

ALCALDÍA MAYOR DE SANTA FE DE BOGOTÁ D.C.

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO

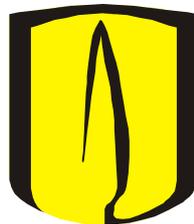
CALLE 22 No. 6-27 PISO 9
Bogotá D.C.



MANUAL DE INSTRUMENTACIÓN DE PAVIMENTOS

CONTRATO 118 DE 2009
Procedimiento para la Instrumentación de Pavimentos

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES



Bogotá D.C., Abril 2011

Índice

Preliminares

Alcance

Definición de proyectos de instrumentación en pavimentos

Experiencias previas en proyectos de instrumentación

Etapas de proyectos de Instrumentación

Etapa 1: Identificación de las variables a instrumentar

Etapa 2: Selección de sensores y equipos de adquisición de datos

Etapa 3: Software para la captura y almacenamiento de datos

Etapa 4: Pre-verificación de los sensores, diseño de dispositivos mecánicos especiales, verificación de sensores, pre-validación de las metodologías de instrumentación en laboratorio e instalación de los sensores en campo

Etapa 5: Puesta en operación de los sistemas y mantenimiento

Recomendaciones para futuros proyectos de instrumentación

Anexos

MANUAL DE INSTRUMENTACIÓN DE PAVIMENTOS

Preliminares

El presente manual describe de forma resumida las etapas requeridas para realizar proyectos de instrumentación en tramos de pavimento en servicio. La información contenida en este manual es el resultado de las actividades de diseño de metodologías de instrumentación desarrolladas por la Universidad de Los Andes mediante el Contrato No. 118 de 2009 realizado con el Instituto de Desarrollo Urbano. Estas metodologías fueron diseñadas y validadas en campo en dos tramos de pavimento diferente (rígido y flexible). Las metodologías presentadas en este Manual hacen, por lo tanto, referencia a estas dos experiencias de instrumentación. Para detalles específicos sobre la mayoría de información consolidada en este manual, se recomienda recurrir al *Informe Final* de dicho contrato.

Alcance

El alcance de este documento es describir y presentar la información requerida para ejecutar un proyecto de instrumentación de pavimentos en cada una de sus etapas. Las metodologías presentadas en este manual son válidas únicamente para los sensores y equipos acá descritos. Cuando se empleen nuevos sensores, diferentes a los descritos en este documento, o se empleen sensores con marcas, especificaciones o características diferentes a los descritos en este documento, las metodologías presentadas en este manual pierden validez. En este caso, el personal a cargo de la instrumentación se debe hacer responsable del impacto que las nuevas metodologías pueden generar sobre la calidad final y el éxito del proyecto. Es importante resaltar que, aun siguiendo las recomendaciones acá establecidas, cada proyecto de instrumentación es único y diferente. Por esta razón, este tipo de proyectos debe ser administrado y dirigido por de un equipo multidisciplinario de alta preparación técnica. Este equipo debe contar con los

conocimientos y el criterio necesarios y suficientes para tomar las decisiones que promuevan la obtención de sistemas integrales de instrumentación funcionales y confiables.

Definición de Proyectos de Instrumentación en Pavimentos

En términos generales, la instrumentación de pavimentos se define como un conjunto de procedimientos o metodologías que tienen como objetivo incorporar dentro de diferentes lugares de la estructura una cantidad adecuada de equipos y dispositivos, con el objetivo de medir la respuesta y el desempeño de los materiales que constituyen el pavimento.

Existen dos tipos principales de instrumentación en pavimentos. El primero, y más documentada en la literatura científica, es la instrumentación en pistas de prueba para ensayos acelerados de carga; los cuales se realizan a través de sistemas mecánicos especialmente diseñados para este fin. El segundo consiste en instrumentar tramos de vía en servicio cuya carga corresponde a la del tráfico real que circula por la vía o la de vehículos que transitan con carga controlada. Las metodologías descritas en el presente manual son aplicables a proyectos de *instrumentación de pavimentos en vías de servicio*, aun cuando algunas secciones particulares de este documento pueden tener injerencia y validez en otro tipo de proyectos de instrumentación.

Experiencias Previas en Proyectos de Instrumentación

La sección 2 del Informe Final del Contrato 118 de 2009 (Uniandes-IDU) presenta una completa descripción del estado del conocimiento en el tema de instrumentación en pavimentos. Al respecto, es importante mencionar que el número de experiencias de instrumentación en pavimentos a nivel nacional e internacional ha aumentado significativamente en los últimos 15 años. Existen tres razones principales que explican el creciente interés por estas metodologías:

- Los proyectos de instrumentación permiten obtener información única y valiosa sobre la respuesta mecánica y sobre las condiciones al interior de los pavimentos que, de otra forma, serían imposibles de determinar,
- La rapidez del desarrollo tecnológico ha promovido el uso y/o diseño de sistemas de software confiables y eficientes para la adquisición, almacenamiento y procesamiento de los datos recolectados en campo, y
- Las agencias internacionales encargadas de la administración de las redes viales han reconocido que estos proyectos son un medio eficaz para obtener y/o calibrar parámetros necesarios para las nuevas metodologías mecanicistas de diseño de pavimentos y para el desarrollo y caracterización de curvas de deterioro y planes integrales de gestión de pavimentos.

En el país existen experiencias previas puntuales en el uso limitado de instrumentación en pistas aceleradas de prueba. En este sentido, las validaciones de las metodologías de instrumentación realizadas en tramos de servicio que se emplean para ejemplificar las actividades de instrumentación en este manual, constituyen la primera experiencia a nivel nacional en proyectos de esta naturaleza.

En cuanto a los objetivos de las metodologías de instrumentación de pavimentos, es importante señalar que éstos son variados y dependen exclusivamente de la naturaleza y motivación de cada proyecto en particular. No obstante, si bien existen diversas motivaciones para realizar proyectos de instrumentación, en todos los casos la información recolectada puede ser empleada para realizar, al menos, una de las siguientes actividades:

- Validar y calibrar modelos constitutivos del comportamiento de pavimentos,
- Validar y calibrar metodologías de diseño mecanicistas de pavimentos.

- Desarrollar funciones o curvas de deterioro para secciones transversales típicas de pavimentos flexibles. Esta actividad es fundamental para desarrollar planes de gestión de pavimentos que se adapten a las condiciones locales de una red de infraestructura específica.
- Evaluar el efecto individual del comportamiento de cada capa en el desempeño estructural del pavimento.
- Establecer el comportamiento de nuevos materiales o de condiciones especiales de un proyecto en el desempeño de los pavimentos.
- Establecer relaciones del acoplamiento entre las condiciones ambientales al exterior y al interior de los pavimentos y su respuesta mecánica.

La metodologías para el procesamiento, empleo y aplicación de las mediciones recolectadas a través del sistema de instrumentación en cualquiera de las actividades mencionadas previamente se encuentra fuera del alcance de este documento.

Etapas de proyectos de instrumentación

Las siguientes son las etapas requeridas para ejecutar un proyecto de instrumentación en pavimentos:

- **Etapas 1:** Identificación de las variables a instrumentar. Esta etapa culmina con un listado de los tipos de mediciones se van a realizar, la naturaleza de la medición (variable mecánica/dinámica o variables ambiental/estática) y con la ubicación específica de la medición dentro del pavimento en donde se van a realizar dichas mediciones.

