplazamiento angular, y mediante *software* realizar la conversión al desplazamiento lineal equivalente. El sensor de desplazamiento angular deberá entregar una señal de voltaje continua equivalente a su desplazamiento, y de igual forma que el transductor de desplazamiento horizontal, soportar condiciones ambientales severas, de lluvia incluso. Teniendo en cuenta estos requerimientos para ambos sensores, se describirá de manera general los que se seleccionaron para integrarlos en el perfilógrafo.

II.4.2. Medición del desplazamiento horizontal

Para la medición del desplazamiento horizontal se hará uso de un codificador angular (conocido como *encoder*), para el caso de nuestra aplicación se empleará uno de tipo incremental. Un codificador incremental produce una serie de ondas cuadradas a medida que gira. El número de ciclos de onda cuadrada producidas por cada vuelta del rotor es llamada “resolución del codificador”. Los codificadores incrementales trabajan mediante la rotación de un disco en la

trayectoria de una fuente de luz; con el disco codificado actuando como un obturador para alternar la transmisión o no de la luz hacia un fotodetector. Entonces, la resolución de decodificador es la misma que el número de líneas realizadas en el disco codificado. Una resolución de 360 significa que el disco codificador tendrá 360 líneas sobre él, y una vuelta completa del codificador producirá 360 ciclos de onda cuadrada completa, cada ciclo indica un grado de la rotación del eje.

Debido a que la resolución es un “código fijo” sobre el disco, los codificadores ópticos son de manera inherente muy repetibles y, cuando se encuentran bien contruidos, muy precisos. Tampoco hay un error de acumulación como puede experimentarse con los sensores analógicos, y la onda cuadrada de salida es fácil de manejar mediante técnicas de procesamiento digital de señales.

Los fabricantes proveen codificadores incrementales con hasta 288,000 conteos por vuelta a través de una combinación de la lectura directa sobre el código del disco y varias técnicas de multiplicación.

Generalmente, los codificadores incrementales proporcionan más resolución a un menor costo que sus primos los codificadores absolutos. También tienen una interfaz mucho más simple debido a que tienen pocas líneas de salida. De manera típica, un codificador incremental podría tener 4 líneas: 2 señales para la cuadratura y las líneas de alimentación y tierra. Un codificador de 12 bits absoluto, en contraste, podría usar hasta 12 líneas de datos además de la alimentación y la tierra.

Los codificadores incrementales se proporcionan usualmente con dos canales (A y B), que están desfasados por un cuarto de ciclo (90° eléctricos). Este tipo de señal es referido como la cuadratura y permite al usuario determinar no sólo la velocidad de la rotación sino su dirección también. Examinando la relación entre los canales A y B, un canal puede determinar si el codificador está girando en sentido del reloj (B adelanta a A) o en sentido contrario a las manecillas del reloj (A adelanta a B).

Varios fabricantes de contadores y controladores incluyen circuitos de detección de cuadratura como parte de su electrónica. Esto permite el uso de dos canales de entrada sin la necesidad de acondicionamiento. Con la detección de cuadratura el controlador puede obtener resoluciones del código base del disco de 1X, 2X ó 4X. 10,000 conteos por vuelta pueden ser generados por un codificador de dos canales de 2,500 ciclos, detectando las transiciones positivas y negativas de los canales A y B. Con un disco de calidad y un codificador de fase apropiado, la señal 4X tendrá una precisión mejor que medio conteo. Esto puede ser apreciado en la figura 2.8.

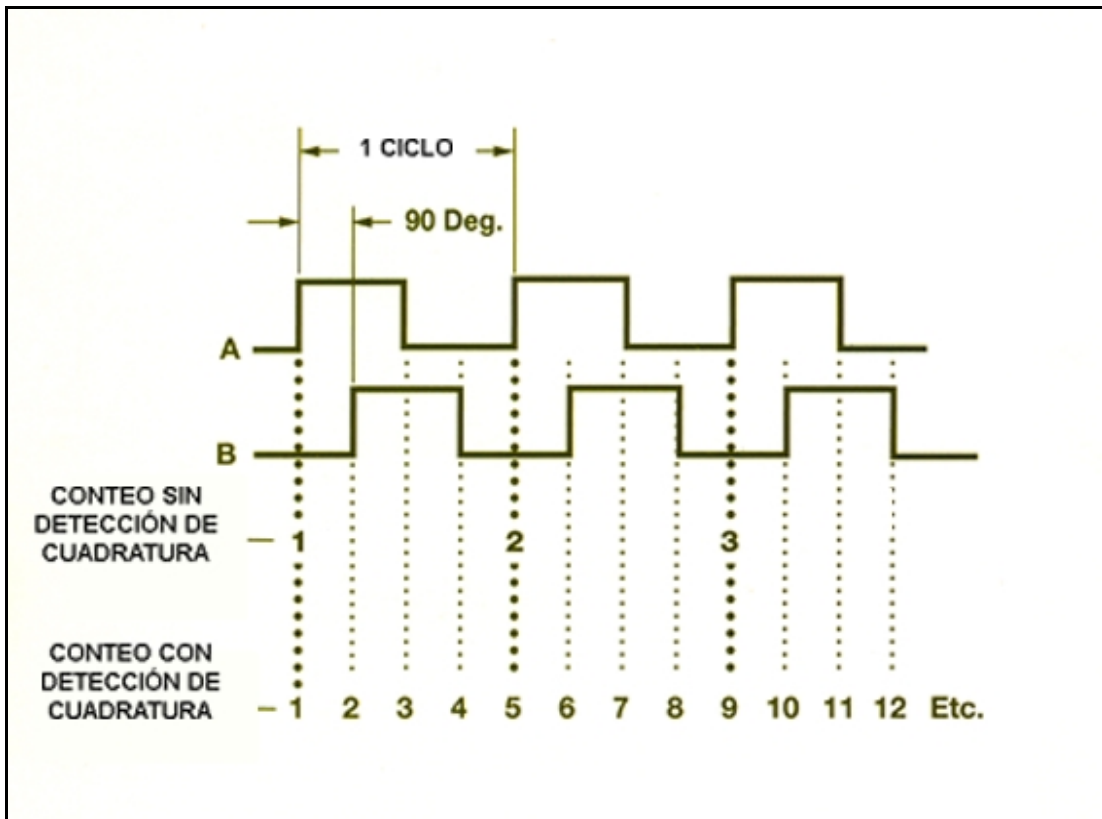


Figura 2.8. Señales en cuadratura del codificador angular.

Otra manera de incrementar la resolución es mediante la interpolación, la cual subdivide electrónicamente la resolución base. La interpolación se alcanza a través del uso de electrónica interna, actuando sobre las aberturas del codificador. La señal interpolada puede ser entonces multiplicada a través del método de detección de cuadratura mencionado anteriormente. Se encuentran disponibles en el mercado multiplicadores de interpolación de 2, 4, 5, 10 y 20.

El codificador seleccionado se clasifica como un codificador de tipo industrial. Los codificadores industriales se encuentran disponibles para su uso sobre un amplio margen de condiciones ambientales. Una gran variedad de diseños permite al usuario configurar un codificador a sus requerimientos. Esto también permite al ingeniero de diseño especificar o seleccionar sólo las opciones necesarias sin incurrir en costos adicionales innecesarios.

Existen ciertos factores que deben ser considerados para asegurar la confiabilidad y la operación consistente del codificador, especialmente en aplicaciones donde el codificador se encontrará bajo condiciones ambientales extremas o bien bajo ambientes de operación industrial. En particular, el codificador debe tener un alto grado de estabilidad mecánica y eléctrica. Para alcanzar dicha estabilidad el codificador debe contar con una base que le permita un apoyo sólido. El disco del codificador, el eje y los mecanismos de rodamiento deben ser de la más alta calidad para asegurar la mayor precisión del dispositivo.

Las interrupciones de luz del disco del codificador, a medida que el codificador gira, y el código asociado sobre el disco, son los principales responsables de la precisión de la señal eléctrica generada por el codificador. Si la forma del disco no fuera precisa, la señal resultante se vería reflejada de manera poco precisa.

Los fabricantes de codificadores angulares han desarrollado algunas de las máquinas de división de círculos en el mundo más sofisticadas y precisas; esas máquinas son capaces de obtener precisiones en el rango de subsegundos por arco. Originalmente desarrollados para la industria militar y aeroespacial, esta calidad es automáticamente incorporada en los productos industriales.

El eje y el mecanismo de rotación mantienen una rotación precisa sobre el disco y ayudan a eliminar errores tales como vibración y excentricidad, las cuales pueden ser trasladadas en errores de posición. El disco del codificador debe estar montado cuidadosamente para evitar la excentricidad como parte de la lectura. Tal excentricidad puede causar imprecisiones en la salida del codificador, que pueden no ser aparentes para el usuario durante las pruebas eléctricas pero que pueden causar falsa información de la posición. En la figura 2.9 se muestra un esquema

de los diferentes elementos que integran un codificador angular incremental, del tipo a emplear en la instrumentación del perfilógrafo.

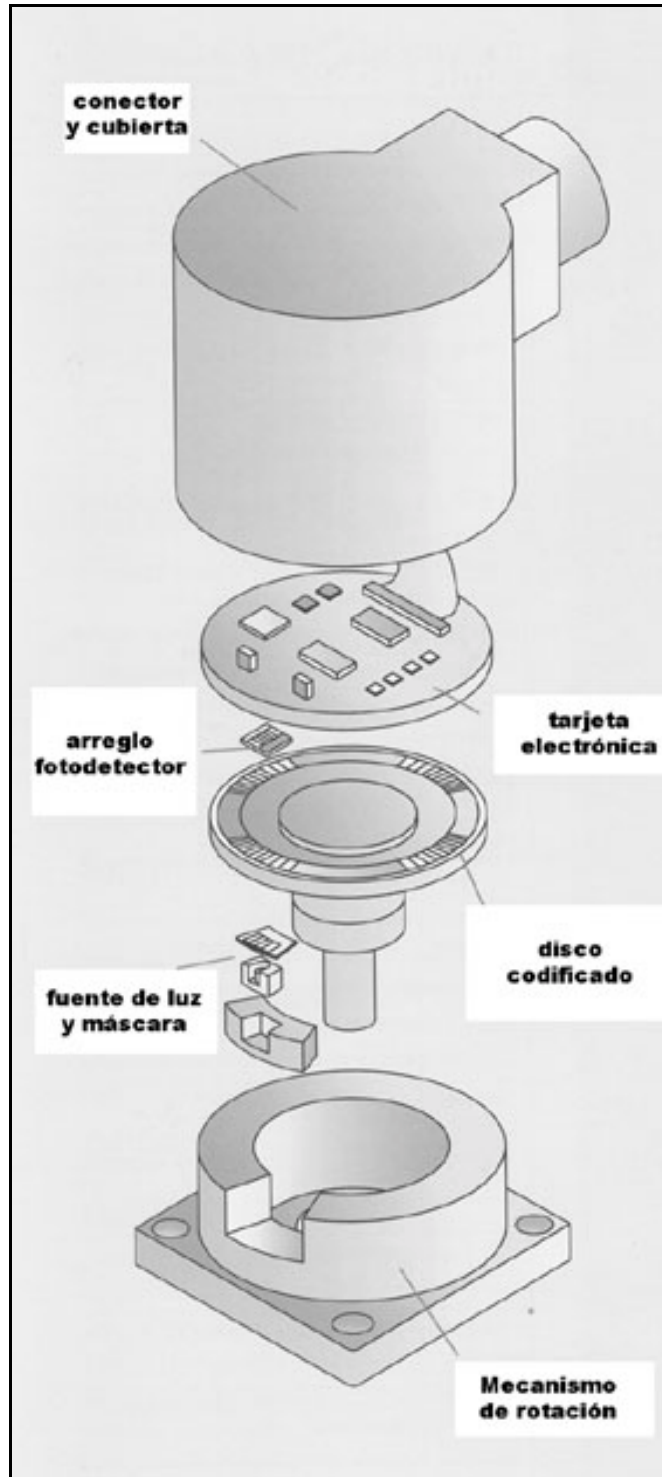


Figura 2.9. Elementos funcionales del codificador angular.

En la selección de los codificadores ópticos para ambientes industriales se debe tener en cuenta los siguientes aspectos: las características de los elementos de carga, el tipo de encapsulado, la temperatura de operación y el ambiente de operación final.

Cargas pesadas

En aplicaciones utilizando engranajes o bandas, una carga excesiva radial sobre el eje puede acortar la vida del mecanismo de rotación. Los codificadores deben de ser especificados de acuerdo a la carga radial. Las cargas máximas típicas para codificadores industriales son 50, 40 y 100 libras. Codificadores de ciclo alto se encuentran disponibles para manejar cargas y golpes de hasta 200 g. En el caso particular del perfilógrafo no se tiene el problema de la carga radial, ya que todo el peso es soportado por el eje de la llanta de bicicleta.

Corrosivos o rociados

Para la mayoría de las aplicaciones, los encapsulados de aluminio con una cubierta de una película química final son suficientes para asegurar una protección adecuada. Sin embargo, si el codificador será empleado en ambientes corrosivos, se debe considerar un anodizado final robusto con una cubierta de dicromato. Para el caso del perfilógrafo, no operará en ambientes corrosivos, por lo cual se cuenta únicamente con la cubierta de aluminio y la capa química de protección en el modelo seleccionado.

Temperaturas extremas

La especificación de la temperatura del codificador seleccionado debe de ser consistente con la aplicación, de 0 a 70 °C es la temperatura de operación estándar para los codificadores industriales. Según el fabricante, se tienen disponibles grados de temperatura extendidas de – 55 a 105 °C, dependiendo del modelo. Para el caso particular del perfilógrafo se tiene como temperatura de operación del mismo 0 a 70° C, por lo cual no se requirió del rango extendido de temperatura.

Ambientes peligrosos

La aplicación puede requerir una certificación especial, tales como prueba de explosión. Pruebas de esta certificación determinan que si ciertos gases inflamables se filtran dentro de la carcasa del codificador y hacen ignición por la electrónica interna, la flama o explosión resultante no sea capaz de escapar de la carcasa y hacer ignición en la atmósfera que lo rodea. Codificadores con un diseño especial se encuentran disponibles para alcanzar la especificación apropiada. En el caso del perfilógrafo no se presenta el inconveniente de ambientes peligrosos, por lo cual no se seleccionó un modelo que requiriera de una certificación especial.

Ambientes húmedos o sucios

Si la aplicación requiere de la operación en ambientes de líquido o sucios, el codificador deberá ser seleccionado de acuerdo a estos requerimientos. Un sellado adecuado debe asegurar la prevención de contaminación, particularmente a través del uso del ensamblado. Los contaminantes que se filtran en el mecanismo de rotación pueden degradar rápidamente el desempeño del codificador. En el interior del codificador se puede bloquear los componente ópticos o dañarse la tarjeta del circuito electrónico. Generalmente se recomienda un sello en el eje del mecanismo de rotación y debe de ser usado en aplicaciones donde haya líquidos presentes.

Si se anticipa la exposición al líquido, se pueden especificar una prueba de filtración. Para el caso del perfilógrafo se seleccionó un modelo que fuese capaz de soportar humedad, ya que el perfilógrafo en un momento dado puede recibir agua de lluvia, y por esta razón se seleccionó un modelo a prueba de humedad.

Ambientes eléctricamente ruidosos

El incremento del uso de sistemas de automatización en fábricas implica trabajar en ambientes ricos en señales eléctricas que pueden crear interferencia electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés). Alguna protección contra esta interferencia puede ser alcanzada utilizando cable blindado, especialmente en conjunto con el uso de conductores de par trenzado. Cuando

este tipo de cables es utilizado con el codificador, una mejora significativa en la inmunidad al ruido puede ser alcanzada. Aunque en el caso del perfilógrafo no operará en un ambiente industrial, éste estará alimentado por un generador portátil de gasolina, el cual genera una gran cantidad de ruido eléctrico, por lo cual se emplearon cables blindados de par trenzado y líneas diferenciales en la tarjeta de adquisición.

Codificador angular incremental

El codificador seleccionado para la instrumentación del perfilógrafo es el que se muestra en la figura 2.10. El codificador combina las características de alta duración, usualmente asociadas con codificadores sellados dentro de un eje con una perforación. Este diseño incluye un mecanismo de rotación dual o doble y sellos con características ambientales NEMA 4, 13 e IP65, una cubierta robusta de metal y un conector para el cable.



Figura 2.10. Codificador angular incremental.

Este diseño de bajo perfil, de sólo 2 pulgadas de profundidad, es fácilmente montado a través de un eje. Asegurar el codificador al eje es sencillo con tornillos de amarre. La opción seleccionada de contar con un bloque de amarre anti-rotacional, mantiene la carcasa estable durante la operación. El codificador está diseñado para recibir ejes de hasta $\frac{3}{4}$ " en diámetro. Con inserciones aislantes opcionales puede ser montado sobre ejes de diámetro menor. Aplicaciones típicas para este tipo de codificadores incluyen su uso en el control de motores de corriente directa, la industria del papel, control de robots, y el control de procesos entre muchas otras aplicaciones.

Determinación del desplazamiento horizontal

La relación entre desplazamiento horizontal y el desplazamiento el codificador angular incremental es directa, ya que dicho codificador entrega una determinada cantidad de pulsos por cada una de las revoluciones que da, al estar montado directamente en el eje de la llanta sensora, el número de giros que dé es el mismo número de giros dado por la llanta sensora, como conocemos la distancia recorrida en un giro completo por la llanta sensora, es fácil inferir el desplazamiento por cada pulso entregado por el codificador angular.

La llanta sensora que se empleará en el perfilógrafo será una rueda de bicicleta rodada 26, es decir, el diámetro de dicha rueda es de 26 pulgadas, sin embargo, haciendo una medición detallada se encontró que el diámetro real de la rueda es de 26.44 pulgadas. Es importante tener el diámetro exacto, ya que de esto depende la correcta medición de la distancia horizontal. Si se omitieran las 0.44 pulgadas del diámetro real, tendríamos un error de exactamente ese valor por cada revolución, y dado que la llanta sensora gira varios cientos de veces por cada una de las pruebas, el error acumulado sería muy elevado. El diámetro real de la rueda sensora en metros es de:

$$26.44 \text{ pulgadas} = 0.671576 \text{ metros}$$

Tomando en cuenta el dato real obtenemos una circunferencia de la rueda de: 2.1098 metros.

Ahora bien, el codificador angular seleccionado entrega 250 pulsos por revolución, por lo que cada pulso entregado por el codificador angular representa un avance de

$$\text{Avance por pulso} = (2.1098/250) = 0.008439272 \text{ metros}$$

De tal forma que al completar una revolución completa, es decir, 250 pulsos, se tendrá el avance total de la circunferencia de 2.1098 metros. Al registrar tres pulsos nos permite detectar un avance de 1 pulgada, que como se mencionó es el dato requerido de resolución horizontal; sin embargo, si tomamos cada uno de los pulsos enviados, la resolución horizontal mejora.

En la figura 2.11 se muestra un esquema del codificador angular montado en el eje de la llanta sensora. En dicha figura también se muestra el brazo que une la llanta con la estructura del perfilógrafo.

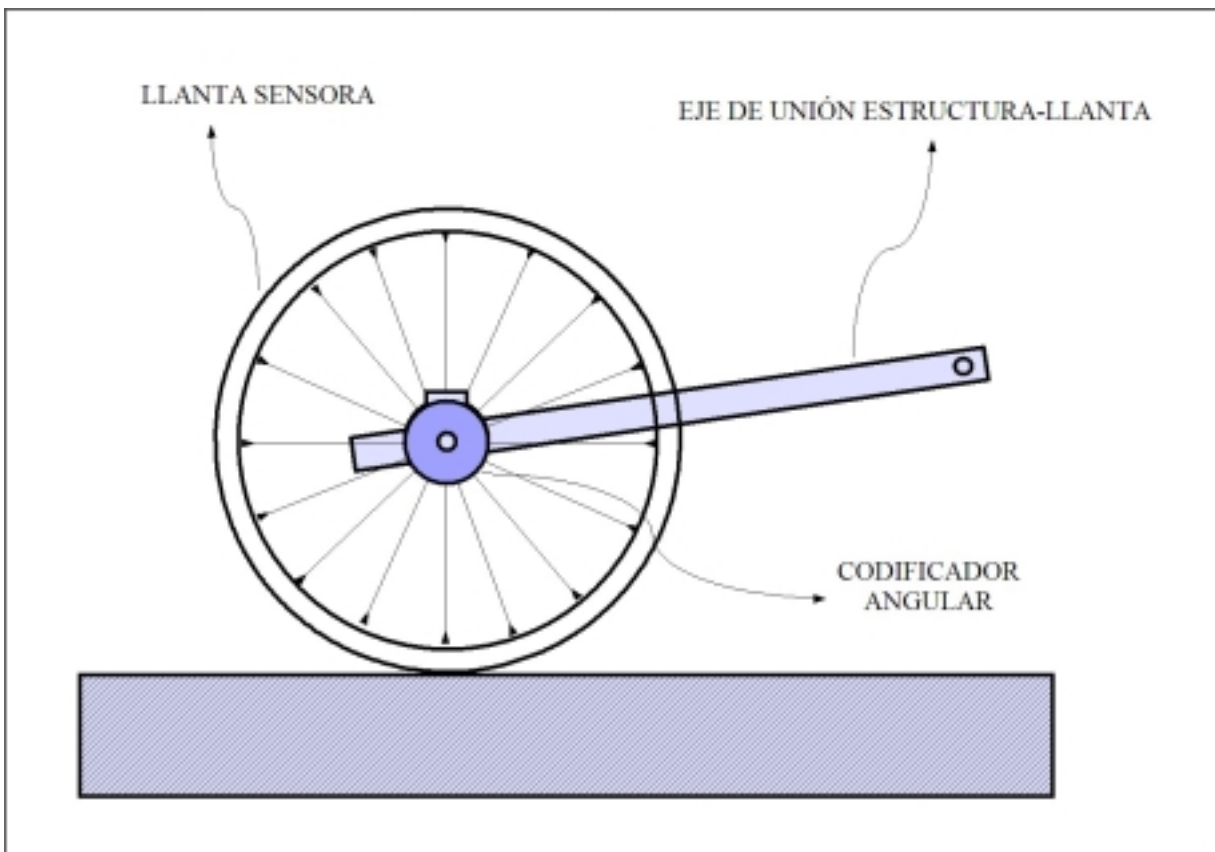


Figura 2.11. Montaje de codificador angular en la llanta sensora.

Fuente de alimentación

Para su operación, el codificador angular requiere de fuentes de alimentación de voltaje, las cuales pueden ser solicitadas de 5 o 24 V de DC. En nuestro caso se seleccionó el transductor para que opere con una fuente de alimentación de 5 V de DC, a 250 mA. La misma compañía que diseña el transductor ofrece la fuente de alimentación que cumple con las características de corriente y voltaje requeridas, además de algunas otras características de protección. La fuente de alimentación seleccionada puede ser alimentada con voltaje de DC y de AC en un rango muy amplio, cuenta con protección contra transitorios y protecciones contra electricidad estática, entre algunas otras características que se muestran en la tabla 2.2. En la figura 2.12 se presenta una imagen de la fuente de alimentación.

| | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Voltaje de entrada | 85 a 254 V AC 110 a 350 V DC |
| Frecuencia (AC) | 45 a 65 Hz |
| Protección contra transitorios | Varistor |
| Variación de voltaje de salida | ± 1 % |
| Corriente de salida | 4 A |
| Eficiencia | 70 % |
| Temperatura de operación | 0 a + 55 °C |

Tabla 2.2 Características técnicas fuente de alimentación del codificador angular.



Figura 2.12. Fuente de alimentación del codificador angular.

II.4.2. Medición del desplazamiento vertical

Dado el diseño de la estructura mecánica del perfilógrafo, un transductor de desplazamiento angular (ADT, por sus siglas en inglés) es ideal para la medición del desplazamiento vertical, ya que el brazo que une la llanta sensora con la estructura mecánica sufre un desplazamiento que es proporcional a las variaciones de la superficie sobre la cual se desplaza. El transductor opera bajo un principio capacitivo y cuenta con la electrónica de acondicionamiento necesaria para entregar un voltaje de CD proporcional al desplazamiento angular de su eje.

El transductor de desplazamiento angular seleccionado (figura 2.12) está constituido por un capacitor diferencial con un rotor móvil conectado al eje, una estructura de rodamiento de precisión y la electrónica de acondicionamiento de señal para la operación con voltajes de entrada y salida de DC. El sensor capacitivo en el interior del transductor consiste de una tarjeta de transmisión, el rotor, y una tarjeta de recepción. La tarjeta de recepción está dividida en segmentos discretos, con el número exacto de segmentos determinados por el máximo margen usable para el cual el transductor de desplazamiento angular está diseñado. El rotor está colocado entre las tarjetas de transmisión y de recepción, separadas únicamente por unas cuantas centésimas de pulgada; se encuentra montado sobre un eje de acero inoxidable. Parte de este eje está soportado por dos mecanismos de rotación de precisión, montados en la base del transductor. Este ensamblado es un elemento importante de todo el diseño, ya que su función es la de mantener el par de torsión de inicio y de carrera libre en un valor mínimo. Las tarjetas electrónicas contienen los circuitos del oscilador/demodulador y del filtro, los cuales están montados en serie con el capacitor, la señal de salida del conjunto es llevada a un conector industrial de larga duración, dicho conector se encuentra sujetado a una cubierta de aluminio anodizado. La base y el ensamblado de la cubierta están asegurados juntos con tornillos, resultando en un ensamblado final muy robusto. En la figura 2.13 se muestra un esquema de la construcción interna del ADT.

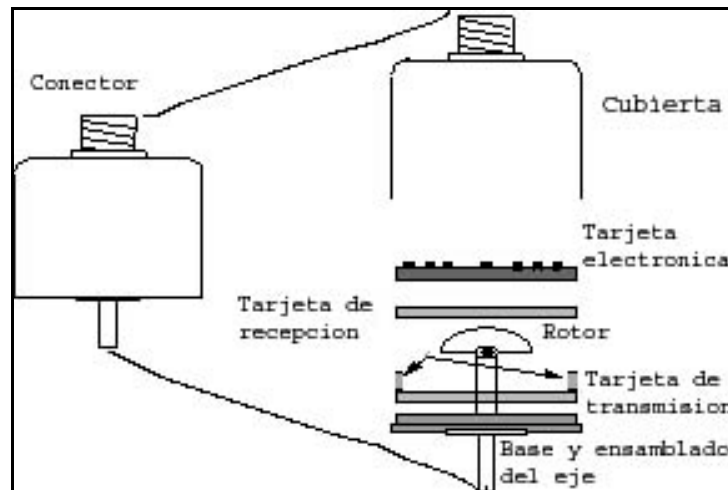


Figura 2.13. Esquema de la construcción del ADT.

El transductor es de manera inherente un dispositivo de AC, requiriendo por ello de una señal de AC de alta frecuencia para excitar el elemento capacitivo. El transductor contiene toda la electrónica necesaria para operar también con señales de DC, tanto en la entrada como en la salida. La electrónica del ADT consiste de un oscilador de precisión, el capacitor diferencial variable, un demodulador y circuitos de filtrado de ruido (figura 2.14). Un voltaje de DC es aplicado a las terminales de entrada del ADT, el cual alimenta al oscilador de precisión. El oscilador genera una señal de alta frecuencia (400-500 kHz) de voltaje de AC, el cual es aplicado a la tarjeta de transmisión del capacitor. La tarjeta de recepción está montada muy próxima a la tarjeta de transmisión, y completa la otra sección del capacitor en el circuito. La tarjeta de recepción está dividida en secciones, el número y la forma está determinada por el ángulo máximo que el transductor medirá. Las secciones de la tarjeta de recepción funcionan como una tierra virtual y actúan como el estator en el ensamblado.

La forma física del rotor está también determinada por el ángulo máximo a medir del transductor. El rotor está eléctricamente conectado a tierra a través de un contacto mecánico y bloquea el flujo de electrones entre las tarjetas de transmisión y de recepción. Al cambiar la posición del rotor cambiará el nivel de capacitancia entre los segmentos de la tarjeta de recepción. Mediante la diferencia en la capacitancia entre los segmentos se genera una salida de voltaje, cuyo valor es proporcional al movimiento angular del eje.

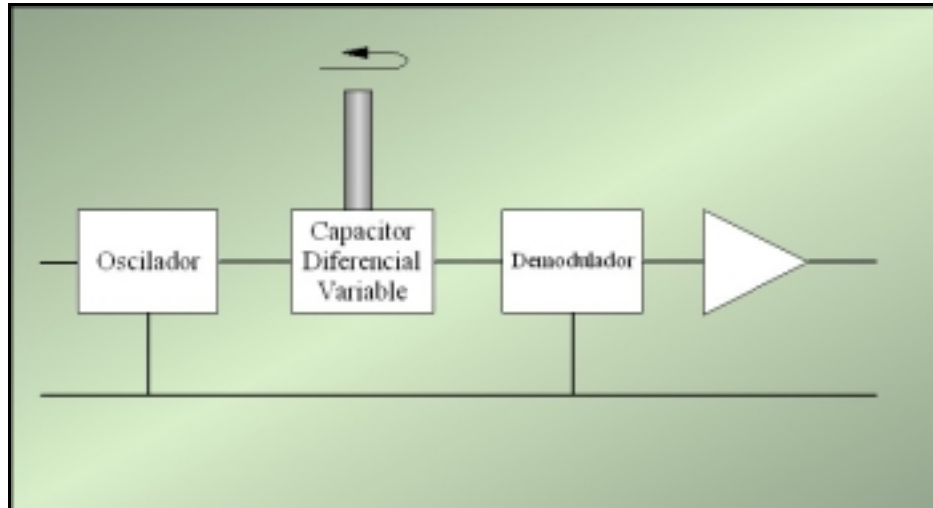


Figura 2.14. Diagrama de bloques del ADT.

Hay dos configuraciones principales que se generan con la tarjeta de recepción y la geometría del rotor. Para la primera configuración, la tarjeta de recepción está dividida en cuatro secciones, figura 2.15(a), diseñada para transductores con ángulo de medición máximo de $\pm 30^\circ$. En el estator, las secciones A y D se encuentran conectadas entre sí, así como las secciones B y C; para realizar la medición correspondiente al desplazamiento angular la capacitancia de esas dos secciones es restada. Cuando la mitad del rotor está posicionada sobre las secciones A y C, como se muestra en la misma figura, la capacitancia sobre cada sección será la misma, y la diferencia será de cero. A medida que el rotor se mueve en sentido de las manecillas del reloj o en contra, la capacitancia de una sección comienza a ser mayor que el de la otra sección, y la salida diferencial es proporcional a la distancia angular que se ha movido desde el punto de cero.

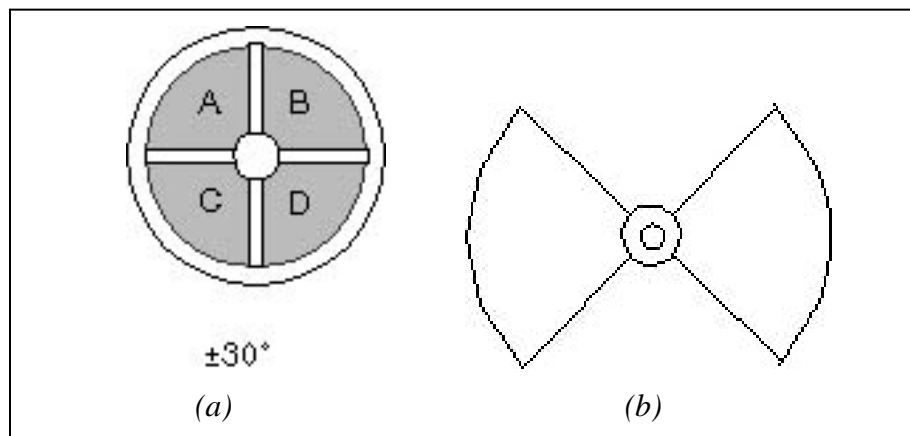


Figura 2.15. Tarjeta de recepción(a) y rotor (b) para dispositivos con rango de $\pm 30^\circ$.

En la segunda configuración la tarjeta de recepción está dividida en dos secciones, diseñada para transductores con un ángulo de medición de $\pm 60^\circ$. Esto se muestra en la figura 2.16. La capacitancia de las secciones A y B es restada. Cuando la mitad del rotor está posicionada sobre la sección A, como se muestra en la misma figura, la capacitancia de cada sección será igual y la diferencia entre ambas será de cero. A medida que el rotor se mueve en sentido de las manecillas del reloj o en el sentido contrario, la capacitancia de una sección comienza a ser mayor que la de la otra sección y la salida diferencial es proporcional a la distancia angular recorrida desde el punto de cero.

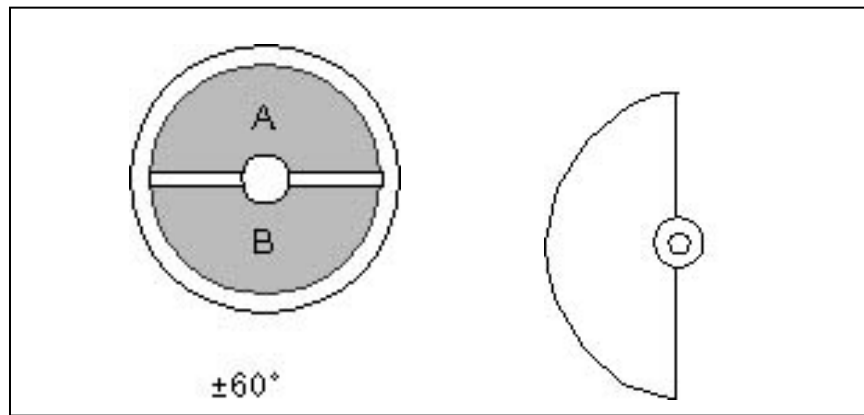


Figura 2.16. Tarjeta de recepción y rotor para ADTs con rango de medición de $\pm 60^\circ$.

Para el diseño final del perfilómetro se seleccionó un ADT con rango de medición de $\pm 30^\circ$, ya que con esta variación angular es posible cubrir la variación lineal máxima a medir por el sistema, la cual es de ± 2 pulgadas, esto último se logrará a través de una conversión del desplazamiento angular a desplazamiento lineal. Además de cubrir el margen mencionado completo, se requiere que el transductor tenga una resolución muy buena, en este caso para poder detectar 0.08 milímetros de desplazamiento vertical.

El modelo de transductor seleccionado entrega un alto nivel de voltaje de DC, que es directamente proporcional al desplazamiento angular del eje con un alto grado de conformidad. La rotación es continua y no tiene un par de torsión reactivo. El desempeño confiable es asegurado por la ausencia de cualquier contacto de fricción de alta velocidad.

Entre las características eléctricas principales del transductor se tienen las siguientes: el rango de desplazamiento en ambos sentidos es de $\pm 30^\circ$, tiene una linealidad de $\pm 0.05\%$, un voltaje de salida de $100 \text{ mV}/^\circ$ y la resolución es infinita. La corriente de alimentación de 30 mA , la velocidad angular máxima de $1,440 \text{ }^\circ/\text{seg}$, tiene una respuesta en frecuencia superior a los $1,500 \text{ Hz}$, el voltaje de alimentación es de 15 Vdc , cuenta además con protecciones contra corto circuito y polarización errónea. Con esta característica podemos realizar mediciones de desplazamiento muy reducidos y satisfacer la resolución requerida.

En cuanto a las características mecánicas del transductor, de entre otras, se tienen las siguientes: el rango de desplazamiento es continuo, el par de torsión de inicio máximo es de 5.0 gm/cm , el par máxima de carrera libre es de 3.5 gm/cm , el momento de inercia del rotor de 6 gm/cm^2 , la máxima carga radial es de 10 libras , su peso nominal de 352 gm y el rango de temperatura es de operación de -55°C a $+125^\circ\text{C}$. En la figura 2.17 se muestra una imagen de este tipo de transductor.



Figura 2.17. Transductor de desplazamiento angular.

Relación entre el desplazamiento angular del ADT y el desplazamiento lineal

El perfilógrafo es un dispositivo que mide los desplazamientos vertical y horizontal, y en particular el desplazamiento vertical es que el determina el perfil del pavimento; con el desplazamiento horizontal se determina el lugar preciso de la deformación. En la instrumentación del perfilógrafo se empleó, sin embargo, un transductor de desplazamiento angular para la medición indirecta del desplazamiento vertical sufrido por la llanta sensora. Razón por la cual es necesario realizar la conversión de dicho desplazamiento angular al desplazamiento lineal. La figura 2.18 muestra la configuración empleada y se observa que es posible relacionar el desplazamiento angular con el lineal mediante trigonometría simple.

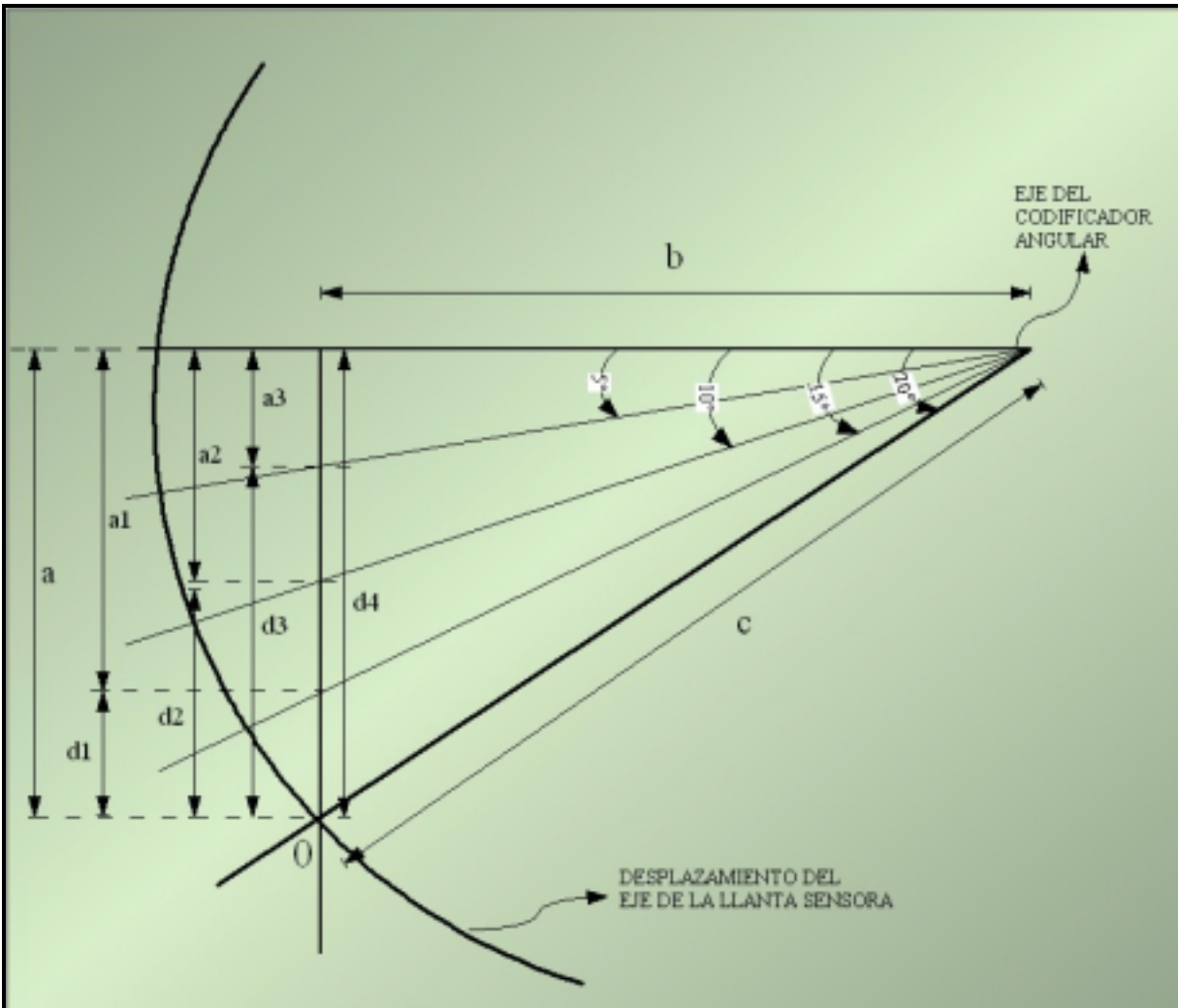


Figura 2.18. Relación entre el desplazamiento lineal y la rotación.