- **Etapa 2:** selección de los sensores a emplear para la medición de las variables especificadas en la Etapa 1, de los equipos de adquisición de datos y de otros equipos complementarios (especificaciones técnicas generales, fabricante, modelo, etc.). Para seleccionar estos equipos, es necesario realizar un estudio previo de las especificaciones y requerimientos técnicos de cada sensor y de su relación con los equipos de adquisición de datos. Esta etapa también incluye la adquisición, importación y nacionalización de dichos instrumentos.
- **Etapa 3:** diseño de software para el manejo y administración de la información captura por los sensores.
- **Etapa 4:** pre-validación y validación de los sensores en laboratorio, validaciones preliminares del sistema de instrumentación en laboratorio y actividades de instalación de los sensores en obra.
- **Etapa 5:** puesta en operación del sistema y actividades de mantenimiento.
- **Etapa 6:** utilización de las mediciones recolectadas en campo para diferentes aplicaciones.

Este manual describe las etapas 1 a 5 de un sistema de instrumentación en tramos en servicio de pavimento flexible y rígido. Como se mencionó con anterioridad, la etapa 6 se encuentra fuera del alcance de este manual.

Nota: La mayoría de actividades mencionadas en este manual (número de sensores, ubicaciones específicas y algunas características de los procedimientos de instalación en obra) corresponden a las condiciones específicas y particulares de los tramos instrumentados. El personal a cargo de diseñar un sistema de instrumentación debe emplear su conocimiento en comportamiento y desempeño de estructuras de pavimento y materiales con el objetivo de hacer un uso cuidadoso de la información

aquí presentada, de tal forma que ésta se adapte acertadamente a las condiciones especiales de la estructura de pavimento a instrumentar.

TRAMOS EXPERIMENTALES EMPLEADOS EN LA VALIDACIÓN

Como se mencionó anteriormente, las metodologías de instrumentación propuestas como parte del Contrato 118 fueron validadas mediante su instalación y puesta en operación en dos tramos reales de pavimento en servicio, uno flexible y uno rígido. El número específico de sensores, así como ciertos aspectos de las metodologías de instalación de los sensores descritos en este manual, son particulares para estos dos pavimentos. A continuación se describen las características de los dos tramos instrumentados.

- Pavimento flexible

Ubicación: carril sur *sólo-bus* de la troncal de Transmilenio de la Calle 80, al oriente de la estación Escuela Militar.

Estructura: la estructura del pavimento se resume en la siguiente tabla:

Tabla P.1 Características de las capas que conforman la estructura de rehabilitación de pavimento flexible (Calle 80, estación Escuela Militar, costado sur)

No. de Capa	Capa	Material	Espesor (m)
1	Rodadura	MD 12 Asfalto Tipo III	0.05
2	Intermedia	MAM 20 Asfalto tipo V	0.11
3	Intermedia	MD 20 Convencional	0.09
4	Base	Material Granular Estabilizado con Asfalto (MGEA)	0.25
5	Material Remanente	Granular Remanente	0.55

- Pavimento rígido

Ubicación: carril occidental *sólo-bus* de la troncal de Transmilenio de la Autopista Norte, al sur de la estación Alcalá.

Estructura: la estructura del pavimento se resume en la siguiente tabla:

Tabla P.2. Características de las capas que conforman la estructura de rehabilitación de pavimento rígido a instrumentar (Autopista Norte, estación Alcalá, costado occidental)

No. de Capa	Capa	Tipo de Material	Espesor (m)
1	Losa de Concreto	Concreto Fast-Track	0.25
2	Mezcla Asfáltica	MD 20 Convencional	0.25
4	Base Granular	Material existente	No especificada
5	Estructura existente	No especificada	No especificada

ETAPA 1

Identificación de las variables a instrumentar

La primera etapa de un proyecto de instrumentación consiste en determinar las variables de interés que se desean monitorear. La identificación de estas variables es un proceso que requiere información básica del proyecto, tal como las características del pavimento a instrumentar, las posibles manifestaciones de desempeño que se pueden monitorear y el tipo y la configuración de carga a los que se espera que sea sometido el pavimento.

En términos generales, existen dos tipos de variables a medir en un pavimento: 1) variables mecánicas, y 2) variables climáticas o medio-ambientales. En este manual se emplea el término *variables dinámicas* para hacer referencia a las variables de naturaleza mecánica—las cuales miden las solicitaciones y respuesta de la estructura ante la aplicación de la carga vehicular—y el término *variables estáticas* para hacer referencia a las variables climáticas y medio ambientales. La nomenclatura *dinámica y estática*, busca describir el hecho de que la naturaleza de estos dos tipos de variables genera necesidades diferentes en la toma de mediciones (cantidad de datos por intervalo de tiempo). Mientras que en el caso de las variables dinámicas las lecturas de las variables deben ser a una gran velocidad y en un periodo corto de tiempo (similar al tiempo que se demora el paso de un vehículo sobre el pavimento), las mediciones de las variables estáticas o ambientales se deben realizar de forma continua y en intervalos de tiempo más grandes. El primer caso se refiere a un esquema de captura de datos de alta frecuencia y el segundo a un esquema de captura de datos de baja frecuencia.

La siguiente tabla (Tabla 1.1) lista las variables dinámicas y estáticas que se pueden considerar en proyectos de instrumentación y que corresponden a las consideradas en las metodologías incluidas en este manual. Como se verá más adelante, el sistema de instrumentación tiene características diferentes, en especial en lo que se refiere a la captura y almacenamiento de la información, para cada uno de los tres grupos de variables presentados en dicha tabla.

Tabla 1.1. Conjunto de variables dinámicas y estáticas a considerar en proyectos de instrumentación en pavimentos.

Variable	Naturaleza/tipo	Material o capa
Carga vehicular	Dinámica	Superficie del pavimento
Presión vertical		Parte superior de capas granulares sin estabilizar/subrasante
Presión de poros dinámica		Parte superior de capas granulares sin estabilizar/subrasante
Deformaciones a tensión		Base de las capas de material granular estabilizadas (mezcla asfáltica, granular cemento, losas de concreto)
Deflexiones		En diferentes capas (profundidades) de la estructura de pavimento
Acelerómetros		Superficie del pavimento
Cámara de video		Superficie del pavimento (tipología de vehículos)
Temperatura	Estáticas al interior del pavimento	En diferentes capas de la estructura de pavimento
Humedad		Capas granulares sin estabilizar/subrasante
Succión		Capas granulares sin estabilizar/subrasante
Nivel Freático	Estáticas al exterior del pavimento	Subrasante (fuera o dentro del tramo de pavimento)
Humedad Relativa del Aire		Externo al pavimento
Temperatura del Aire		Externo al pavimento
Radiación solar		Externo al pavimento
Precipitación		Externo al pavimento

Nota: las variables listadas en esta tabla constituyen el conjunto total de posibles variables a instrumentar en un pavimento. La selección particular de las variables a instrumentar (tipo de variable y número de puntos de medición de esa variable en el pavimento) depende las características específicas de cada proyecto, tales como tipo de pavimento, importancia de la vía, objetivo de la instrumentación, etc.

A continuación se presenta un esquema sugerido en donde se especifican las variables que pueden ser consideradas en un proyecto de pavimentación en función de la importancia o jerarquía de la vía.