El transductor de desplazamiento angular se encuentra montado en el eje de uno de los extremos del brazo que se encuentra unido, en su otro extremo, con el eje de la llanta sensora. Al subir o bajar la llanta por una protuberancia o una depresión de la superficie, el movimiento es transmitido al transductor, sin embargo, la señal de voltaje corresponderá al desplazamiento angular, y en la aplicación tenemos interés por el desplazamiento vertical real, figura 2.17. Para poder conocer el desplazamiento real se debe tener una referencia o desplazamiento inicial, al comenzar cualquier medición, y debido a la disposición del sensor en la estructura, la referencia inicial estará dada por un desplazamiento angular inicial. Para analizar dicha situación, supongamos que el desplazamiento inicial o de referencia corresponde con el desplazamiento formado por el triángulo rectángulo abc, y cuyo ángulo formado por los ejes bc es de 20 grados, al ángulo formado lo designaremos α . De la figura 2.18 puede deducirse que:

$$\text{sen}\alpha = \frac{a}{c} \quad (2.1)$$

$$\text{cos}\alpha = \frac{b}{c} \quad (2.2)$$

La longitud del brazo de palanca (distancia “c”) es de exactamente 1 metro, por lo que si el ángulo inicial α es de 20° , tenemos que:

$$a = c \text{ sen}\alpha = 1(\text{sen}20^\circ) = 0.342m$$

$$b = c \text{ cos}\alpha = 1(\text{cos}20^\circ) = 0.940m$$

Ahora, suponiendo que de su posición inicial el brazo de palanca sufre un desplazamiento angular de 5° , lo que origina un desplazamiento lineal $d1$, tendremos que el valor de éste último se podrá obtener con el siguiente procedimiento, es decir el desplazamiento angular entre la horizontal y el brazo de palanca ahora es de 15° , y dado que la distancia b se mantendrá constante, formando varios triángulos rectángulos a lo largo del desplazamiento angular, lo que a su vez nos permitirá inferir el desplazamiento vertical $d1$, para determinar $a1$ tenemos:

$$\tan \alpha = \frac{a_1}{b} \quad (2.3)$$

Despejando a_1 , tenemos:

$$a_1 = b \tan \alpha = 1 \tan 15^\circ = 0.268 \text{ m}$$

Finalmente,

$$d_1 = a - a_1 = 0.342 - 0.268 = 0.074 \text{ m}$$

De tal forma que el desplazamiento vertical real experimentado es el que se tenía como referencia menos el desplazamiento que se obtuvo con la nueva variación angular del transductor.

Así mismo, para un desplazamiento de 10° respecto a la horizontal y tomando como referencia el mismo desplazamiento original de 20° , se tiene:

$$a_2 = b \tan \alpha = 1 \tan 10^\circ = 0.176 \text{ m}$$

$$d_2 = a - a_2 = 0.342 - 0.176 = 0.166 \text{ m}$$

El desplazamiento sufrido en este caso a partir de la referencia inicial es de 0.166 metros.

Considerando un último caso, en el cual se tiene un ángulo de desplazamiento respecto de la horizontal de 5° , se tiene que el desplazamiento vertical sufrido por la llanta sensora es de:

$$a_3 = b \tan \alpha = 1 \tan 5^\circ = 0.087 \text{ m}$$

$$d_3 = a - a_3 = 0.342 - 0.087 = 0.255 \text{ m}$$

Obviamente, para un ángulo de 0° el desplazamiento total será el que se tenía como referencia. El método descrito para calcular el desplazamiento vertical aplica para ángulos positivos, como es el caso de los calculados, o bien para ángulos negativos, considerados cuando

el desplazamiento supera la línea horizontal de 0° de desplazamiento. En la figura 2.19 se muestran varias situaciones de la llanta sensora y puede verse claramente el desplazamiento del eje y los desplazamientos de interés, los cuales se marcan un líneas punteadas verticales.

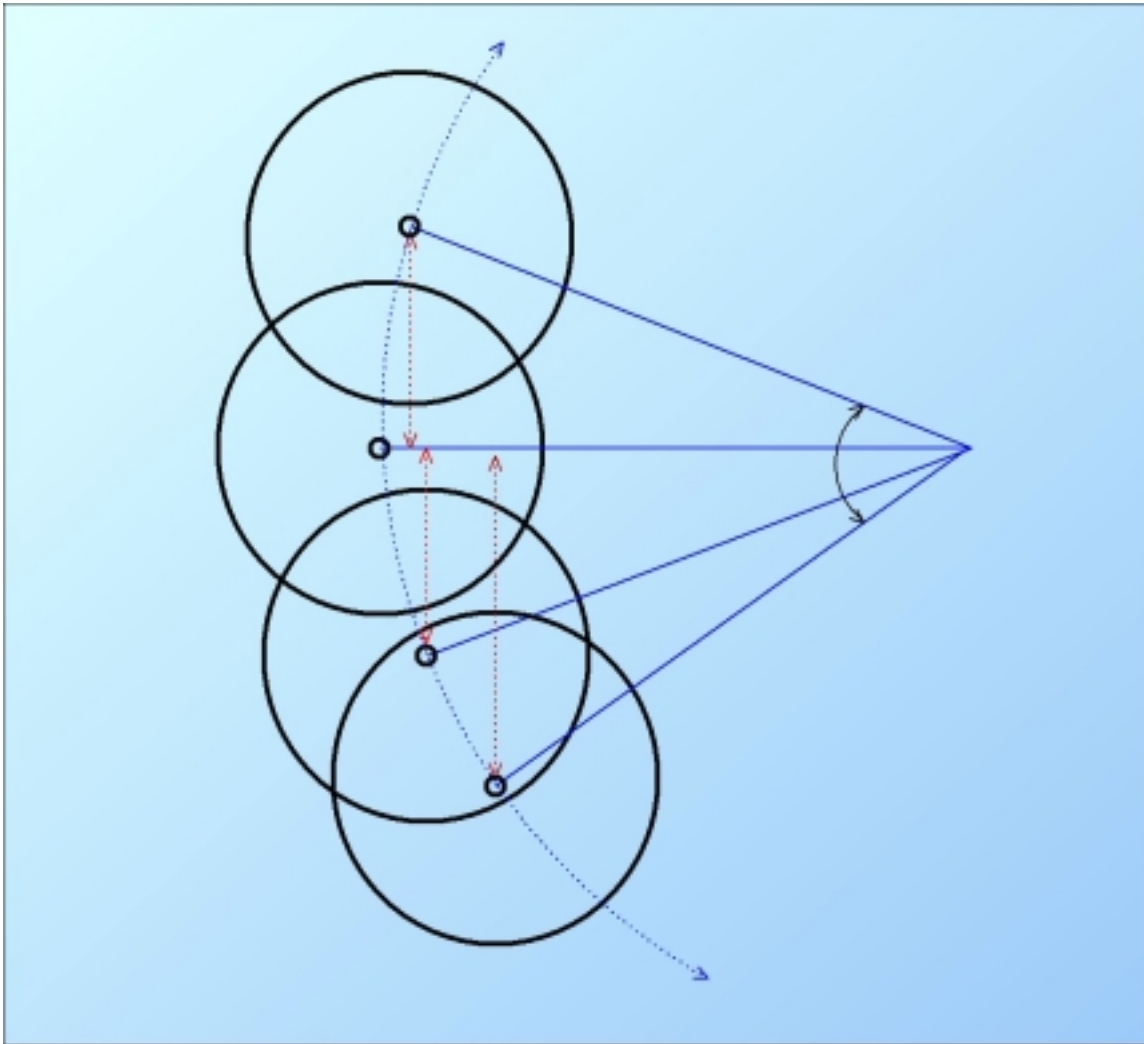


Figura 2.19. Desplazamiento vertical de la llanta sensora y desplazamientos de interés.

Para que el algoritmo descrito anteriormente funcione de manera adecuada, es necesario contar con un desplazamiento inicial, que sirva como referencia al resto de las mediciones. Este desplazamiento inicial se tomará mediante una calibración del sistema. En esta calibración se tomarán lecturas de diferentes elevaciones sobre una placa de aluminio con dimensiones de una y dos pulgadas. Este procedimiento se describe más adelante a detalle en un apartado dedicado

completamente a la calibración del sistema. Los valores obtenidos en la calibración servirán como desplazamientos de referencia.

Procesamiento de la señal de desplazamiento angular

El transductor de desplazamiento angular entrega un voltaje de DC que es proporcional a la variación angular de su eje, y tiene una salida de $100 \text{ mV}/^\circ$, por ejemplo, para una variación de medio grado se tendrá 50 mV , para una variación de un cuarto de grado se tendrá 25 mV y así sucesivamente, esto implica que la limitante en cuanto a la resolución que se puede obtener por parte del sistema radica en la elección del convertidor analógico digital a emplear, cabe comentar que esta señal no requiere ser amplificada. En el caso de la instrumentación del perfilógrafo se empleará el convertidor analógico digital de la tarjeta de adquisición de datos, el cual cuenta con una resolución de 12 bits. En cuanto a la velocidad de conversión, éste no es un dato crítico, ya que las señales son lentas y no requieren de un convertidor de alta velocidad. En la figura 2.20 se muestra un esquema del montaje de cómo quedaría el transductor de desplazamiento angular en la estructura del perfilógrafo.

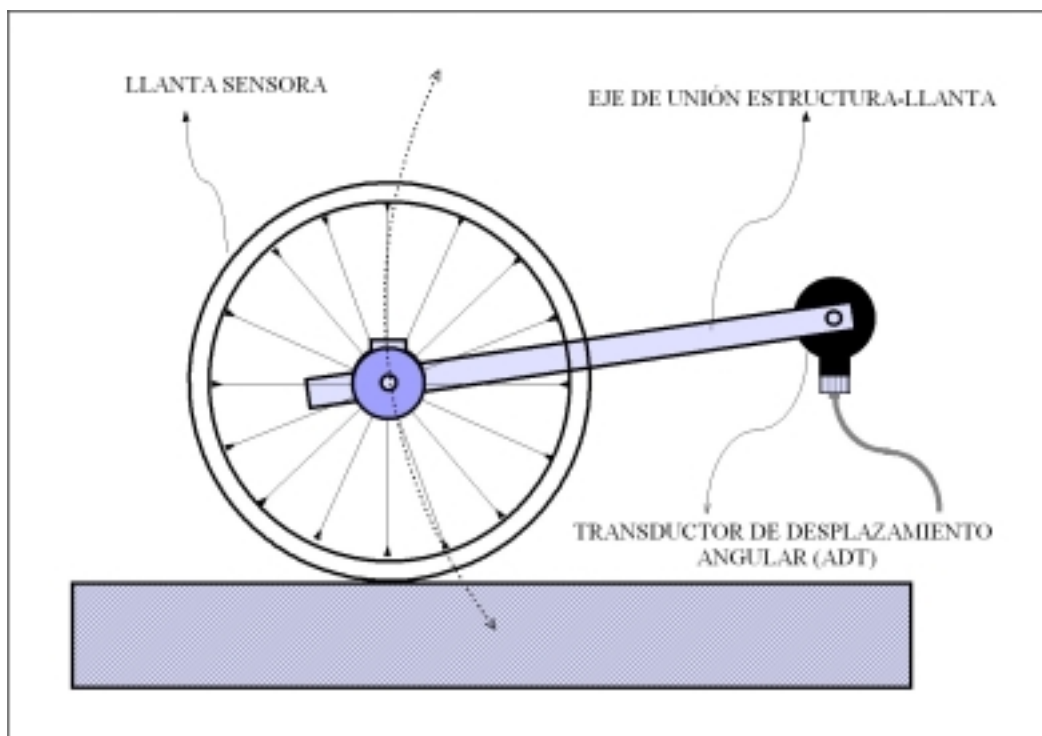


Figura 2.20. Montaje del ADT.

Fuente de alimentación

El transductor de desplazamiento angular requiere de una fuente de alimentación que con un margen de voltaje de 12 a 16 V de DC, aunque el fabricante recomienda una polarización de 15 V. Al igual que en el caso del codificador angular, el fabricante ofrece la fuente de alimentación para el transductor. La tabla 2.3 muestra las características técnicas de la fuente y la figura 2.21 muestra una imagen de la misma.

| | |
|----------------------------------|----------------|
| Voltaje de entrada | 105 a 125 V AC |
| Variación de voltaje a la salida | $\pm 1 \%$ |
| Ruido | 1 V RMS Máximo |
| Aislamiento de entrada | 50 Mega Ohm |
| Temperatura de operación | -25 ° a +71 °C |
| Voltaje de salida | 15 V DC |

Tabla 2.3. Características técnicas de la fuente de alimentación del ADT.



Figura 2.21. Fuente de alimentación del ADT.

II.5. Sensor de temperatura

Un tercer sensor a emplear en la instrumentación del perfilógrafo es el de temperatura, se decidió agregar dicho dato a los reportes como una referencia a las condiciones de temperatura en las cuales se realizó la prueba, y tenerla como una referencia para comparar los desgastes de los pavimentos en función de la temperatura a la cual normalmente se encuentran expuestos. Dicho sensor se encuentra en el bloque de conexiones de todas las señales provenientes de los sensores.

El sensor a utilizar en la medición de temperatura es el circuito integrado (CI) de la serie LM35, que es un sensor de temperatura de precisión, cuya salida es linealmente proporcional a la temperatura Celsius ($^{\circ}\text{C}$). El CI LM35 tiene una ventaja sobre los sensores de temperatura lineales calibrados en grados Kelvin, el usuario no requiere de restar un voltaje constante de su salida para obtener la escala centígrada conveniente. El LM35 no requiere de ninguna calibración externa para proporcionar precisiones típicas de $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$ a temperatura ambiente y $\pm 3/4^{\circ}\text{C}$ en el margen de temperatura total de -55 a 150°C . Su bajo costo es asegurado por un ajuste en calibración a nivel de la oblea de silicio. La baja impedancia de salida del LM35, su salida lineal y calibración precisa inherente, hacen que la interfaz para lectura o control sea especialmente sencilla. El sensor puede ser empleado con una sola fuente de alimentación positiva o bien con fuentes de alimentación negativas. Consume sólo $60\mu\text{A}$, tiene un autocalentamiento muy bajo. Para el caso de la instrumentación del perfilógrafo se requiere cubrir el margen de -10 a 110°C , el cual cubre el LM 35.

II.6. Tarjeta de adquisición de datos

Una vez que se han definido las señales con las que se trabajará, se debe seleccionar el sistema de medición. En el caso del perfilógrafo se tienen dos señales con las cuales se debe trabajar: una es la señal del transductor de desplazamiento horizontal, la cual como se mencionó anteriormente, es una señal de tipo digital, que para su adquisición y procesamiento se requiere de un canal digital que maneje niveles de voltaje TTL; y la señal del transductor de desplazamiento vertical, que es una señal de tipo analógica y por lo tanto se requiere de un canal analógico. La señal de desplazamiento vertical se debe convertir a una señal de tipo digital, empleando un

convertidor analógico digital, para que de esta forma la computadora la pueda procesar. Algunos de los factores que se deben tomar en cuenta en el manejo de esta señal son: la resolución del convertidor A/D, el margen de la señal y el margen del dispositivo.

II.6.1. Resolución del convertidor A/D

El número de bits empleado para representar una señal analógica determina la resolución del convertidor A/D. Podemos comparar la resolución de un convertidor A/D con las marcas en una regla, entre más marcas tengamos más precisa resultará la medición que hagamos. De manera similar, al aumentar la resolución, aumentamos el número de divisiones en las cuales el sistema puede dividir el margen de conversión A/D, y por lo tanto detectar cambios mucho más pequeños. Un convertidor A/D de 3 bits puede dividir el margen en 8 divisiones. Un código digital o binario entre 000 y 111 representa cada división. El convertidor A/D traslada cada medición de la señal analógica en una de las divisiones digitales. La figura 2.22 muestra la imagen de una onda senoidal como es obtenida con un convertidor A/D de 3 bits. Claramente, la señal digital no representa la señal original de forma adecuada, debido a que el convertidor tiene muy pocas divisiones para representar las variaciones de voltaje de la señal analógica. Al incrementar la resolución a 16 bits, por ejemplo, el número de divisiones se incrementa de 8 a 65,536 (2^{16}). El convertidor A/D puede ahora obtener de manera extremadamente precisa la representación de la señal analógica.

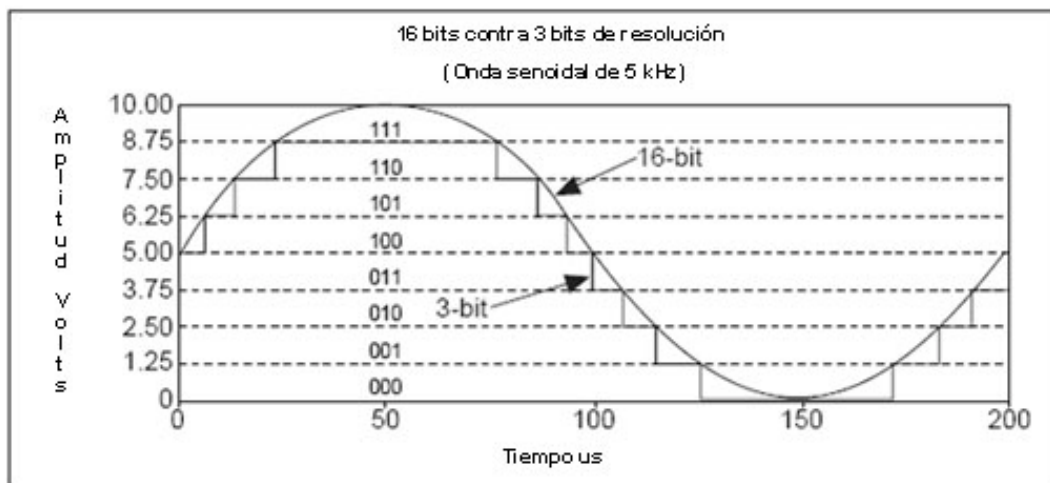


Figura 2.22. Conversión A/D utilizando 3 y 16 bits.

II.6.2. Margen del convertidor A/D

El margen del convertidor se refiere al nivel mínimo y máximo de la señal de entrada que el convertidor A/D puede digitalizar. Varios dispositivos de adquisición de datos poseen la característica de contar con márgenes variables, de tal manera que la señal tome la mayor ventaja de la resolución. Por ejemplo, en la figura 2.23 el convertidor A/D de 3 bits tiene un total de ocho divisiones en el rango de 0 a 10 volts. Si se selecciona el rango de -10.00 a 10.00 volts, como se muestra en la gráfica de la derecha, el mismo convertidor A/D separa el rango de 20 volts en 8 ocho divisiones. El cambio de voltaje detectable más pequeño se incrementa de 1.25 a 2.50 volts, y ahora tenemos una representación mucho menos precisa de la señal.

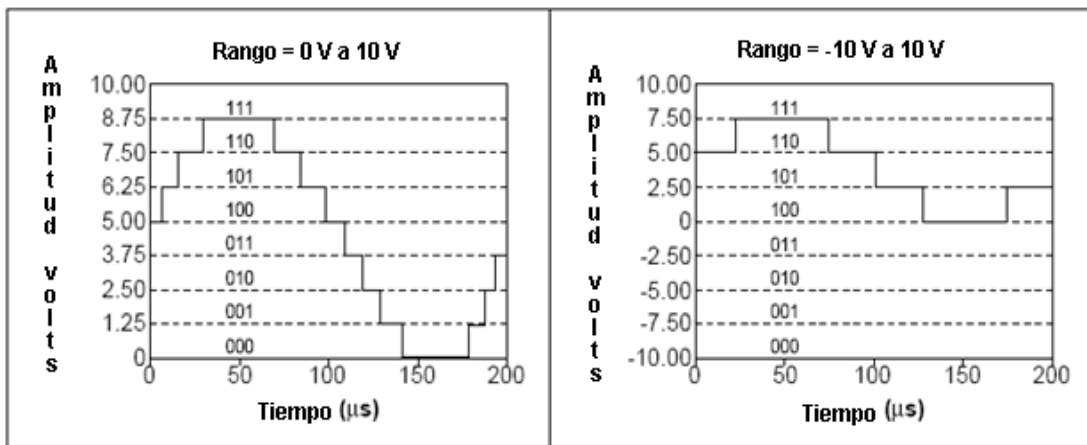


Figura 2.23. Margen del convertidor A/D.

II.6.3 Límites de la señal de entrada

En LabVIEW los límites de la señal se refieren a los valores mínimo y máximo de la señal que se está midiendo. Un límite establecido de manera más precisa permite al convertidor analógico digital emplear más divisiones digitales para representar la señal. La figura 2.24 muestra un ejemplo para esta teoría; empleando un convertidor ADC de 3 bits, la figura muestra los efectos al establecer los límites entre 0.00 y 5.00 volts y entre 0.00 y 10.00 volts, para una señal de entrada cuyos niveles de voltaje máximos son del orden de 5 volts. Con los límites establecidos en 0.00 y 10.00 volts, el convertidor analógico digital utiliza únicamente cuatro de las ocho divisiones para la conversión de la señal de entrada. Pero al emplear límites entre 0 y 5

volts, el convertidor accede a los ocho niveles de división digital. Esto último hace la representación digital de la señal más precisa.

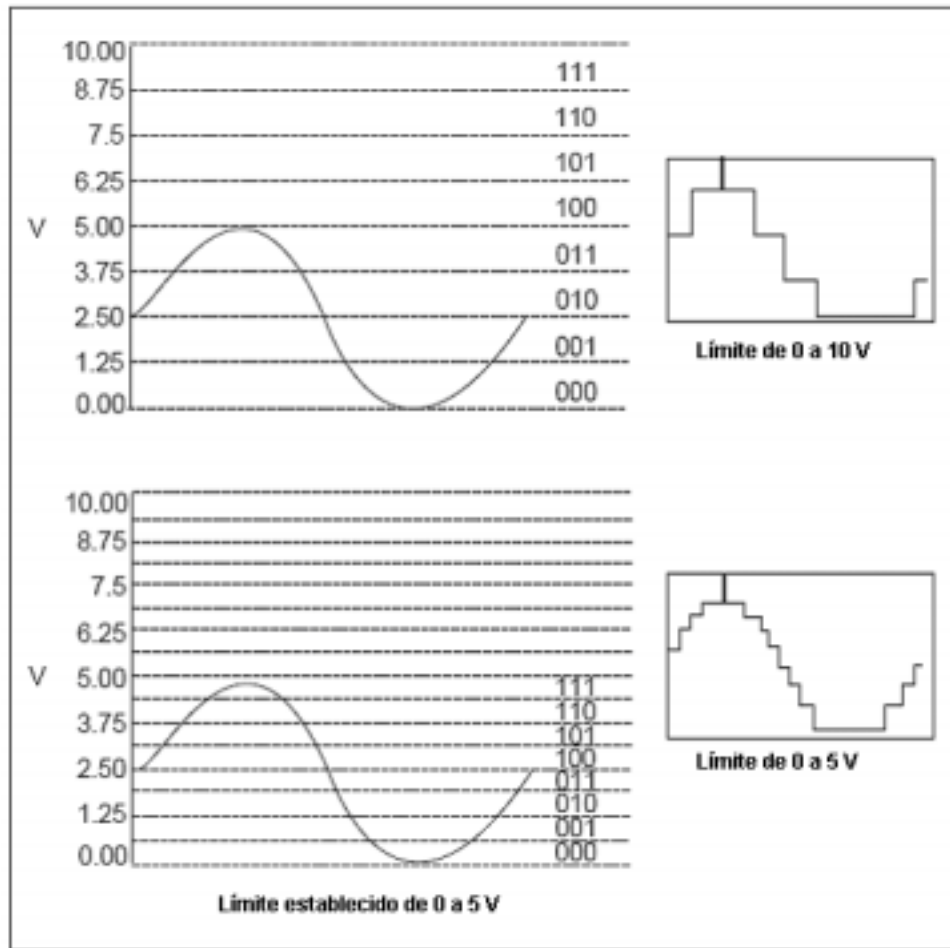


Figura 2.24. Límites de la señal de entrada.

II.6.4. Consideraciones para la definición de las características de la señal de entrada

La resolución y el margen de medición de un dispositivo de adquisición de datos determinan el cambio mínimo detectable en la señal de entrada. Se puede calcular el cambio mínimo detectable, llamado *ancho de código*, empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Ancho de código} = \frac{\text{MARGEN DEL DISPOSITIVO}}{2^{\text{resolución}}} \quad (2.4)$$

Por ejemplo, un dispositivo de adquisición de datos con un margen de entrada de 0 a 10 volts y una resolución de 12 bits, detecta un cambio de 2.4 mV; mientras que el mismo dispositivo en un rango de -10 volts a 10 volts detecta únicamente un cambio de 4.8 mV.

$$\frac{\text{MARGEN DEL DISPOSITIVO}}{2^{\text{resolución}}} = \frac{10}{2^{12}} = 2.4mV$$

$$\frac{\text{MARGEN DEL DISPOSITIVO}}{2^{\text{resolución}}} = \frac{20}{2^{12}} = 4.8mV$$

Por otra parte, un convertidor de mayor resolución proporciona un ancho de código menor. Para los márgenes de voltaje anteriores y utilizando un convertidor de 16 bits, se tiene:

$$\frac{\text{MARGEN DEL DISPOSITIVO}}{2^{\text{resolución}}} = \frac{10}{2^{16}} = 0.15mV$$

$$\frac{\text{MARGEN DEL DISPOSITIVO}}{2^{\text{resolución}}} = \frac{20}{2^{16}} = 0.30mV$$

Entre más reducido sea el ancho del código más precisa será la medición.

Hay ocasiones en que la señal es unipolar o bien bipolar. Las señales unipolares son señales que van desde los 0 volts a un valor positivo de voltaje, por ejemplo de 0 a 5 volts. Las señales bipolares son señales que van de un valor negativo a uno positivo, por ejemplo de -5 a 5 volts. Para alcanzar un ancho de código menor si la señal es unipolar, se debe especificar el margen del dispositivo como unipolar, como se mostró anteriormente. Si el margen de la señal es menor que el margen del dispositivo se deben establecer los límites de la señal a valores que de manera más precisa reflejen el margen de la señal, esto es llevado a cabo a través de un cuadro de diálogo que LabVIEW muestra al usuario al momento de configurar la señal a adquirir. En la tabla 2.4 se muestra la variación en ancho de código de un convertidor analógico digital de 12 bits, con el margen del dispositivo y los límites de la señal de entrada.

| Margen de voltaje del dispositivo | Límites de la señal | Precisión |
|-----------------------------------|--|---|
| 0 a 10 V | 0 a 10 V 0 a 5 V 0 a 2.5 V 0 a 1.25 V 0 a 1 V 0 a 1.0 V 0 mV a 20 mV | 2.44 mV 1.22 mV 610 uV 305 uV 244 uV 24.4 uV 4.88 uV |
| -5 a 5 V | -5 a 5 V -2.5 a 2.5 V -1.25 a 1.25 V -0.0625 a 0.0625 V -0.5 a 0.5 V -50 mV a 50 mV -10 mV a 10 mV | 2.44 mV 1.22 mV 610 uV 305 uV 244 uV 24.4 uV 4.88 uV |
| -10 a 10 V | -10 a 10 V - 5 a 5 V -2.5 a 2.5 V -1.25 V a 1.25 V -1 a 1 V -0.1 a 0.1 V -20 mV a 20 mV | 4.88 mV 2.44 mV 1.22 mV 610 uV 488 uV 48.8 uV 9.76 mV |

Tabla 2.4. Precisión del convertidor A/D de acuerdo a los límites de la señal.

Para nuestra aplicación, los cambios mínimos de voltaje que se pueden medir son de 2.44 mV. Esto se obtiene al considerar que la resolución del convertidor A/D a utilizar en la medición del desplazamiento lineal es de 12 bits, que el transductor de desplazamiento angular nos entregará una señal con una variación de nivel de voltaje de -4.5 a 4.5 volts, aproximadamente, y si se selecciona como límite el rango de -5 V a +5 V, previendo que el sensor pudiese en un momento dado entregar un nivel de señal ligeramente por arriba del valor máximo, ya que la misma hoja de datos técnicos del sensor establece que puede existir un cierto intervalo de variación.

Como ya se mencionó líneas arriba, el transductor de desplazamiento angular entrega 100 mV por cada grado de variación, por lo que 2.44 mV, que es la lectura mínima que puede ser detectada por el convertidor, se traduce en un desplazamiento angular de 0.0244° , y aplicando la ecuación 2.2, podemos obtener el desplazamiento lineal mínimo que puede ser detectado, y que es de $425.86 \mu\text{m}$, el cual es un desplazamiento muy pequeño; de hecho para la obtención del

perfil, estamos interesados en poder detectar desplazamientos del orden de 1 milímetro, así que se cubren de sobra los requerimientos para la medición del perfil en los pavimentos.

II.6.5. Selección de la tarjeta de adquisición de datos

Con base en la información presentada en los apartados anteriores, se seleccionó la tarjeta de adquisición de datos (TAD). Esta tarjeta permitirá a la computadora adquirir los datos enviados por los sensores, así como su procesamiento para su representación gráfica en la pantalla.

Como características mínimas de la tarjeta se requería de: dos canales de entrada analógicos, uno para el registro de la señal del sensor de temperatura y otro para el registro de la señal del ADT, y dos canales de entrada digitales, para el registro de las señales de cuadratura provenientes del codificador angular.

Las señales mencionadas en el párrafo anterior se encuentran dentro de ciertos rangos de voltaje, mismos que la tarjeta de adquisición debe soportar. Por otro lado, para obtener la resolución necesaria en el desplazamiento vertical, se requiere que el convertidor analógico digital de la tarjeta de adquisición de datos sea de 12 bits de resolución.

Dado que se empleará una computadora portátil (*laptop*) para la creación del programa de interfaz de usuario, se requería que la tarjeta de adquisición pudiera ser insertada en ranuras CF-II, por lo cual debía ser una tarjeta con bus de comunicación PCMCIA (*Personal Computer Memory Card International Association*). Las características mencionadas en párrafos anteriores nos llevaron a la selección de la tarjeta PCMCIA seleccionada, figuras 2.25 y 2.26. Entre las características generales de dicha tarjeta pueden mencionarse las siguientes:

- Integración superior; se puede configurar y manejar mediante los siguientes entornos de desarrollo: LabVIEW, CVI y *Measurement Studio* para *Visual Basic* y *Visual Studio .NET*.

- Dos salidas analógicas; 8 líneas de entradas/salidas digitales; dos contadores de 24 bits; disparo analógico y digital.
- 8 entradas analógicas
- Certificado trazable de calibración expedido por el NIST y más de 70 opciones de acondicionamiento de señal.
- *Software* controlador NI-DAQmx incluido y servicios de medida adicionales.
- Tasa de muestreo de 500 kilomuestras por segundo.
- Rango de voltaje de la señal de entrada ± 10 V.



Figura 2.25. Tarjeta de adquisición de datos PCMCIA 6062E.



Figura 2.26. Inserción de la tarjeta de adquisición en la computadora.

II.6.6. Módulo y cables de conexión

Las señales provenientes de los transductores de desplazamiento deben conducirse de alguna forma a la tarjeta de adquisición de datos, esto se lleva a cabo a través de un cableado que incluye protección contra ruido a través de una malla que se conecta a la tierra del sistema. Estos cables no pasan directamente a la tarjeta de adquisición de datos, se conectan a un bloque, el cual, a través de un cable especial, se comunica con la tarjeta de adquisición de datos montada en una de las ranuras de la computadora.

Bloque de terminales de conexión

Para realizar las conexiones entre los sensores y la tarjeta de adquisición de datos se empleará un bloque de terminales de conexión de entrada/salida; el cual cuenta con 68 borneras para la conexión de los cables que portan la señal de los sensores y un conector de salida que a través de un cable se conecta a la TAD. Además, dicho bloque de conexiones cuenta con un área general para agregar e interconectar componentes electrónicos. También cuenta con un área para filtros RC, o bien sensor corriente (4-20 mA), detección de termopares abiertos y atenuación de voltaje.

Cabe comentar que la tarjeta de adquisición de datos se puede configurar para uno de tres modos de operación (NRSE, señales no referenciadas; RSE, señales con referencia simple o sencilla; ó DIFF, señales diferenciales). Una señal no referenciada, señal flotada, es una señal que no se encuentra conectada de ninguna forma a la tierra del sistema, pero que cuenta con una terminal aislada de tierra. Los instrumentos o dispositivos con salidas aisladas son considerados fuentes de señales flotadas, y tienen por lo tanto una trayectoria de alta impedancia hacia la tierra. Algunos ejemplos de fuentes de señales flotadas son las salidas de termopares, transformadores, dispositivos alimentados por baterías, aisladores ópticos y amplificadores de aislamiento. La referencia a tierra de una señal flotada debe ser unida a la tierra del dispositivo de adquisición de datos para establecer una referencia local sobre la señal.

Cuando se está midiendo fuentes flotadas diferenciales, se debe configurar el dispositivo para operar en este modo. Para proporcionar una trayectoria de regreso a las corrientes de polarización del amplificador de instrumentación contenido en la tarjeta de adquisición, las fuentes flotadas diferenciales deben tener resistencias con valores que van de 10 a 100 k Ω a la terminal AIGND sobre una entrada, si es que se encuentran acopladas mediante DC, o sobre ambas entradas si se encuentran acopladas mediante AC.

En el modo de medición de señal con referencia simple o sencilla, la terminal negativa del amplificador de instrumentación de la tarjeta de adquisición de datos es conectado a la tierra analógica. Para usar cualquiera de los tres modos de las señales se deben configurar algunos micro interruptores incluidos en la tarjeta de conexión. En la figura 2.27 se muestra una imagen del bloque de terminales empleado para la instrumentación del perfilógrafo, y en la figura 2.28 se muestra el bloque de conexión conectado a través del cable a la tarjeta de adquisición de datos.



Figura 2.27. Bloque de terminales empleado.



Figura 2.28. Computadora conectada al bloque de conexión.

Señales analógicas y LabVIEW

En el entorno de desarrollo a utilizar LabVIEW 8.0, podemos separar las señales analógicas en tres categorías: de Corriente Directa (DC), dominio del tiempo y dominio de la frecuencia. Para poder clasificar las señales debemos preguntarnos donde se encuentra la información que nos es útil de la misma, en el nivel de amplitud, en la forma o en la frecuencia, figura 2.29.

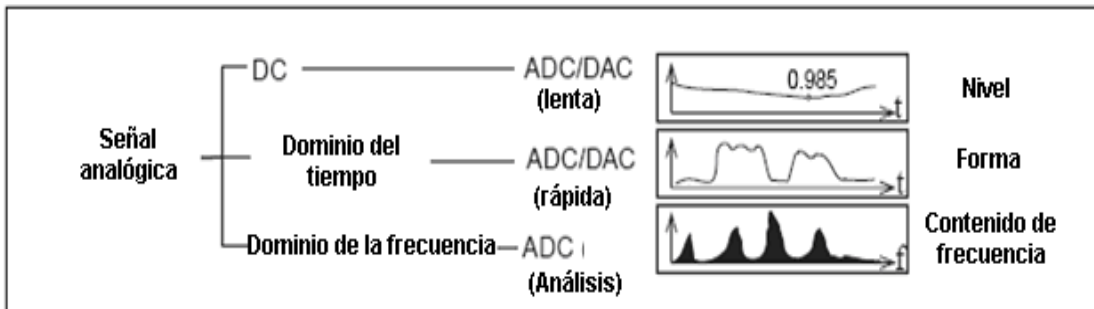


Figura 2.29. Señales analógicas.

Como ejemplo de una señal donde la información se encuentra en el nivel de amplitud podemos mencionar un termopar, la información primaria que se puede obtener de la misma

(temperatura) está contenida en el nivel del voltaje analógico. Para el caso en el cual la forma es la señal de interés, podemos mencionar como ejemplo una señal entregada por un micrófono, es importante conocer la forma de la señal original para poder después procesarla. Como ejemplo de señales donde el contenido de frecuencia es el factor de importancia se puede mencionar cromatógrafos que toman la información precisamente del análisis en frecuencia de la señal.

Otras características a tomar en cuenta, cuando se adquiere y se procesa una señal en el entorno de LabVIEW son la variación de la señal con el tiempo y si se encuentra o no referenciada. En cuanto a la variación de la señal con el tiempo, la velocidad de muestreo determina que tan rápido las conversiones analógico digital pueden llevarse a cabo. Una velocidad de muestreo elevada adquiere más puntos en un tiempo dado, y por lo tanto puede obtener una mejor representación de la señal original que con una velocidad de muestreo baja. De acuerdo con el teorema de Nyquist, la velocidad de muestreo debe ser mayor al doble de la frecuencia máxima de la señal para poder obtener información precisa de la frecuencia de la señal.

En cuanto a la referencia, LabVIEW maneja las señales de dos formas: como señales referenciadas y como señales no referenciadas. Más aún, las señales referenciadas se dice que están aterrizadas, mientras que las señales no referenciadas se conocen como señales flotadas. Las fuentes de señal aterrizadas tienen señales de voltaje que están referenciadas a sistemas de tierra, tales como generadores de funciones o fuentes de voltaje. En la figura 2.30 se muestra un esquema de este tipo de señales.

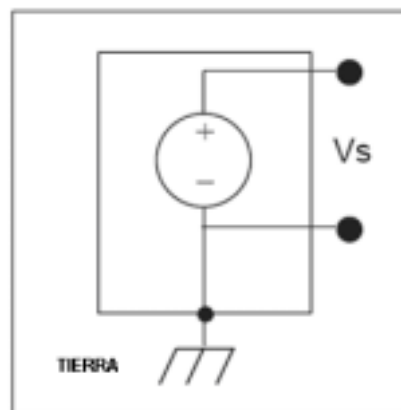


Figura 2.30. Señal de voltaje referenciada.

Las fuentes de señal flotadas contienen una señal, como un voltaje por ejemplo, que no se encuentra conectada a una referencia absoluta. Algunos ejemplos comunes de señales flotadas las podemos encontrar en las baterías, fuentes alimentadas por baterías, termopares, transformadores, amplificadores de aislamiento y cualquier instrumento que de manera explícita flota sus señales de salida. En el diagrama de la figura 2.31 se observa que ninguna de las terminales se encuentra conectada al sistema de tierra.

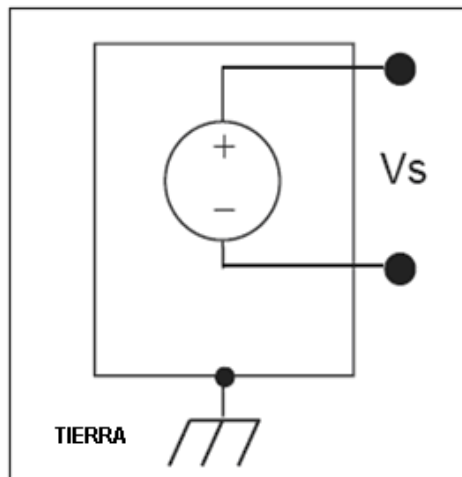


Figura 2. 31. Señal de voltaje no referenciada.

Cable de conexión

Para la conexión de la tarjeta de adquisición de datos se empleará un cable de alto desempeño, y de esta forma preservar la integridad de las señales adquiridas. En particular se seleccionó un cable que permite la conexión entre tarjetas PCMCIA, y un bloque de terminales donde se conectan directamente los cables provenientes de los sensores. En la figura 2.32 se observa un esquema de la tecnología empleada en estos cables de conexión, y en la figura 2.33 una imagen del cable de conexión.

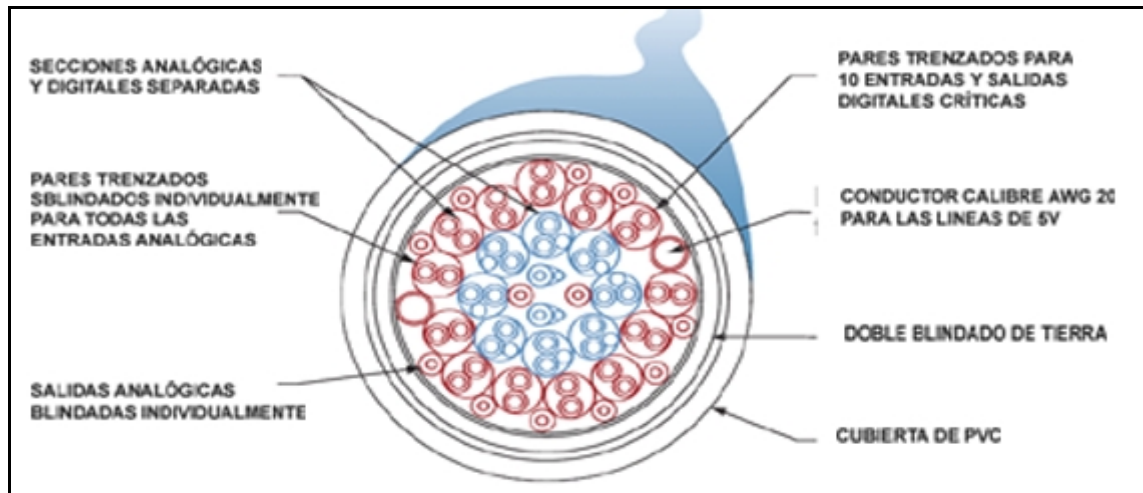


Figura 2.32. Tecnología de construcción de cable de conexión.



Figura 2.33. Cable de conexión.

II.7. Computadora de uso rudo

Para llevar a cabo la interfaz del *software* de usuario se empleará el entorno de programación LabVIEW 8, dicho entorno requiere de una computadora, ya sea de escritorio o portátil, para poder llevar a cabo la programación, y mediante el entorno, crear los instrumentos virtuales necesarios. Se optó por seleccionar una computadora portátil que contendría la tarjeta de adquisición de datos. Dicha computadora operará en el exterior, por lo cual al seleccionarla se buscó una que pudiera cumplir con un uso en exteriores. Dichas computadoras portátiles se

conocen como computadoras de uso rudo, ya que sus características las hacen ideales para su operación en ambientes extremos, en los que se deben considerar las condiciones de humedad, polvo, o temperaturas extremas, además de contar con protección en su cubierta que las hace resistentes a golpes y vibraciones. Para la instrumentación del perfilógrafo se seleccionó un modelo cuyas características principales son las siguientes:

- Resistente a vibraciones e impactos
- Resistente al agua y al polvo
- Pantalla LCD a color de 13.3" de matriz activa (TFT) con pantalla táctil (*touchscreen*)
- Tecnología Móvil Intel® Centrino®
- Excelente operación y desempeño de la batería de 6 horas promedio
- Lista para conexión inalámbrica a la red

Cuenta con toda una serie de innovaciones, aplicaciones inalámbricas y elementos reforzados:

- Construida con un gabinete ultra resistente, diseñado de aleación de magnesio. La computadora absorbe vibraciones e impactos, para ello cumple con los estándares de las normas del ejército norteamericano, según la norma MILSTD 810F; además, la caja del disco duro está protegida por una capa de espuma con un grosor de 32 mm, esto le permite resistir caídas desde una altura de 90 cm.