Tabla 1.2. Esquemas sugeridos de calibración en función de la importancia y jerarquía de la vía

Esquemas de calibración en función del nivel de jerarquía de la vía				
MEDIDA DE LAS SOLICITACIONES AMBIENTALES				
<i>Sensor</i>	<i>Variable</i>	<i>Vía arterial</i>	<i>Vía Intermedia</i>	<i>Vía local</i>
Sensor de radiación solar	Radiación Solar	X		
Sensor de temperatura	Temperatura del ambiente	X		
Sensor de humedad relativa	Humedad Relativa	X		
Pluviómetro	Precipitación	X		
MEDIDA DE LAS SOLICITACIONES MECÁNICAS				
<i>Sensor</i>	<i>Variable</i>	<i>Vía arterial</i>	<i>Vía Intermedia</i>	<i>Vía local</i>
Acelerómetros	Número de Vehículos	X		
Placas instrumentadas de medida de carga	Carga	X		
Cámara de Video+Lente	Tipología de vehículos	X		
MEDIDA DE LAS VARIABLES AMBIENTALES				
<i>Sensor</i>	<i>Variable</i>	<i>Vía arterial</i>	<i>Vía Intermedia</i>	<i>Vía local</i>
Árbol de Termopares	Temperatura del pavimento	X	X	X
Termopares independientes	Temperatura del pavimento	X	X	X
Sensor de presión (nivel freático)	Nivel Freático	X	X	
Tensiómetros para medida de succión	Succión	X		
Sensores de humedad	Humedad	X	X	
MEDIDA DE LAS VARIABLES MECÁNICAS				
<i>Sensor</i>	<i>Variable</i>	<i>Vía arterial</i>	<i>Vía Intermedia</i>	<i>Vía local</i>
Deformímetros para concreto asfáltico	Deformaciones de tensión	X	X	
Deformímetros para concreto hidráulico	Deformaciones	X	X	
Deflectómetro dinámico multiprofundidad	Deflexiones	X		
Deflectómetro dinámico simple	Deflexiones	X		
Sensores de esfuerzo vertical	Esfuerzo Vertical	X	X	
Sensores de presión de poros dinámica, asfáltico	Presión de poros	X		

ETAPA 2

Selección de sensores y equipos de adquisición de datos

Una vez se han definido las variables a instrumentar, es necesario seleccionar los sensores o instrumentos a emplear. La selección del tipo de dispositivo para medir una variable específica depende de varios factores, tales como:

- Identificación de las condiciones a las cuales van a estar sometidos los sensores con base en su ubicación dentro del pavimento (en profundidad y en planta),
- confiabilidad y precisión de la lectura de los instrumentos,
- facilidad de la instalación de los sensores en campo,
- necesidades especiales de hardware relacionadas con el uso de dichos equipos,
- necesidades especiales de software para el manejo eficiente de la adquisición y almacenamiento de datos,
- necesidades especiales de dispositivos mecánicos especiales para el ensamble de los sensores antes de su instalación en campo,
- costos de los instrumentos,
- experiencia del equipo de trabajo en el manejo de sensores similares, y
- uso potencial de la información recolectada y planes para el manejo eficiente de dicha información.

Así mismo, es necesario seleccionar los equipos de adquisición de datos que se van a emplear en el proyecto. Estos se deben seleccionar con los mismos criterios antes mencionados y, además, en función de los requerimientos técnicos específicos de cada sensor.

La Tabla 2.1., en la siguiente hoja, resume las variables, sensores y equipos de adquisición de datos que fueron adquiridos para instrumentar los dos tramos de pavimento descritos con anterioridad. Por otra parte, la Tabla 2.2. muestra la relación entre cada una de las variables y los correspondientes equipos de adquisición de datos. Finalmente, el Anexo A.1 presenta los *data sheets* técnicos de todos los instrumentos y equipos listados en las tablas anteriores.

VER TABLA DE MATRIZ DE SENSORES EN LA CARPETA DE ANEXOS (Tabla 2.1)

Tabla 2.2. Relación entre los sensores y los equipos de adquisición de datos

Información del rango de medición de los sensores					Información del Sistema de Adquisición				
Sensor	Compañía	Referencia	Tipo	Rango	Equipo	Marca	Entrada	Salida Analógica	Salida digital
Sensor de radiación solar	Global Water	WE 500	Estático	0 - 1500 W m ⁻²	GL 500	Global water	0 - 10 V	4 - 20 mA	12 bits
Sensor de temperatura		WE 700	Estático	- 50 - 50 °C	GL 500		0 - 10 V	4 - 20 mA	12 bits
Sensor de humedad relativa		WE 600	Estático	0 - 100 %	GL 500		0 - 10 V	4 - 20 mA	12 bits
Pluviómetro		RJ 200	Estático	-	GL 500		0 - 10 V	4 - 20 mA	12 bits
Accelerómetros	RIEKER	BDE 3	Dinámico	± 3 G	NI 9205	National Instrument	0 - 10 V	0 - 10 V	16 bits
Placas instrumentadas de medida de carga	Omega Sealtec	Sstrain gage	Dinámico	0 - 7000 kg	NI 9237	National Instrument	0 - 10 V	mV proporcional	24 bits
Árbol de Termopares	Omega	WTJ-124	Estático	0 - 100 °C	Adam 4013	Advantech	-	mV proporcional	16 bits
Termopares independientes		WTJ-124	Estático	0 - 100 °C	Adam 4013		-	mV proporcional	16 bits
Sensor de presión inercial (fónico)	Global Water	WL 400 - 050	Estático	0 - 9 m	GL 500	National Instrument	0 - 10 V	4 - 20 mA	16 bits
Tensiómetros para medida de succión	Omega	Px 481 A - 015 V	Estático	-14.7 - 15 psi	NI 9205		0 - 10 V	0 - 5 V	16 bits
Sensores de humedad	Decagon	EC-5	Estático	0 - 100 % de VWC	NI 9205		0 - 10 V	0 - 5 V	16 bits
Deformímetros para concreto asfáltico	Omeg	S6TD-50 120-LY-40	Dinámico	-	NI 9237		0 - 10 V	mV proporcional	24 bits
Deformímetros para concreto hidráulico		S6TD-50 120-LY-40	Dinámico	-	NI 9237		0 - 10 V	mV proporcional	24 bits
Deflectómetro dinámico multiprofundidad	Wayson	LMI-12-F	Dinámico	0 - 100 mm	NI 9205		0 - 10 V	0 - 10 V	16 bits
Deflectómetro dinámico simple (pas rígido)		LMI-12-F	Dinámico	0 - 100 mm	NI 9205		0 - 10 V	0 - 10 V	16 bits
Sensores de esfuerzo vertical pas rígido	Omega	DLC 101 - 500	Dinámico	0 - 250 kg	NI 9234		4 mA	0 - 10 V	24 bits
Sensores de esfuerzo vertical pas flexible		DLC 101 - 500	Dinámico	0 - 250 kg	NI 9234		4 mA	0 - 10 V	24 bits
Sensores de presión de pesos dinámicos rígidos	Omega	PX 139	Dinámico	± 100 kPa	NI 9205		0 - 10 V	0 - 10 V	16 bits
Sensores de presión de pesos dinámicos asfálticos		PX 139	Dinámico	± 100 kPa	NI 9205		0 - 10 V	0 - 10 V	16 bits

 Contrato IDU - 118
Procedimiento para la instrumentación de Pavimentos

Los sistemas de adquisición de datos deben conectarse e instalarse de forma cuidadosa en una caseta metálica que se debe instalar en cercanías al tramo instrumentado. La Figura 2.1. muestra algunas fotografías de las casetas metálicas diseñadas para este fin. Adicionalmente, con el objetivo de proteger los equipos de actos vandálicos o de hurto, esta caseta fue ubicada dentro de una caja prefabricada de concreto (Figura 2.1). La caseta prefabricada de concreto es una de las varias posibilidades que existen para preservar y proteger estos equipos. El personal a cargo de cada proyecto debe seleccionar el esquema que mejor se ajuste a las exigencias y necesidades propias del lugar de instrumentación.



Figura 2.1. Caseta metálica que contiene los equipos de adquisición de datos y caja de concreto que contiene dicha caseta en campo.