Lista para operar bajo condiciones extremas:

- Un sistema especial para el disco duro permite que la computadora opere en condiciones extremas de hasta 40 °C, a la vez que la pintura plateada antirreflejante y el sistema interno de tubos térmicos de la unidad impiden la absorción del calor cuando hay temperaturas elevadas al exterior.
- Todos los acabados de sus extremos y cubiertas exteriores han sido selladas usando un nuevo método hermético de *dispense gasket*, con elastómeros flexibles, para garantizar la resistencia al polvo y al agua, cumpliendo con la norma IP54.

Libertad de movimiento:

- La arquitectura Intel® Centrino con el estándar inalámbrico WLAN permite una mayor flexibilidad de comunicación, así como sus opciones de GPS o GPRS permiten estar conectado en cualquier lugar.
- Las baterías desarrolladas por Panasonic dan a la computadora una gran independencia al durar en promedio 6 horas.
- Las opciones de configuración incluyen GSM / GPRS, Bluetooth y GPS, permitiendo una movilidad totalmente inalámbrica a la vez que la *'hot swapping multimedia pocket'* tiene la flexibilidad para alternar entre varios discos ópticos, incluso utilizar una batería secundaria o disco duro adicional.

II.7.1 Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas de la *laptop* son:

CPU: Procesador Intel® Pentium® M 738 de 1.4 GHz de bajo voltaje

Caché L2: de 2 MB 400 MHz FSB

Chipset: Intel® 855 GM

RAM: 256 y 512 MB (expandible hasta 1.5 GB)

Controlador de video integrado Intel® 855 GM 64 MB (UMA) max.

Disco Duro: 60 y 80 GB

LCD: Pantalla LCD transmisivo a color de 13.3° de matriz activa, (TFT) XGA con pantalla táctil *touchscreen* y 16 millones de colores con una excelente visión para exteriores.

Gabinete de LCD: Aleación de magnesio 20 veces más resistente que el plástico de las computadoras portátiles tradicionales.

LAN inalámbrico: Tarjeta inalámbrica Intel® Pro/ Wireless 2100 802.11 a/b/g. LAN: tarjeta de red integrada 10/ 100 ethernet. Modem: Interno de 56 kbps compatible con el protocolo V.92, fax clase 1 de 14.4 kbps.

En la figura 2.34 se observa una imagen de la computadora a emplear en la instrumentación del perfilógrafo.



Figura 2.34. Computadora utilizada.

II.8. Módulo de impresión de reportes

En los perfilógrafos tipo California de manera tradicional se trazaban los perfilogramas sobre un rollo de papel con una plumilla que se desplazaba de acuerdo al perfil de la superficie, con este perfilograma el personal encargado de analizar los reportes calculaba el índice de perfil de las secciones a analizar. En el perfilógrafo del Instituto de Ingeniería la propuesta fue automatizar todo el proceso, de tal forma que el cálculo del PI de cada una de las secciones se realice de forma automática, y que la información se almacenara en una base de datos que pudiera ser consultada en cualquier momento por el personal a través el programa desarrollado para tal propósito. Además del almacenamiento de información en la computadora personal se planteó el generar reportes impresos donde se coloque la información de las pruebas realizadas, así como de

la impresión de algunos de los parámetros de operación del perfilógrafo, para ello se tenía la opción de utilizar una impresora convencional, ya fuera de inyección de tinta o láser, o bien una impresora de tipo térmico.

Se seleccionó la impresora de tipo térmico para no tener el problema de la falta de tinta para generar los reportes, además de que al emplear este tipo de impresoras no se tiene la restricción en cuanto a la longitud de los reporte a generar, ya que tanto la impresora de tinta como la impresora láser pueden imprimir los reportes en hojas de papel de tamaño convencional, y los perfilogramas suelen ser reportes de varios metros de largo.

Otro factor que llevó a la selección de la impresora térmica sobre una impresora de escritorio es que es mucho más robusta, está diseñada para operar en condiciones ambientales extremas, y no así las impresoras de escritorio que son para uso doméstico o de oficina.

Para la instrumentación del perfilógrafo se buscó una impresora térmica que tuviera un ancho de impresión de cuatro pulgadas y de esta forma tener claridad en los reportes generados. En particular se seleccionó una impresora térmica modular, es decir, que el mecanismo de impresión, tarjeta de control, mecanismo de enrollado y fuente de alimentación, fueran módulos independientes.

II.8.1 Tarjeta de control de la impresora térmica

Esta tarjeta de control acepta datos de entrada desde una interfaz de datos tales como paralelo, serial RS-232, etc. y proporciona funciones lógicas y de manejo necesarios para operar los mecanismos de impresión. La tarjeta de control está basada en un microprocesador 80C31 con otros dispositivos CMOS complementarios. El microprocesador es el encargado de la comunicación serial y paralela. Para el caso de la instrumentación del perfilógrafo se seleccionó un mecanismo de impresión y la tarjeta de control que corresponde a dicho mecanismo.

La impresión en la dirección del eje X es realizado por la mayoría de las impresoras de tipo térmico; se envían los caracteres deseados seguidos del comando retorno de carro (CR, por

sus siglas en inglés, y cuyo código ASCII es \$0D). La impresora seleccionada es también capaz de imprimir en la dirección del eje Y, e imprimir curvas de alta resolución, gráficas de barras, etc. direccionando puntos individuales o grupos de puntos como sea necesarios. Es importante contar con impresión en ambos ejes, ya que es necesario colocar información sobre cada una de las gráficas que se generen en los reportes.

Todos los caracteres recibidos por la impresora son colocados en un buffer FIFO (*First Input First Output*) el cual puede mantener 5120 caracteres. La condición de BUSY es indicada cuando el buffer FIFO alcanza 5088 caracteres. La condición READY es nuevamente indicada cuando el buffer FIFO baja de 5056 o menos caracteres. *Buffers* adicionales en el programa de impresión de datos son utilizados para almacenar caracteres para la impresión en el eje “x”, para en el eje “y” así como para gráficos y almacenamiento de diferentes tipos de rejilla. Las rejillas son gráficas que pueden emplearse de manera repetida, por ejemplo, se puede crear una secuencia de puntos y líneas, almacenarla en el buffer como una rejilla y emplearla tantas veces como se quiera sin necesidad de volver a generar las secuencias. Son muy útiles en el manejo de gráficas.

La impresora automáticamente ejecuta un diagnóstico de prueba cuando se le aplica energía. Si cualquier error es detectado, el procesador no completará su inicialización en el encendido. En esta condición, en la impresora no funcionará ni siquiera la función de avance de papel. En esta función la tarjeta de control envía el comando de avance de papel a la unidad de enrollamiento de papel, haciendo que avance por un instante. Si la función de avance de papel trabaja y se completa exitosamente, se puede asumir que la prueba de encendido fue completada normalmente sin ningún error.

La tarjeta de control requiere de una alimentación de energía de +5V con $\pm 5\%$ de variación a 300 mA, un voltaje adicional para manejar la cabeza de impresión y el motor a pasos de + 16V @ 4.5 A pico, a este último valor se le llama voltaje de manejo de la cabeza de impresión.

El voltaje de manejo debe ser ajustable sobre un rango de $\pm 10\%$ sobre su valor nominal para compensar diferencias normales en la resistencia de la cabeza de impresión y para su uso

como control de contraste. El voltaje de manejo nunca debe ser aplicado antes de la alimentación lógica de +5V, o cuando ese voltaje de +5 V está fuera de los límites de tolerancia. Los circuitos internos de la lógica de *reset* están diseñados para prevenir daños cuando las dos alimentaciones son energizadas simultáneamente. La alimentación de +5V debe estar libre de variaciones que puedan causar un reset parcial del microprocesador y que por lo tanto funcione erróneamente. En la figura 2.35 se observa una imagen de la tarjeta de control utilizada.

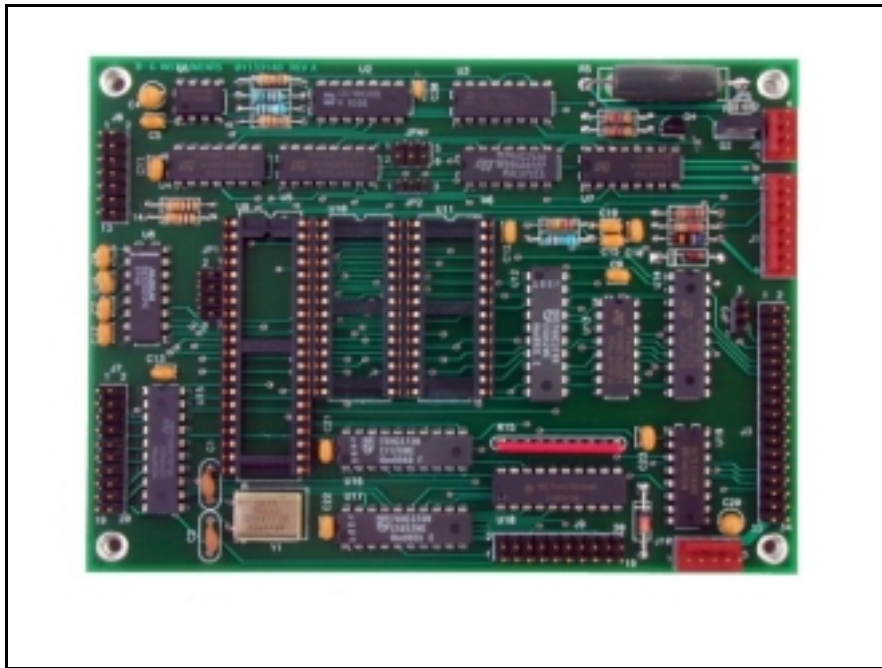


Figura 2.35. Tarjeta de control de la impresora térmica.

II.8.2. Mecanismo de impresión

El mecanismo de impresión modelo PM1832 incorpora una cabeza térmica con 832 elementos de arreglo de puntos en una sola línea a lo largo de todo el ancho del papel. El mecanismo mantiene un rollo de alimentación de 4.5” de ancho de papel térmico y mueve el papel en pasos de impresión de aproximadamente 0.005 pulgadas. Cuando es manejada por una tarjeta de control, el mecanismo de impresión adelanta el papel, haciendo una pausa después de que cada paso para calentar los puntos seleccionados. De esta manera, una representación de matrices de puntos o datos gráficos o alfanuméricos puede ser impresa.

Los 832 puntos térmicos se encuentran uniformemente espaciados, a 200 puntos por pulgada, con centros apartados 0.005 pulgadas. La marca hecha por cada elemento es apenas más grande que el espacio mencionado, de tal manera que la impresora pueda imprimir líneas sólidas o bien rellenar áreas sólidas. El mecanismo de impresión estándar avanza el papel aproximadamente 0.005 pulgadas entre cada paso, proporcionando una matriz de puntos de 0.005 pulgadas a lo largo de la longitud del papel.

Un sensor para el papel en el mecanismo de impresión proporciona señales que son empleadas por la tarjeta de control para detener la impresión cuando el papel se termina, lo que permite cargar un nuevo rollo de papel. Para cargar la impresora con un nuevo rollo de papel hay que asegurarse de que esté encendida e insertar el papel en la ranura correspondiente. Cuando el papel es insertado el rodillo avanzará de manera automática jalando el papel aproximadamente 2 pulgadas.

Cuando el mecanismo de impresión es controlado por la tarjeta de control se puede imprimir aproximadamente 125 renglones de puntos por segundo (la impresión puede ser más lenta si los renglones contienen más de 64 puntos de impresión). En 0.005 pulgadas por paso, la velocidad máxima de papel es cerca de 0.6 pulgadas por segundo. Caracteres de 5x7 renglones pueden ser impresos a una velocidad de 5 líneas por segundo. En la figura 2.36 se observa una imagen del mecanismo de impresión utilizado.



Figura 2.36. Mecanismo de impresión utilizado.

En la sección correspondiente al *software* de la rutina de impresión de reportes, se hará mención del manejo del mecanismo a través de la tarjeta de control para la generación de los reportes impresos.

II.8.3. Unidad de enrollamiento de papel

La unidad de enrollamiento de papel (PTU, por sus siglas en inglés) está diseñada para operar con las tarjetas de control y mecanismos de impresión. El objetivo de este dispositivo es enrollar el papel a medida que el mecanismo de impresión genera la impresión sobre el papel térmico. Dado que los reportes a generar en el perfilógrafo son de longitud variable, y pueden medir desde unos cuantos centímetros hasta varios metros, dependiendo de la longitud de la sección bajo análisis, se consideró necesario agregar este aditamento para facilitar el manejo y almacenamiento de los reportes impresos, ya que si no se utiliza, se tendría que enrollar manualmente los reportes que son generados, lo cual puede resultar una tarea harto tediosa. La operación de esta unidad es automática y no requiere de comandos por parte del usuario. En la figura 2.37 se observa una imagen de la unidad.



Figura 2.37. Unidad de enrollamiento de papel.

El funcionamiento de la unidad es el siguiente: inicialmente un tramo de papel es pasado a través del mecanismo de impresión de longitud suficiente para permitir un fácil manejo al usuario, este tramo de papel es insertado en una ranura en la PTU. Usando el interruptor manual con que cuenta la unidad, se hace que el rodillo avance enrollando el papel hasta que éste quede tenso. Es la única intervención requerida por parte del usuario. A partir de este instante la tarjeta de control se encargará de operar la PTU, cada que se imprime sobre el papel la tarjeta de control también hará que la PTU se active enrollando sobre el rodillo el papel y manteniendo la tensión necesaria. Una vez que se terminó con la impresión, el rodillo puede ser liberado para tomar el rollo de papel que contiene la impresión. Se coloca nuevamente el rodillo y el papel es insertado nuevamente en la ranura para repetir el procedimiento.

Cabe mencionar que la colocación de la PTU es crítica para una correcta operación de la misma, debe de estar alienada con el mecanismo de impresión. La PTU emplea un motor de DC y puede operar con un voltaje de 12 a 24 V DC, el cual es tomado de la tarjeta de control, a través de un cable. Por lo tanto la fuente de alimentación debe soportar las demandas de corriente de la tarjeta de control, del mecanismo de impresión y de la PTU, a continuación se mencionarán las características necesarias de la fuente de alimentación seleccionada para esta tarea.

II.8.4. Fuente de alimentación de energía

Para satisfacer las necesidades de voltaje y de corriente del módulo de impresión de reportes, se hizo uso de la fuente de alimentación de energía recomendada por el fabricante del mecanismo de impresión, la cual proporciona los voltajes lógicos requeridos por la tarjeta de control y los voltajes para el mecanismo de impresión y la PTU. Esta fuente de alimentación soporta voltajes de entrada de 110 V AC hasta 220 V AC. Para los niveles lógicos proporciona 5 V DC @ 300 mA, el voltaje a la cabeza de impresión se inhibe si no se detecta el voltaje lógico de 5 V DC. La salida de voltaje está protegida contra corto circuito y contra sobre tensiones. En la figura 2.38 se observa una imagen de la fuente de alimentación.



Figura 2.38. Fuente de alimentación del módulo de impresión de reportes.

Para configurar la operación de la fuente de alimentación, dado que el voltaje aplicado a la entrada de la fuente será de 110 V, es necesario unir las terminales 1 con 3 y 2 con 4, la identificación de las terminales se muestra en la figura 2.39.



Figura 2.39. Terminales de la fuente de alimentación del módulo de impresión.

II.9. Módulo de generación de energía

Cada uno de los módulos descritos anteriormente requiere de una fuente de alimentación, incluyendo la computadora de uso rudo, y cada una de estas fuentes es alimentada en su entrada

por 127 V AC. Dado que el perfilógrafo es un dispositivo móvil, no se puede contar con alimentación por parte de la línea de alimentación comercial. Por esta razón se adicionó un generador de energía portátil, con la capacidad de proporcionar a todo el sistema la energía suficiente para operar por un espacio de tiempo de hasta 8 horas.

Para el caso del perfilógrafo se seleccionó un generador portátil que puede manejar una carga máxima de 1 kW, y proporcionar hasta 4 horas de operación a plena carga, con tan solo un tanque de 2 litros de gasolina. La carga máxima a manejar en el perfilógrafo es de 300 W, y no es un consumo continuo, se alcanzará este valor únicamente cuando se esté imprimiendo el reporte, se requiere 1.5 Ampere de corriente para energizar la cabeza de impresión de la impresora térmica, y no en todo momento se tiene este consumo, el consumo máximo que se puede alcanzar por parte de la impresora térmica es de 180 W. La computadora tiene un consumo promedio de 60 W, los transductores de desplazamiento tienen un consumo de potencia junto con sus fuentes de alimentación de 20 W, por lo cual se demanda aproximadamente la tercera parte de la carga total que puede soportar el generador, aumentando el tiempo de autonomía del sistema más allá de las 4 horas soportadas por el generador.

En este generador portátil se emplean motores de cuatro tiempos, los cuales ofrecen reducción en la emisión de contaminantes, mayor autonomía en combustible y niveles de ruido mucho más bajos. Además de que no requieren la mezcla del aceite con gasolina, extendiendo significativamente la vida de las bujías y del mofle.

El generador portátil cuenta con dos salidas de voltaje de AC y DC. El generador portátil es silencioso porque está construido con doble pared de insonorización envolvente, este generador cumple con las normas más estrictas de ruido y contaminación de Europa y de EU, además cuenta con un sistema llamado Eco-Acelerador, el cual depende de la carga para acelerar automáticamente, haciéndolo muy ahorrador. Protege al equipo de los posibles daños, interrumpiendo la energía al presentarse una sobrecorriente. El generador está diseñado para entregar energía limpia sin picos de voltaje, lo que permite trabajar con gran precisión y confiabilidad, es recomendado para equipos de medicina, fotografía y de cómputo. En la figura

2.40 se muestra una imagen del generador y en la tabla 2.5 se resume las características técnicas del generador.



Figura 2.40. Generador portátil.

| | |
|---------------------------------------|---|
| Motor | 1.8 HP. 1 cilindro, enfriado por aire |
| Desplazamiento | 50 cc |
| Salida AC | 120 V 1000 W máximo (8.3 A) 900 W nominal (7.5 A) |
| Contactos AC | 2 contactos: 127 V Duplex 15 A |
| Contactos DC | 1 contacto 12 V, 96 W (8 A) |
| Arranque | Manual (De tirón) |
| Tanque de Gasolina | 2.5 litros |
| Tiempo de funcionamiento con 1 tanque | 3.8 hrs al 90 % de carga 8.3 hrs al 25 % de carga |
| Dimensiones | 17.7 " x 9.4" x 15.0 " |
| Niveles de ruido | 53 dB al 25 % de carga |
| Peso | 13 kg. |

Tabla 2.5. Características técnicas del generador portátil.

Habiendo descrito todos los elementos que componen el *hardware* del perfilógrafo, se procederá a describir el diseño del *software*.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y DISEÑO

DEL SOFTWARE

DEL PERFILÓGRAFO

En este capítulo se hará la descripción del *software* desarrollado para la operación del perfilógrafo. Se describirá el entorno del *software* empleado para la generación de la interfaz de usuario del perfilógrafo, justificando su empleo sobre otras plataformas disponibles en el mercado. Una vez descrito el entorno de desarrollo, se procederá con la descripción de las rutinas necesarias para la instrumentación del perfilógrafo, las cuales se encargarán de la lectura de las señales provenientes de los sensores, del acondicionamiento de las señales recibidas, del cálculo del PI, de la generación de la base de datos y de la impresión de los reportes.

III.1. LabVIEW

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), de la compañía National Instruments, es un sistema de programación gráfico diseñado para el desarrollo de

distintas aplicaciones; como el análisis y la adquisición de datos y el control de instrumentos. La versión de LabVIEW utilizada para este proyecto es la 8.0.

Al ser LabVIEW un lenguaje de programación gráfico y basado en un sistema de ventanas, muchas veces es más sencillo de utilizar que otros lenguajes más típicos. Mucha gente que habitualmente no intentaría diseñar una aplicación puede conseguirlo con LabVIEW.

Este tipo de lenguaje se desarrolló a partir de la aparición de la instrumentación virtual, es decir, con el uso de las computadoras y de tarjetas de adquisición de datos para realizar mediciones de variables físicas o químicas como son: temperatura, presión, flujo, desplazamiento, etc.; aprovechando las características de éstas últimas ya que permiten el cálculo, la productividad, la capacidad de visualización gráfica y la capacidad de conexión con otros dispositivos, principalmente, con ello se optimizan los resultados.

En definitiva, se puede concluir diciendo que con una computadora personal, un *hardware* adecuado (tarjetas de adquisición de datos), unos “*drivers*” y un *software* como LabVIEW, se pueden integrar sistemas de adquisición de datos muy provechosos y mejores que si se utilizan instrumentos tradicionales tales como osciloscopios, generadores de señal, analizadores de espectros, analizadores vectoriales, etc.

Las ventajas principales de usar LabVIEW son:

- Es compatible con herramientas de desarrollo similares como Labwindows o Pulsar y puede trabajar a la vez con programas de otra área de aplicación, como Matlab o Excel. Además, se puede utilizar en muchos sistemas operativos, incluyendo Windows y UNIX, siendo el código transportable de uno a otro sistema.
- Permite una fácil integración con *hardware*, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos (incluyendo adquisición de imágenes).

- Es muy simple de manejar, debido a que está basado en un sistema de programación gráfica, llamado lenguaje G.
- Es un programa enfocado hacia la instrumentación virtual, por lo que cuenta con numerosas herramientas de presentación, en gráficas, botones, indicadores y controles, los cuales son muy esquemáticos y versátiles. Estos serían complicados de realizar en bases como C++, donde el tiempo para lograr el mismo efecto sería muchas veces mayor.
- Es un programa que contiene librerías especializadas para manejos de diversas tarjetas de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés), redes, comunicaciones, análisis estadístico, comunicación con bases de datos (útil para una automatización de una empresa a nivel total).
- Como se programa creando subrutinas en módulos de bloques, se pueden usar otros bloques creados anteriormente como aplicaciones por otras personas.

Otras ventajas de la instrumentación virtual frente a la instrumentación tradicional de ventajas del instrumento virtual frente al instrumento tradicional se muestran en la tabla 3.1.

| Instrumento tradicional | Instrumento virtual |
|---|--|
| Definido por el fabricante | Definido por el usuario |
| Funcionalidad específica, con conectividad limitada | Funcionalidad ilimitada, orientado a aplicaciones y con conectividad amplia |
| El <i>hardware</i> es la clave | El <i>software</i> es la clave |
| Una relación de costo función alta | Una relación de costo/función baja, presenta variedad de funciones y es reusable |
| Arquitectura “cerrada” | Arquitectura “abierta” |
| Lenta incorporación de nuevas tecnologías | Rápida incorporación de tecnologías nuevas, gracias a la plataforma PC |
| Altos costos de mantenimiento | Bajos costos de mantenimiento |

Tabla 3.1. Comparación de un instrumento virtual contra uno tradicional.

LabVIEW tiene su mayor aplicación en sistemas de medición, como monitoreo de procesos (como en el caso de este proyecto, ya que se representan las curvas de perfil) y de control. Además, LabVIEW se utiliza en el procesamiento digital de señales, en el procesamiento en tiempo real de aplicaciones biomédicas, manipulación de imágenes y audio, automatización, diseño de filtros digitales, generación de señales, etc.

III.1.1. Programación con LabVIEW

Con la llegada del *software* de programación gráfica LabVIEW de *National Instruments*, el proceso de realización de un programa se ha facilitado en gran medida al minimizarse el tiempo y costo de desarrollo de las aplicaciones.

La forma de programar en LabVIEW es muy distinta a otros lenguajes de programación que se basan en texto, como C, VISUAL BASIC o FORTRAN. La principal diferencia con respecto a los lenguajes de programación mencionados es que LabVIEW utiliza los símbolos gráficos, denominados iconos, para representar el programa de acciones.

Los programas de LabVIEW se denominan VI ó VI's (*Virtual Instruments*), instrumentos virtuales, debido a que su aspecto y operación reproducen a instrumentos tradicionales como osciloscopios, generadores de señales, analizadores, etc. (Figura 3.1).



Figura 3.1. Osciloscopio tradicional.

Un instrumento virtual (programa) se define como un módulo de *software* que simula el panel frontal en un instrumento, y ayudándose en elementos *hardware* accesibles por una computadora (tarjetas de adquisición de datos, instrumentos accesibles vía GPIB, puerto USB, puerto serie, etc.), realiza una serie de mediciones que equivalen a las que se obtendrían en un instrumento real. De este modo, cuando se ejecuta un programa que actúa como un instrumento virtual o “VI”, el usuario ve en la pantalla de la computadora personal un panel cuya función es idéntica a la de un instrumento físico, facilitando así la visualización y el control del aparato.

Un programa creado en LabVIEW consta de dos partes: el panel frontal y el diagrama de bloques. El panel frontal de la aplicación desarrollada, simula el panel frontal de un instrumento físico, se diseña la interfaz con el usuario y contiene los elementos que van a caracterizar el programa. En él se ven los datos y allí se controlan y se manipulan, figura 3.2.



Figura 3.2. Panel Frontal del Instrumento Virtual.

En el diagrama de bloques se aprecia la estructura del programa, su función y algoritmo, de forma gráfica en lenguaje G, en el cual los datos “fluyen” a través de líneas, figura 3.3.

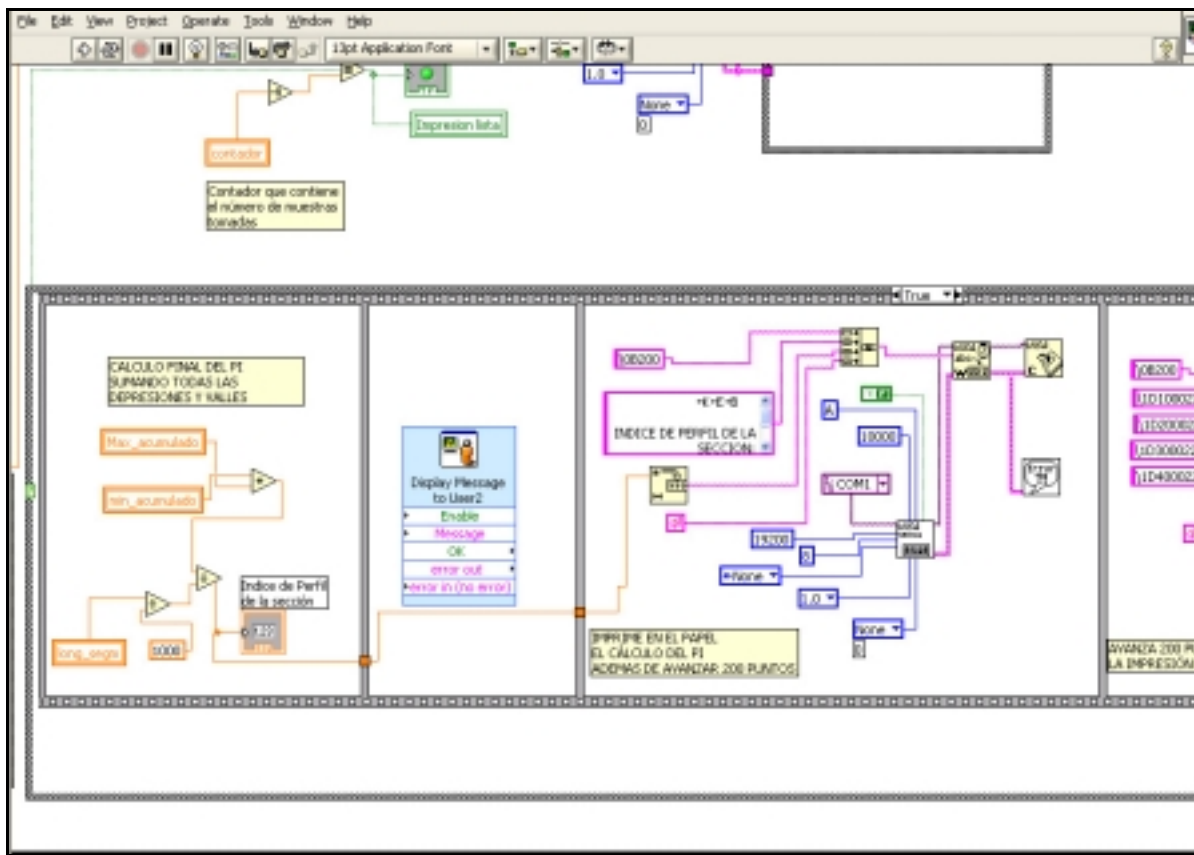


Figura 3.3. Diagrama de bloques de un instrumento virtual.

III.2. Panel de control del perfilógrafo

El perfilógrafo debe contar con una interfaz que permita al usuario interactuar con los parámetros del equipo, dicha interfaz se creará empleando el panel de control en LabVIEW, y en el diagrama de bloques se realizará la programación. En este panel de control se debe incluir una pantalla gráfica que permita visualizar el perfil del pavimento bajo prueba. Además de dicha pantalla, se agregarán varios botones e indicadores que permitirán conocer el estado de operación del sistema, así como configurar parámetros de operación del mismo. En la figura 3.4 se observa una imagen del panel frontal creado para el perfilógrafo.

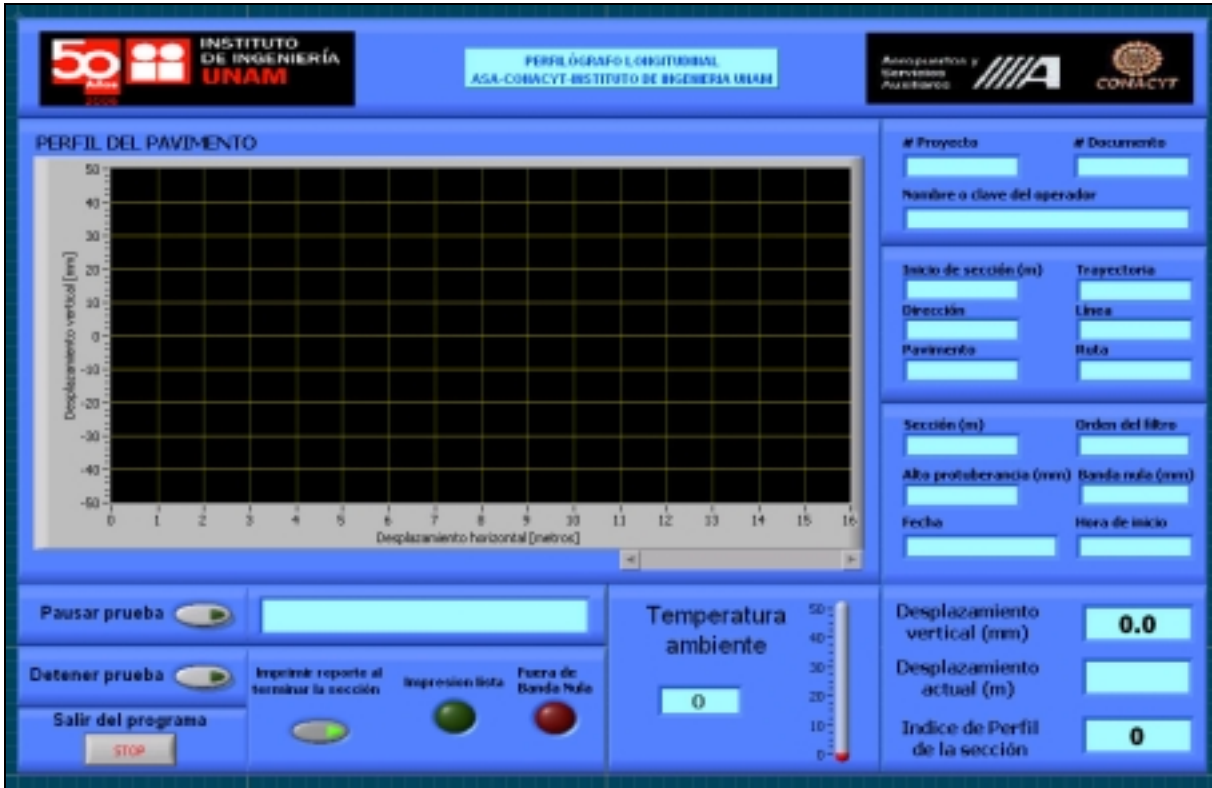


Figura 3.4. Panel de control del perfilógrafo.

III.2.1. Controles e indicadores

En el panel frontal se encuentra la pantalla gráfica donde se mostrará al usuario el perfil de la superficie bajo prueba, en el eje de las abscisas se muestra el desplazamiento horizontal del perfilógrafo a lo largo de la superficie de prueba, se encuentra en unidades de metros y puede ser ajustada la escala por el usuario. El eje de las ordenadas contiene la información referente al desplazamiento vertical y se encuentra graduada en milímetros, al igual que en caso del eje de las abscisas es posible modificar la escala para observar a detalle alguna sección de la gráfica.

En el panel frontal se agregó también un indicador de la temperatura, que permite visualizar el dato de temperatura ambiente. Este dato no es relevante para el cálculo del índice de perfil, solamente se presenta para informar al usuario sobre la temperatura que opera el sistema, y que no debe ser mayor a 50 °C; en algunos aeropuertos del país las temperaturas son extremas y por lo tanto requerimos que el sistema opere bajo condiciones para las cuales fue diseñado, de lo contrario podrían generarse errores en las lecturas o daño al equipo.

En la parte inferior izquierda de la pantalla se agregaron tres botones: “Pausar prueba”, “Detener prueba” y “Salir del programa”. El botón “Pausar prueba” permite al usuario detener momentáneamente la adquisición de datos, incluso si la estructura del perfilógrafo se sigue moviendo. Este botón se agregó a petición del personal de ASA, ya que existen ocasiones en las cuales tiene que ser retirado de la pista el perfilógrafo para permitir alguna maniobra con algún avión y continuar después en el lugar en el que se había detenido el análisis, esto con el objeto de no volver a realizar la prueba desde el inicio de la sección, ya que suelen ser pruebas que abarcan varios kilómetros.

A diferencia del botón de “Pausar prueba”, el botón “Detener prueba” finaliza la sección bajo análisis, es decir, se analiza la sección y se calcula el índice de perfil incluso si no se cubrió la distancia preestablecida de análisis.

Finalmente, como su nombre lo indica, el botón “Salir del programa” termina la ejecución del programa, a diferencia del botón “Detener prueba”, el botón finalizar programa no realiza el cálculo del índice de perfil, simplemente cierra la aplicación. El uso principal de este botón es el de finalizar las pruebas una vez que se ha obtenido el perfil de la pista a analizar.

Al lado derecho de los botones descritos anteriormente si tienen un indicador de texto y debajo de él otro botón y un par de indicadores luminosos. El indicador de texto presenta mensajes al usuario, de tal forma que conozca el estado de operación del sistema en un momento dado, en este indicador se presentan mensajes como “Prueba detenida”, “Prueba en proceso”, “Imprimiendo reporte”, entre algunos otros. Cada uno de los mensajes se describirá a detalle en la sección que corresponda. El botón que aparece debajo del indicador de texto permite al usuario generar un reporte impreso de la pista que se esté analizando, una vez que se cubre el tamaño de sección que se especifica al arrancar el programa. Al deshabilitar este botón, no se imprime el reporte y únicamente se guarda la información en el disco duro de la computadora en formato texto, mismo que puede ser impreso posteriormente, o bien puede ser abierto con algún programa de hojas de cálculo como Excel, por ejemplo.

El indicador luminoso marcado como “Impresión lista”, como su nombre lo indica, se iluminará una vez que se tenga completamente impreso y de manera exitosa el reporte de la sección bajo análisis, en caso de que exista algún problema, este botón no se iluminará y se indicará al usuario del problema mediante un mensaje de texto. El indicador luminoso marcado como “Fuera de banda nula”, trabaja en conjunto con el botón “Impresión lista”, ya que al momento de generar el reporte, se hace el cálculo de la banda nula, y cuando se está imprimiendo es cuando se indicará mediante este botón en rojo, cuando la sección bajo análisis se encuentre fuera de dicha banda.

En el extremo inferior derecho del panel de control se encuentra los indicadores numéricos de los valores de los desplazamientos vertical y horizontal. Además se tiene otro indicador numérico que indicará el índice de perfil de la sección bajo análisis, una vez que se haya cubierto la longitud de la sección especificada. El indicador de desplazamiento horizontal muestra el desplazamiento en metros, teniendo una resolución de 0.1 metros. El indicador de desplazamiento vertical tiene unidades de milímetros y una resolución de 0.1 milímetros. Finalmente el indicado de índice de perfil cuenta con unidades de milímetros por kilómetro.

En el extremo superior derecho del panel de control se muestra todos los parámetros con los cuales se encuentra operando el perfilógrafo y que sirven para identificar plenamente cada una de las secciones de pista que se están analizando y evitar ambigüedades en la interpretación de los reportes generados.

El primer parámetro dentro de esta área lo ocupa un indicador de texto que muestra el “Número de proyecto” con el cual se trabajará. Dado que se realizan gran cantidad de pruebas sobre diferentes pistas, es bueno tener parámetros para poder identificarlos, mediante este parámetro el operador puede asignar un número al proyecto de trabajo, el dato se guarda en el reporte en formato texto que se almacena en la computadora y se imprime al inicio de cada uno de los reportes.

El segundo parámetro corresponde al “Número de documento”, al igual que el anterior, es un identificador para poder diferenciar diferentes documentos sobre un mismo proyecto, es decir, pueden realizarse varias pruebas que abarquen una misma pista y una forma de diferencia una de otra puede ser a través de este parámetro, al igual que el anterior, se guarda esta información en el archivo de texto en la computadora y se imprime en el reporte correspondiente.

Finalmente en esta sección del panel de control se tiene el parámetro correspondiente al “Nombre o clave del operador”, este parámetro también permite al personal encargado del análisis de los reportes poder saber quien fue la persona encargada de llevar a cabo las pruebas, se incluye en el reporte en formato texto y se imprime en el reporte impreso.

El siguiente bloque dentro del panel de control permite al operador identificar plenamente la sección bajo análisis, en este campo se tienen seis parámetros. El primero de ellos corresponde a la identificación del inicio de sección, es decir donde se iniciará el recorrido del perfilógrafo y para el cual se maneja el formato de “kilómetros + metros”, es decir, se especifica el avance en kilómetros seguido de un signo “+”, que indica el desplazamiento en metros; así, por ejemplo, si la sección de análisis iniciará en la distancia inicial de 3250 metros, se representará esta marca de desplazamiento como “3 + 250”, que es una representación empleada en este tipo de análisis, ya que las marcas en las pistas de aeropuertos utilizan esta nomenclatura. A partir de esta distancia el perfilógrafo comenzará a registrar el desplazamiento horizontal utilizando la misma nomenclatura.

El siguiente parámetro corresponde a la definición de la “Trayectoria”, en el cual puede indicarse sobre que línea de la pista se está llevando a cabo el perfil, teniéndose tres opciones para ello, central, izquierda y derecha, de acuerdo a la línea de desplazamiento del perfilógrafo sobre la pista.

En el parámetro de dirección se indica hacia donde se está empujando el perfilógrafo, teniendo para este parámetro cuatro opciones: norte, sur, este y oeste. En el parámetro de “Línea”

se puede especificar un valor numérico, si es que se trazó más de una línea por cada una de las trayectorias, y de esta forma identificar de manera precisa a que línea de trazo corresponde el perfil. Los dos últimos parámetros son indicadores de texto que el operador puede o no asignar, pero que permiten una identificación clara del lugar donde se llevó a cabo la prueba. Cada uno de los parámetros correspondientes a este campo del panel de control del perfilógrafo se imprime al inicio de los reportes y también se colocan en el encabezado de los archivos que se almacenan en la computadora.

En el siguiente bloque del panel de control se tienen otros parámetros que tienen que ver con la operación del perfilógrafo. Estos son la “longitud” de la “sección” a analizar, el “Orden del filtro”, la “Altura de la protuberancia”, el ancho de la “Banda nula”, la fecha y la hora del inicio del desarrollo de la prueba. El parámetro de longitud se refiere al tamaño de la sección en metros de la cual se calculará el PI, es decir, cada que se cubra esa distancia con el perfilógrafo, el sistema calculará el PI, e imprimirá el reporte correspondiente, si es que así se estableciera. Por ejemplo, supongamos que se realizará una prueba a una pista de 1 kilómetro, y se estableció una sección de 100 metros, cada que se cubra la distancia de 100 metros el sistema calculará el PI correspondiente a cada tramo y después se calcula el PI de toda la pista con base a los PI’s de cada una de las secciones de 100 metros.

El parámetro “Orden del filtro” corresponde al filtrado de la señal proveniente de la señal del transductor de desplazamiento vertical. Del filtro se pueden seleccionar entre tres órdenes diferente para evitar señales que no son representativas del perfil, y que son agregadas por rugosidad o vibración de la estructura mecánica del perfilógrafo.

El siguiente parámetro “Altura de protuberancia”, indica el valor que la curva de perfil deberá superar a la banda nula para poder ser considerado en el cálculo del PI; si la curva de perfil no supera a dicho valor, ya sea por arriba o por debajo de ésta, simplemente se omite en el cálculo del PI.

El parámetro de “Banda nula” se refiere a la banda de tolerancia definida en milímetros dentro de la cual se considera que el perfil de la pista se encuentra en condiciones óptimas; si la curva de perfil sobresale de dicha banda nula por un valor mayor al de la protuberancia indicada por el parámetro anterior, se considera como una zona que debe ser supervisada, y contribuye en el cálculo del perfil de la sección correspondiente. El valor de la banda de tolerancia es por omisión de 5 milímetros, pero puede modificarse a un valor mayor o menor.

Los parámetros restantes del panel de control del perfilógrafo corresponden a la fecha y hora en la cual inicia cada una de las pruebas, estos parámetros son tomados directamente de la fecha y hora de la computadora, por lo que para modificarlos es necesario que se modifique ya sea la fecha o la hora del sistema de la computadora. Estos parámetros también son colocados en los reportes que se almacenan en la computadora y en el reporte impreso.

Una vez descrito de manera general los parámetros a manejar en el panel de control del perfilógrafo se describirá el diagrama de bloques que integra el programa, empezando por una descripción general, para continuar con una descripción más a detalle de los bloques generales que componen dicho diagrama.

III.3. Diagrama de bloques

Como se mencionó anteriormente, un programa en LabVIEW se compone del panel, frontal que sirve como interfaz entre la computadora y el usuario, y un diagrama de bloques, que es donde se programa las rutinas necesarias para que la interfaz realice los objetivos para los que fue diseñada. En el caso del programa del perfilógrafo, el diagrama de bloques se encuentra dividido en varias etapas, mismas que en conjunto permiten la obtención de los perfiles de las pistas haciendo uso de la tarjeta de adquisición de datos, descrita anteriormente, y de los transductores de desplazamiento vertical y horizontal.

En la figura 3.5 se muestra un diagrama que de manera general ilustra las diferentes etapas de las cuales se compone el programa del perfilógrafo, cuando se inicia con una prueba, lo primero corresponde a la calibración vertical del sistema, seguido de la obtención de los parámetros de operación, cuando se tienen ya listos los parámetros de operación se procede con la adquisición del perfil en la pista correspondiente, una vez que se indica mediante el botón “Pausar prueba” del panel de control que el procedimiento puede iniciar.

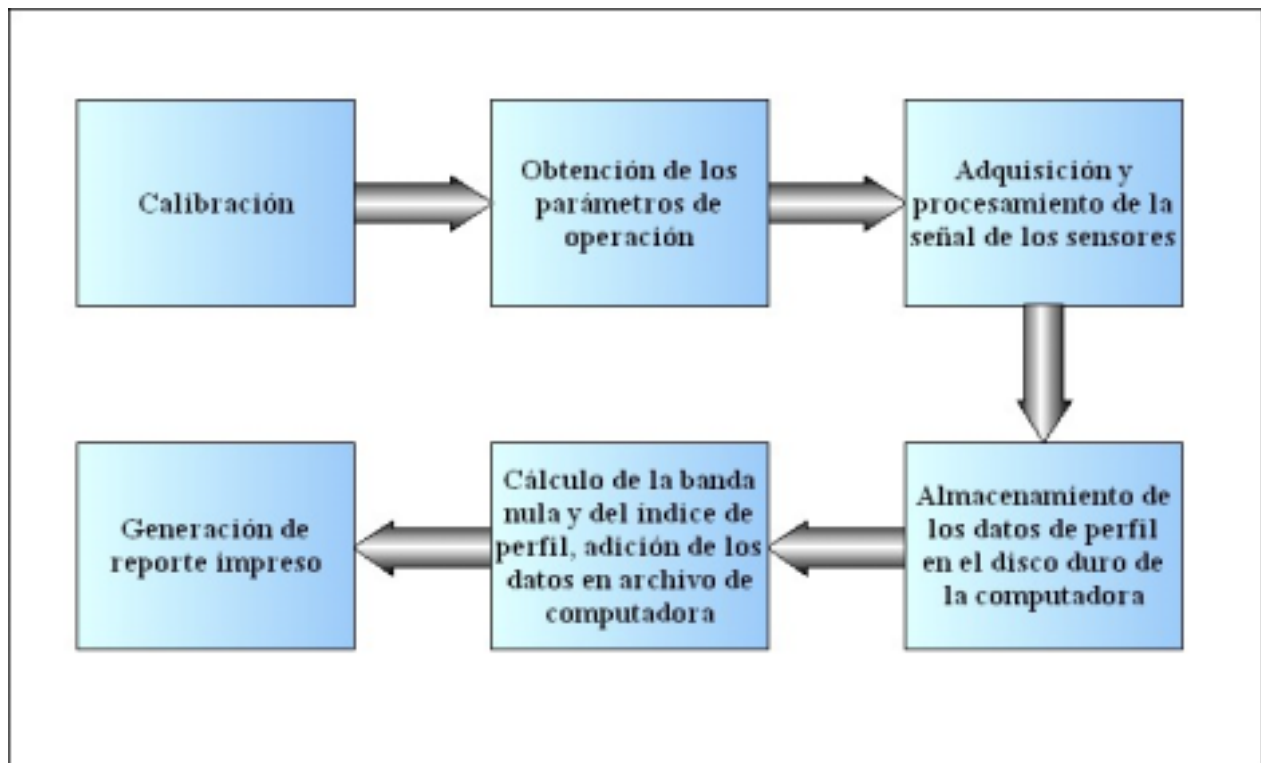


Figura 3.5. Bloques generales que componen el programa del perfilógrafo.

Como se aprecia en la figura anterior, al iniciar la prueba se adquieren los datos provenientes de los sensores y son procesados para eliminar ruido y datos que no forman parte del perfil, a medida que los datos se adquieren son almacenados en el disco duro de la computadora, como se representa en el siguiente bloque. Cuando se finaliza con la adquisición de los datos, se calcula la banda nula y el índice de perfil de la sección, cuando se tiene estos datos,

son agregados también al archivo que se generó para el almacenamiento de los datos. Finalmente, se genera el reporte impreso con la información si es que el usuario así lo dispuso.

Al iniciarse la ejecución del programa, primero se ejecuta una rutina en la cual se pregunta al usuario que es lo que desea realizar, teniendo éste dos opciones: iniciar un nuevo procedimiento de prueba para obtener el perfil de una superficie, o bien imprimir alguno de los archivos que se tienen almacenados en el disco duro de la computadora. De esta forma se tiene una estructura “*case*” que selecciona el código que ejecuta cualquiera de estas dos opciones. Si la opción elegida es iniciar una nueva prueba, la primera acción a ser realizadas como lo muestra la figura anterior es la calibración de desplazamiento vertical del sistema.

III.3.1. Subrutina de calibración vertical

Al inicio de ejecución de la ejecución de la subrutina de calibración vertical del programa del perfilógrafo se pide al usuario mediante un cuadro de diálogo, que realice una calibración vertical del sistema para que de esta forma las mediciones que se lleven a cabo sean confiables. El usuario puede sin embargo omitir dicha rutina de calibración y continuar con la ejecución del programa.

Si el operador elige calibrar el sistema, se invocará a una subrutina o sub VI, que ejecutará una secuencia de calibración específica. La secuencia de calibración vertical consiste en la obtención de desplazamientos conocidos de la llanta sensora, para ello se hace uso de un bloque de aluminio con dos alturas establecidas de 1 y 2 pulgadas de alto y de una placa base también de aluminio. En la figura 3.6 se observa una imagen del dispositivo de calibración.

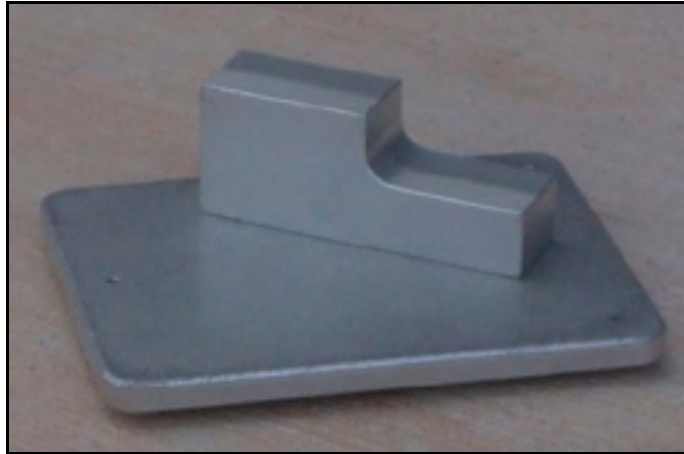


Figura 3.6. Dispositivo de calibración vertical.

El procedimiento de calibración consiste en tomar la referencia de desplazamiento vertical a partir de la placa base. Una vez colocada la placa base se coloca la llanta sensora sobre el primer escalón, tomar el desplazamiento que existió de la llanta sensora, al llevarlo de la placa base a este primer escalón, y dado que se conoce la altura de los escalones respecto de la placa base, se conoce cual es el desplazamiento que debe ser registrado por el sistema.

La altura del primer escalón es de 25.4 milímetros (1 pulgada), de esta forma el primer desplazamiento debe ser de 25.4 milímetros ± 0.5 milímetros. El siguiente paso es colocar la llanta sensora en el segundo peldaño y tomar el desplazamiento obtenido, el cual deberá ser de 50.8 milímetros (2 pulgadas), tomando como referencia la placa sensora y de 25.4 milímetros ± 0.5 milímetros respecto del primer peldaño.

El resto de la calibración consiste en realizar la secuencia ahora en sentido inverso, es decir, tomar la lectura del segundo peldaño, después la altura del primer peldaño y verificar que la diferencia de desplazamientos se encuentre entre los 25.4 milímetros ± 0.5 milímetros, y continuar con la secuencia hasta llegar nuevamente a la placa base, todos los desplazamientos deben cumplir con la tolerancia establecida, sólo de esa forma se considera satisfactoria la prueba de calibración vertical.

En la figura 3.7 se muestra la pantalla que aparece al momento de realizar la calibración. Como se observa se tiene cuadros de texto para la lectura de cada uno de los desplazamientos, y cuadros de texto que indican las diferencias respectivas entre cada uno de los desplazamientos.

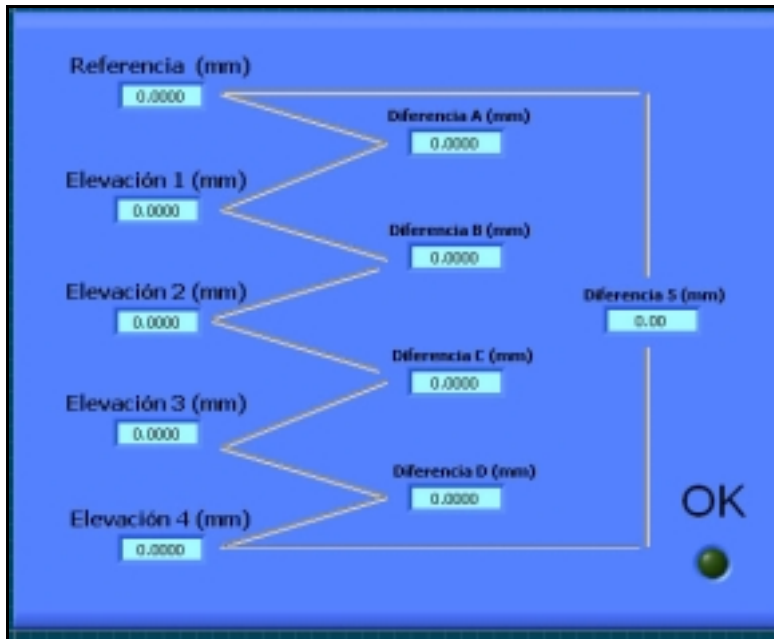


Figura 3.7. Pantalla de calibración del desplazamiento vertical.

El primer cuadro de texto de la figura anterior colocado en el extremo superior izquierdo, corresponde a la referencia inicial de desplazamiento, es decir, la lectura obtenida con la lectura de la placa base. La elevación 1 corresponde con el desplazamiento sufrido por la llanta sensora para llegar al primer escalón, la elevación 2 es la lectura obtenida al llevar a la llanta sensora hasta el segundo escalón, la elevación 3 corresponde con la lectura obtenida en el primer escalón, pero ahora al desplazar la llanta sensora del segundo al primer escalón, y finalmente la elevación 4 corresponde con la lectura de desplazamiento tomada nuevamente sobre la placa base.

Los cuadros de texto colocados en la parte central del cuadro de diálogo corresponden con las diferencias entre los desplazamientos. La diferencia A corresponde al desplazamiento de la base de referencia al primer peldaño tomado de manera ascendente, la diferencia B corresponde

con el desplazamiento de la llanta sensora del primer al segundo peldaño, nuevamente de manera ascendente, la diferencia 3 corresponde con el desplazamiento de la llanta sensora del segundo peldaño al primer peldaño, pero ahora en un recorrido descendente, la diferencia 4 corresponde al desplazamiento de la llanta sensora del segundo al primer escalón nuevamente en un recorrido descendente. Finalmente la diferencia 5 corresponde con la diferencia de desplazamiento tomada entre la primer lectura de la placa base (cuando inicia la calibración) y la ultima lectura de la placa base (al terminar la calibración).

Como se mencionó anteriormente, la calibración se considera exitosa siempre y cuando la diferencia en valor absoluto, entre las elevaciones determinadas sucesivamente sea de 25.4 ± 0.5 milímetros, y si la diferencia entre la elevación inicial y final es de 0.76 milímetros como máximo. En la figura 3.8 se muestra el diagrama de bloques del inicio de la subrutina de calibración vertical.

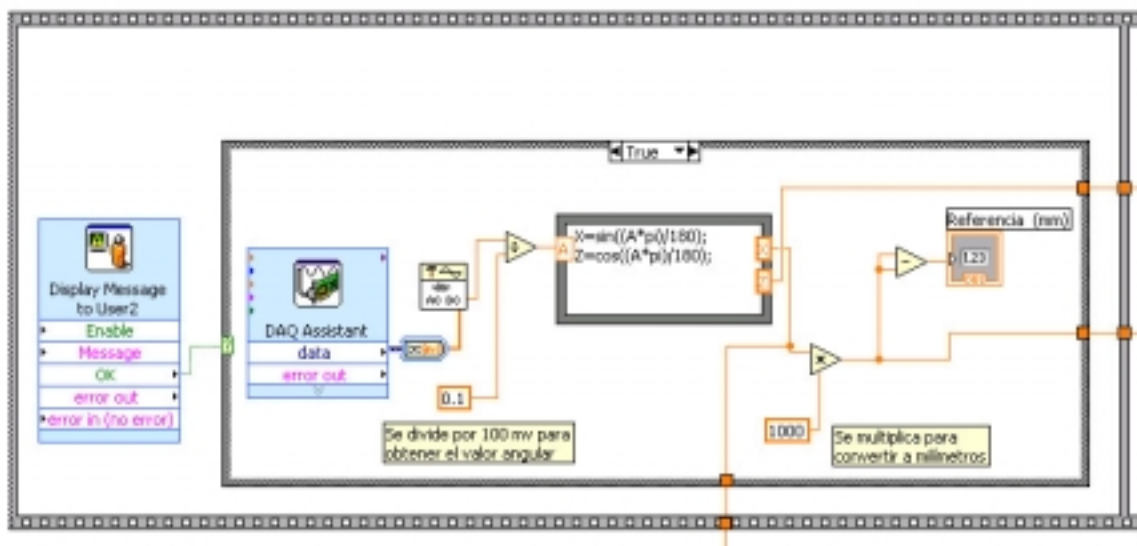


Figura 3.8. Inicio de la subrutina de calibración vertical.

Esta subrutina se encuentra controlada por un lazo “while”, el cual es controlado por un botón, que en este caso permite realizar el procedimiento de calibración o bien omitirlo, dicho botón corresponde al cuadro de diálogo que aparece al inicio de la rutina de calibración preguntando al usuario si desea llevar a cabo la calibración. Cabe destacar que una vez que el

usuario realizó la calibración debe completarla hasta finalizarla, no es posible abortar dicha rutina una vez que ha iniciado.

Una vez que se ha seleccionado llevar a cabo la calibración vertical, la subrutina entrará en una estructura secuencial, la cual a medida que avanza, solicitará al usuario realizar cada una de las acciones necesarias con la llanta sensora (colocarla en determinado escalón o sobre la placa base) para completar la calibración. Como se muestra en la figura 3.8, el bloque cuenta con un asistente de adquisición de datos, en este caso nombrado *DAQ Assistant* en la figura, dicho asistente se encarga de tomar 1000 lecturas a una tasa de muestreo de 10 kilo muestras por segundo. En la figura 3.9 se muestra los campos para configurar en el asistente.

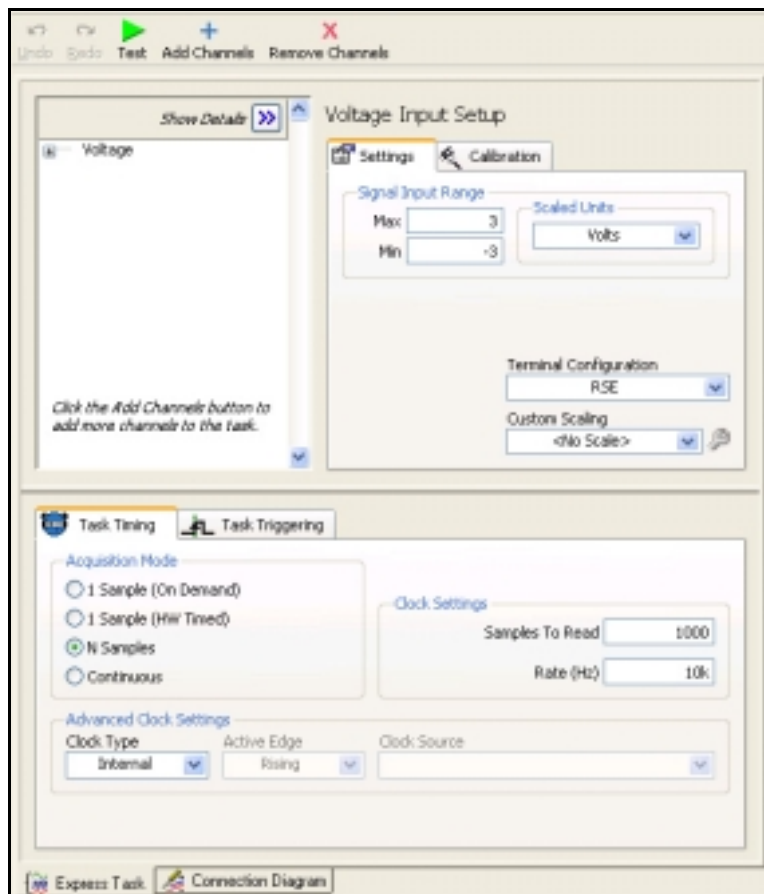


Figura 3.9. Cuadro de configuración de la señal de calibración.

La finalidad de tomar varias muestras es con la finalidad de reducir el error al máximo, si contamos con el promedio de 1000 muestras, tendremos una mayor certidumbre de la lectura real. El promedio de todas las muestras tomadas se lleva a cabo con un bloque de LabVIEW especialmente diseñado para esta tarea.

Una vez que se tiene el promedio de las muestras adquiridas se procesa el desplazamiento angular leído del transductor, el cual entrega un voltaje de DC proporcional a dicho desplazamiento, se transforma el voltaje y se obtiene el desplazamiento equivalente en grados, esto se logra simplemente al dividir la lectura obtenida por 0.1, ya que como se mencionó, el transductor entrega 100 mV por cada grado de desplazamiento. Con la lectura promedio en grados, es posible procesarla para obtener el desplazamiento lineal a partir del desplazamiento angular, esto a través de un bloque de fórmula de LabVIEW, el cual permite la inclusión de líneas de texto y por lo tanto simplificar la programación. En este cuadro de fórmula se obtiene el cateto opuesto y el cateto adyacente del triángulo formador por la horizontal y por el ángulo de desplazamiento inicial del brazo de la llanta sensora medido a partir de la horizontal. De esta manera, el cateto opuesto de dicho triángulo servirá como desplazamiento de referencia al resto de los desplazamientos. Dado que la hipotenusa de este triángulo imaginario es de exactamente 1 metro, el valor obtenido para el cateto opuesto (desplazamiento inicial) es transformado a milímetros al multiplicarlo por 1000. La figura 3.10 muestra el siguiente bloque dentro de la rutina de calibración vertical.

Nuevamente en este bloque se tiene un asistente de adquisición de datos que al igual que en el bloque anterior, tomará 1000 muestras con una tasa de 10 kilo muestras por segundo, se observa también en este bloque de la secuencia, la obtención de la “elevación 1”, y al contar con la “lectura de referencia”, es posible obtener la “diferencia A”, la cual es la diferencia entre ambas lecturas en valor absoluto. Una vez que se obtiene la diferencia absoluta, es convertida a milímetros y llevada al cuadro de texto del panel de control de la calibración vertical.

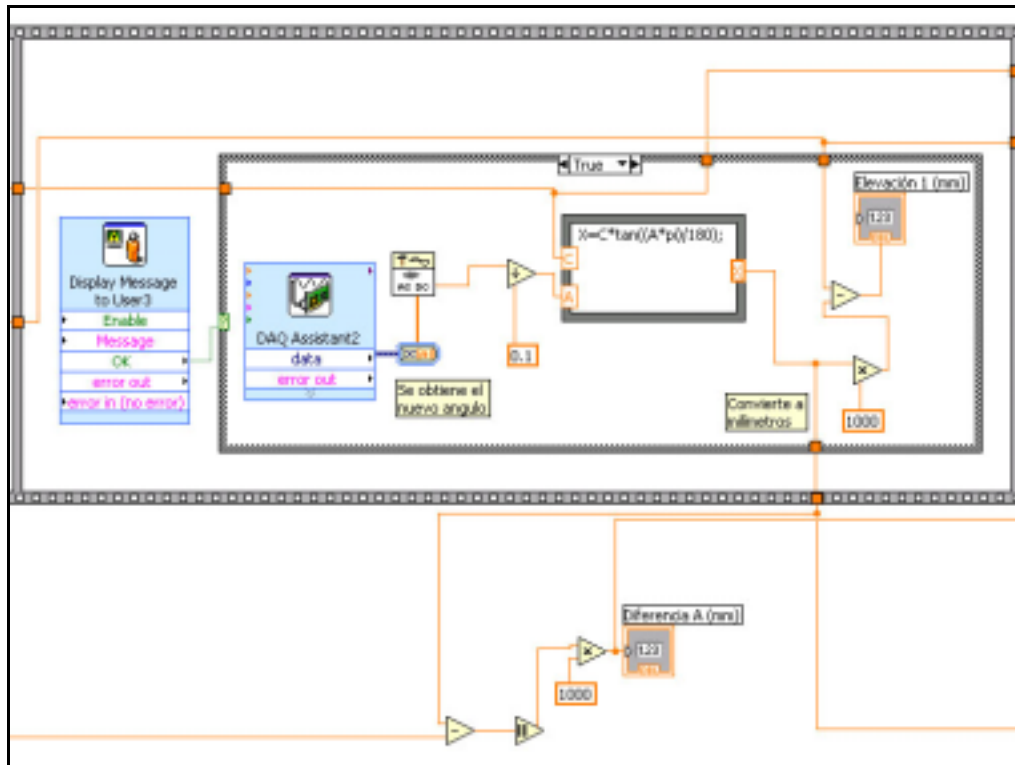


Figura 3.10. Segunda secuencia de calibración vertical.

El resto de los desplazamientos y de las diferencias se obtiene de manera similar; a medida que se avanza en el procedimiento de calibración se obtiene el valor para cada una de las casillas del panel de control. Para cada uno de los avances se muestra al usuario un cuadro de texto que le indica exactamente cual es la acción por parte del operador debe ser llevada a cabo en ese instante en particular, en la figura 3.11 se muestra uno de estos cuadros de texto.

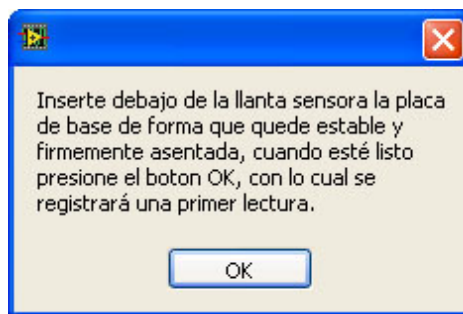


Figura 3.11. Cuadro de texto en la secuencia de calibración vertical.

Al obtener todos los desplazamientos y diferencias, se procede a verificar si cada una de las lecturas se encuentra dentro de las tolerancias permitidas, esto se muestra en el diagrama mostrado en la figura 3.12.

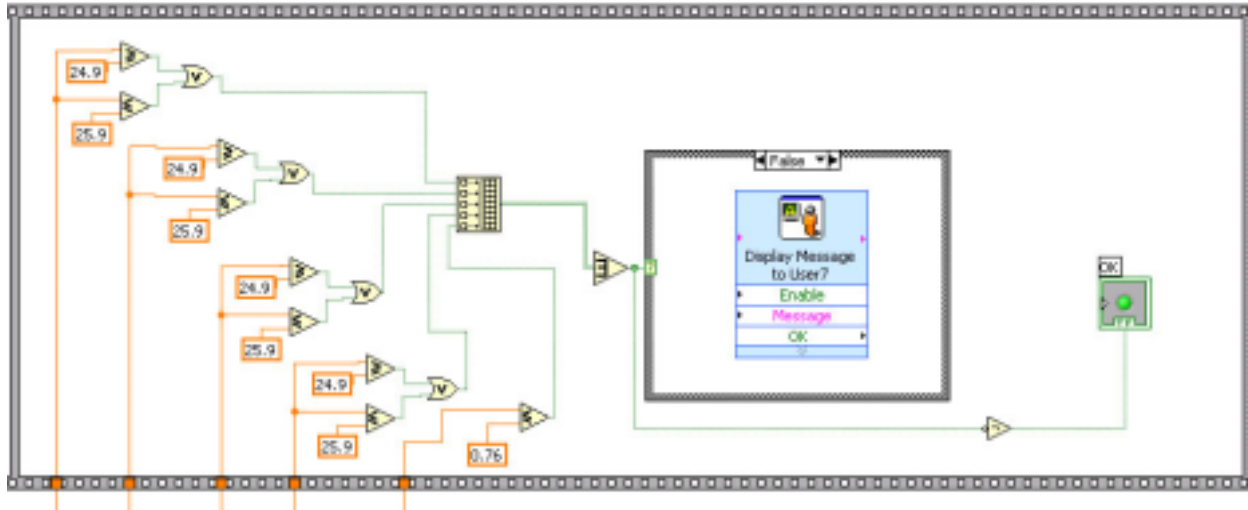


Figura 3.12. Verificación de tolerancias en la calibración vertical.

Como se observa en la figura 3.12, se verifica que los desplazamientos se encuentren entre 24.9 milímetros y 25.9 milímetros; se debe cumplir con medio milímetro por arriba y por debajo de 25.4 milímetros, y en cuanto a las diferencias entre los desplazamientos inicial y final, no deben superar los 0.76 milímetros. Cada una de las comparaciones se lleva a una compuerta lógica AND, la cual entregará un valor lógico “1” siempre y cuando se cumpla con la tolerancia, las salidas de todas las compuertas son llevadas a un arreglo AND que verifica todas las salidas, y solamente cuando coincidan todas en el valor “1” se generará una salida verdadera, la cual se conecta a una estructura “Case” booleana. Para el caso verdadero se tiene un mensaje en el cual se notifica al operador que la rutina de calibración se realizó de manera exitosa (cuando todos los desplazamientos y diferencias se encontraron dentro de límites permitidos), y en caso falso de la estructura, se notifica al usuario que uno o más de los desplazamientos no cumplieron con los requerimientos de la calibración, y se permite cancelar la prueba o bien continuar, con la advertencia de que una mala calibración puede generar resultados poco confiables.

Una vez que se superó la prueba de calibración, o bien se haya decidido omitirla, se procede a la creación del archivo de datos donde se almacenará la información adquirida durante las pruebas. Esto se muestra en el diagrama de la figura 3.13.

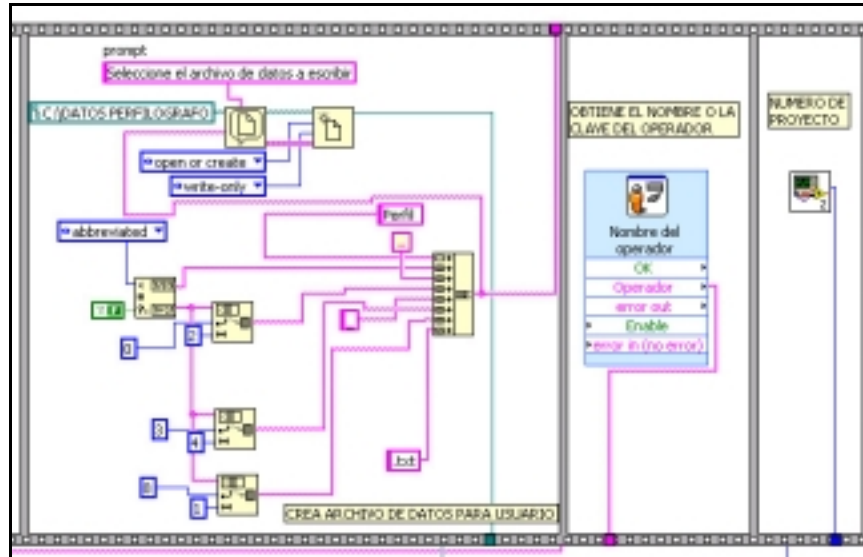


Figura 3.13. Creación del archivo de datos del perfilógrafo.

LabVIEW cuenta con un bloque de generación de archivos de texto, donde es posible asignar el un nombre a dicho archivo, además de poder seleccionar la carpeta donde se almacenará, todo esto a través de un cuadro de diálogo. Para facilidad del usuario, se arregló esta parte del código de tal forma que se tenga una carpeta donde se almacenan los archivos y se asigne un nombre que permita de manera sencilla identificar una determinada prueba, se optó por nombrar a cada archivo como “perfil *fecha hora*”, donde el campo de *fecha* y *hora* es sustituido automáticamente por la fecha y hora en la cual se está llevando a cabo la prueba. Esto facilitará la ubicación de archivos cuando se desee consultar archivos ya almacenados en la computadora. Puede sin embargo, ser modificado el nombre por cualquiera que el usuario desee, así como la ubicación.

Una vez que se ha seleccionado nombre y ubicación para el archivo con el cual se trabajará, el programa solicitará al usuario todos los parámetros de operación que fueron descritos

anteriormente, cada uno de estos parámetros de operación cuenta con una subrutina separada. En la figura 3.14 se observa que las secuencias subsecuentes adquieren el nombre del operador y el número de proyecto, es posible observar que los sub VI's entregan señales al programa principal, donde precisamente se informa a la rutina principal sobre las acciones tomadas por el usuario. En la figura 3.14 se observan las etapas subsecuentes de la estructura secuencial, donde se identifica como cada uno de los parámetros es adquirido a través de una subrutina y que cada uno de ellos entrega datos al programa principal, ya sea en formato de texto (líneas de color rosa) o bien mediante un valor numérico (líneas azules).

En la figura se observa la adquisición de los parámetros de trayectoria, dirección, línea, pavimento, ruta y banda nula o semitransparente. El resto de los parámetros son adquiridos similarmente, aunque no son mostrados en la figura. Cada una de estas subrutinas será tratada a continuación.

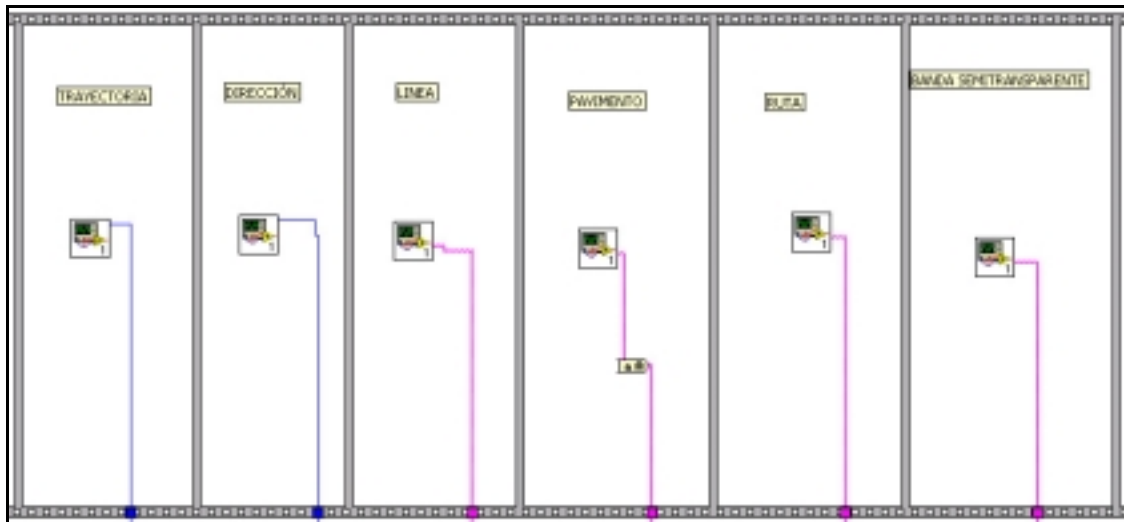


Figura 3.14. Secuencia de adquisición de parámetros.

III.3.2. Subrutina de obtención del número de proyecto

El número de proyecto es uno de los parámetros que permiten identificar un proyecto mediante un dígito para alguna pista o pavimento en particular, en este parámetro se permite la

inclusión de un número que va desde 1 hasta 65,535, que es el entero positivo mayor que puede representarse utilizando 16 bits, y que es el formato empleado para la representación de este parámetro. En la figura 3.15 se muestra una imagen de la pantalla que aparece en el panel frontal del perfilógrafo cuando se solicita el dato al usuario. La pantalla muestra un control que permite incrementar o disminuir en una unidad el número de proyecto, aunque también puede directamente colocarse el cursor sobre el dígito y modificarlo con el teclado. Se agregaron filtros de protección contra datos erróneos introducidos que pudieran ser introducidos por el usuario, como números fraccionarios, números negativos, caracteres no numéricos, etc.



Figura 3.15. Pantalla de ingreso del número de proyecto.

En el diagrama de bloques, que se muestra en la figura 3.16, se mantiene la ejecución de la subrutina dentro de un ciclo “while”, controlado por un interruptor *booleano* que permite detener la ejecución de la subrutina en cualquier momento, dentro del ciclo se colocó un cuadro de diálogo que aparecerá en caso de que el operador presione el botón de ayuda. Se colocó un botón de ayuda en todos los parámetros en caso de que el operador tenga confusión respecto al papel que desempeña cada uno de los parámetros dentro de la ejecución del programa.

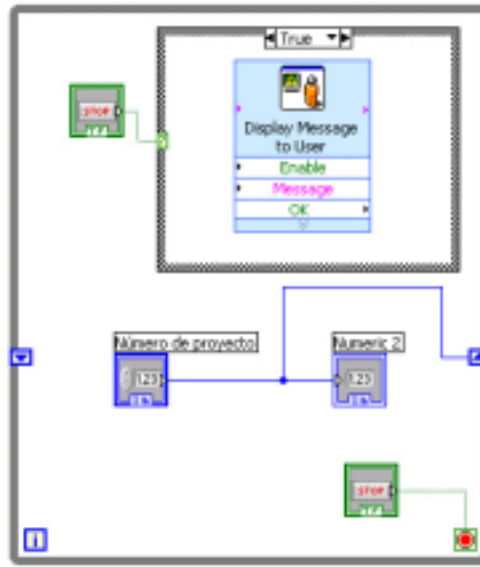


Figura 3.16. Diagrama de bloques de la subrutina del número de proyecto.

El cuadro de diálogo se encuentra dentro de una estructura “case” que cuenta con únicamente 2 opciones, tratándose por lo tanto también de una selección de tipo *booleana*. Finalmente se observan un control y un indicador numérico, es necesario agregar el indicador numérico, ya que de éste es donde tomaremos el parámetro para que sea enviado a la rutina principal, el indicador será colocado con el resto de los parámetros en el reporte que se almacena en la computadora, así como en el reporte impreso correspondiente. Se observa que el parámetro es llevado fuera de la estructura cíclica, a través de un registro de corrimiento, representado por las flechas a los lados de la estructura, en dicho registro no se coloca un dato de entrada, únicamente uno de salida, y que es precisamente el dato entero correspondiente al número de proyecto.

III.3.3. Subrutina de obtención del número de documento

Este es otro parámetro que permite la identificación de un documento en específico dentro de un proyecto, es de igual forma un identificador numérico de 16 bits que permite asignar un

dato de 0 a 65,535. En la figura 3.17 se muestra una imagen del cuadro de diálogo que aparece sobre el panel de control una vez que es invocada la subrutina.



Figura 3.17. Cuadro de diálogo para la obtención del número de documento.

Al igual que en el caso anterior se cuenta con un botón que permite obtener una descripción sobre la función de dicho parámetro dentro del sistema. El diagrama de bloques, que se muestra en la figura 3.18, cuenta con una estructura que es similar al caso anterior, la principal diferencia radica en la adición de una variable local, con lo cual se puede evitar el cableado del ícono de la subrutina con la variable que se desee enlazar dentro del programa de LabVIEW, una variable en LabVIEW es similar a una en un lenguaje de programación basado en texto, puede tomar valores de acuerdo a la ejecución del programa. Existen variables para cada uno de los tipos de datos que maneja el entorno de programación.

Otra diferencia también respecto a la subrutina anterior es la adición de un temporizador de 50 milisegundos, lo cual provocará que cada 50 milisegundos se ejecute el ciclo *while* de la subrutina, liberando entre tanto al procesador para poder llevar a cabo otra tarea.

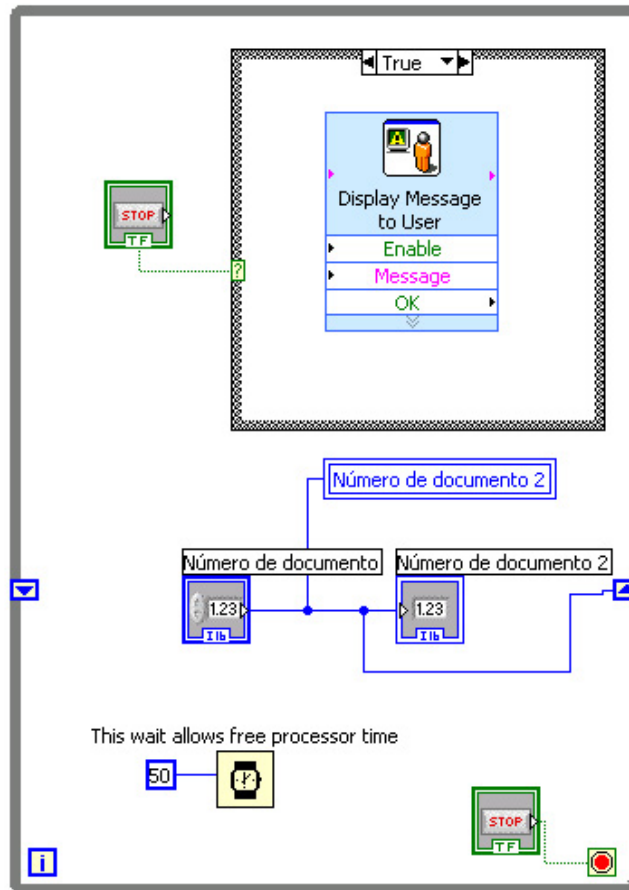


Figura 3.18. Diagrama de bloques de la subrutina de obtención del número de documento.

III.3.4. Subrutina de obtención del inicio de sección

A diferencia de los dos parámetros anteriores, que simplemente sirven como una referencia para cada uno de los trabajos realizados, este parámetro si juega un papel importante en el desempeño del sistema, ya que a través de éste, es posible conocer exactamente la marca inicial de desplazamiento del perfilógrafo, y a partir de ésta llevar a cabo el análisis correspondiente a los segmentos de pista. En la figura 3.19 se observa el cuadro de diálogo con el que el usuario tendrá que interactuar al momento de especificar el parámetro.



Figura 3.19. Cuadro de diálogo para especificar el inicio de una sección.

En el cuadro de diálogo se especifica la sección de arranque en el formato de kilómetros más los metros de desplazamiento, por lo cual fue necesario colocar dos controles, uno para kilómetros y otro para los metros, esto porque es el formato que suele emplearse en este tipo de trabajos dentro del aeropuerto. Si por ejemplo se trabaja sobre el kilómetro 3.25 de una pista, este se especifica como 3 + 250. El rango manejado para los kilómetros es de 0 a 65,535 y para el caso de los metros se tiene un margen de operabilidad de 000 a 999.

En el caso del diagrama de bloques, el cual se muestra en la figura 3.20, se estructuró nuevamente como un ciclo “while” controlado por un botón, y con una estructura “case” en caso de que el usuario requiera de ayuda. Se tiene también un control y un indicador para cada una de las variables manejadas.