Todos los cables de los sensores instalados en el tramo de pavimento llegan a la caseta metálica, en donde se realizará su debida conexión a los sistemas de adquisición de datos. El conjunto de Figuras 2.2 (A a D) presentan los planos de conexiones eléctricas que corresponden a la organización de los equipos de adquisición de datos al interior de la caseta para los dos tipos de pavimento.

VER FIGURAS 2.2 EN LA CARPETA DE ANEXOS / CONEXIONES ELÉCTRICAS

ETAPA 3

Software para la captura y almacenamiento de datos

La actividad de registro de los datos proporcionados por los diferentes sensores se puede realizar empleando diferentes lenguajes de programación. En el caso del contrato en cuestión, el software para la captura y almacenamiento de datos fue diseñado en lenguaje de programación LabView. La escogencia de LabView como herramienta de programación se debe a que éste es un lenguaje gráfico especialmente diseñado para el desarrollo de programas de control para el procesamiento de señales y adquisición de datos. A continuación se describen los detalles del software.

3.1. Objetivo del software

El software es el mecanismo que permite la comunicación entre los sensores y los equipos de adquisición de datos, descritos con anterioridad. Por lo tanto, el objetivo del software es el de configurar, almacenar, publicar y visualizar en el computador central los datos correspondientes a cada uno de los instrumentos instalados en campo.

3.2. Adquisición de datos en el computador central

El enlace de comunicación entre los equipos de adquisición de datos y el computador central se establece mediante el protocolo USB (Universal Serial Bus). En el caso específico de los equipos National Instrument, la función de interfase es asumida por el Chasis (cDAQ-9178), el cual, bajo este protocolo, transmite los datos por el puerto al computador. De la misma manera, en los equipos de Advantech la interfase de comunicación fue efectuada mediante el módulo ADAM 4561, el cual se encarga de tomar los datos suministrados por los módulos.

3.3. Velocidad de registro de datos

La velocidad de registro de los datos depende de la naturaleza de las variables que se van a medir. El registro de las condiciones ambientales internas en el pavimento (variables tipo

estáticas) se efectúa en periodos de muestreo de 1 min de forma constante durante todo el día. El registro de las variables climáticas externas o mediciones meteorológicas (variables tipo *estáticas*) se efectúa en periodos de muestreo de 30 min de forma constante durante todo el día. Existen en general dos posibilidades de realizar el registro de las variables *dinámicas* que se relacionan con el desempeño mecánico del pavimento (e.g., cargas, deflexiones, deformaciones, video, etc.). La primera consiste en registrar valores únicamente cuando se detecte el paso de un vehículo en la superficie del pavimento. En este caso se define un periodo de muestreo, por ejemplo de 0.01s, y una ventana de tiempo para la toma de las mediciones (por ejemplo 20 s). La segunda forma consiste en realizar medidas secuenciales en periodos definidos de tiempo. En este caso se define que se tomarán un determinado número de mediciones por segundo, durante un valor fijo de minutos, cada cierto periodo de tiempo. En el caso de los tramos instrumentados, y debido a las condiciones particulares de servicio de la vía, se tomó la decisión de realizar mediciones secuenciales de 200 datos por segundo durante 1 minuto cada 10 minutos. Cada registro es almacenado en forma independiente en el computador central.

Nota: en cada proyecto de instrumentación se debe evaluar el método más apropiado para la toma de lecturas, siendo recomendable intentar emplear para las mediciones de las variables dinámicas un esquema de captura mediante un disparo confiable que indique el acercamiento inminente de un vehículo. Este tipo de esquema optimiza el empleo de la capacidad de memoria del computador central.

3.4. Requerimientos de hardware

El programa fue diseñado para trabajar en el sistema operativo Windows XP. Los requerimientos mínimos de hardware requeridos por el equipo son de 1 Gb de memoria RAM, 200 Gb en disco duro y un procesador de 1 GHz de velocidad.

3.5. Características generales del programa

Al iniciar la aplicación, el software configura los equipos e inicia la adquisición de los datos. Los datos se pueden visualizar directamente en la pantalla mientras que son almacenados (Figura 3.1).

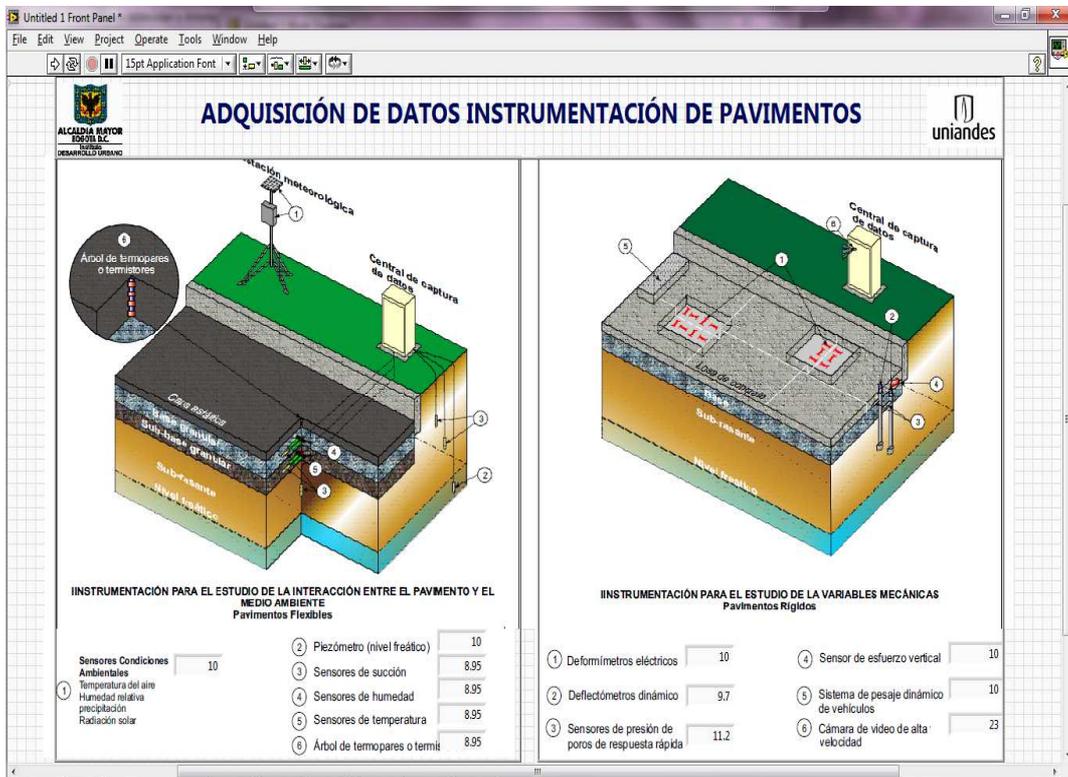


Figura 3.1 Pantalla del software de adquisición de datos

A continuación se presenta una vista previa del código fuente del programa desarrollado en LabView (Figura 3.2), el cual maneja 2 lazos independientes para la captura de variables dinámicas y estáticas.

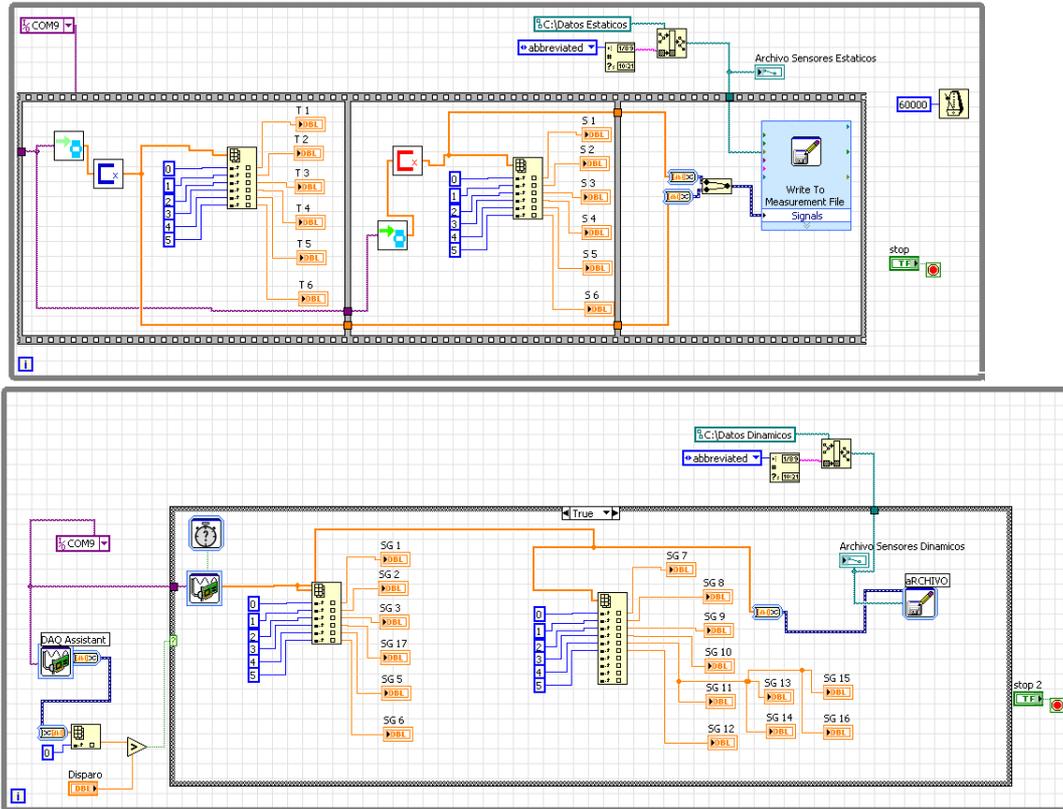


Figura 3.2. Pantalla del código del software de adquisición de datos

Internamente, el programa realiza las siguientes actividades en el siguiente orden:

1. Establece la comunicación entre el computador central y los equipos de adquisición de datos.
2. Configura la sensibilidad de cada uno de los canales de los módulos de adquisición de datos.

3. Asigna y aplica las constantes de calibración a cada una de las señales proporcionadas por los instrumentos de medida. Estas constantes se obtienen con base en los procedimientos de calibración o verificación descritos más adelante.
4. Sincroniza las lecturas de los instrumentos con respecto a su naturaleza dinámica o estática.
5. Genera automáticamente los archivos de texto donde se almacena la información que arrojan los instrumentos de medida.

El usuario no es testigo de las actividades descritas anteriormente ya que éstas ocurren al interior del programa. El programa está diseñado para permitir al usuario realizar las siguientes actividades:

1. Correr el ejecutable que inicializa el programa.
2. Descargar la información que es almacenada en una carpeta del explorador.
3. Cambiar las condiciones para la toma de datos o muestreo de las variables dinámicas.
4. Variar la ventana de tiempo en el que se realiza la captura y almacenamiento de las variables dinámicas.

Es importante mencionar, sin embargo, que el personal encargado de recolectar y procesar la información no necesita, en principio, acceder al software para realizar dichas actividades.

3.6. Archivos de salida

Las medidas realizadas en los tramos de instrumentación son almacenadas en 4 archivos diferentes. La información contenida en estos archivos es la siguiente:

1. Archivo con información de las variables meteorológicas.

2. Archivo con información de las variables medidas al interior del pavimento caracterizadas por una baja frecuencia de adquisición de datos (variables estáticas ambientales al interior del pavimento).
3. Archivo con información de las variables dinámicas o variables de alta frecuencia de adquisición de datos (i.e., variables relacionadas con la respuesta mecánica de la estructura).
4. Archivo con la información del video o de toma de fotos secuenciales.

Los archivos mencionados en los puntos 1, 2 y 3 tienen un formato de texto plano separado por espacios o tabuladores, de acuerdo con las necesidades expresadas por el IDU para este fin. En la primera columna de dichos archivos se encuentra el tiempo de la medida y en las columnas siguientes el valor correspondiente a cada una de las variables. Los archivos son almacenados en el directorio: “C:\Datos Instrumentación”. Cada uno de estos archivos corresponde a un día de medición. El nombre del archivo tiene información para identificar el día correspondiente, como se describe a continuación.

Los archivos de las variables ambientales que se miden al interior del pavimento se generan diariamente y el nombre del archivo incluye la fecha (en formato *día-mes-año*), la letra “E”—que se refiere al hecho de que son variables estáticas—seguida del número “1” (por ejemplo 29-04-11E-1.txt). Los archivos de video se registran mediante el mismo formato pero con la letra “V”. Los archivos de las variables dinámicas (instrumentos de medición de desempeño mecánico) se generan durante 1 minuto cada 10 minutos y su título es la forma: “29-04-11D-*x*” en donde *x* es el número de toma de muestra de ese día (1, 2, 3... indicando archivos tomados cada 10 minutos empezando a las 12:00 am del día correspondiente). Si el usuario lo desea, puede además acceder al software de captura, manejo y almacenamiento de datos para observar la información allí almacenada. Sin embargo, en las actividades de recuperación de

datos que se realizan de forma rutinaria no se recomienda acceder a este software, a menos de que el análisis de la información requiera algún tipo de verificación.

3.7. Guía general del uso del software

El software es altamente autónomo y no necesita una configuración o manipulación compleja por parte del usuario. Al dar inicio al ejecutable, el software automáticamente establece la comunicación con los equipos de adquisición de datos, configura los rangos de lectura de cada uno de los canales, da inicio a la adquisición de los datos y transforma la información recibida. Esta última transformación se realiza por medio de los sensores para convertir los datos de voltios, reportados por cada sensor, a las unidades correspondientes por medio de las constantes de calibración. Esta información se muestra en las casillas que se encuentran en el panel frontal y son almacenadas en el archivo correspondiente.

ETAPA 4

Pre-verificación de los sensores, diseño de dispositivos mecánicos especiales, verificación de sensores, pre-validación de las metodologías de instrumentación en laboratorio e instalación de los sensores en campo

A continuación se resumen las actividades de pre-verificación, verificación, diseño y construcción de dispositivos mecánicos especiales, pre-validación de los sistemas de instrumentación en laboratorio e instalación de los sensores en campo.

Con el objetivo de facilitar la consulta de esta información, se realizaron formatos por tipo de sensor en los cuales se resumen sus especificaciones técnicas, el procedimiento de pre-verificación, los dispositivos mecánicos especiales que requiere el sensor y la metodología empleada para su instalación en campo. Estos formatos se encuentran al final de esta sección. Adicionalmente, en el Anexo A.2. se presentan esquemas ilustrativos de los procedimientos de instalación para cada tipo de pavimento.

A continuación se describe con brevedad las características de cada una de las actividades mencionadas.

4.1. Pre-verificación de los sensores en laboratorio

Una vez adquiridos los sensores, es fundamental verificar que éstos no vengan defectuosos de fábrica. Esta etapa, denominada pre-verificación, consiste en someter a los sensores a las condiciones para las cuales fueron diseñados con el fin de verificar si éstos reportan apropiadamente las lecturas correspondientes a dichas condiciones. Es importante resaltar que las actividades acá descritas constituyen una etapa previa a la de calibración o verificación final de los sensores. En esta etapa es necesario revisar la información que proveen los fabricantes de los sensores, ya que algunos especifican las actividades que se deben seguir para la pre-verificación y/o calibración de los equipos. Además, algunos sensores vienen calibrados de fábrica, por lo que no necesitan actividades especiales después de validar su debido funcionamiento.