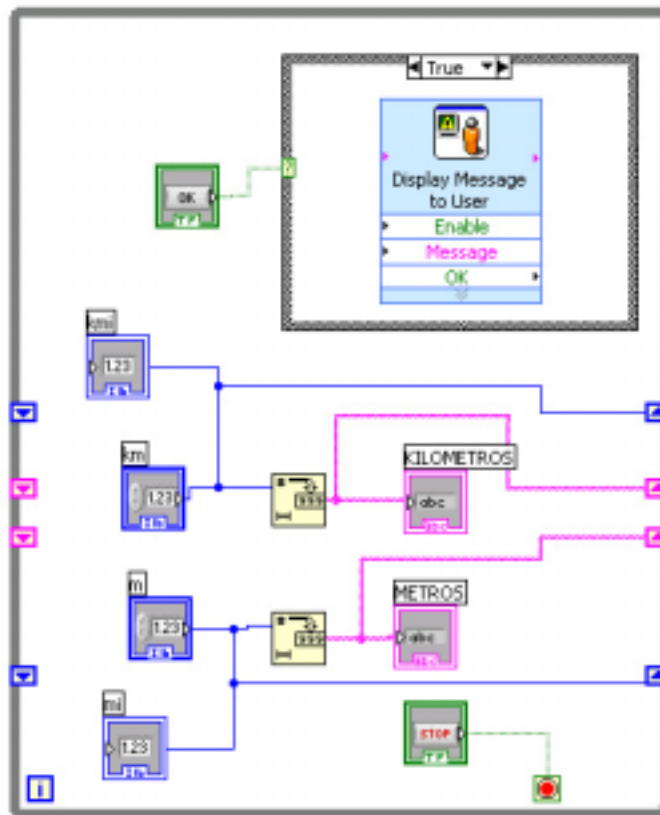


Figura 3.20. Diagrama de bloques de la subrutina de inicio de sección.

En la figura anterior se nota que la subrutina maneja datos enteros (líneas oscuras delgadas) y datos de tipo carácter (líneas claras gruesas), esto es debido a que se requiere del dato entero para inicializar un contador de desplazamiento, en tanto que los datos de tipo carácter se emplean en la generación del reporte de la computadora y del reporte impreso. La subrutina maneja originalmente las variables como datos numéricos de tipo entero a través de la interfaz de usuario, y después a través de un bloque de LabVIEW son convertidos a datos de tipo carácter, mediante este bloque es posible especificar el formato a emplear; en caso de no especificarse, LabVIEW automáticamente asigna el formato más compacto y conveniente del dato, por ejemplo, si el dato entero es el 0016, LabVIEW convertirá dicho dato a la cadena “16”, omitiendo los ceros que no son significativos, si se deseara que dichos ceros se mantuvieran en la cadena, es posible especificarlo en el bloque, sin embargo, no es éste el caso.

III.3.5. Subrutina de obtención de la trayectoria

Este parámetro de operación permite conocer sobre cual de las trayectorias de las pistas se está llevando a cabo la prueba, generalmente el trabajo se realiza por el centro de la pista, pero bien puede ser cambiado a una trayectoria izquierda o derecha. En este parámetro, dado que solamente son tres las opciones disponibles para el usuario, se despliega un menú con cada una de estas opciones, el cual las hace mutuamente excluyentes. En la figura 3.21 se muestra la pantalla mostrada al usuario cuando se ejecuta la subrutina, al igual que en todos los parámetros se cuenta con un botón de ayuda que orienta al operador sobre la función del parámetro que está modificando.

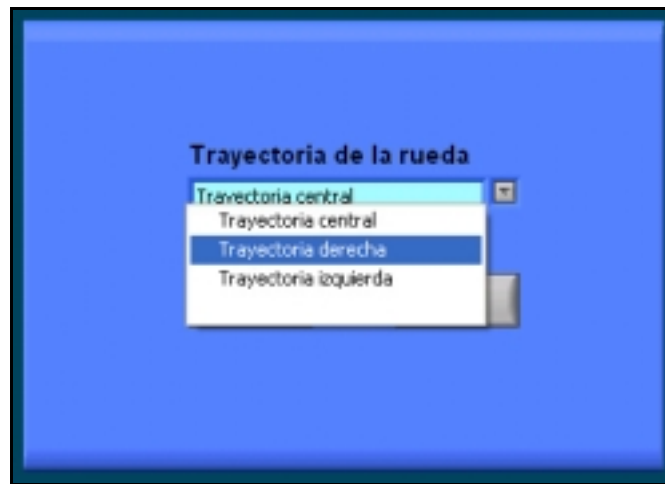


Figura 3.21. Cuadro de diálogo para modificación de la trayectoria de la rueda.

El diagrama de bloques de esta subrutina está conformado también por un ciclo “while”, sobre el cual tiene control el operador a través del botón marcado con la leyenda “OK”, mediante la cual se acepta el parámetro actual y por lo tanto se termina la ejecución de la subrutina. El diagrama de bloques se muestra en la figura 3.22, en ella se observa que se tiene una situación contraria a los casos anteriores, ya que la lista desplegable entrega cadenas de texto, pero requerimos además de la cadena, de un valor numérico para asociarlo con la rutina principal del código, esto se lleva a cabo nuevamente de manera simple a través de un bloque ya construido en LabVIEW, pero que realiza la función inversa, es decir, convierte texto en caracteres enteros en este caso.

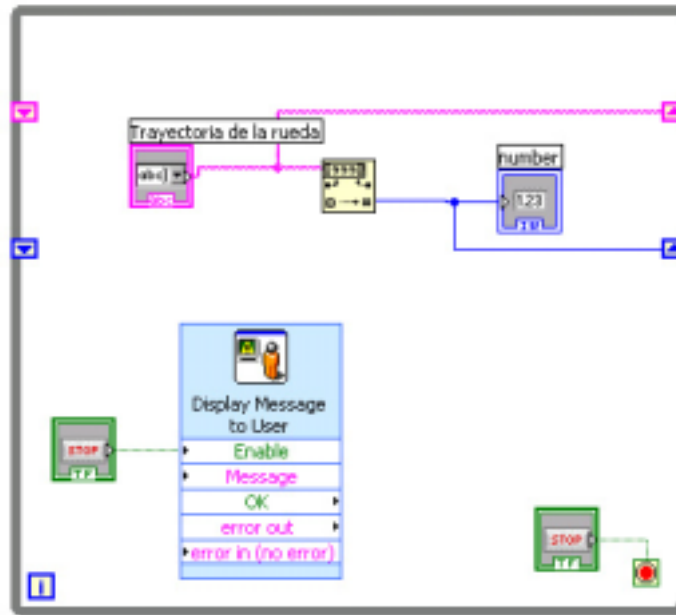


Figura 3.22. Diagrama de bloques de la subrutina de modificación de la trayectoria.

El botón de ayuda se programó en esta subrutina empleando un bloque Express, a diferencia de los casos anteriores donde se empleaba una estructura secuencial; con el bloque Express simplemente el botón de ayuda se conecta a la terminal de habilitación de dicho bloque, el funcionamiento para el operador es exactamente igual en ambos casos para la ayuda.

III.3.6. Subrutina de obtención de la dirección

Con este parámetro se especifica la dirección en la cual es empujado el perfilógrafo, nuevamente se trata de un parámetro para la identificación correcta de la pista sobre la cual se realizó la prueba, al igual que en el caso anterior se tiene un menú desplegable con opciones ya predefinidas, de tal forma que el operador puede únicamente seleccionar entre dichas opciones. Como opciones se han manejado los cuatro puntos cardinales: norte, sur, este y oeste.

Se cuenta también con un botón de ayuda para el usuario. En la figura 3.23 se muestra una imagen del cuadro de diálogo que aparece al momento de ejecutar la subrutina.

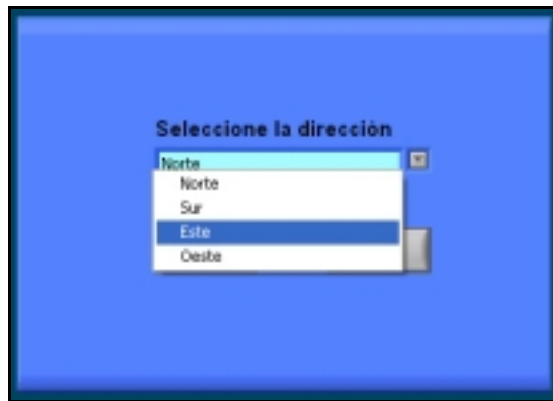


Figura 3.23. Cuadro de diálogo para la modificación de la dirección.

En el diagrama de bloques de la subrutina se incluye un menú desplegable, el cual entrega cadenas de texto correspondiente a la selección del usuario, las cuales se emplean para incluirlas en el archivo que se almacenará en la computadora y para el reporte impreso, estas cadenas son convertidas a un valor numérico para que pueda ser empleada en la rutina principal del programa. Nuevamente el cuerpo principal está compuesto por un ciclo “while” que es controlado por el usuario mediante el botón OK. En la figura 3.24 se muestra el diagrama de bloques de esta subrutina.

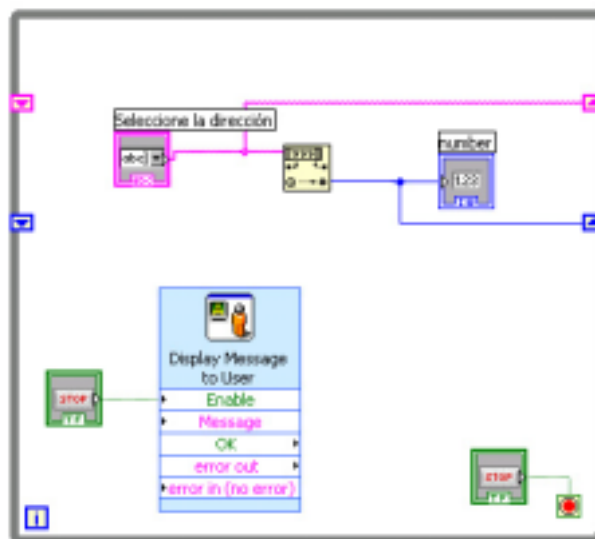


Figura 3.24. Diagrama de bloques de la subrutina de selección de dirección.

III.3.7. Subrutina de obtención de la línea

El parámetro de línea permite especificar diferentes pruebas sobre una misma pista, al adicionar un número. Por ejemplo, si se realizan tres trazos en la trayectoria derecha, puede cada uno de ellos ser diferenciado con este parámetro. Se utiliza cuando se requiere conocer a detalle el perfil de una sección realizando varias pruebas sobre la misma. El cuadro de diálogo mostrado al usuario aparece en la figura 3.25. Se tiene un controlador que permite incrementar el número de línea, o bien disminuirlo, teniendo como valor máximo 512 y como valor mínimo el 1.

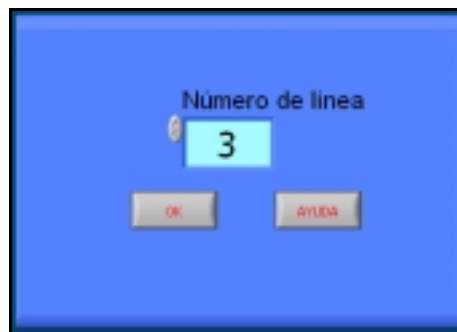


Figura 3.25. Cuadro de diálogo para la modificación del número de línea.

En el diagrama de bloques se emplea nuevamente el ciclo “while” para controlar la ejecución de la subrutina, en la figura 3.26 se muestra el diagrama de bloques. El control del número de línea entrega un valor entero, por lo que es necesaria su conversión a formato de texto para poder ser incluido en el archivo de datos y en el reporte impreso. La ayuda se implementó mediante un bloque Express controlado por un botón por el usuario.

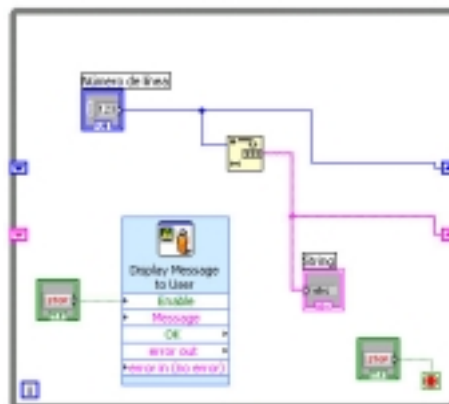


Figura 3.26. Diagrama de bloques de modificación del número de línea.

III.3.8. Subrutina de obtención del pavimento

Este es un parámetro que permite introducir información al usuario para identificar una pista o pavimento con un nombre que puede contener caracteres alfanuméricos con una longitud de hasta 12 caracteres. En la figura 3.27 se muestra el cuadro de diálogo de dicha subrutina.

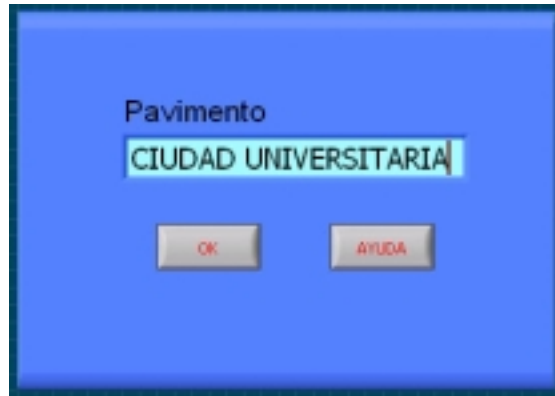


Figura 3.27. Cuadro de diálogo para la obtención del pavimento.

El parámetro puede ser cualquier cadena alfanumérica, con la restricción de que no debe sobrepasar 20 caracteres. Al igual que en los casos anteriores se dispuso de dos botones, uno para aceptar el parámetro actual y otro para ofrecer una orientación al operador sobre la función del parámetro. El diagrama de bloques de la subrutina se muestra en la figura 3.28, se emplea un cuadro de texto para capturar los caracteres y enviarlos a través de un registro de corrimiento a la rutina principal.

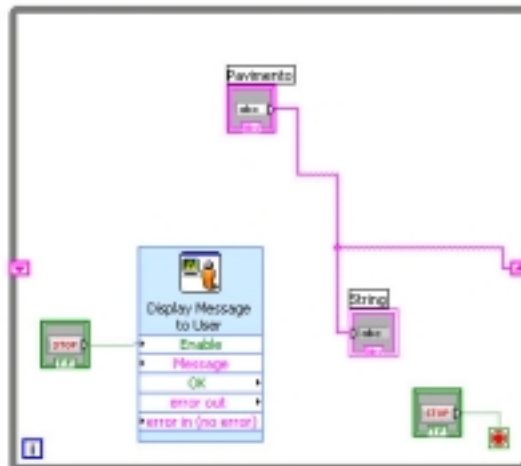


Figura 3.28. Diagrama de bloques de la subrutina de modificación del pavimento.

III.3.9. Subrutina de obtención de la ruta

La ruta es otro parámetro que puede contener ya sea números o caracteres y que sirve para que el operador agregue otro parámetro de identificación a la pista sobre la cual se está realizando la prueba, el parámetro no es de vital importancia en el desempeño del perfilógrafo y bien puede omitirse si es que el operador no ingresa ningún parámetro en el momento en que es solicitado por el programa. En la figura 3.29 se muestra el cuadro de diálogo que aparece al momento de ejecutar la subrutina.



Figura 3.29. Cuadro de diálogo para la modificación de la ruta.

Al igual que en los casos anteriores se agregó un botón de ayuda que permite al usuario recibir una orientación sobre la función del parámetro. El diagrama de bloques que se muestra en la figura 3.30, se encuentra integrado alrededor de un lazo “while”, el cual se encuentra en operación hasta que el usuario presiona la tecla OK. El parámetro se maneja como una cadena de texto, aunque bien puede introducirse sin problema cualquier carácter ASCII.

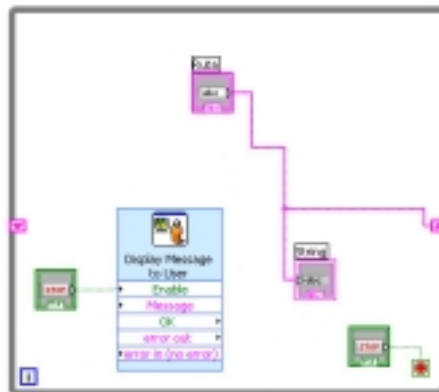


Figura 3.30. Diagrama de bloques de la subrutina de modificación de la ruta.

III.3.10. Subrutina de determinación del valor de la banda nula

Esta subrutina permite modificar el valor del ancho de la banda nula del perfilógrafo, es decir, se puede establecer un valor diferente al que se asigna por omisión, que es de 5 milímetros, como se ha comentado anteriormente. El cuadro de diálogo que se muestra al operador es el que aparece en la figura 3.31, en el se tiene un control que permite incrementar o disminuir en un milímetro el valor mostrado por el cuadro de texto, o bien puede ser modificado directamente al emplear el teclado directamente. Como en casos anteriores, se agregó un botón de ayuda para orientar al usuario sobre el parámetro que está modificando.

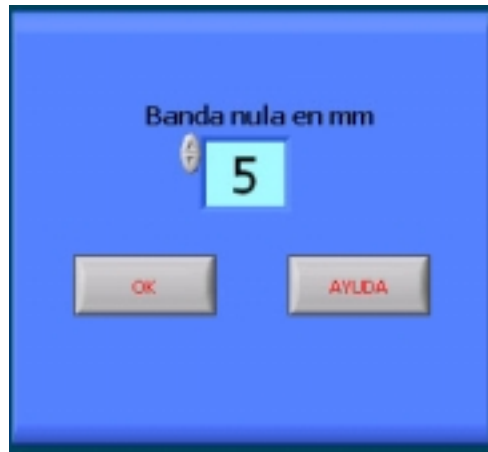


Figura 3.31. Cuadro de diálogo para la modificación de la banda nula.

El diagrama de bloque de la subrutina está integrado alrededor de un lazo “while”, el cual es controlado por el usuario mediante el botón OK. Cuando el usuario oprime dicho botón la subrutina envía a través de un registro de corrimiento el dato del cuadro de texto a la rutina principal del programa del perfilógrafo. Dado que se trata de un dato que participa activamente en el desempeño de las pruebas realizadas con el perfilógrafo, se requiere de su valor como un número entero y como una cadena de caracteres para imprimirse en los reportes, por lo cual se tienen dos registros de corrimiento, una para cada tipo de dato. El dato sobre el que se tiene control es el de tipo entero, el de texto es convertido a través de un bloque que LabVIEW posee. Para el botón de ayuda se empleó una estructura “Case” de tipo *booleana*, es decir, únicamente con dos posibilidades: falso y verdadero. Dicha estructura es controlada por el usuario a través del botón AYUDA, si el operador presiona dicho botón, se ejecutará la rutina correspondiente al

caso verdadero de la estructura, y en la cual se empleó un bloque Express para mostrar al operador información sobre el parámetro en cuestión. El diagrama de bloques de este parámetro se muestra en la figura 3.32.

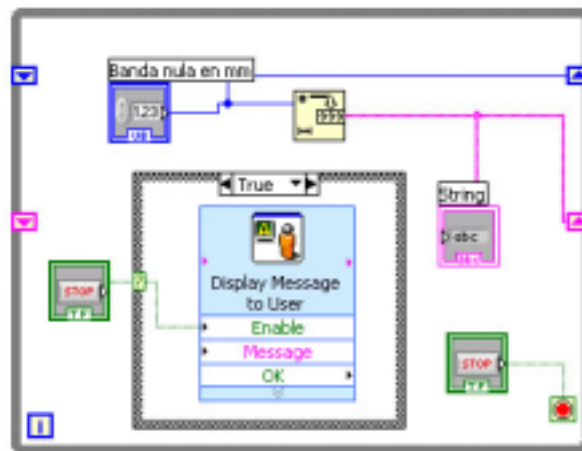


Figura 3.32. Diagrama de bloques de la rutina de modificación de la banda nula.

III.3.11. Subrutina de la obtención de la longitud del segmento

La longitud del segmento define el tramo de pista sobre la cual se calculará el PI, es decir, al cubrirse esta longitud el programa calculará de manera automática el PI, además de generar el reporte impreso, si es que así fue especificado por el usuario. El cuadro de diálogo de esta subrutina se muestra en la figura 3.33. La longitud que se maneja generalmente para el segmento es de 160 metros, si el operador no modifica este parámetro, será ésta la longitud de sección con la cual se trabaje.

La subrutina de modificación trabaja con dos registros de corrimiento, el primero de ellos contiene el valor decimal de la sección y es empleado en la rutina principal para modificar un contador dentro de un ciclo “*for*”, que se encargará de realizar la adquisición de datos, en tanto no se alcance la longitud preestablecida, y por el otro lado se tiene un registro de corrimiento del tipo *string*, que permite el envío del dato entero pero convertido a formato ASCII, mismo que permitirá enviar la información al reporte impreso y al archivo de la computadora.

III.3.12. Subrutina de obtención del orden del filtro a emplear

La finalidad de un filtro es procesar una señal determinada, de tal manera que al término del proceso la señal presente ciertas características en la frecuencia, cambiadas de acuerdo a ciertas especificaciones. Este objetivo de todo filtro es independiente de su realización, sea esta digital o analógica, y su comportamiento selectivo en frecuencias puede manifestarse en el módulo de la señal de salida, en la fase o en ambos.

Los filtros analógicos están constituidos por elementos reactivos fáciles de conseguir en el mercado, y cuya impedancia varía con la frecuencia (capacitores e inductores); pudiendo contener además elementos resistivos y componentes activos. Según las especificaciones del filtro (frecuencia de corte, transición entre las bandas de paso y de atenuación, etc.) su realización puede ser más o menos compleja. Filtros sencillos, como pueden ser filtros pasivos de orden reducido, son soluciones que generalmente operan en el dominio analógico.

Otro de los atractivos de los filtros analógicos es su capacidad para manejar niveles de potencia importantes, aspecto difícil o, en muchos casos, imposible de conseguir con solamente filtrado digital. Y, finalmente, los filtros analógicos permiten trabajar con bandas de frecuencias muy altas, aspecto que en el filtrado digital se ve limitado por la velocidad del procesador.

El filtrado digital es un algoritmo matemático, expresable como una ecuación en diferencias e implementado en *hardware* o *software*, cuyo objetivo es el mismo de los filtros analógicos. Al ser digital, tiene algunas ventajas, como por ejemplo la capacidad de memorización o de ejecución de decisiones basadas en reglas lógicas, según valores observados en las señales de entrada o salida. Cuenta además con otras ventajas como son: filtros con auto aprendizaje basado en la memorización de resultados previos, ajustes automáticos de las especificaciones del filtro, listado y estadísticas de resultados, etc.

Los filtros digitales, por su tecnología, presentan algunas ventajas respecto a los analógicos. Algunas de estas ventajas son su mayor inmunidad a condiciones ambientales (como la temperatura), su pequeño tamaño gracias a las tecnologías de muy alta escala de integración (VLSI, por sus siglas en inglés), el menor costo para filtros de un orden elevado, la repetibilidad de resultados (menor tolerancia a valores de los componentes), son muy versátiles para efectuar diversos tipos de filtrado sin tener que modificar el *hardware*, o su capacidad para operar con señales de frecuencia muy baja sin la necesidad de voluminosos capacitores ni de compensar variaciones de tensión o corrientes en dispositivos activos, como ocurre en el filtrado analógico.

Pero aparte de estas ventajas tecnológicas, con el filtrado digital se puede obtener filtros de fase lineal, imposibles con el filtrado analógico (la fase lineal, propia de los filtros FIR, sólo se puede aproximar en una limitada banda de frecuencia en el caso analógico), y se puede efectuar filtrados no lineales, predicciones de comportamiento de señales u optimizaciones del comportamiento del filtro según determinados criterios que el propio algoritmo puede ir supervisando.

Con esta breve introducción se han mencionado algunas de las ventajas del filtrado digital, pero ello no debe llevar a concluir que siempre es mejor que el analógico. El concepto “mejor”, es muy relativo, pues depende de la infraestructura para el desarrollo, del costo y de las prestaciones exigibles al filtro. Aparte de las ventajas de los filtros analógicos en el procesamiento de potencia y de señales de muy alta frecuencia, los filtros digitales pueden presentar problemas (ciertamente reducibles empleando tecnologías adecuadas) debidos a los

efectos de aritmética finita (longitud finita de las palabras digitales en los procesadores y en las memorias), que producen cierto tipo de ruido a la salida del filtro, o incluso inestabilidades si el número de bits con que se opera obliga a truncamientos o redondeos inaceptables de los resultados. También aspectos internos de los sistemas basados en microprocesadores o DSP, como posibilidades de saltos de los contadores de programa frente a interferencias eléctricas en los buses de datos o direcciones, y que pueden alterar la correcta ejecución de las subrutinas, son problemas potenciales de los filtros digitales.

Los problemas mencionados anteriormente son superables utilizando las tecnologías adecuadas, lo que supone disponer de los dispositivos adecuados. En el caso de la instrumentación del perfilógrafo, el *software* desarrollado del programa de aplicación posee filtros digitales que se configuran mediante *software*. El nuevo VI Express para filtros de LabVIEW puede configurar filtros pasa bajo, pasa alto, pasa banda, detención de banda y *smoothing*. Puede configurar rangos de corte, número de tapas para filtros de respuesta finita de impulso (FIR), orden para filtros de respuesta infinita de impulso (IIR) y topología de filtros como filtros Butterworth y Elíptico.

En la ventana de la caja de configuración del VI Express para filtros, se puede ver la señal de entrada como se adquirió y una vista previa de la señal resultante después del filtrado. Con este VI Express, se puede probar diferentes tipos de filtros y configurar mediante la vista previa la respuesta en frecuencia del filtro. Los beneficios de esta manera interactiva para configurar los filtros es que no se necesita entender de manera profunda el procesamiento digital de la señal y la programación del filtro, ya que se puede comparar entre ellos para lograr los resultados deseados. Es por esta razón que se empleó el filtrado de la señal digital, empleando las ventajas prestadas por LabVIEW, colocando filtros digitales a la señal proveniente del sensor de desplazamiento vertical y para la lectura de la temperatura ambiente, las cuales son las dos señales analógicas que se manejan dentro del sistema, siendo de carácter crítico la primera y no tanto así la segunda. En la figura 3.35 se muestra la imagen de la señal del transductor de temperatura antes de ser filtrada.

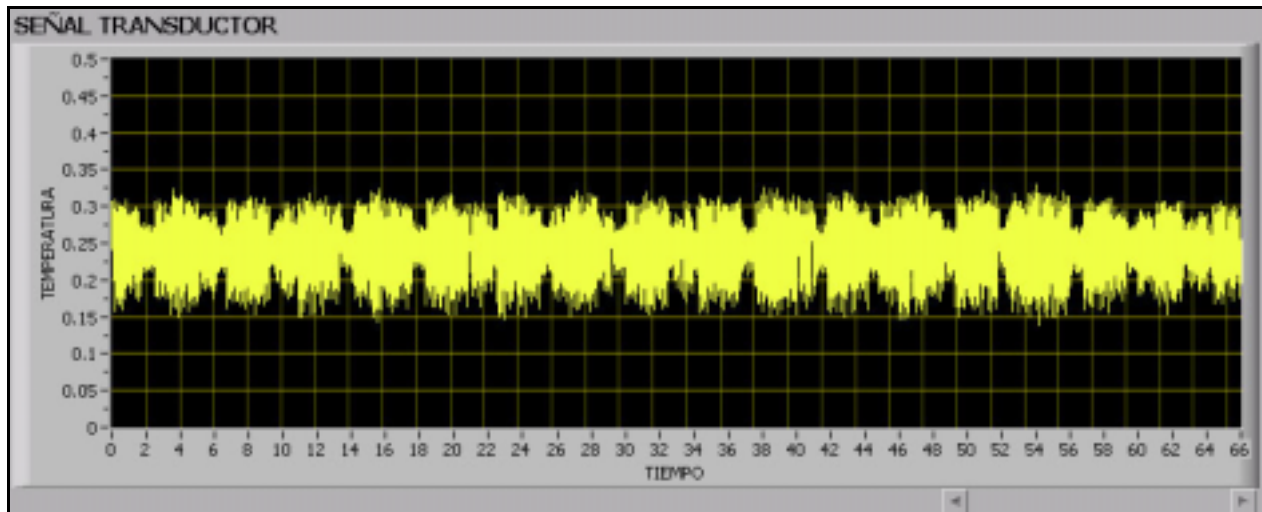


Figura 3.35. Señal del transductor de temperatura sin filtrar.

Como se comentó en apartados anteriores, el transductor de temperatura entrega 10 mV por cada grado centígrado, en la figura anterior se muestra una temperatura ambiente de 25 grados centígrados, sin embargo, es muy evidente que la señal tiene variaciones que van desde los 150 milivolts hasta los 300 milivolts, si la señal se tomara directamente sin hacer un procesamiento previo, la lectura en cualquier indicador tendría variaciones muy grandes sin estar en un valor estable, dicha inestabilidad se debe principalmente a ruido de tipo eléctrico que es generado por algunos otros de los módulos que componen el sistema.

La señal de la temperatura ambiente presenta variaciones muy lentas, y el ruido que se añade a ella es de una alta frecuencia, comparada con la señal de interés, por esta razón se colocó un filtro paso bajas, con una frecuencia de corte de 5 Hz. El filtro seleccionado fue uno de tipo Butterworth de segundo orden, se seleccionó este tipo y orden de filtro ya que se tiene una respuesta sin muchas variaciones en la banda de paso, y aunque la caída es más lenta en la banda de transición, dada la naturaleza de la señal con la que se trabaja, no representa un problema mayor. Se realizaron pruebas cambiando la topología del filtro, así como la frecuencia de corte y de muestreo, empleando el panel de prueba de LabVIEW, y con los valores seleccionados fue con los que se obtuvo mejores resultados. En la figura 3.36 se muestra la señal de temperatura después de aplicar el filtrado digital de LabVIEW.

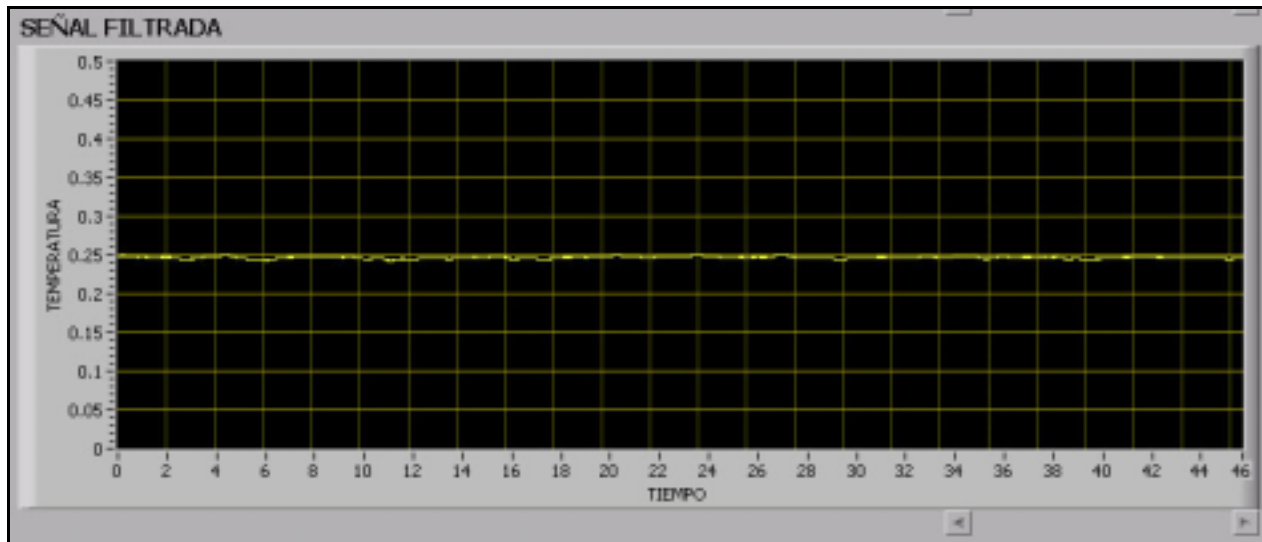


Figura 3.36. Señal del transductor de temperatura filtrada digitalmente.

La etapa más importante de filtrado digital en el programa del perfilógrafo corresponde al procesamiento de la señal de desplazamiento vertical, ya que de esta depende el correcto cálculo del PI del pavimento por parte del sistema; se requiere tener la certeza de las mediciones verticales llevadas a cabo por el sistema.

Al igual que en el caso anterior, la señal entregada por el transductor presenta un nivel de ruido considerable, mismo que debe ser eliminado antes de que sea procesado por el programa para el cálculo del PI, así como para la representación gráfica en la pantalla del panel de control del perfilógrafo. En la figura 3.37 se muestra una señal entregada por el transductor de desplazamiento vertical.

Para el filtrado de la señal de desplazamiento vertical, la norma E 1274-03 “*Standard Test Method for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph*”, de la ASTM, así como la norma MMP-4-07-002/06 “*Metodos de muestreo y pruebas de materiales*”, Apartado. 4 “*Materiales para pavimentos*” de la SCT recomiendan que el filtro a emplear sea de tipo Butterworth de tercer orden.

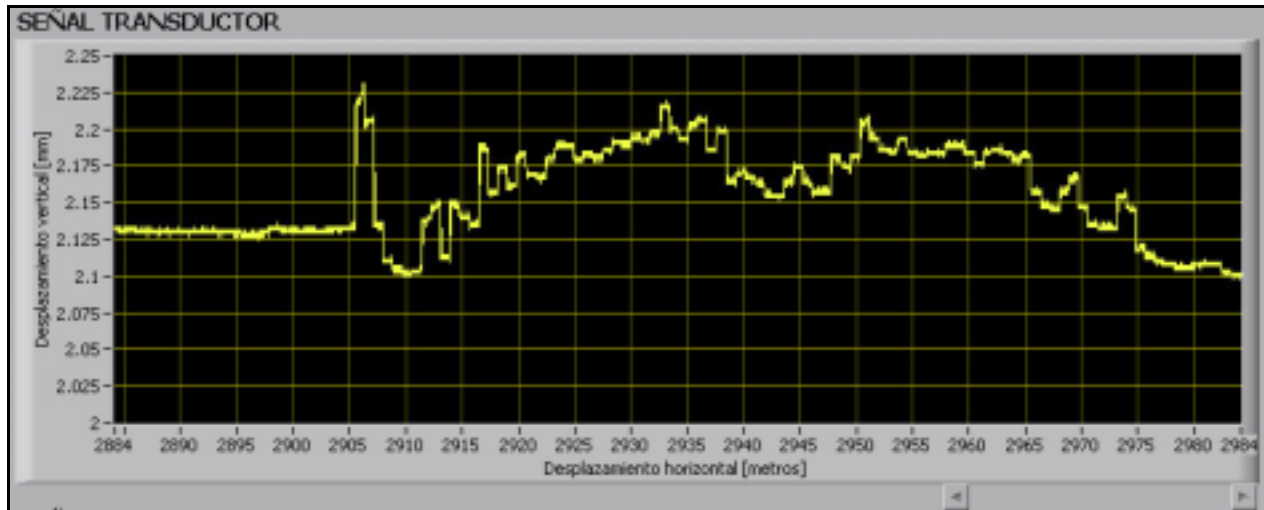


Figura 3.37. Señal del transductor de desplazamiento vertical sin filtrar.

Para verificar el tipo de salida que se obtiene con este tipo y orden del filtro digital, se procedió a realizar pruebas mediante el panel de control de LabVIEW, verificándose que efectivamente para dicho orden y tipo de filtrado se obtienen resultados satisfactorios, como muestra la figura 3.38, donde se empleó el filtro y orden mencionados. Así mismo se observaron resultados satisfactorios para el mismo filtro pero de orden reducido, es decir de segundo y de primer orden.

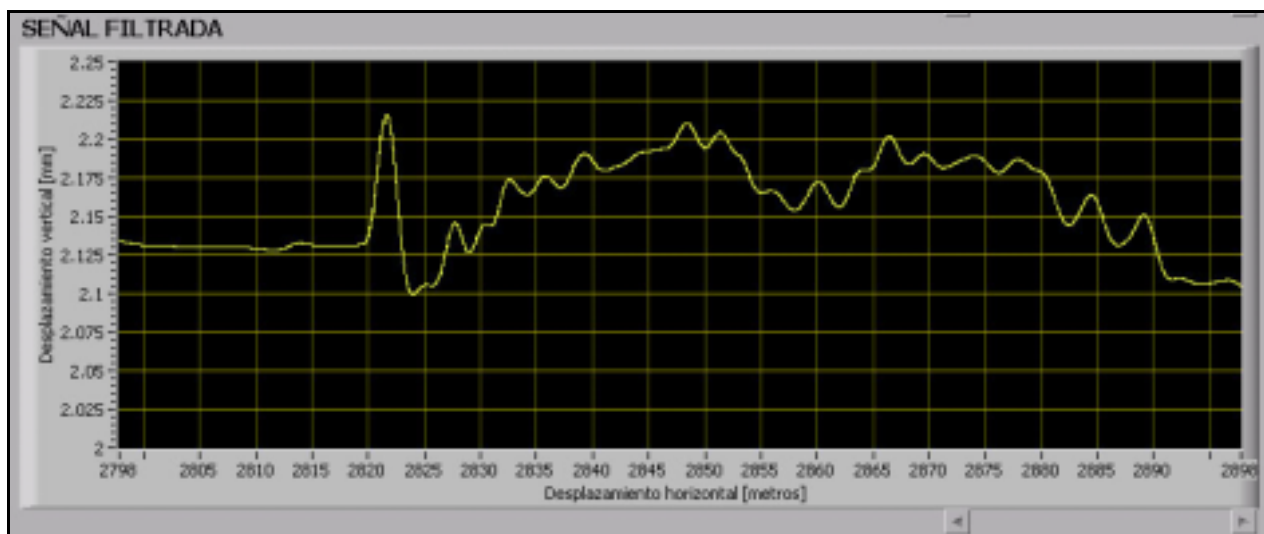


Figura 3.38. Señal del transductor de desplazamiento vertical filtrada.

En la gráfica anterior se observa la misma tendencia de la gráfica mostrada en la figura 3.37, pero sin los niveles de ruido presentados por ésta. Se tiene una curva con cambios suaves, eliminando el ruido de alta frecuencia, que es lo que se requería del filtro a implementar. La frecuencia de corte que se estableció para este filtro fue de 5 Hz, mediante pruebas realizadas en el pavimento, no se observan variaciones más allá de este valor, incluso empujando el perfilógrafo con una velocidad mayor a la de una caminata normal (5 kilómetros por hora), que es la velocidad de operación normal, se trata por lo tanto también de una señal lenta. Mediante el uso de las herramientas de LabVIEW, la implementación del filtro resultó ser muy rápida y sencilla.

Dado que es posible obtener resultados de igual forma satisfactorios con órdenes de filtro menores al de tercer grado, se implementó una subrutina en la cual es posible seleccionar el orden del filtro a emplear, esto mediante el cuadro de diálogo mostrado en la figura 3.39.

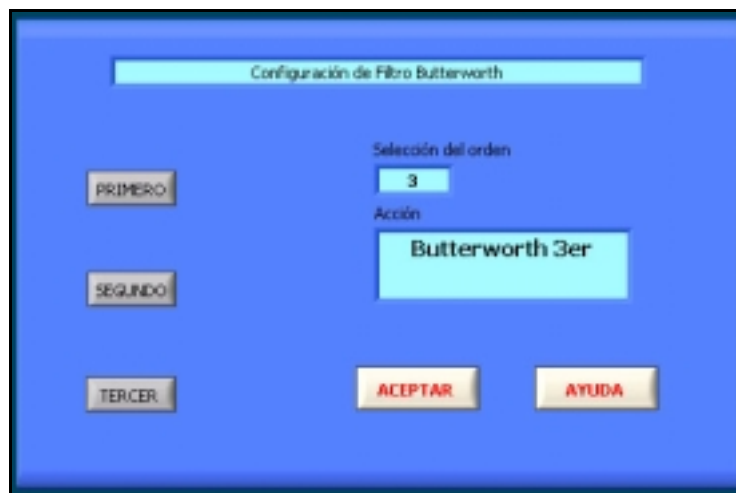


Figura 3.39. Cuadro de diálogo para la selección del orden del filtro.

El orden que se asigna por omisión al filtro es el tercero, como lo marca la norma, de tal forma que si el usuario no modifica este parámetro, se trabajará con dicho orden. Se cuenta también con un botón de ayuda que mostrará, en caso de ser presionado un cuadro de texto describiendo la función del parámetro que está modificando. Al momento de presionar el botón

ACEPTAR, el programa enviará el orden de filtro seleccionado a la rutina principal del programa del perfilógrafo.

En la figura 3.40 se muestra el diagrama de bloques de la subrutina de obtención del orden del filtro. La subrutina se encuentra integrada alrededor de una estructura cíclica de tipo *While*, la cual es controlada por el usuario a través del botón ACEPTAR de la figura 3.39, mientras en usuario no presione dicho botón, la subrutina se encontrará en ejecución. Dentro del ciclo se tiene una estructura de selección “*case*”, mediante la cual se selecciona el orden del filtro a través de tres botones, en dicha estructura de selección se tiene las cadenas de texto, así como el orden en número decimal correspondiente a la selección de cada uno de los casos, es decir, a cada uno de los órdenes disponibles, los cuales son enviados al programa principal a través de un registro de corrimiento, en formato texto y en formato entero.