4.2. Diseño e implementación de los dispositivos mecánicos complementarios

Debido a las características específicas para las cuales se van a emplear los instrumentos adquiridos, es necesario diseñar y construir algunos dispositivos mecánicos a los cuales se deben adherir los sensores antes de su calibración e instalación en campo. Las siguientes son algunas de las razones por las cuales dichos dispositivos son fundamentales para garantizar el éxito del sistema de instrumentación:

- Los sensores son expuestos a condiciones extremas durante los procesos de instalación en campo. Dichos procesos imponen condiciones funcionales severas que pueden atentar contra la integridad de los sensores. Por esta razón, algunos sensores requieren cierto tipo de protección antes de su instalación.
- La ubicación y disposición final de los sensores es fundamental para garantizar la calidad de los datos capturados y almacenados. Los dispositivos mecánicos contribuyen a que la posición final de los sensores dentro de la estructura del pavimento sea la apropiada.
- Los sensores son expuestos a condiciones climáticas dentro del pavimento que pueden atentar contra su durabilidad. Por esta razón, y con el objetivo de preservar la integridad de los instrumentos, algunos de éstos requieren estar en condiciones especiales (e.g., impermeabilización) antes de su instalación en campo.
- Finalmente, algunos sensores requieren condiciones especiales para su buen funcionamiento (e.g., tener una fuente permanente de humedad, etc.), para lo cual requieren la adaptación de dispositivos particulares.

Los sensores que requirieron dispositivos especiales fueron: 1) Celdas de presión de carga, 2) tensiómetros, 3) balanzas de carga o WIM, 4) sensores de presión de poros dinámico, 5) deflectómetros y 6) acelerómetros. Las siguientes figuras muestran el ensamble final de estos sensores:



Figura 4.1. Dispositivos mecánicos para los Tensiómetros

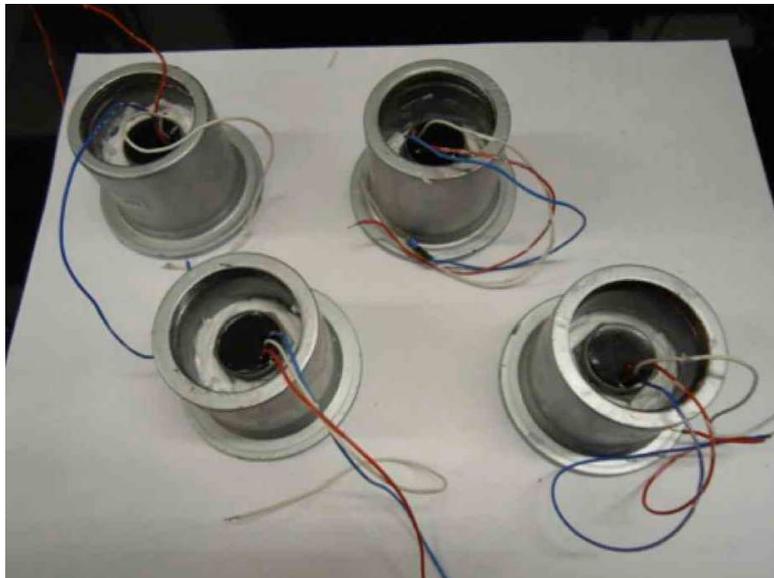


Figura 4.2. Dispositivos mecánicos para los Acelerómetros



Figura 4.3. Caja Metálica para la Placa Instrumentada de Medida de Carga



Figura 4.4. Sistema de Montaje para los deflectómetros



Figura 4.5. Sistema de Protección para el Sensor de Celda o Esfuerzo Vertical



Figura 4.6. Dispositivo mecánico funcional para el Sensor de Presión de Poros Dinámica

4.3. Verificación (calibración) de los sensores

Una vez culminada la etapa de pre-verificación, y después de que los sensores han sido ensamblados dentro de los dispositivos mecánicos especiales, es necesario proceder a las actividades de calibración. Para cada uno de los sensores estas actividades incluyen las siguientes actividades:

1. Conexión de los sensores a los equipos de adquisición de datos.
2. Imposición de condiciones sobre el sensor que simulen condiciones similares a las de servicio que se esperan capturar y reportar.
3. Captura de los datos reportados por el sensor en la segunda actividad.
4. Comparación de dichos datos con información confiable que permita la determinación de constantes de calibración. Estas constantes permiten traducir las lecturas realizadas por los sensores en valores que correspondan a las unidades apropiadas de la variables que el sensor se encuentra midiendo (i.e., presión de carga, succión, temperatura, deflexiones, deformaciones, etc.). Esta etapa incluye, en la mayoría de ocasiones, montajes experimentales especiales y específicos para cada tipo de sensor. Estos montajes fueron diseñados e implementados siguiendo las recomendaciones de los equipos, en aquellos casos en que se especificaban dichos procedimientos de fábrica, y/o empleando la experiencia con el manejo de estos sensores del equipo de trabajo.

Las constantes finales de calibración, sin embargo, sólo pueden ser obtenidas una vez se realicen las actividades de puesta en operación de los sistemas. Esto se debe a que las condiciones propias del lugar donde se ubica el proyecto pueden generar alteraciones y condiciones diferentes a las de laboratorio, lo cual hace necesario un ajuste en dichos valores. Las Tablas 4.1. y 4.2 presenta las constantes finales de calibración para los sensores de los dos tipos de pavimento.

Tabla 4.1. Constantes de calibración de los sensores del tramo instrumentado de pavimento flexible

Constantes Instrumentación Pavimento Flexible			
Elemento	Constante	Unidades	Offset
Wia 1	-10593725,7	Newton Voltio	-1421370811
Wia 2	-794829387,8	Newton Voltio	36295882100
Deformímetro 1	1	Deformación Unitaria	0,004,72
Deformímetro 2	1	Deformación Unitaria	-0,045665
Deformímetro 3	1	Deformación Unitaria	-0,045793
Deformímetro 4	1	Deformación Unitaria	-0,0457
Deformímetro 5	1	Deformación Unitaria	0,003247
Deformímetro 6	1	Deformación Unitaria	0,00623
Deformímetro 7	1	Deformación Unitaria	0,004569
Deformímetro 8	1	Deformación Unitaria	-0,045685
Deformímetro 9	1	Deformación Unitaria	-0,045677
Deformímetro 10	1	Deformación Unitaria	0,003241
Deformímetro 11	1	Deformación Unitaria	0,007783
Deformímetro 12	1	Deformación Unitaria	-0,045616
Deflectómetro 1	-20,447	milímetro Voltio	52,830233
Deflectómetro 2	-20,392	milímetro Voltio	73,729607
Deflectómetro 3	-20,141	milímetro Voltio	65,757,28
Deflectómetro 4	-20,128	milímetro Voltio	77,3996
Deflectómetro 5	-20,50	milímetro Voltio	58,769,98
Presión de pisos 1	516,78	kPa Voltio	58,887988
Celda piezoelectrónica 1	13,634603	Newton Voltio	0,034603
Celda piezoelectrónica 2	13,6248503	Newton Voltio	15,07302
Acelerómetro 1	5,68,8	Gravedad Voltio	-1,080231
Acelerómetro 2	5,68,8	Gravedad Voltio	0,003253
Temperatura 1	1	Celsius Voltio	0
Temperatura 2	1	Celsius Voltio	0
Temperatura 3	1	Celsius Voltio	0
Temperatura 4	1	Celsius Voltio	0
Temperatura 5	1	Celsius Voltio	0
Arbol de Termocuplas 1	1	Celsius Voltio	0
Arbol de Termocuplas 2	1	Celsius Voltio	0
Tensiómetro 1	52,38,	kPa Voltio	-156,94
Tensiómetro 2	52,088	kPa Voltio	-156,15
Tensiómetro 3	52,567	kPa Voltio	-157,58
Tensiómetro 4	52,086	kPa Voltio	-155,88
Tensiómetro 5	52,250	kPa Voltio	-156,38
Humedad 1	101,63	% H Voltio	-35,125
Humedad 2	77,0,6	% H Voltio	-26,324

Tabla 4.2. Constantes de calibración de los sensores del tramo instrumentado de pavimento rígido

Constantes Instrumentación Pavimento Rígido			
Elemento	Constante	Unidades	Offset
Wia_1	-1093278204	Newton Voltio	-4.621304
Wia_2	--	Newton Voltio	--
Defleómetro 1	1	Deflexión Milímetro	-1.981509
Defleómetro 2	1	Deflexión Milímetro	0.000997
Defleómetro 3	1	Deflexión Milímetro	0.002818
Defleómetro 4	1	Deflexión Milímetro	0.004021
Defleómetro 5	1	Deflexión Milímetro	0.001684
Defleómetro 6	1	Deflexión Milímetro	0.003365
Defleómetro 7	1	Deflexión Milímetro	0.004506
Defleómetro 8	1	Deflexión Milímetro	0.002567
Defleómetro 9	1	Deflexión Milímetro	0.003504
Defleómetro 10	1	Deflexión Milímetro	0.004148
Defleómetro 11	1	Deflexión Milímetro	0.004229
Defleómetro 12	1	Deflexión Milímetro	0.003209
Defleómetro 13	1	Deflexión Milímetro	0.003085
Defleómetro 14	1	Deflexión Milímetro	0.003017
Defleómetro 1	-20	milímetro Voltio	0.014524
Defleómetro 2	-20	milímetro Voltio	-0.004868
Presión de poros_1	517	kPa Voltio	2.367907
Presión de poros_2	517	kPa Voltio	2.367907
Celda piezoelectrica	13	Newton Voltio	-11.492697
Acelerómetro 1	5	Gravedad Voltio	12.650053
Acelerómetro 2	5	Gravedad Voltio	11.372448
Temperatura 1	1	Celsius Voltio	0
Arbol de termocuplas 1	1	Celsius Voltio	0
Arbol de termocuplas 2	1	Celsius Voltio	0
Arbol de termocuplas 3	1	Celsius Voltio	0
Arbol de termocuplas 4	1	Celsius Voltio	0
Humedad_1	10%	% H Voltio	-35.025
Tensiómetro 1	52	kPa Voltio	-157.03
Tensiómetro 2	52	kPa Voltio	-156.5
Tensiómetro 3	52	kPa Voltio	-155.97

Nota: estas constantes sólo pueden ser usadas en estos dos tramos; todo proyecto de instrumentación es único y los sensores allí instalados requieren la determinación de sus propias constantes de calibración.

El valor del *offset* presentado en la última columna de las Tablas 4.1 y 4.2 corresponde al corrimiento eléctrico de la salida de voltaje de sensor. De esta forma, la medida final del sensor en unidades apropiadas resulta de multiplicar la medición del sensor por la constante de calibración y de restar el valor del *offset* a dicha cantidad.

4.4. Pre-validación de las metodologías de instrumentación en laboratorio

Con el fin de aumentar la probabilidad de éxito del funcionamiento de los sensores en campo, es importante realizar en laboratorio un montaje preliminar del sistema integral de instrumentación. Este montaje consiste en conectar todos los sensores al cableado que se va a instalar en campo, conectar el cableado a los sistemas de adquisición de datos, impartir sobre los sensores (uno a uno) condiciones para promover su funcionamiento (i.e., promover que los sensores capturen datos) y emplear los sistemas de adquisición de datos mediante el software diseñado para este fin, con el objetivo de verificar su buen funcionamiento.

Esta etapa se considera muy importante dentro de la metodología de implementación del sistema de instrumentación ya que permite:

- Identificar condiciones especiales que se requieren para el buen funcionamiento de algunos sensores durante su vida útil en campo,
- Re-estructurar algunas de las actividades planeadas para la instalación de los sensores en campo,
- Verificar el buen funcionamiento de los sistemas de adquisición de datos, y

- Verificar el buen funcionamiento del software diseñado para la adquisición y almacenamiento de datos. En esta etapa se pueden identificar dificultades o debilidades que requieren ser mejoradas y/o modificadas con el fin de garantizar la calidad y confiabilidad general del software.

4.5. Instalación de los sensores en campo

La etapa de instalación de los sensores en campo constituye la más delicada dentro de todo el proceso de instrumentación. Esto se debe a que existen factores adversos e imprevistos durante la construcción del pavimento y la instalación de los sensores que pueden afectar la integridad de los instrumentos.

Los procedimientos para la instalación en campo propuestos en este documento se establecieron con base en la información bibliográfica internacional disponible y en las características constructivas de cada tipo de pavimento. En general, la instalación de los sensores requirió la consideración de cuatro aspectos fundamentales:

1. Los sensores deben quedar instalados en las capas correspondientes bajo condiciones que garanticen la calidad de las mediciones de las variables pertinentes. Este aspecto se refiere, por ejemplo, a la necesidad de garantizar la ubicación horizontal de los deformímetros destinados a medir las deformaciones a tensión en la parte inferior de las capas asfálticas, etc.
2. La instalación de los sensores aumenta el tiempo total de construcción de un tramo de pavimento. Por esta razón, es esencial la comprensión y colaboración de los contratistas encargados de la construcción de los tramos en servicio a instrumentar.
3. El procedimiento de instalación debe propender por proteger la integridad de los sensores. Por este motivo, es necesario evaluar las mejores estrategias para la instalación de cada sensor. Esto significa, por ejemplo, que algunos sensores deben ser instalados

después de la extensión y compactación de una capa mediante el uso de apiques o excavaciones, en lugar de pre-instalarlos antes de la extensión de dicha capa.

4. El cableado de los sensores requiere un manejo cuidadoso y especial. Con el objetivo de garantizar su durabilidad, los cables deben ser protegidos de los efectos nocivos del entorno y de las exigencias constructivas. Este es un aspecto importante ya el deterioro o daño del cableado puede causar la pérdida en la captura y adquisición de datos.

A continuación se presentan los planos finales de la instrumentación en los dos tramos considerados, así como todos los formatos de caracterización de los sensores.

**PLANOS DE INSTRUMENTACIÓN DEL TRAMO DE PAVIMENTO
FLEXIBLE**

VER CARPETA DE ANEXOS / PLANOS CALLE 80

**PLANOS DE INSTRUMENTACIÓN DEL TRAMO DE
PAVIMENTO RIGIDO**

VER CARPETA DE ANEXOS / PLANOS AUTONORTE

**FORMATOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES EMPLADOS
(PRE-VERIFICACIÓN, VERIFICACIÓN E INSTALACIÓN)**

VER CARPETA DE ANEXOS

ETAPA 5

Puesta en operación de los sistemas y mantenimiento

5.1. Conexión de los sensores a la caseta de instrumentación y suministro de energía

Una vez los sensores han sido instalados en campo, es necesario realizar la conexión del cableado de cada uno de los sensores a su respectivo punto de entrada de los sistemas de adquisición de datos. A continuación, y después de realizar las labores pertinentes para garantizar la alimentación continua de energía eléctrica de 110 V en la caseta de instrumentación—actividad que es particular de cada proyecto—se puede proceder a realizar las actividades de *puesta en operación* y de *calibración final* de los sistemas de instrumentación propuestos. La Figura 5.1 muestra algunas fotografías de la instalación de los sensores a la caseta de instrumentación y la Figura 5.2 muestra etapas del proceso de adaptación del punto de energía para el suministro de corriente eléctrica desde las estaciones de Transmilenio hasta las casetas de instrumentación.