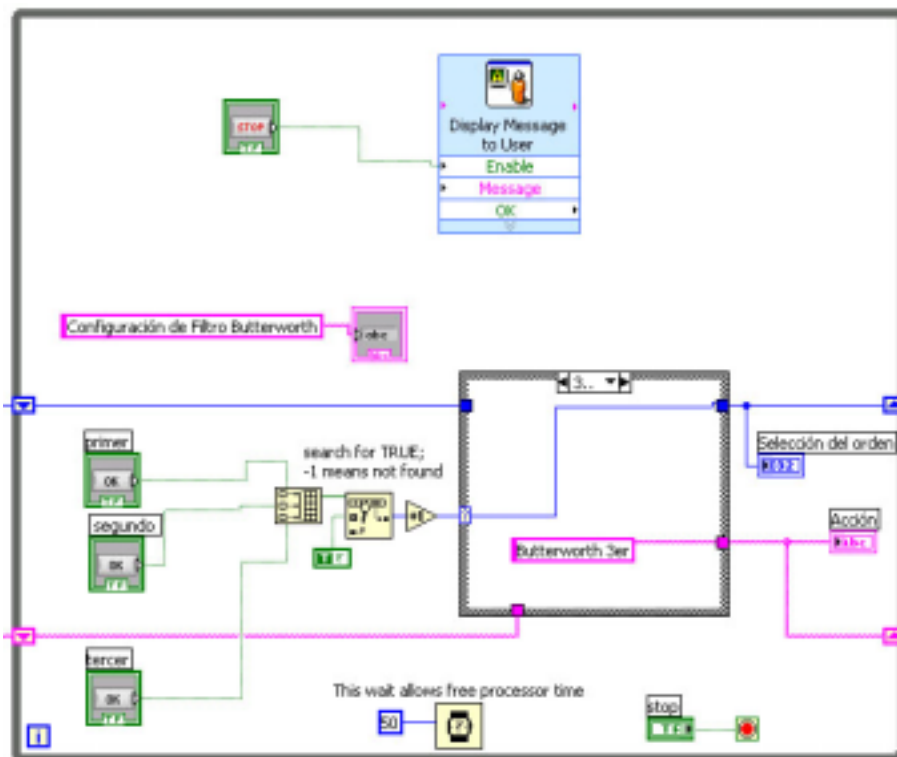


Figura 3.40. Diagrama de bloques de la subrutina de selección del orden del filtro.

La rutina de ayuda se realizó empleando un bloque Express, en donde al presionar el botón AYUDA se invoca a un cuadro de texto donde se muestra información al usuario. Dado que no se trata de una rutina que requiere de ejecución continua, se agregó un retardo de tiempo entre ejecuciones del ciclo de 50 mili segundos, lo que permite liberar de carga al procesador.

Cuando se obtiene el valor del orden del orden del filtro, este dato se envía a la rutina principal de programa del perfilógrafo, el resto de la configuración del filtro se lleva a cabo en la rutina principal del programa.

III.3.13. Subrutina de obtención de la altura de la protuberancia

El parámetro de altura de la protuberancia se refiere a la altura del perfil que debe como mínimo sobresalir de la banda nula para poder ser tomado en cuenta en el cálculo del PI, es decir, si la gráfica de perfil sale de la banda nula por una altura que es menor a la que especifica este parámetro, ésta no será tomada en cuenta. De manera normal este parámetro se establece en un valor de 0.5 milímetros, pero puede ser modificado por el usuario a través del cuadro de diálogo que se presenta al invocar a la subrutina y que es mostrado en la figura 3.41.

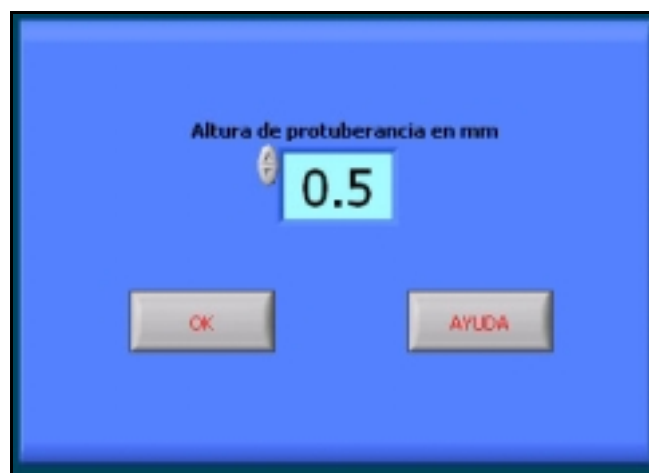


Figura 3.41. Cuadro de diálogo para la modificación de la altura de protuberancia.

En el cuadro de diálogo se muestra un control que permite aumentar o disminuir el valor del parámetro en pasos de 0.1 milímetro, con un valor mínimo de 0 y uno máximo de 5 milímetros. La subrutina se integro alrededor de un ciclo “*While*”, el cual es controlado por el usuario a través del botón OK, mientras el botón no sea presionado, la subrutina permanecerá en ejecución, en el caso contrario, la subrutina termina y envía el dato a través de un registro de corrimiento en formato de número en punto flotante de precisión simple, para que sea empleado por la rutina principal del programa del perfilógrafo; en un segundo registro de corrimiento, el dato se transmite en formato de texto para que sea colocado como tal en el reporte que se almacena en la computadora y que se imprime mediante la impresora térmica en cada uno de los reportes impresos generados. En la figura 3.42 se muestra en diagrama de bloques de esta subrutina.

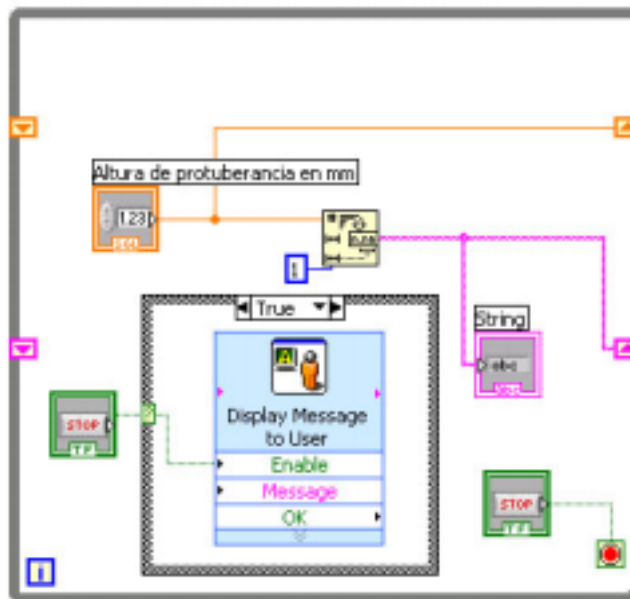


Figura 3.42. Subrutina de modificación de la altura de la protuberancia.

Cuando se han adquirido los parámetros de operación del sistema, el siguiente paso es obtener la altura que servirá como referencia para el cálculo de los desplazamientos verticales que sufrirá la llanta sensora durante las pruebas.

III.3.14. Subrutina de obtención de la altura de referencia

Como se mencionó en el apartado II.4.3 de este mismo trabajo, es necesario fijar una referencia para poder obtener todos los datos de desplazamiento vertical a través del desplazamiento angular del transductor de desplazamiento vertical. En la figura 3.43 se muestra el diagrama de bloques de la rutina empleada dentro de la estructura secuencial de inicio de programa.

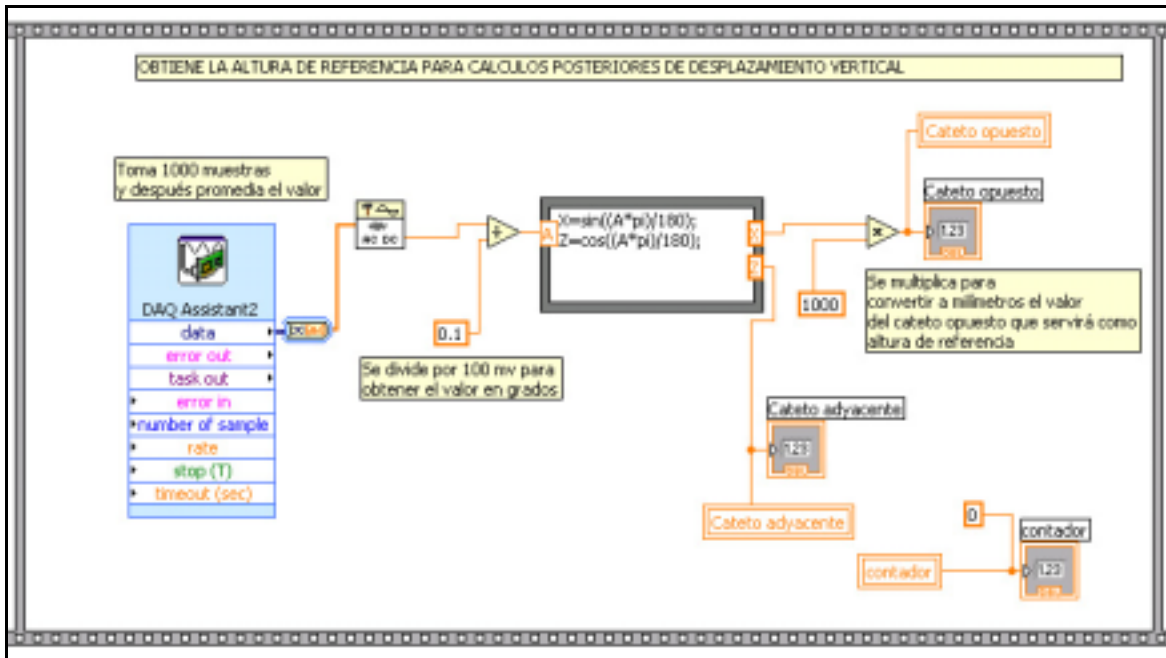


Figura 3.43. Obtención de la altura de referencia.

Dado que la obtención de la altura de referencia se logra mediante la adquisición de una señal analógica, que posteriormente es convertida a su equivalente digital, se configuró el bloque de adquisición “DAQ Assistant2”, de la figura 3.43, para que tomara 1000 muestras de la señal del transductor de desplazamiento vertical. Estas 1000 muestras son promediadas después, para reducir la incertidumbre que se generaría al realizar una sola conversión, esto mediante el cuadro marcado como AC/DC de la figura indicada.

Para obtener el valor de referencia, la lectura de desplazamiento angular es convertida a un desplazamiento lineal mediante trigonometría. Se calcula el ángulo del brazo que une a la llanta sensora con la estructura del perfilógrafo, la lectura obtenida es dividida por 0.1 para obtener el ángulo directo en grados y después se calcula los catetos opuestos y adyacentes del triángulo formado por el brazo respecto a la horizontal, la hipotenusa es un valor constante, de un metro. Los valores calculados sirven como los valores de referencia en el momento de la adquisición de datos. Cabe resaltar que el procedimiento de obtención de la altura de referencia es un procedimiento estático que no dura más de 500 milisegundos. Cuando se obtiene la altura de referencia, el procedimiento de inicialización del perfilógrafo se completa, procediendo ahora a la adquisición y procesamiento de los datos de perfil.

III.3.15. Rutina de adquisición y procesamiento de los datos

Cuando la secuencia de inicialización ha concluido, el programa procede a espera la señal del transductor de desplazamiento horizontal, misma que servirá de disparo para la adquisición de la señal de de desplazamiento vertical, es decir, cada que el transductor de desplazamiento horizontal entregue un pulso, se iniciará la adquisición de la señal de desplazamiento vertical. Por esta razón, es necesario tener control sobre la señal de disparo, en la figura 3.44 se muestra el diagrama de bloques mediante el cual se genera la señal de disparo. Este diagrama de bloques se encuentra relacionado con el panel de control del perfilógrafo a través el botón “pausar prueba”, al presionar dicho botón se detiene el disparo.

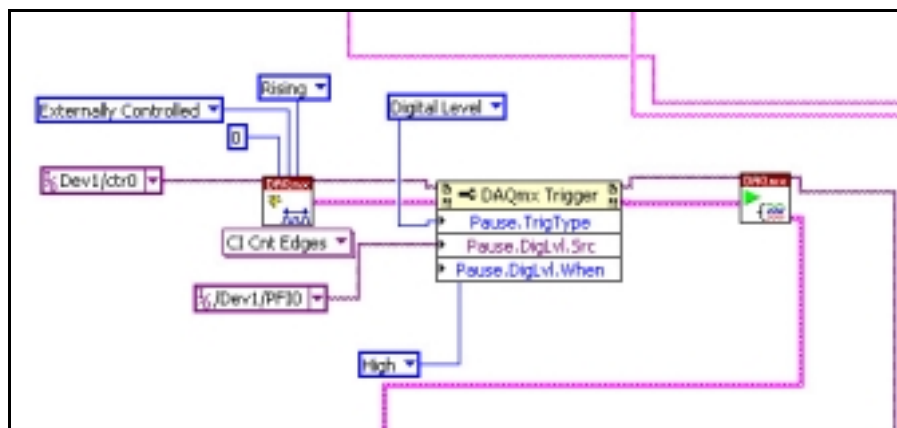


Figura 3.44. Control de disparo en la adquisición de datos.

La señal de disparo se requiere, ya que de otro modo, cada que gire la llanta sensora se producirían adquisiciones de datos; y en situaciones en las cuales el perfilógrafo se cambia de línea, o de trayectoria, o bien cuando se va a pasar a analizar otra sección, no se debe encontrar adquiriendo datos. Si se inhibe el disparo mediante un control en el panel, no importará que la llanta sensora gire en situaciones como las descritas, ya que no provocarán adquisición de información. Como se observa en la figura 3.44 se pausa el disparo mediante una señal digital proveniente del puerto digital PFI0, y en particular cuando la salida digital de este puerto presenta un nivel alto.

En condiciones de prueba normal, es decir, cuando la llanta sensora se encuentra girando y el operador no presionó el botón “Detener prueba” o “Pausar prueba” del panel frontal, se generarán los disparos necesarios para la adquisición de datos del desplazamiento vertical. Por otra parte la señal de desplazamiento horizontal también es enviada al puerto digital CTR0 de la tarjeta de adquisición de datos, que es la entrada a un contador de pulsos; con la información del contador de pulsos se calcula el desplazamiento horizontal.

El diagrama de bloques correspondiente a la adquisición de la señal de desplazamiento vertical, bajo condiciones de prueba dinámica, se muestra en la figura 3.45. En ella se observa que nuevamente la adquisición de la señal se lleva a cabo a través de un bloque Express. En dicho bloque Express se adquiere también la señal de temperatura, posteriormente se separan dichas señales, ya que cada una requiere de un procesamiento por separado. La primera de ellas se procesa para poder inferir el desplazamiento vertical a través de la señal de voltaje del transductor de desplazamiento angular, y la señal de voltaje del sensor de temperatura es enviada al indicador de temperatura ambiente del panel de control.

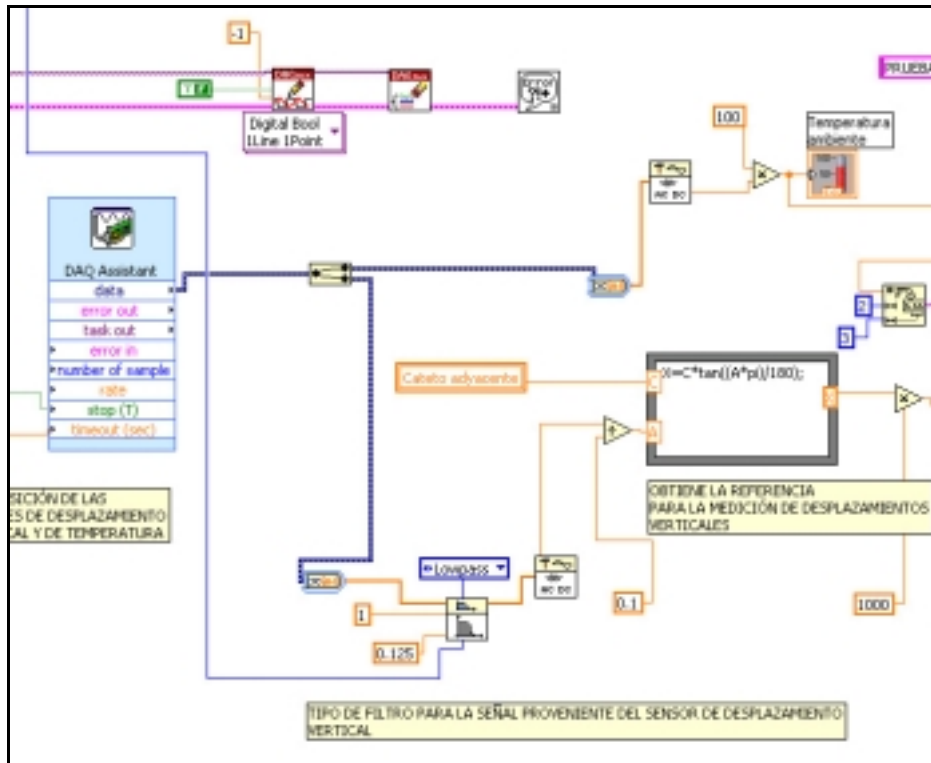


Figura 3.45. Adquisición de la señal de desplazamiento vertical.

Bajo condiciones de prueba dinámica, la señal de desplazamiento vertical, proveniente del transductor, viene acompañada de ruido, debido principalmente a la vibración a la que se somete a la estructura, causada por la rugosidad de la superficie bajo análisis y no precisamente debido al perfil de la misma. En menor grado la señal se contamina con ruido eléctrico generado por las fuentes de alimentación de los sensores o por el generador eléctrico que alimenta de manera general el sistema. Estas señales de ruido deben ser removidas de alguna forma; la manera más común de llevar a cabo esta remoción es mediante la colocación de filtros analógicos. Para el caso de nuestra aplicación, requerimos de un filtro paso bajas, ya que las señales de ruido son de una frecuencia mucho mayor que la señal de interés. Tradicionalmente la implementación del filtro mencionado se llevaba a cabo mediante el diseño de filtros empleando componentes activos, como amplificadores operacionales, trabajando en conjunto con elementos pasivos, como resistencias o capacitores.

En la aplicación del perfilógrafo se hará uso de filtros digitales. El filtro digital se programa ahora haciendo uso de las utilerías de LabVIEW, para llevar a cabo las funciones de un filtrado analógico convencional, con la ventaja de poder ajustar los parámetros del mismo de una manera simple, como se mencionó en el apartado III.3.12 de este mismo trabajo.

Una vez que se ha filtrado la señal de desplazamiento, se tiene una serie de datos filtrados correspondientes a cada uno de los datos adquiridos, considerando que un dato es el resultado de tomar y procesar 1000 muestras. Estas 1000 muestras por cada dato son promediadas por otro bloque, a la salida de dicho bloque se obtendrá el valor promedio de esas 1000 muestras. Esto proporciona gran confiabilidad a las señales adquiridas, y dado que las señales son de muy baja frecuencia, no existe el problema del tiempo de procesamiento de la señal. Una vez que se tiene el dato final, con éste se lleva a cabo el cálculo para determinar los desplazamientos verticales.

El dato final obtenido sirve como el valor de desplazamiento que puede ser sumado o restado a la altura de referencia obtenida anteriormente en la rutina de inicialización, esto a través del dato de cateto opuesto obtenido, y que ahora es utilizado en una suma algebraica para conocer el nuevo desplazamiento. Se observa en la figura 3.45 que el dato de cateto adyacente es traído a la rutina haciendo uso de una variable de tipo local, que es similar a una variable en un lenguaje como C, este valor, en conjunto con la lectura de desplazamiento procesada, es ingresado a un bloque de fórmula donde se calcula el nuevo desplazamiento vertical sufrido por la llanta sensora.

En cuanto a la señal de temperatura, ésta no requiere de un procesamiento tan crítico como la señal de desplazamiento vertical. Aprovechando el mismo bloque de adquisición se toman 1000 muestras del sensor de temperatura y se promedian para obtener el dato de la temperatura ambiente, y posteriormente se hacen actualizaciones cada que se recibe un pulso del transductor de desplazamiento horizontal. Dado que el transductor de temperatura entrega 10 mV por cada grado centígrado, para la obtención del valor de la temperatura, el valor de voltaje se

multiplica por 100, como se muestra en la figura 3.45, y de esta forma se obtiene la temperatura ambiente actual, dato que también es enviado al indicador en el panel de control del perfilógrafo.

Una vez que se ha aplicado el procesamiento para la obtención del valor de desplazamiento vertical, éste es graficado en la pantalla de la computadora para que en tiempo real sea observada la variación del perfil en el panel de control del perfilógrafo. En la figura 3.46 se observa como la señal procesada se envía al indicador gráfico, las propiedades de este indicador se modificaron para adecuar las escalas vertical y horizontal. Además del envío de la señal al indicador gráfico del panel de control, la señal es enviada al indicador numérico del mismo panel de control, de esta forma se cuenta con la visualización y con una indicación en tiempo real del desplazamiento sufrido por la llanta sensora.

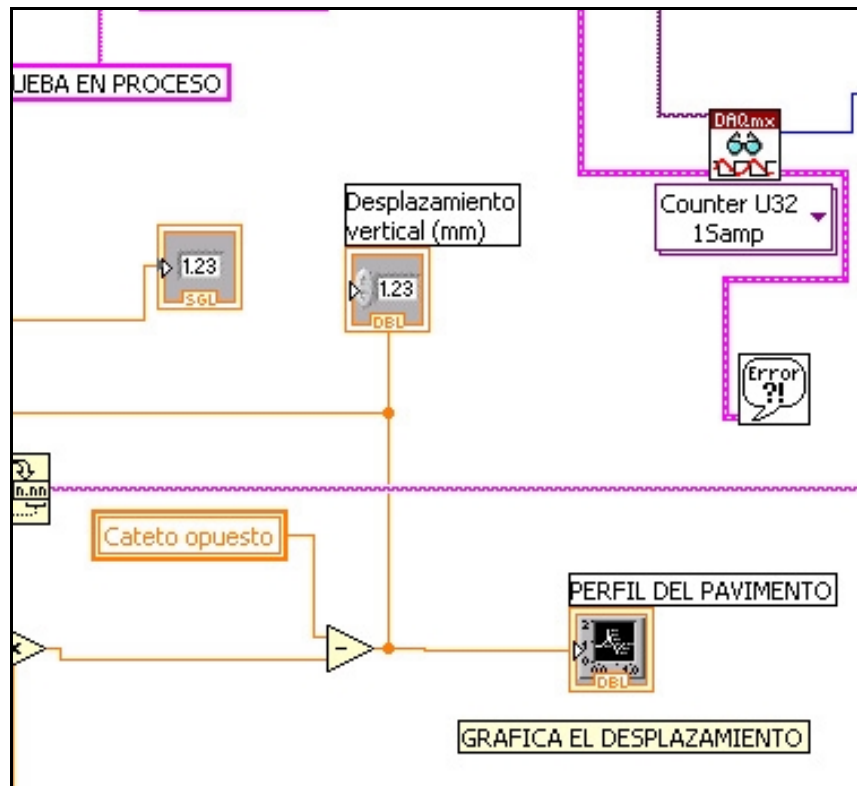


Figura 3.46. Visualización del desplazamiento vertical.

El contador que se observa en la figura anterior, marcado como *Counter U32*, se encarga del conteo de los pulsos recibidos por el transductor de desplazamiento horizontal. El conteo de pulsos es multiplicado por la distancia de avance que implica la generación de cada uno de ellos, explicada en el apartado II.4.2, y que corresponde a 0.0084584 metros. En el diagrama de bloques de la figura 3.47 se muestra dicha adecuación.

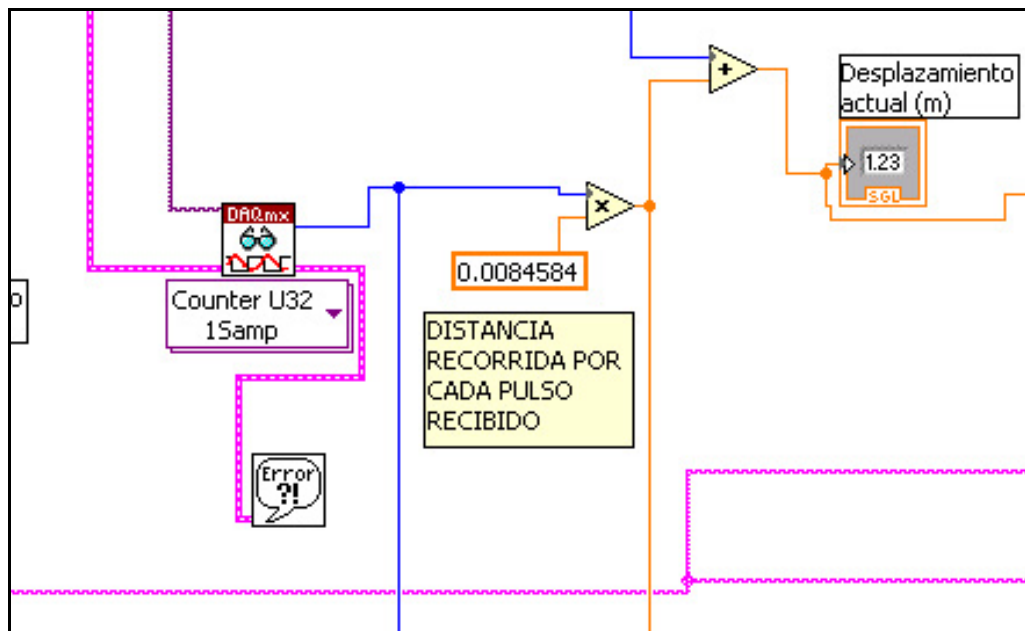


Figura 3.47. Conteo de pulsos y relación con desplazamiento horizontal.

La salida de la distancia recorrida se conecta a un comparador, para identificar en que momento se ha alcanzado la longitud de la sección establecida en la rutina de inicialización por el usuario, si no se ha alcanzado dicha distancia, el programa continúa adquiriendo y almacenando datos a medida que los disparos llegan. Al momento de darse la comparación, el programa entra en un bloque *case* y en ese momento se ejecuta toda la rutina encargada del cálculo del PI, cálculo de la banda nula, impresión de reporte, si es que así lo determinó el operador, y se envía la información obtenida al indicador que se encuentra en el panel de control del perfilógrafo.

III.3.16. Generación y almacenamiento de reportes

Cuando se inicia con una prueba nueva, el programa genera de manera automática un reporte en formato de texto, mismo que se almacenará en la computadora en cualquier carpeta que el usuario haya seleccionado, este reporte se leerá una vez que finaliza la prueba para poder realizar el cálculo de la banda nula y del PI correspondiente a la sección analizada.

LabVIEW cuenta con un bloque que permite la creación de manera sencilla de un archivo de texto, y mediante cadenas de caracteres es posible agregar datos al mismo. En el reporte que se genera para el perfilógrafo, se agregan cada uno de los parámetros de operación del sistema, así como todos los datos correspondientes a las lecturas de desplazamiento vertical registradas por el sistema. Al final del reporte se añade el valor del PI correspondiente. En la figura 3.48 se muestra la sección del diagrama de bloques correspondiente a la creación del archivo de texto.

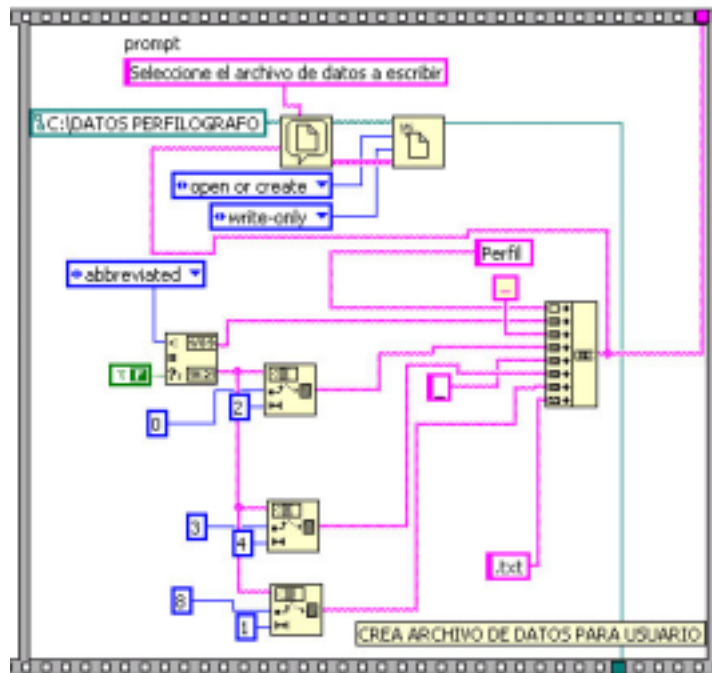


Figura 3.48. Creación de archivo de datos.

Mediante esta sección de código se genera un cuadro de diálogo que permitirá al usuario proporcionar el nombre al archivo, así como seleccionar la ubicación que prefiera dentro del

disco duro de la computadora. Si bien la ubicación y el nombre pueden ser modificados por el usuario a su criterio, se generó una carpeta de almacenamiento por omisión, lo mismo para el nombre del archivo. La carpeta en la que se almacenan los datos, si el usuario no elige otra, es “C:\DATOS PERFILOGRAFO”, la ruta se especifica en el diagrama de bloques anterior. En cuanto al nombre del archivo se buscó que fuera un nombre que permitiera la fácil identificación de una prueba en específico, por lo cual, si el usuario no modifica dicho nombre, el programa se encargará de nombrar el archivo como “Perfil fecha hora”, donde los campos de fecha y hora serán sustituidos de manera automática por el sistema. En la figura 3.49 se muestra el cuadro de diálogo generado al momento de crear el archivo de datos.

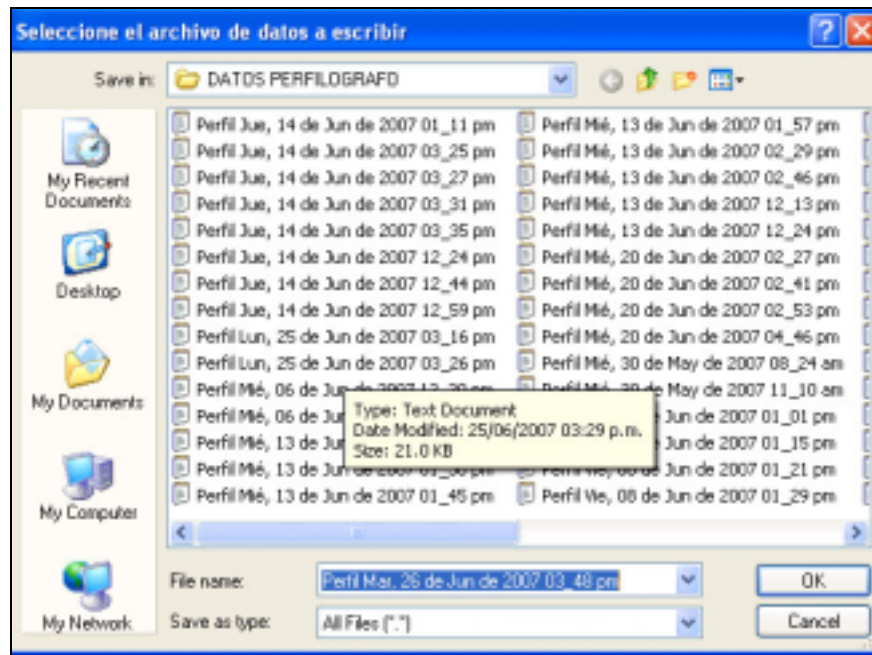


Figura 3.49. Creación del archivo de datos a escribir.

Al momento de presionar el botón OK del cuadro de diálogo, se genera el archivo y se encuentra listo para poder escribir información sobre él. La escritura se lleva a cabo durante la operación dinámica del sistema, y conforme el perfilógrafo avanza, los datos son escritos en el archivo creado.

A medida que el sistema recibe disparos por parte del transductor de desplazamiento horizontal, toma mil muestras de desplazamiento vertical, los valores numéricos del voltaje leído

son procesados para reducir la incertidumbre y generar un valor único, esto mediante un bloque de LabVIEW que permite promediar un conjunto de valores, el valor promediado se utilizará para encontrar el equivalente de desplazamiento lineal en milímetros. Cuando el procesamiento es realizado, el valor obtenido es escrito en el archivo de datos. Esta operación se realiza de manera continua hasta almacenar todas las muestras que se generaron para una prueba en particular. Todos los datos adquiridos y procesados se convierten a una cadena de texto antes de ser colocados en el archivo, si no se realizara esto, se colocaría en el archivo los datos ASCII correspondientes a los valores empleados.

III.3.17. Generación de reportes impresos

Para la generación de reportes impresos se hizo uso de una impresora térmica, la cual es posible controlar a través de una interfaz serie. El control de dicha interfaz es llevado a cabo por el programa del perfilógrafo, en el reporte es posible imprimir las pantallas gráficas correspondientes a los perfiles de las pruebas realizadas a los pavimentos, mismos que son acompañados de los parámetros de operación, de los datos que permiten identificar la sección bajo prueba, así como de los datos de la persona que se encargó de llevar a cabo la prueba.

Mediante la tarjeta de control de la impresora se puede enviar y recibir datos en modo “*full duplex*”, es decir, puede enviarse y recibirse información al mismo tiempo de la impresora. El formato empleado es RS232C, con 1 bit de inicio, 8 bits de datos, sin paridad y con un bit de parada. La velocidad que se establece de fábrica para la comunicación serial con la tarjeta de control es de 19,200 *bauds*, pero puede ser cambiada a 2,400, 4,800, 9,600, o 38,400 removiendo uno o dos conectores sobre la tarjeta de control. En nuestro caso para el envío y recepción se hizo uso de 38,400 *bauds*, ya que con esta velocidad es posible una impresión rápida de los reportes generados.

Se tienen disponibles dos protocolos para el envío de datos hacia la impresora, el “*DATA BUSY*”, y el “*XON/OFF*”. Si se emplea el primero de ellos, la computadora debe en todo momento monitorear el estado de la línea RTS antes de enviar cada paquete de información. Un

nivel en alto indica a la computadora que la tarjeta de control se encuentra lista para recibir otro paquete de información, mientras que un nivel bajo indica que se está llevando a cabo otro proceso dentro de la tarjeta de control, y que en ese momento no puede ser atendida la petición por parte de la computadora.

Cuando la computadora cambia del estado “*READY*” al estado “*BUSY*”, ésta transmite el carácter XOFF (\$13) vía la salida serial. Cuando cambia del estado “*BUSY*” al estado “*READY*”, transmite el carácter XON (\$11). Esto habilita a la computadora a implementar el protocolo XON/XOFF, eliminando la necesidad de monitorear la línea RTS. Este es el protocolo que se empleó para la generación de reportes en el perfilógrafo. En el momento en que la impresora es encendida, ésta envía el carácter XON a la computadora. Después de esto, los caracteres XOFF y XON son enviados de forma alternada, a medida que es requerido por la condición *BUSY/READY* de la impresora. LabVIEW permite implementar de manera simple el protocolo XON/XOFF simplemente al configurar el puerto de comunicación utilizado y cambiar la propiedad de protocolo a emplear en la comunicación, LabVIEW permite emplear cualquiera de los dos protocolos descritos.

Cabe aclarar que el programa residente en la unidad de control de la impresora no implementa ningún protocolo para el uso de los caracteres XON, XOFF, DC2 y DC4 de la impresora hacia la computadora, es decir, la impresora asume que la computadora siempre está lista para recibir caracteres. Dado que únicamente la computadora recibe por parte de la impresora los caracteres de control de flujo del protocolo XON/XOFF, no hay prácticamente en ningún momento un desbordamiento del buffer de datos de la computadora y el protocolo puede ser utilizado sin ningún inconveniente.

La impresora puede imprimir en la dirección del eje X, es decir, a lo largo del papel, o bien en la dirección del eje Y, de manera transversal; la primera opción es la comúnmente empleada. En esta opción se imprimen caracteres a través del papel en el tamaño, tipo de fuente y orientación seleccionada mediante el programa del perfilógrafo. Como otras impresoras, sólo se envía el código correspondiente al carácter que se desea imprimir a través de la interfaz serie. Los caracteres son almacenados en un buffer para caracteres en la dirección X, mismos que son

impresos cuando se envía el comando CR (0x0D). El número de caracteres que puede ser almacenado dentro del buffer depende del tamaño de la cabeza de impresión que se esté utilizando, así como del tipo y tamaño de fuente seleccionados. La siguiente tabla muestra el número máximo de caracteres en tamaño 1 por línea para cada una de las cabezas de impresión del fabricante seleccionado.

| | 224 | 320 | 416 | 448 | 832 | 1728 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 5x7 | 37 | 53 | 69 | 72 | 138 | 284 |
| 5x9 | 37 | 53 | 69 | 72 | 138 | 284 |
| 5x9d | 37 | 53 | 69 | 72 | 138 | 284 |
| 7x9 | 28 | 40 | 52 | 54 | 104 | 213 |
| 11x21d | 17 | 13 | 32 | 33 | 64 | 131 |

Figura 3.50. Caracteres por línea dependiendo del tamaño de letra e impresora.

Las impresoras de tipo térmico pueden imprimir en la dirección del eje Y, por ejemplo cuando se requiere colocar información a lo largo del papel, y dado que al generar las gráficas de perfil es necesario imprimir en dicha dirección, los comandos *YLOAD* y *YPRINT* son usados para este propósito. Cada mensaje separado en la dirección del eje Y requiere de N+6 bytes, donde N es el número de bytes que se requiere para el almacenamiento del mensaje. La siguiente tabla indica el tamaño de del buffer de almacenamiento en Y para cada una de las impresoras del fabricante.

| Dots | 224 | 320 | 416 | 448 | 832 | 1728 |
|--------|------|------|-----|-----|------|------|
| y-line | 1620 | 1088 | 556 | 391 | 4500 | 5833 |

Figura 3.51. Caracteres en la dirección Y de acuerdo al tamaño.

Al igual que en las líneas en el eje X, las líneas en el eje Y pueden ser impresas de manera separada o sobrepuestas con otras acciones de impresión. La impresión en dirección Y es muchas veces empleada para colocar etiquetas en ejes de gráficas o algunas otras anotaciones en la salida gráfica.

En el reporte del PI, los parámetros de operación del perfilógrafo son enviados únicamente en dirección X, en la figura 3.52 se observa una imagen del reporte impreso en la sección que contiene dichos parámetros.

```

*****
UNAM
INSTITUTO DE INGENIERIA
COORDINACION DE INVESTIGACION
TELEFONO: 56 22 62 1000

PERFILOGRAFO LONGITUDINAL
ASA-CONACYT
*****

DATOS DEL REPORTE
OPERADOR: ISRAEL
# DOCUMENTO: 1
# PROYECTO: 1
INICIO DE SECCION: 0+0 m.
FIN DE SECCION: 0+0 m.
BANDA SEMITRANSARENTE: 5 mm.
LONGITUD DE SECCION: 5 m.
ALTURA DE PROTUBERANCIA: 8 mm.
ANCHO DE PROTUBERANCIA: 7.6 m.
RUTA: 1
PAVIMENTO: CU
FILTRD: Butterworth tercer orden
FECHA: Mii, 25 de Abr de 2007
HORA DE INICIO: 04:10 p.m.
TEMPERATURA AMBIENTE: 27 Grados C
*****

```

Figura 3.52. Sección de parámetros de operación en el reporte impreso.

En la figura 3.53 se muestra la sección de código en LabVIEW que envía los parámetros de operación a la impresora a través de la interfaz serie. Se define también cuatro zonas de impresión para la impresora, ya que es posible el manejo de cuatro zonas independientes por parte de la impresora térmica. La primera zona maneja los puntos que marcan la separación de cada una de las líneas impresas de separación vertical, es decir, se imprime un punto en la parte superior e inferior de la gráfica y que representan una separación de dos metros. La siguiente zona de impresión se encarga de la impresión de la banda nula, la zona tres tiene el manejo de las líneas impresas de separación vertical, cada línea representa una separación de diez metros,

usados por el comando GRIDLOAD, el cual permite la impresión de patrones almacenados en memoria.

En la impresora pueden ser colocados 100 puntos por pulgada a lo largo del ancho del papel, para los modelos con cabezas de impresión con los siguientes tamaños: 224, 320 y 416, y de 200 puntos por pulgada para los modelos con cabezas de impresión de los siguiente tamaños: 448, 832 y 1728. Todos los modelos cuentan con 200 puntos por pulgada a lo largo del papel. Los comandos de impresión estándar permiten la impresión de formas en dos dimensiones, que puedan ser representadas empleando esta matriz. La velocidad máxima de impresión es de 125 puntos por columna por segundo.

Ahora bien, en el caso de nuestra aplicación, la escala horizontal con que cuenta un perfilógrafo comercial tipo California es de 300:1, es decir, cada 300 metros son representados en un metro de papel. En esta escala 3.333 centímetros representan 10 metros de desplazamiento, 3.333 centímetros equivalen a 1.3123 pulgadas, que representan los mismo 10 metros.

La impresora térmica con que se cuenta es capaz de imprimir 200 puntos por pulgada, por lo que en 1.3123 pulgadas hay 262.46 puntos de impresión. Cada punto de impresión representa una distancia real de:

$$\text{Distancia por punto} = (10 \text{ m} / 262.46 \text{ puntos}) = 0.038101 \text{ metros por punto de impresión}$$

De esta forma, se puede enviar a imprimir un punto a la impresora térmica cuando se tenga la certeza que se recorrió ya la distancia que representa cada punto de impresión, es decir cada que el codificador angular entregue un pulso. Para realizar este proceso se conectó la salida del codificador a la terminal de disparo en la tarjeta de adquisición de datos. Para cumplir con la escala 1:300 necesitamos que el disparo se haga cada que se recorre una distancia de 3.81 centímetros. Con la llanta sensora que contamos y cuya circunferencia es de 211.46 cm, tenemos:

$$\text{Pulsos por revolución requeridos} = 211.46 \text{ cm} / 3.81 = 55.5 \text{ pulsos por cada revolución}$$

Con esa cantidad de pulsos por revolución aseguraríamos que cada punto de impresión representa el desplazamiento necesario de 3.81 centímetros por pulso y así obtener la escala 1:300 planteada. O bien un múltiplo entero de esa cantidad de pulsos, es decir, 110 pulsos por revolución, y sabríamos que cada dos pulsos recorreríamos la distancia necesaria, o bien 222 pulsos por revolución, y así cada 4 pulsos tendríamos la distancia requerida. Con la resolución de codificador que contamos actualmente (250 pulsos por revolución) podemos aproximarnos a la escala pero no dejarla exactamente 1:300.

Lo mencionado anteriormente representaría un problema en el caso de que se empleara el procedimiento manual para el cálculo del PI, y se emplearan plantillas con escala 300:1, ya que no habría coincidencia con la impresión obtenida en el reporte impreso. Sin embargo, ya que no se realiza un cálculo manual para la obtención del PI, dado que el sistema lo calcula de forma automática, la gráfica impresa es presentada para la localización exacta de las protuberancias y de las depresiones localizadas en una pista, pero no es empleada en el cálculo del PI, por lo cual el cálculo del PI es independiente de la escala empleada.

Para el cálculo del PI se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones: el diámetro real de la llanta sensora es de 26.44 pulgadas o 0.671576 metros, por lo que su circunferencia en metros es de 2.1098 metros, teniendo esta circunferencia y los 250 pulsos por revolución que con que cuenta el transductor de desplazamiento horizontal, se tiene un desplazamiento por pulso recibido de:

$$\text{Avance por pulso} = \frac{2.1098}{250} = 0.008439273 \text{ metros}$$

Por lo anterior para completar un metro de avance se requerirían de 118.439 pulsos ($1/0.008439273$). Por otra parte, la impresora cuenta, como ya se ha mencionado, con una resolución de 200 puntos por pulgada, por lo que 118.4936 pulsos representan una distancia impresa en el papel de $118.4936/200 = 0.592468$ pulgadas, es decir, 1 metro de avance se representará con 0.592468 pulgadas, lo que es igual a 0.015048 metros. De esta forma la escala directa que se está manejando sobre el papel de la impresora es de:

$$\frac{1}{0.015048} = 66.45$$

Sin embargo el manejo de dicha escala implica un uso excesivo de papel, por lo cual se buscó acercarse lo más posible a la escala que maneja un sistema comercial. Al no imprimir cada uno de los puntos, la escala aumenta, es decir, si se imprime un punto y otro no sucesivamente, se empleará la mitad de los puntos para la representación gráfica del perfil, y se tendría una escala de 132.9; de forma análoga, al tomar uno de cada cuatro puntos se tendría una escala de 265.8, que es una escala más cercana a la manejada a un perfilógrafo California de tipo comercial, pero sobre todo permite un ahorro sustancial en la cantidad de papel empleado para la representación de las gráficas de perfil. Dado que el eliminar puntos puede reducir la calidad de la impresión, lo que se llevó a cabo fue un promedio de cuatro muestras consecutivas, y el valor obtenido es el que se grafica, de esta forma no perdemos información de la gráfica.

La situación en cuanto a la escala de impresión vertical es diferente, la escala que se maneja es 1:1, es decir, se representa en milímetros el desplazamiento real de la llanta sensora. Como se comentó, se tiene 100 puntos por pulgada para impresión en esta dirección, teniendo en cuenta que en una pulgada se tiene 25.4 milímetros, se tiene que para representar un milímetro se debe imprimir $100/25.4 = 3.937$ puntos. Este factor es el que se emplea para adecuar las lecturas que se obtienen del desplazamiento vertical de la llanta sensora, así como el ancho de la banda nula que se imprime junto con la gráfica de desplazamiento.

III.3.18. Cálculo de la banda nula

La banda nula juega un papel muy importante dentro del cálculo del PI en el sistema, si no puede precisarse de manera correcta la banda nula, es imposible determinar eficientemente el PI. Esta banda nula es una franja que generalmente tiene un ancho de 5 milímetros y que sirve para localizar las secciones sobre la pista que deben ser revisadas y en su caso corregidas. Esta franja no necesariamente tiene una pendiente cero, ya que existen muchas pistas en aeropuertos que tienen una pendiente, pero que pueden estar planas, por lo cual caen dentro de la banda de

tolerancia. Como ejemplo de una mala colocación de la banda nula se muestra la figura 3.54, impresa en una de las pruebas llevadas a cabo con el perfilógrafo.

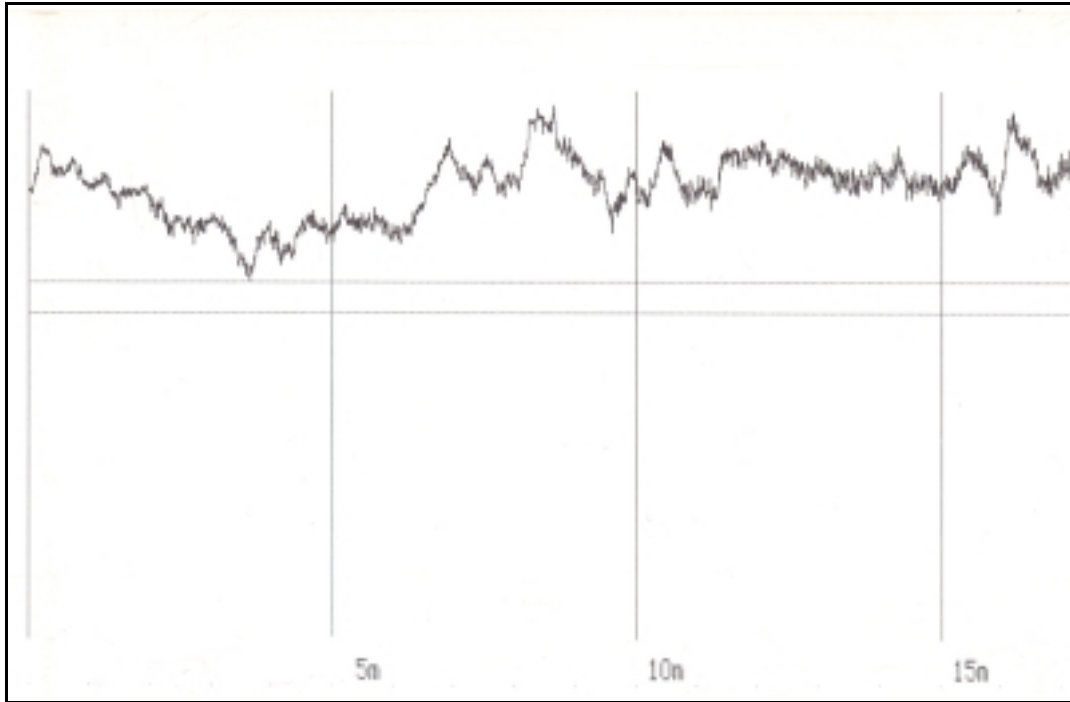


Figura 3.54. Incorrecta colocación de la banda nula.

Como se observa en la figura, la banda nula se encuentra por debajo del trazo de la gráfica de perfil; en un primer diseño del *software* del perfilógrafo, el algoritmo que se había programado calculaba el promedio de los valores leídos del perfilógrafo, y una vez obtenido el promedio, se graficaban dos líneas, una 2.5 milímetros por arriba del valor promedio y otra 2.5 milímetros por abajo. El problema que se tiene con esta manera de proceder es que, si se adquiere un valor muy grande, el promedio se desplaza hacia un valor positivo por arriba de la media, desplazando las líneas de banda nula hacia arriba, por otro lado si el valor leído se encuentra muy por debajo de la media, las líneas de banda nula se desplazan hacia la parte inferior de la gráfica, como es el caso de la figura anterior. Cabe mencionar que estos valores muy altos o muy bajos suelen presentarse cuando la llanta sensora golpea una pequeña piedra o algún otro objeto sobre la pista, que la hace dar un pequeño salto, evidentemente la piedra o pequeña deformación encontrada no forma parte

del perfil de la pista, por lo cual es necesario evitar tomar en cuenta estos valores para el cálculo de la banda nula.

Otro ejemplo de una mala ubicación de la banda nula se presentó en el caso de una pista con pendiente pronunciada, en él se compensaban los valores positivos obtenidos con los negativos y el promedio se anulaba, dando por resultado una banda nula con pendiente cero, lo cual es incorrecto.

El problema de la ubicación de la banda nula se resolvió realizando una regresión lineal de los datos colectados durante una prueba, de esta forma no importa si se presentan variaciones súbitas de valores muy altos o muy bajos de perfil, ya que mediante la regresión lineal se ubica una línea con el mejor ajuste posible. Se empleó este tipo de regresión ya que el ideal es precisamente una línea recta para una pista de aeropuerto con la menor variación posible de la misma. LabVIEW cuenta con un bloque que automáticamente proporciona el valor de pendiente y ordenada de una regresión lineal, de tal forma que no es necesario más que conectar los datos a la entrada de dicho bloque, en la figura 3.55 se muestra la etapa del diagrama de bloques de la rutina principal donde se lleva a cabo la regresión lineal de los datos colectados en una prueba.

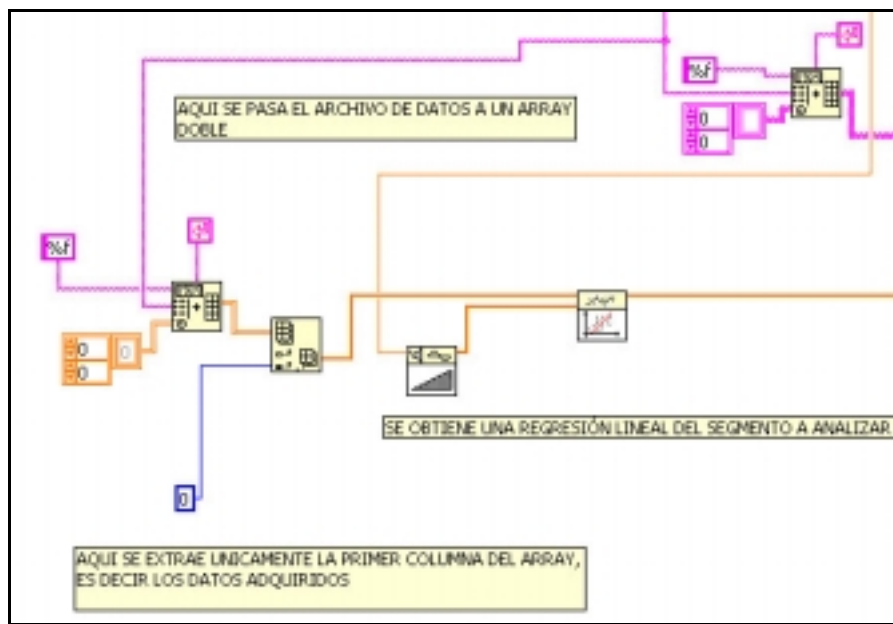


Figura 3.55. Regresión lineal de los datos para cálculo de la banda nula.

Los datos son tomados del archivo en donde se han almacenado los datos colectados, en la computadora, dicho archivo es de tipo texto, por lo cual, para poder llevar a cabo la regresión es necesario convertirlo a un tipo de dato numérico, que en este caso es de tipo flotante. Cuando se realiza la regresión lineal, se cuenta con los datos de la pendiente y ordenada como se comentó anteriormente, pero agregando una secuencia en ascenso (0,1,2,3,...,n) es posible obtener las parejas ordenadas que permitan generar la gráfica de regresión lineal, en el diagrama de bloques se empleó un bloque que permite generar dicha secuencia, dado que la rutina entera se encuentra dentro de un ciclo “for”, la secuencia tendrá la longitud del número de muestras que se hayan adquirido durante una prueba en particular. Cuando se cuenta con las parejas ordenadas se encuentran listas para ser impresas en el reporte impreso y poder ubicar la banda nula. Esto se muestra en el diagrama mostrado en la figura 3.56.

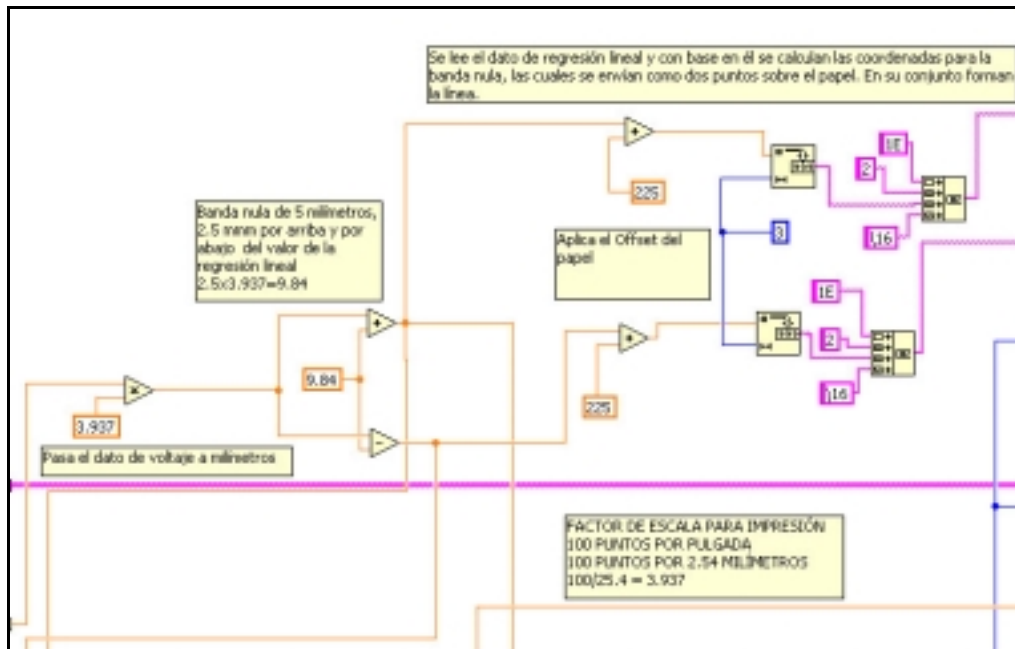


Figura 3.56. Cálculo de la banda nula.

El dato que se lee de la base de datos debe ser modificado para que corresponda con la escala de impresión, ya que el valor en milímetros no corresponde directamente con el número de puntos de impresión con que cuenta la impresora. Cuando se tiene el dato ya en la escala correcta, se suma un desplazamiento positivo para que se coloque una línea 2.5 milímetros por arriba del valor de regresión lineal obtenido, de la misma forma se suma un desplazamiento negativo para poder dibujar la parte inferior de la banda nula. La impresión es punto a punto, es decir, se envía

tres puntos en cada avance de la impresora, uno correspondiente al valor de la gráfica de perfil (el cual también debe ser escalado), y los otros dos correspondientes a los valores de las dos rectas que delimitan el valor de la banda nula. En las figuras 3.57 se muestra una gráfica con la correcta colocación de la banda nula, empleando el método aquí descrito.

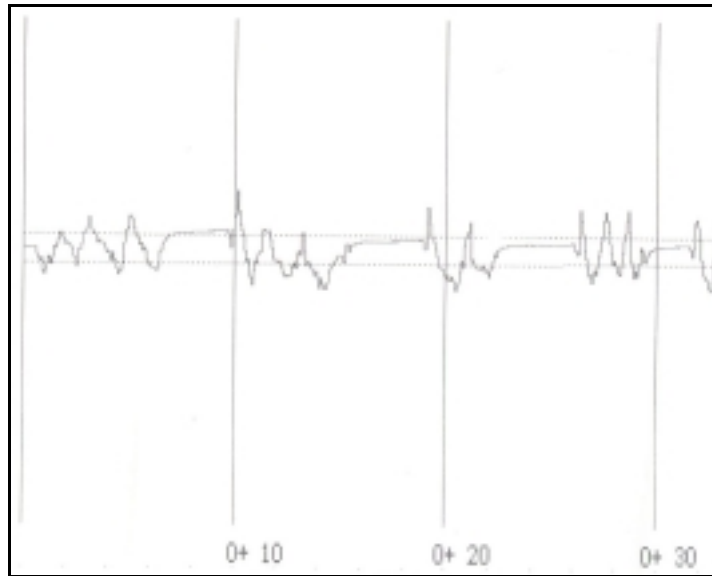


Figura 3.57. Gráfica de perfil con pendiente cero con banda nula colocada correctamente.

En la gráfica anterior se tiene una situación en la cual la pendiente del pavimento sobre el cual se realizó la prueba contaba con una pendiente casi cero, por lo cual la gráfica de regresión lineal obtenida cuenta con una pendiente de casi cero. Se observa la distribución uniforme de los picos que sobresalen de la banda nula con aquellos que se encuentran por debajo de la misma. En la figura 3.58 se muestra la gráfica obtenida en una prueba realizada sobre un pavimento con una pendiente muy pronunciada, pero a pesar de ello, son pocas las secciones que sobresalen o caen por debajo de la banda nula; si se hubiesen promediado los valores, se tendría una banda nula con pendiente cero, dejando prácticamente a la sección izquierda y derecha de la sección analizada fuera de la banda nula, lo cual sería incorrecto.

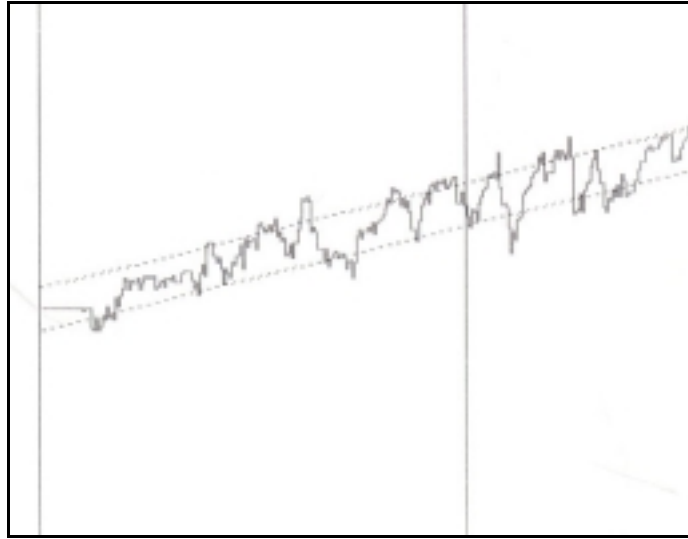


Figura 3.58. Gráfica de pendiente pronunciada con banda nula colocada correctamente.

III.3.19. Cálculo del PI

El programa del perfilógrafo permite el cálculo automático del PI una vez que se finaliza una sección específica bajo prueba. Para poder calcular el PI es necesario conocer la ubicación de la banda nula, y una vez que se ubica dicha banda, se localiza que partes de la gráfica de perfil sobrepasan o caen por debajo de dicha banda nula. La manera en la cual el programa del perfilógrafo calcula el PI es mediante la ubicación de las crestas y de los valles a lo largo de todo el reporte y comparando los valores de cada punto contra los valores de la banda nula, para verificar que se encuentren dentro de ella. Es decir, si se imprimieron n puntos sobre la gráfica de un reporte, habrá entonces n comparaciones de la gráfica de perfil con la banda nula.

Para considerar una cresta o un valle se deben cumplir tres puntos importantes: el primero de ellos es que inicie dentro de la banda nula, es decir, no se toma en cuenta como un nuevo valle o cresta a aquellos que no caen nuevamente dentro de la banda nula; el segundo se debe exceder la banda nula en un factor que por omisión es de 0.5 milímetros, a menos que el usuario especifique otro, esto se refiere a que si la excursión de la gráfica de perfil no supera este valor,

no será contabilizada en el cálculo del PI y se considerará que aun se encuentra dentro de la tolerancia. Y como tercer y último criterio, se considera el ancho de las protuberancias que sobresalen de la banda nula, las cuales deberán ser de cuando menos 60 centímetros de ancho, o bien, en el reporte impreso, de acuerdo a la escala manejada, deberán tener un ancho de cuando menos 2.25 milímetros. La figura 3.59 muestra una idea de las crestas y valles a ser tomados en cuenta en el cálculo del PI.

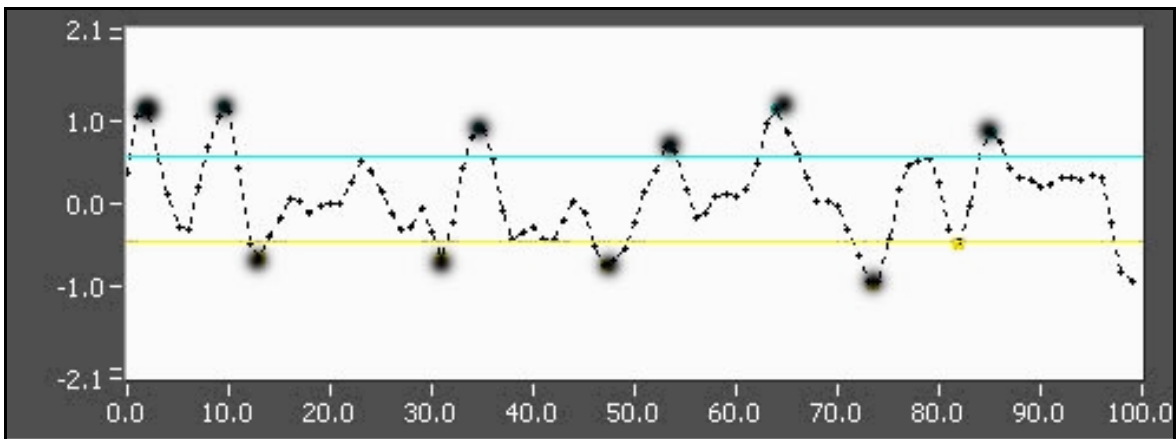


Figura 3.59. Crestas y valles considerados en el cálculo del PI.

En la gráfica anterior se muestra la banda nula formada por las dos líneas horizontales, y la gráfica de una prueba simulada en el laboratorio, con puntos se indica las crestas y valles que cumplen con los tres criterios anteriores para ser considerados en el cálculo del PI.

La subrutina encargada del cálculo del PI verifica cada uno de los tres criterios mencionados, para determinar si debe contarse dentro del cálculo ya sea una cresta o un valle. La rutina se encuentra anidada en un ciclo “for”, el cual se ejecuta de acuerdo al número de datos que se almacenaron en el archivo durante una prueba. Cada uno de los datos es leído de este archivo y comparado con los datos de la banda nula, se realiza una comparación y en caso de que el valor leído sea mayor o menor en un valor especificado (0.5 milímetros) a la banda nula, se entra a una estructura “case” de tipo *booleana*, es decir, con sólo dos opciones, falso y verdadero.

Analizaremos primero la situación en la cual el perfil sobresale de la banda nula en el valor especificado. Una vez que se da esta condición, se asigna el valor leído del perfil a una variable llamada “max_tmp”, que ubica el valor como un máximo temporal, esto porque necesitamos únicamente el valor máximo de la cresta para tomarlo en cuenta en el cálculo del PI y desconocemos cual de los valores a leer será el máximo. Este valor es comparado contra una variable llamada “max_abs”, la cual contiene de inicio un valor de cero, pero que contendrá el máximo valor de cada una de las crestas que sobresalgan de la banda nula, actualizando su valor si es que resulta ser mayor que el dato inmediato anterior. Dentro de esta estructura se anidó otra estructura “case”, la cual también es de tipo *booleana*, el valor actual del perfil que se encuentra contenido en la variable “max_tmp” es comparado con el valor “max_abs” para determinar si es mayor, y si fuera el caso, entonces “max_tmp” pasa ahora a ser el nuevo máximo absoluto, almacenando su valor en la variable “max_abs”. En la figura 3.60 se muestra una imagen del diagrama de bloques de la subrutina.

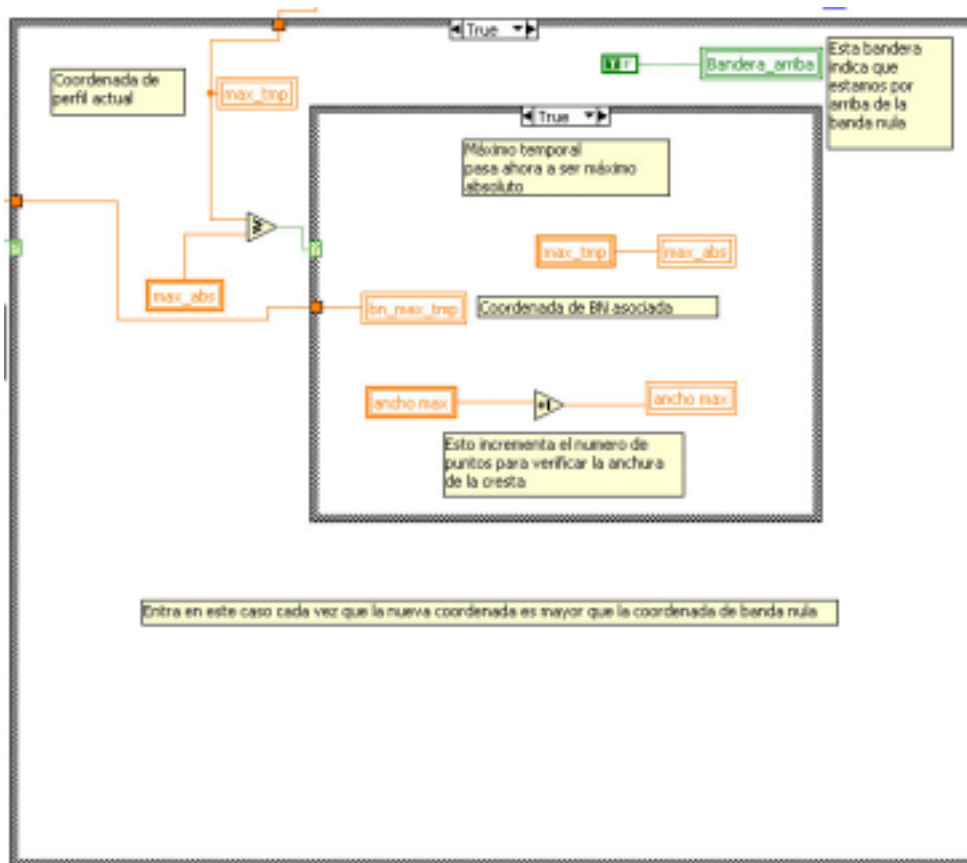


Figura 3.60. Cálculo del máximo de una cresta para el cálculo del PI.

Dentro de esta misma estructura se tiene un contador de muestras llamado “ancho_max”, para verificar el tercer criterio, es decir, si se tiene determinada cantidad de puntos fuera de la banda nula. En caso de que el nuevo valor del perfil no sea mayor que el anterior, la variable “max_abs” conserva su valor, y el contador del ancho de la protuberancia “ancho_max” no es incrementado.

Se agregó una bandera que indicará en que región se encuentra la gráfica del perfil, es decir, por arriba o por debajo de la banda nula, esta bandera permite verificar el primer criterio mencionado: “para que la cresta o protuberancia sea tomada en cuenta deberá haber iniciado dentro de la banda nula”, la bandera es de tipo *booleana*, y en la rutina recibe el nombre de “Bandera arriba”.

En el momento en que la gráfica de perfil cae por debajo de la banda nula, se entra en el caso falso de la estructura “*case*” externa, se procede entonces a verificar el estado de la variable “Bandera arriba”, además de verificar el valor del contador de “Ancho_max”, para verificar que la protuberancia cumplió con el ancho mínimo de 60 centímetros como mínimo para ser considerada en el cálculo del PI. Si cualquiera de estas dos variables resultara falsa, es decir, si no se está nuevamente por debajo de la banda nula o bien no se cumplió con el ancho mínimo, no se procede a acumular los datos para el cálculo del PI y se vuelve a colocar el contador de puntos fuera de la banda nula en cero.

Si se da el caso en el cual ambas variables resultan ser ciertas, satisfaciendo los criterios para ser tomadas en cuenta, se procede a acumular su valor en una variable llamada “Max_acumulado”, la cual se encargará de sumar todas las crestas o protuberancias que hayan cumplido con los tres criterios. El valor a ser acumulado se obtiene de la resta del máximo valor de la cresta, almacenado en la variable “Max_abs”, con la variable “bn_max_tmp”, que contiene la coordenada de la banda nula en la cual se dio el máximo valor, ya que en el cálculo del PI se toma la altura de la cresta por arriba de la banda nula.

Una vez que se ha acumulado el valor del máximo correspondiente, se limpian las variables, a excepción de la variable “Max_acumulado”, ya que es la variable donde se acumulan el valor de cada una de las crestas que contribuyen al cálculo del PI a lo largo de toda la prueba. Finalmente se envía el dato calculado a la impresora térmica para que sea impreso en el reporte. La figura 3.61 muestra la implementación de esta rutina.

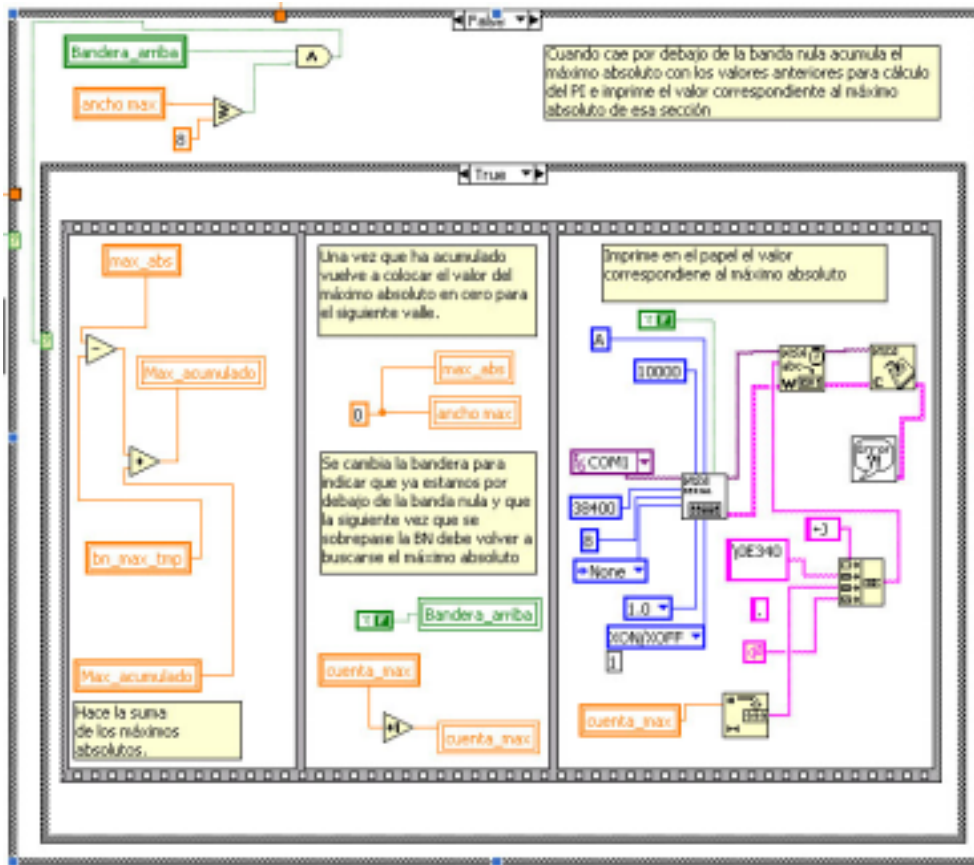


Figura 3.61. Acumulación de máximos para el cálculo del PI.

La situación en la cual la gráfica de perfil cae por debajo de la banda nula es similar a la descrita anteriormente, la diferencia radica en que las comparaciones serán ahora contra la banda nula inferior, es decir, la línea que se ubica 2.5 milímetros por debajo de la línea de regresión lineal. De igual forma se debe de cumplir con los tres criterios establecidos para que puedan ser tomados en cuenta los valles o depresiones en el cálculo del PI. El diagrama de flujo simplificado para el cálculo del PI, tanto en el caso de las crestas como de los valles, se muestra en la figura 3.62.

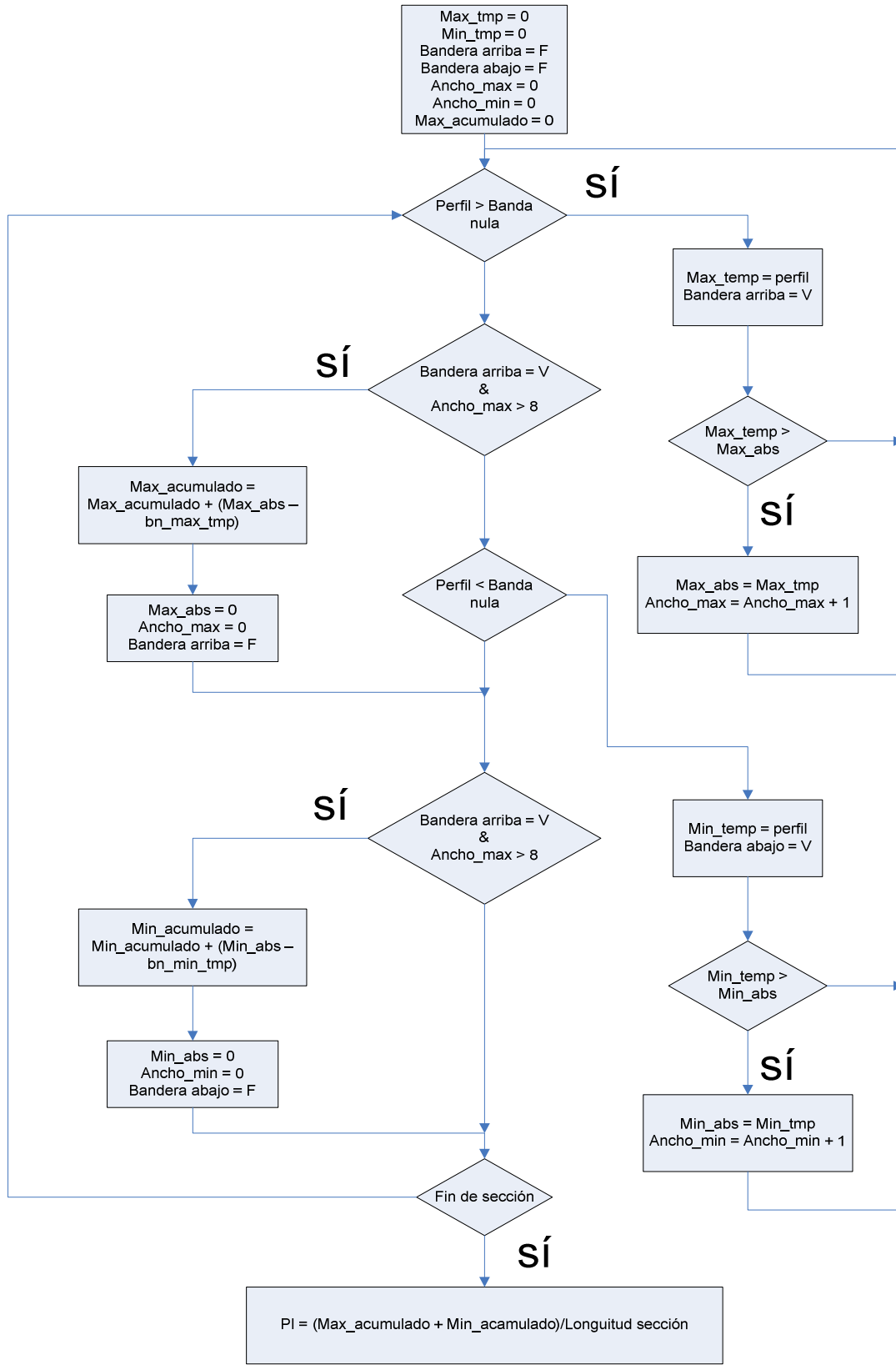


Figura 3.62. Diagrama de flujo para el cálculo del PI.

III.3.20. Programa de instalación

Una vez que se completó el programa se procedió a la generación de un programa de instalación que permitiera a la aplicación desarrollada ejecutarse en cualquier computadora con sistema operativo Windows XP o posterior, sin la necesidad de que tengan instalado LabVIEW. En la figura 3.63 se muestra una de las pantallas de instalación del programa del perfilógrafo.

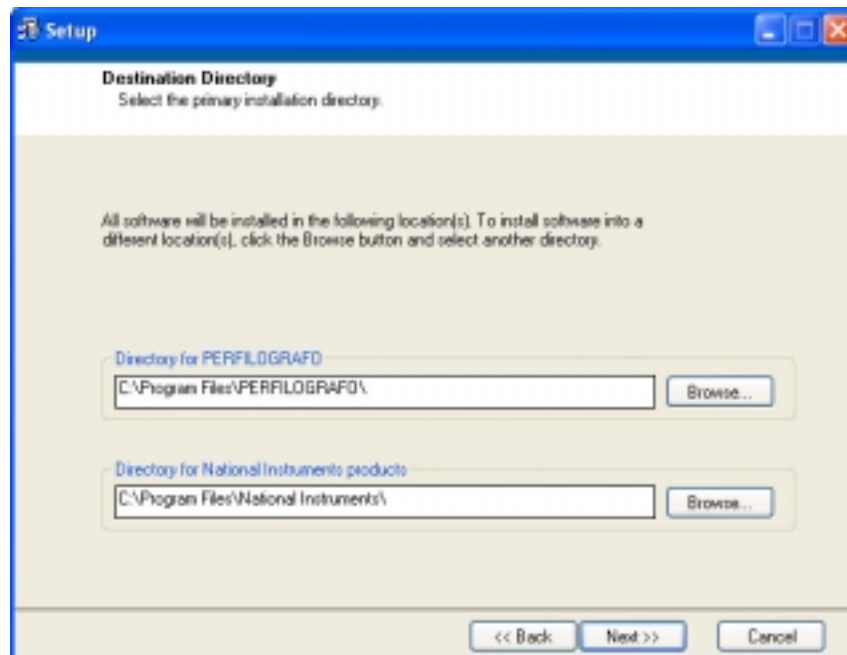


Figura 3.63. Pantalla de instalación del programa del perfilógrafo.

El programa de instalación guía al usuario paso a paso sobre el procedimiento a seguir para una correcta instalación, creándose de manera automática un acceso en la barra de programas y uno en el escritorio de la computadora. En la figura 3.64 se muestra la barra de programas de una computadora donde se instaló el programa del perfilógrafo, la cual no contaba con LabVIEW, comprobándose que una vez instalado el programa no se requiere de la plataforma para que se ejecute.

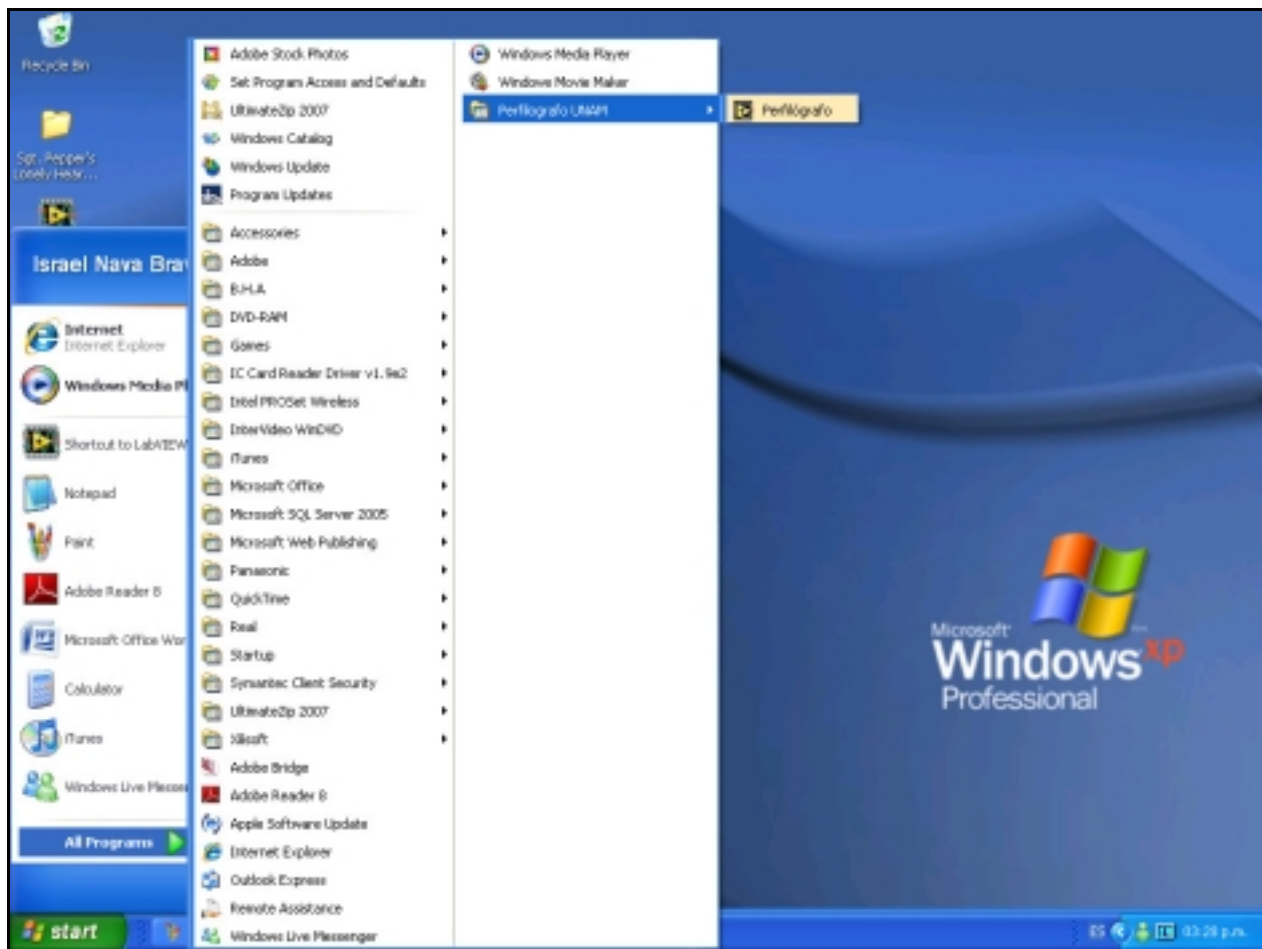


Figura 3.64. Ubicación del programa del perfilógrafo en la barra de programas.

Habiendo descrito las rutinas que conforman el diagrama de flujo del programa del perfilógrafo, se abordará ahora la integración y las pruebas a las que se sometió al equipo, tanto de laboratorio como las pruebas que se realizaron con la instrumentación montada en la estructura del perfilógrafo.

CAPÍTULO IV

INTEGRACIÓN Y

PRUEBAS

En el presente capítulo se presenta la integración de los diferentes módulos que conforman el perfilógrafo longitudinal, y los cuales fueron discutidos en el capítulo II. Se muestra la interconexión de las señales y la alimentación de energía a los diferentes módulos. De igual forma se presenta el procedimiento de calibración del perfilógrafo, el cual se basa en el procedimiento de prueba Kansas KT-54. Como parte final del capítulo se muestra las pruebas a la que fue sometido el sistema, así como la evaluación del desempeño del mismo.

IV.1. Integración

La mayoría de los módulos de hardware empleados fueron colocados dentro de un gabinete para protegerlos de la intemperie, ya que como se ha comentado, el sistema operará en ambientes externos. Los únicos elementos que se encuentran fuera del gabinete son los sensores de desplazamiento y el generador de energía. Los sensores se encuentran montados en la estructura del perfilógrafo, por lo cual fueron seleccionados para soportar condiciones

ambientales externos. La figura 4.1 muestra una imagen de la estructura final del perfilógrafo longitudinal. En ella se observa que al centro de la estructura, en la parte más alta, se encuentra colocada la caja que contiene la instrumentación del equipo. En uno de los extremos de la estructura se encuentra colocado un manubrio que permite girar las ruedas que se encuentran al frente de la estructura y de esta forma corregir el desplazamiento cuando se realiza una prueba.



Figura 4.1. Estructura final del perfilógrafo longitudinal del ii.

La alimentación de energía es llevada a la caja que contiene la instrumentación a través de una extensión que proviene del generador portátil de gasolina, que se ubica en el extremo contrario del manubrio del perfilógrafo. En la figura 4.2 se observa un detalle de la conexión de alimentación, así como de los cables que transportan las señales de los transductores de desplazamiento horizontal y vertical. Se utilizaron conectores de tipo militar, ya que permiten una sujeción segura de los cables a pesar de la vibración a la que es sometida la estructura en cada prueba, además de que están diseñados para soportar condiciones de trabajo extremas y soportan la corrosión, por lo que no sufren deterioro bajo lluvia. En la figura 4.3 se muestra la colocación del generador portátil en la estructura del perfilógrafo longitudinal.



Figura 4.2. Conexiones de alimentación y de los transductores de desplazamiento.



Figura 4.3. Colocación del generador en la estructura del perfilógrafo longitudinal.

El sensor de desplazamiento horizontal se montó directamente sobre una extensión del eje de la llanta sensora, tal como se muestra en la figura 4.4, de esta forma el giro de la llanta sensora es transmitido directamente al transductor de desplazamiento.



Figura 4.4. Montaje del sensor de desplazamiento horizontal.

El sensor de desplazamiento vertical se colocó en el eje del brazo que sostiene a la llanta sensora, las irregularidades del pavimento transmiten el movimiento a dicho sensor. En la figura 4.5 se observa el montaje del sensor en la estructura del perfilógrafo.



Figura 4.5. Montaje del sensor de desplazamiento vertical.

Dentro del gabinete se colocó las fuentes de alimentación de cada uno de los módulos, así como la tarjeta de control de la impresora térmica y el bloque de conexiones de la tarjeta de adquisición de datos. Cada uno de los módulos colocados dentro del gabinete fue atornillado a una platina interior que contiene el gabinete, una perfecta fijación es importante, ya que el equipo

durante operación tiene una vibración que va en función del pavimento sobre el cual se esté desplazando. En la figura 4.6 se muestra una imagen del interior del gabinete con todos los módulos montados.



Figura 4.6. Montaje de los módulos de instrumentación dentro del gabinete.

Dentro del gabinete se colocaron tornillos largos en los extremos de la platina inferior, de tal forma que permitiese el montaje de una platina sobre esta instrumentación, esta segunda platina sirve como base para colocar la impresora térmica y la computadora portátil. En la figura 4.7 se muestra el detalle del montaje de la fuente de alimentación de la impresora térmica sobre la platina inferior, es posible observar también en el extremo superior izquierdo de la imagen, la colocación del tornillo largo, que en conjunto con los otros tres tornillos colocados en los extremos de la platina, permite el montaje de la platina superior.



Figura 4.7. Montaje de la fuente de la impresora.

En la platina superior se fijó con tornillos la impresora térmica y la computadora portátil, ésta última se sujeto con Velcro, ya que no se consideró viable la posibilidad de atornillar la computadora a la platina, dado que muchas veces la estructura por su tamaño tiene que dejarse en bodegas o incluso sobre una pista por periodos de tiempo prolongados y la computadora puede ser robada, de esta forma la computadora puede retirarse y almacenarse en otro lugar. En las figura 4.8 y 4.9 se muestran imágenes de la colocación de la impresora térmica y de la computadora.



Figura 4.8. Colocación de la computadora y de la impresora en el gabinete.



Figura 4.9. Vista de la parte superior del gabinete.

IV.2. Calibración

El método de prueba Kansas KT-54 es un procedimiento para determinar el índice de perfil tanto de concretos como de pavimentos, utilizando para ello un perfilógrafo de tipo California de 7.6 metros o equivalente. En particular el documento KT-54 muestra el procedimiento utilizando unidades del Sistema Internacional, existe la descripción del procedimiento empleando unidades del Sistema Inglés, y es referido como el documento KT-46. En particular nos ocuparemos en este trabajo en el método descrito para las unidades del Sistema Internacional.

El procedimiento KT-54 es válido para un perfilógrafo tipo California o equivalente, de 7.6 metros de largo, el cual permite medir desviaciones verticales de un plano de referencia de 7.6 metros. En el documento se especifica que cuando menos una vez al año debe ser llevada a cabo una calibración del perfilógrafo, y de manera obligada cuando el perfilógrafo ha sido reparado o modificado. La calibración incluye la verificación de la presión de inflado de la llanta de medición, la verificación de la veracidad del viaje total de la llanta, la verificación del factor de escala de la gráfica y la verificación del desplazamiento vertical de la llanta de sensado.

Se menciona a su vez que se debe contar con una sección de calibración de 100 a 300 metros de longitud. Esta sección de prueba debe ser bastante recta, relativamente plana y usada periódicamente para verificar la calibración longitudinal y la reproducción del trazo. En nuestro caso no fue posible contar con una sección de las características mencionadas, sin embargo, se buscó trabajar en las condiciones lo más cercanas posibles a las descritas por el procedimiento.

IV.2.1 Calibración de la escala horizontal

La calibración longitudinal consiste en empujar el perfilógrafo a velocidad de caminata (aproximadamente 5 km/hr), a lo largo de una distancia de prueba preestablecida (200 a 300 metros) y determinar el factor de escala de la gráfica. Al dividir la distancia de prueba preestablecida en milímetros entre la longitud de trazo del perfilograma en milímetros, se determinará el factor de escala. Este factor debe ser de 300 ± 0.5 , si es que el perfilógrafo maneja dicha escala. Como se mencionó en el capítulo III, la escala que maneja el perfilógrafo diseñado es de 266:1, éste es pues el factor de escala con el cual se trabajó para la calibración de desplazamiento horizontal. Si el perfilograma produce un factor de escala diferente a 266 ± 0.5 , se debe realizar una calibración del perfilógrafo para alcanzar la tolerancia mencionada. Adicionalmente se cuenta con la indicación del desplazamiento mediante un indicador numérico en el panel de control del perfilógrafo. El procedimiento de calibración se describe a continuación:

- Se selecciona un tramo de camino recto de 200 metros de longitud como mínimo, medido con algún medio que garantice una aproximación de $\pm 0.2\%$ de la longitud del tramo.
- Se desplaza en línea recta el perfilógrafo a lo largo del tramo estipulado por el inciso anterior.
- En la gráfica generada por el sistema, se mide gráficamente la longitud del perfilograma obtenido, en milímetros, con una aproximación de 0.5 milímetros y se determina el factor de escala mediante la siguiente ecuación:

$$fe = 1000 \frac{Lt}{Lp} \quad (4.1)$$

Donde:

fe = Factor de escala, adimensional

Lt = Longitud de tramo, en m

Lp = Longitud del perfilograma, en mm

La calibración se considera satisfactoria si el factor de escala calculado es igual a 266 ± 0.5 . De igual forma, en la pantalla de registro electrónico del perfilógrafo la longitud registrada deberá ser igual a la longitud del tramo bajo prueba y cumplir con la tolerancia antes mencionada. En caso de que no se cumpla con la tolerancia indicada se debe verificar que no existan deformaciones de la llanta sensora y que la presión de la misma sea la correcta. El procedimiento de calibración debe repetirse las veces que sea necesario para cumplir con dicha tolerancia.

La sección con la que se trabajó en las pruebas realizadas fue de 100 metros, y el factor de escala no correspondió en las primeras pruebas, por lo cual fue necesario corregir la rutina de software, una vez corregida la rutina, el factor de escala obtenido fue satisfactorio.

IV.2.2. Calibración de la escala vertical

El dispositivo empleado para dicha calibración deberá consistir de una placa base y un bloque de dos peldaños, como el que se muestra en la figura 4.10. La placa base debe ser plana y en general su espesor será menor de 25.4 mm (1 pulgada); la altura de los peldaños del bloque será de 25.4 ± 0.25 mm (1 ± 0.1 pulgadas). En lugar del bloque pueden utilizarse dos placas auxiliares del mismo espesor que la altura de los peldaños del bloque.



Figura 4.10. Bloque de calibración de la escala vertical.

El procedimiento de calibración de la escala vertical será el siguiente:

- Se coloca el perfilógrafo sobre una superficie sensiblemente horizontal, se levanta la llanta sensora y se inserta debajo de ella la placa base, de forma que quede estable y firmemente asentada, y se apoya la llanta sobre dicha placa; se debe tomar la elevación inicial ($e1$) con el programa del perfilógrafo, esta elevación es retenida en la memoria de la computadora y sirve como referencia para las siguientes lecturas.
- Se levanta cuidadosamente la llanta sensora para insertar entre ésta y la placa base el primer peldaño o bloque de calibración o la primera placa auxiliar, de forma que la llanta quede apoyada libremente sobre el peldaño o placa auxiliar y se registra la nueva elevación obtenida ($e2$).
- Se levanta cuidadosamente la llanta sensora para insertar entre ésta y la placa base el segundo peldaño del bloque de calibración o para insertar la segunda placa auxiliar, de forma que la llanta quede apoyada libremente sobre el peldaño o la placa auxiliar y se registra esta nueva lectura ($e3$) con el programa del perfilógrafo.

- Se sostiene la llanta sensora para retirar el segundo peldaño del bloque de calibración o la segunda placa auxiliar, se baja cuidadosamente la llanta hasta que quede apoyada libremente sobre el primer peldaño o la primera placa auxiliar y se registra la nueva elevación obtenida (*e4*).
- Se sostiene la llanta sensora para retirar el primer peldaño del bloque de calibración o la primer placa auxiliar, se baja cuidadosamente la llanta hasta que quede apoyada libremente sobre la placa de base y se registra la elevación final obtenida (*e5*).

La calibración se considera satisfactoria si la diferencia, en valor absoluto, entre las elevaciones determinadas sucesivamente es de 25.4 ± 0.5 mm y si la diferencia, en valor absoluto entre la elevación inicial (*e1*) y la elevación final (*e5*) es 0.76 mm como máximo. En caso de que en la calibración no se cumpla con estos requisitos, hay que verificar que la presión de llanta sea la correcta, y que no existan desperfectos mecánicos en el brazo de palanca de la llanta sensora, así como en la estructura del perfilógrafo. La calibración debe repetirse las veces que sea necesario para cumplir con las especificaciones.

Respecto a la calibración del perfilógrafo en cuestión, cabe comentar que los valores de calibración en las pruebas de campo fueron en un primer intento erróneos, debido a que el método para el cálculo del desplazamiento no fue el adecuado, sin embargo, al replantear el método y programarlo, las pruebas de calibración vertical resultaron satisfactorias.

IV.3. Pruebas aplicadas al perfilógrafo longitudinal

En una primera etapa se realizaron pruebas en el Laboratorio de Instrumentación del Instituto de Ingeniería, simulando las señales tanto de desplazamiento vertical como horizontal, y de esta forma proceder a corregir los errores que se presentaran. Se depuraron también errores observados en la ejecución del programa del perfilógrafo, en los reportes almacenados en la computadora y en los reportes impresos generados. Cuando se realizaron todas las adecuaciones consideradas necesarias en la etapa de laboratorio, se procedió a las pruebas en campo, es decir, pruebas con la estructura sobre un pavimento.

Para realizar una prueba en campo con el perfilógrafo, éste debe ser llevado a una velocidad de caminata, esto es, aproximadamente a 5 kilómetros por hora, en las trayectorias indicadas para cada sección del pavimento, como se muestra en la figura 4.11. Cabe mencionar que las pruebas llevadas a cabo en un principio se realizaron sobre pavimentos del circuito escolar de Ciudad Universitaria, así como en instalaciones de ASA, pero no sobre una pista de aterrizaje propiamente, por lo cual los resultados obtenidos difieren de los que se esperaba obtener en una pista de aterrizaje. Sin embargo, se seleccionaron secciones lo más planas posibles para poder verificar que los desplazamientos verticales y horizontales correspondieran con lecturas reales.

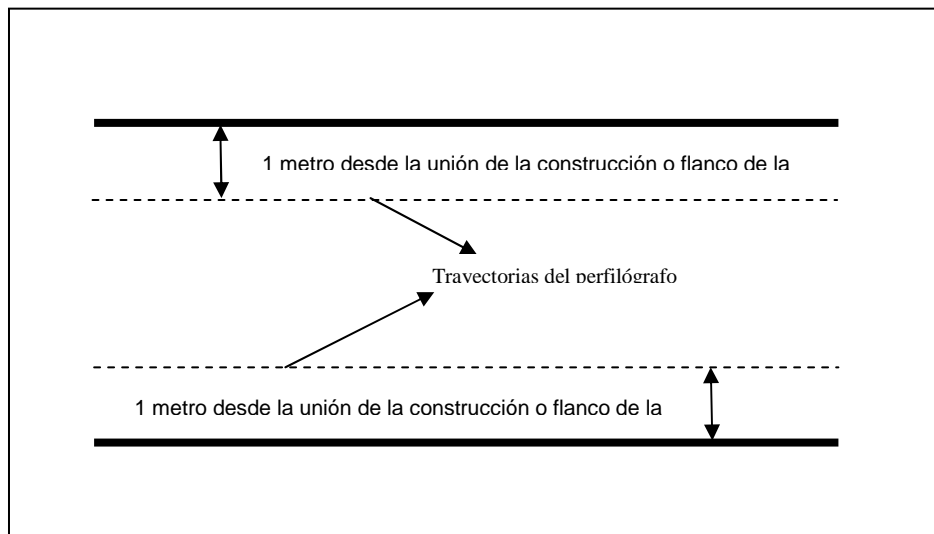


Figura 4.11. Trayectorias de prueba en una pista de aeropuerto.

La propulsión debe ser proporcionada manualmente, es decir, debe ser empujado por una persona, o por una unidad de propulsión adecuada, tal como un tractor de jardín. No deberá ser remolcado o empujado el perfilógrafo con un vehículo. Es probable que se requiera más de una persona para mantener la parte trasera del perfilógrafo exactamente en la trayectoria requerida en curvas elevadas o curvas horizontales pronunciadas.

Si hay un exceso de “saltos” al realizar la prueba, se debe disminuir la velocidad del viaje. Un excesivo número de “saltos” sobre un trazo hace difícil la evaluación del pavimento y puede afectar el resultado de la prueba.

Al iniciar la ejecución del programa del perfilógrafo hay que asegurarse que todos los datos ingresados para los parámetros de operación sean los correctos, ya que esto asegura que la persona que analice la información y la reporte tendrá toda la información necesaria. En las figuras 4.12 y 4.13 se muestran imágenes de algunas de las varias pruebas que fueron realizadas ya en campo con el equipo.



Figura 4.12. Pruebas de campo del perfilógrafo longitudinal en instalaciones de ASA.

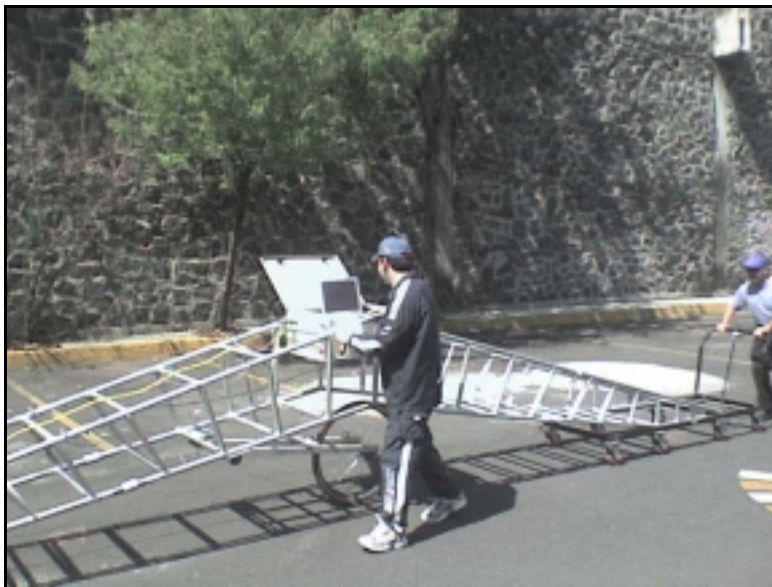


Figura 4.13. Pruebas de campo del perfilógrafo longitudinal en Ciudad Universitaria.

Dadas las limitantes de no poder probar el equipo en una pista de aeropuerto, otra de las pruebas consistió en el trazado de gráficas de perfil de una misma sección y verificar que se obtuvieran resultados similares sobre una misma sección. En las figuras 4.14 se muestra la información correspondiente a dos pruebas llevadas a cabo en el circuito escolar de Ciudad Universitaria, ambas pruebas corresponden al día 19 de febrero de 2007, la imagen de la izquierda corresponde a una prueba efectuada a las 2:31 p.m., mientras que la imagen de la derecha corresponde a una prueba realizada a las 2:38 p.m., sobre la misma sección de pavimento. En el archivo de la prueba se reporta el dato de desplazamiento horizontal en centímetros contra el desplazamiento vertical en milímetros. Puede observarse que los datos corresponden a lecturas similares de desplazamiento vertical.

| Desplazamiento horizontal (cm) | Desplazamiento vertical (mm) |
|--------------------------------|------------------------------|
| 1 | 0.785 |
| 2 | 0.384 |
| 3 | 0.294 |
| 4 | -0.236 |
| 5 | -0.120 |
| 6 | -0.285 |
| 7 | -0.482 |
| 8 | -0.662 |
| 9 | -0.873 |
| 10 | -1.287 |
| 11 | -1.291 |
| 12 | -1.447 |
| 13 | -1.312 |
| 14 | -1.663 |
| 15 | -1.580 |
| 16 | -1.427 |
| 17 | -1.325 |
| 18 | -1.126 |
| 19 | -1.430 |
| 20 | -1.410 |

Figura 4.14. Archivos de datos de una prueba de campo en CU.

Fueron varias las pruebas similares que se llevaron a cabo, con el fin de evaluar el funcionamiento del perfilógrafo y del software. En la figura 4.15 se observan varios de los archivos generados en la base de datos correspondiente al 19 de febrero de 2007, la cual contiene los archivos de datos de pruebas realizadas entre la 1:00 p.m. y las 6:00 p.m.

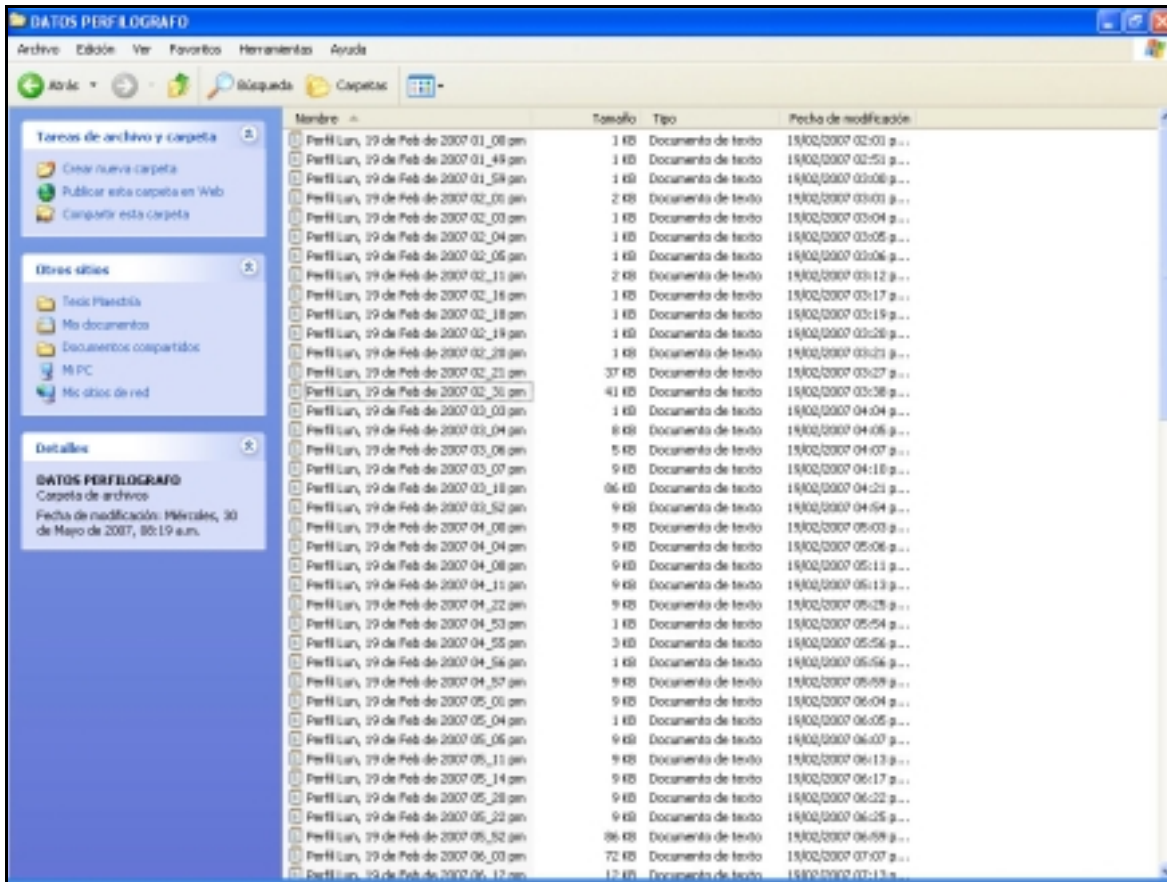


Figura 4.15. Base de datos del 19 de febrero de 2007.

Otra de las pruebas consistió en verificar que los datos generados en el panel de control de la pantalla del perfilógrafo correspondiesen con los reportes impresos generados. En la figura 4.16 se muestra la gráfica de una de las pruebas realizadas, y en la figura 4.17 el reporte impreso generado para dicha prueba. De ambas figuras se observa la similitud entre las gráficas que se generan en la pantalla de la computadora y la del reporte impreso.

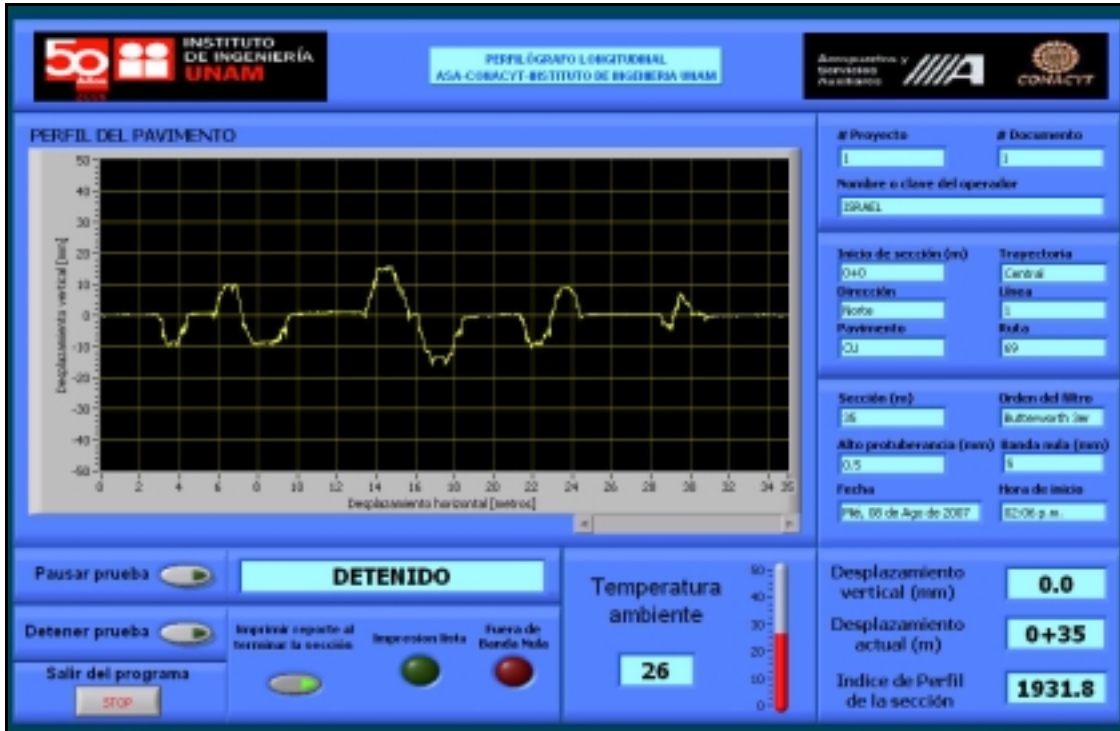


Figura 4.16. Pantalla de la computadora en una prueba realizada en CU.

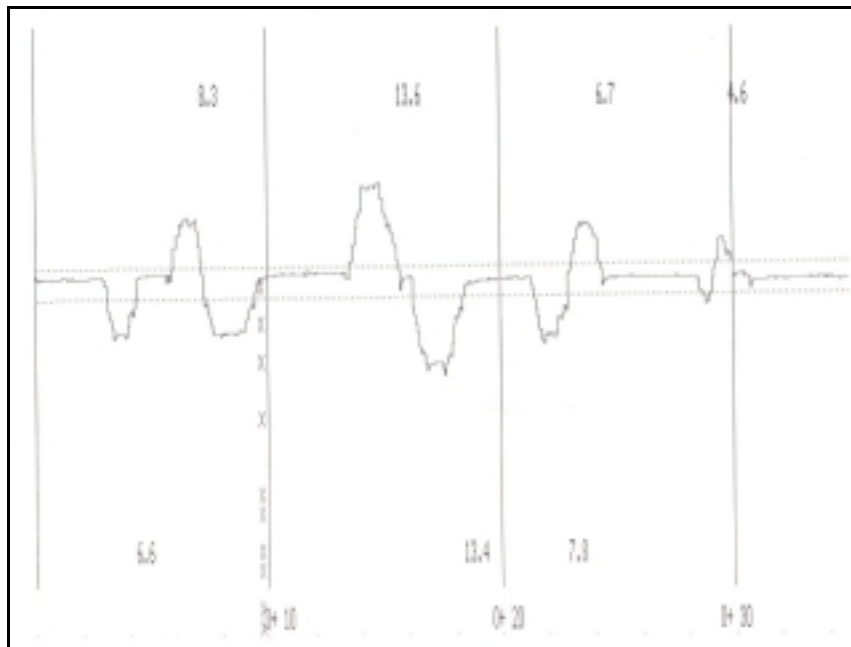


Figura 4.17. Reporte impreso correspondiente al panel de la figura 4.16.

El cálculo del PI entregado por el sistema se corroboró al hacer de manera manual el cálculo, midiendo la altura de las protuberancias y de las depresiones directamente en el reporte impreso de manera manual, y después procediendo al cálculo en papel, corroborando que el sistema calcula de manera eficiente el PI.

Una vez que se realizaron las pruebas de campo del perfilógrafo longitudinal, en ASA y en CU, surgieron varias sugerencias a realizar.

Se notó que debía hacerse un pequeño ajuste en la circunferencia que se había tomado como base para la llanta sensora, es importante que siempre cuente con la presión correcta del inflado para evitar errores en la lectura de desplazamiento. El personal de ASA realizó sugerencias en cuanto a la presentación de datos en la pantalla del panel de control y en el reporte impreso, mismas que fueron atendidas y corregidas.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En el presente y último capítulo se comenta sobre los resultados obtenidos una vez finalizado el desarrollo del perfilógrafo longitudinal, además de las conclusiones a las que se llegó una vez concluido el trabajo. En la tercera parte del capítulo se menciona algunas de las recomendaciones que pueden ser tomadas en consideración con la intención de mejorar la operación del perfilógrafo.

V.1. Resultados

Para alcanzar los objetivos que se plantearon al inicio del presente trabajo, se desarrollaron cinco etapas: la primera consistió en la investigación de la operación de un perfilógrafo, y de los diferentes tipos que se encuentran disponibles hoy en día en el mercado. Si bien la información ofrecida por los fabricantes se refiere únicamente a datos técnicos, esto permitió analizar diferentes posibilidades de atacar el problema y de esta forma satisfacer las

especificaciones requeridas por la compañía que solicitó la instrumentación del sistema. Se consultó también sobre las normas que existen para el desarrollo de estos equipos, así como de las características con las cuales deben cumplir. Se encontraron principalmente normas estadounidenses, que fue las que sirvieron como base para el desarrollo del sistema.

La segunda etapa correspondió a la selección e integración de los elementos que compondrían el *hardware* del sistema. Esto fue un punto fino en el desarrollo del prototipo, ya que se requería de características especiales de algunos de ellos como el soportar condiciones ambientales extremas.

La tercera etapa correspondió al desarrollo del *software* a través de la plataforma seleccionada, e integrar el funcionamiento del *software* con el *hardware*. Se creó primeramente el panel de control de acuerdo a los indicadores y controles necesarios en la aplicación, para después trabajar con el diagrama de bloques, que es donde se crean las rutinas y subrutinas necesarias para que el sistema opere de manera correcta.

Una cuarta etapa fue la de pruebas de laboratorio, contando con los transductores de desplazamiento vertical y horizontal, simulando las señales necesarias en el laboratorio y efectuando las correcciones necesarias que se localizaron a lo largo del proceso de pruebas.

La quinta etapa del proceso fue el trabajar con la instrumentación montada en la estructura mecánica del perfilógrafo, no era posible realizar pruebas de laboratorio con la estructura ya que ésta mide más de siete metros de largo, y el espacio físico es una limitante, sin tomar en cuenta que el laboratorio de instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM se ubica en el segundo nivel del edificio 12. Sin embargo, se trató de reducir en la fase de laboratorio los posibles errores que pudieran generarse. Cuando se realizaron las pruebas de campo con la estructura sobre pavimentos de CU se verificó los parámetros de desplazamiento vertical y horizontal, además del funcionamiento del panel de control, la generación de la gráfica de perfil en la pantalla del panel de control de la computadora, así como en el reporte impreso

Terminada la etapa de pruebas, se obtuvo el prototipo de un sistema de medición de perfiles en pavimentos, haciendo uso del índice de perfil como valor de determinación, cumpliendo con los requerimientos en cuanto a instrumentación electrónica solicitados por ASA. Entre las características del equipo desarrollado se pueden mencionar las siguientes:

- Se tiene un sistema de medición de perfiles en pavimentos con una resolución de desplazamiento vertical de 0.1 milímetros y una resolución de desplazamiento horizontal de 1 0.01 metros.
- El sistema puede evaluar de manera automática el perfil de un pavimento mediante el uso del índice de perfil.
- Se generan reportes impresos a través de una impresora térmica por lo cual no se requiere de cartuchos de tinta.
- Se tiene un sistema que se encuentra protegido contra la intemperie, de tal forma que es posible llevar a cabo pruebas bajo diferentes condiciones ambientales.
- El sistema cuenta con un sistema de generación de energía que le permite una autonomía de hasta 8 horas, con sola una carga de gasolina (2.5 litros) del tanque del generador.
- Se desarrolló un interfaz de usuario amigable, de tal forma que no es necesaria gran capacitación del personal encargado de operar el equipo.
- Se creó un programa de instalación para que el usuario pueda instalar el programa del perfilógrafo en cualquier computadora que trabaje bajo ambiente Windows, sin la necesidad de instalar LabVIEW para que el programa pueda ejecutarse.

- El sistema cuenta con su propia estructura mecánica diseñada en el Instituto de Ingeniería, por lo cual no se tiene el problema del plagio de algún otro diseño y de los problemas que esto pudiera acarrear.
- El sistema puede almacenar los datos de los reportes en un archivo de texto en el disco duro de la computadora. En dicho reporte se almacena los datos de desplazamiento horizontal en centímetros, y su correspondiente dato de desplazamiento vertical asociado. Al final del reporte de cada sección se incluye el cálculo del PI correspondiente. El tamaño y la cantidad de los reportes que pudieran almacenarse dependerá de la cantidad de espacio disponible en el disco duro de la computadora, pero tomando en cuenta que un reporte no excede los 100 kilo *bytes*, y que se dispone de mas de 60 Giga *bytes* por parte de la computadora, no se tienen problemas en cuanto a la capacidad de almacenamiento.
- La temperatura de operación del sistema va de lo 0° a los 50° C, sin que cualquiera de los extremos de temperatura implique una degradación de cualquiera de los componentes empleados, incluyendo la computadora. Se cuenta además con un indicador de temperatura ambiente que permite al operador conocer si se encuentra dentro del rango de operación del sistema, y de esta forma protegerlo contra posibles daños.

V.2. Conclusiones

Se cumplió con el objetivo del proyecto, el cual fue diseñar e integrar un sistema que permitiese la evaluación de perfiles en pavimentos de manera autónoma, de fácil operación, el cual cumple con las resoluciones requeridas en los desplazamientos verticales y horizontales, así como en la impresión de reportes impresos.

El contar con un sistema de evaluación autónoma del índice de perfil reduce en gran medida el error que pudiera generarse al hacer la evaluación en forma manual, además, consume mucho tiempo de procesamiento. Con el desarrollo del sistema, dicha problemática se encuentra prácticamente solucionada al 100%, ya que se elimina por completo la participación del operador en la determinación del dicho valor.

Se reduce el gasto de papel para cada una de las pruebas que eran llevadas a cabo, si bien el sistema aquí desarrollado cuenta con la opción de impresión de los reportes a petición del personal de ASA, no es necesario que se imprima dicho reporte, ya que la información se almacena en la computadora, y se puede consultar la información directamente en la computadora.

En las pruebas de operación del sistema se observó que el equipo es funcional, confiable y seguro en su operación, aunque es susceptible de mejoras. El sistema puede servir como base para futuros desarrollos relacionados con este tipo de equipos que no se realizan en el país, permitiendo la creación de equipos especializados por parte de ingenieros mexicanos, con las prestaciones y funcionalidades similares a las de un equipo de importación, cuyo costo, dada la especialización del equipo, suele ser muy elevado. Incluso se pueden llevar a cabo adecuaciones de acuerdo a las necesidades del personal encargado de realizar este tipo de estudios, como fue el caso del sistema desarrollado.

V.3. Recomendaciones

Siempre cuando se finaliza un trabajo se tiene la sensación de que pudo realizarse de una mejor forma, y el desarrollo de este trabajo no es la excepción. Se presenta por lo tanto algunas sugerencias y recomendaciones con base a la experiencia adquirida en el diseño del sistema.

El principal problema que se tuvo fue con la estructura mecánica del perfilógrafo, la cual fue objeto de numerosas modificaciones hasta llegar a una versión lo más funcional posible. En la convocatoria de ASA se mencionaba que la estructura del perfilógrafo debería permitir su fácil armado y traslado, y dada la naturaleza del material empleado en la fabricación de la estructura, la hace estable, más no ligera ni sencilla de transportar, por lo cual la recomendación principal es plantear una nueva estructura que permita un manejo más simple en el armado y la transportación.

Una recomendación del personal de ASA fue colocar el gabinete que contiene la instrumentación electrónica cerca del manubrio que permite dirigir al equipo, ya que al estar

colocado en el centro del perfilógrafo, no se pueden percatar de alguna falla en la adquisición de datos en el instante en que ocurran, sino hasta finalizar una prueba, las cuales suelen ser de varios kilómetros.

En cuanto a la forma física del gabinete no fue la primera opción que se tenía planeada para el sistema, pero por cuestiones del tiempo de entrega del gabinete originalmente seleccionado, y tiempo de entrega del prototipo a ASA, se tuvo que recurrir a uno con el que se pudiera disponer de manera inmediata. El gabinete cumple con su función de proteger al sistema, sin embargo desde el punto de vista de la ergonomía no es la mejor opción, razón por la cual es recomendable regresar al diseño seleccionado originalmente, el cual además de proteger permite un manejo cómodo del sistema.

Otro problema observado en cuanto a la estructura mecánica es que no toda es de aluminio o de acero inoxidable, principalmente en los tornillos que sirven para fijar las diferentes partes, esto a causado que con el paso del tiempo tiendan a corroerse, lo mismo se observó en el eje de la llanta sensora, el cual ha presentado un problema de corrosión que con el tiempo se va incrementando. Por lo tanto, es importante que todas las partes de ensamble sean o bien de aluminio o de acero inoxidable y de esta forma evitar la corrosión de los mismos.

En cuanto a la instrumentación electrónica se tuvieron que hacer adecuaciones en *software* para corregir algunos detalles de la implementación del *hardware*, por ejemplo, dado que se contaba con un tiempo reducido para el desarrollo del sistema, tanto la interfaz mecánica como la interfaz electrónica fueron desarrolladas de manera paralela, en la selección de los sensores de desplazamiento se tomó como base los planos de diseño del sistema mecánico, los cuales ya en la implementación tuvieron pequeñas variaciones respecto a lo calculado en el diseño. En particular se seleccionó el transductor de desplazamiento horizontal de acuerdo a una llanta sensora de 20 pulgadas de diámetro, encontrándose que no es exacta dicha medida teniendo pequeñas variaciones, las cuales pudieron reducirse si se selecciona un nuevo sensor de desplazamiento, lo cual ya no fue posible debido al alto costo de cada uno de los transductores.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Materials (ASTM), E 1274-03, *Standar Test Metod for Measuring Pavements Roughness Using a Profilograph*, EUA.
2. American Concrete Pavement Association, Technical Bulletin TB-006.0-C, *Constructing Smooth Concrete Pavements*, Arlington heights, Illinois. EUA (1990).
3. Baxter, Larry. *Capacitive Sensors: Design and Applications (IEEE Press Series on Electronics Technology)*, Wiley-IEEE Press, 1996.
4. Beyon, Jeffrey, *LabVIEW Programming, Data Acquisition and Analisis*, Prentice Hall PTR; 2000.
5. Department of Transportation, California Test 526, *Operation of California Profilograph and Evaluation of Profiles*, Sacramento, California, EUA (Abril 2002).
6. *Evaluation of Lightweight Non Contact Profilers*, FHWA/IN/JTRP-2000/6, Indiana Department of Transportation/Purdue University, July 2000.
7. *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Smoothness Measurements*, World Bank Technical Paper Number 46, 1986.
8. *Operational Guidelines for Longitudinal Pavement Profile Measurement*, NCHRP Project 10-47, The University of Michigan Transportation Research Institute, February 1999.
9. *Operation of California Prafilograph and Evaluation of Profiles, California Test 526*, 1978.
10. Pallas, Ramón, *Sensor and Signal Conditioning*, 2nd edition, Wiley-Interscience, 2000.
11. Poger S. Walker, H.-T. Lin: *Profilograph Correlation Study with Present Serviceability Index (PSI)*, FHWA-DP-88-072-002, 1988.
12. *Profile Equipment Evaluation*, Research Report 1378-2, Texas Transportation Institute, December 1997.
13. *Profilograph Limitations, Correlations, and Calibration Criteria for Effective Performance-Based Specifications*, NCHRP Project 20-7, Task 53, 1993.
14. Sayers, M.W. and S.M. Karamihas, *The Little Book of Profiling*, The University of Michigan. Transportation Research Institute, September 1998.
15. *Robotics world (Magazine/Journal), Principles of rotary encoders*. (Motion Control : Official Motion Control Publication of ISA), October 1, 2004, Douglas Publications, Volume 22, Issue 8, page: 19(2).
16. Webster, John G., *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, CRC, 1998.