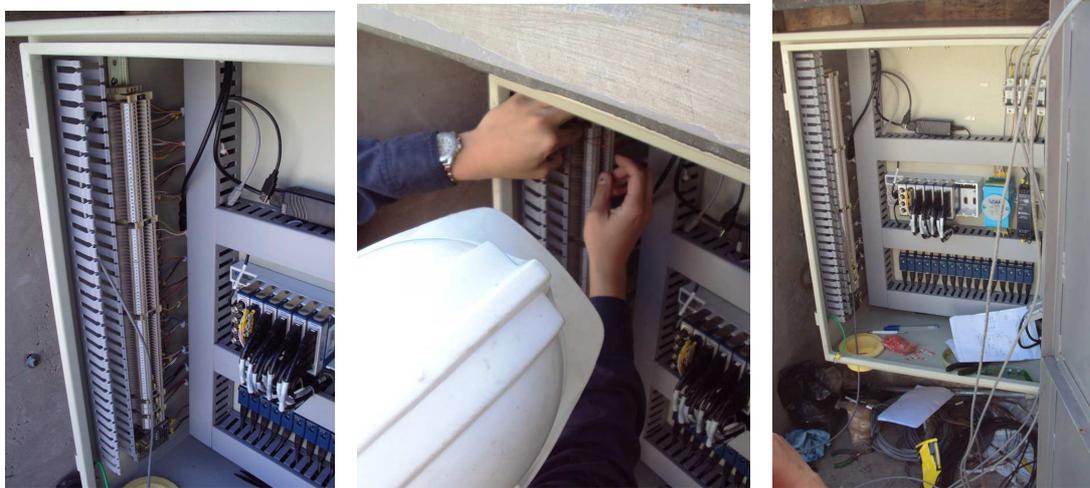


Figura 5.1. Proceso de conexión del cableado de los sensores en la caseta de instrumentación



Figura 5.2. Ejemplo del proceso de adaptación para suministro de energía a la caseta de instrumentación

Las actividades para la configuración final de los sistemas de instrumentación consisten en verificar el funcionamiento individual de cada uno de los sensores (i.e., verificar que se están recibiendo datos, es decir, que los sensores funcionan), revisar la calidad de las mediciones realizadas por cada uno de los sensores, validar—y en caso necesario modificar—las constantes de calibración de cada uno de los equipos, y revisar que el software esté capturando y almacenando las medición de manera oportuna, de acuerdo con las especificaciones técnicas planteadas con anterioridad.

El resultado de esta etapa final permite realizar una evaluación de la efectividad de la instrumentación, así como identificar aspectos que pueden ser mejorados en futuras experiencias de esta naturaleza. En la actualidad, los dos tramos instrumentados como parte del contrato 118 de 2009 donde se validaron estas metodologías, se encuentran funcionando apropiadamente. La Figura 5.3. ilustra la condición final de uno de los tramos una vez culminado el proceso de

instalación y puesta a punto. En esta imagen se puede observar un bus del sistema Transmilenio circulando sobre el tramo y listo para pasar sobre las placas de medición de carga dinámica.



Figura 5.3. Tramo de pavimento rígido instrumentado en operación: se observan las placas de pesaje dinámico de vehículos (WIM)

5.2. Ejemplo de los mediciones realizadas mediante el sistema de instrumentación

En las siguientes páginas se ejemplifican algunas de las mediciones obtenidas con los diferentes sensores y recuperadas directamente de las casetas metálicas instaladas en los dos tramos instrumentados. Algunas de estas figuras se obtienen luego de post-procesar la información mediante filtros tipo pasa-banda, a través de los cuales se filtra el ruido y otros factores que perturban la medición real de la variable de interés. El tipo de filtro (orden del filtro) específico dependen del tipo de sensor y deben ser seleccionados con base en la experiencia del analista. La numeración de los sensores (código) corresponden a aquellos reportados en los planos finales de instrumentación que se encuentran en la sección anterior de este documento.

Nota: es importante señalar que el proceso de procesamiento y análisis de la información debe ser realizado por profesionales expertos en temas de procesamiento y análisis de señales.

**EJEMPLOS DE LECTURAS REPORTADAS POR LOS SENSORES EN EL
TRAMO DE PAVIMENTO FLEXIBLE**

VER ANEXOS

**EJEMPLOS DE LECTURAS REPORTADAS POR LOS SENSORES EN EL
TRAMO DE PAVIMENTO FLEXIBLE**

VER ANEXOS

5.3. Aspectos relacionados con la operación y mantenimiento de los sistemas

Los proyectos de instrumentación tienen, en general, vidas de servicio relativamente cortas. Esto se debe a que la vida útil promedio de los sistemas empleados en estos proyectos (sensor, cables, etc.) es baja y a que la gran mayoría de éstos, por estar embebidos en el pavimento, no pueden ser reemplazados o reparados. Con los sistemas de adquisición de datos ocurre algo similar, puesto que cuando uno de estos equipos falla es recomendable realizar el reemplazo del equipo.

Estas condiciones sugieren que las labores de operación y mantenimiento van dirigidas más a: 1) realizar actividades de recolección regular de la información capturada y almacenada en el computador central, 2) revisar la calidad de la captura de datos, 3) asegurar que el computador se encuentra en condiciones apropiadas (mantenimiento rutinario de un computador estándar), y 4) ejecutar algunas labores de contingencia para aquellos sensores que sufran fallas y que puedan ser diagnosticados o evaluados.

En términos generales, se recomienda llevar un sistema ordenado de registro de las eventualidades que se reporten en los sistemas de instrumentación, la mayoría de las cuales son descritas a continuación. En dicho registro se deben incluir todas y cada una de las situaciones que pueden tener un impacto negativo en la integridad general de los sistemas. El personal a cargo de mantener y administrar los tramos instrumentados debe también incluir aquellas situaciones que considere relevantes para garantizar el buen funcionamiento del sistema, aun cuando no se encuentren descritas en esta sección. Posterior a su registro, cada eventualidad requiere un proceso de diagnóstico y evaluación, de acuerdo con las indicaciones descritas en este documento. Dichos procesos deben concluir en la identificación de las medidas pertinentes que se deben adoptar para, en lo posible, subsanar la situación. Posteriormente, es necesario registrar los resultado de la implementación de las medidas realizadas, incluyendo aquellas

observaciones adicionales que el personal a cargo considere oportunas e importantes para enfrentar eventos futuros de la misma naturaleza.

A continuación se describen los esquemas de operación y mantenimiento recomendados. Esta información es válida para los dos sistemas de instrumentación.

- *Recuperación de la información:* las actividades de recuperación de la información se deben realizar con una frecuencia de 15 días. Para esto, la persona encargada se debe dirigir a los tramos instrumentados, acceder a la caja metálica en donde se encuentra el computador central y proceder a descargar la información en un dispositivo de almacenamiento de información. En todos los casos, la recuperación de la información se realiza accediendo mediante el explorador del sistema operativo a las carpetas donde se encuentran los archivos de texto generados por el software, los cuales están ubicadas en el directorio: “C:\Datos Instrumentación”, tal como se describió en la “Etapa 3” de este manual. Una vez la información ha sido descargada, es necesario borrar y eliminar dicha información del disco duro del computador central. Al finalizar la descarga de la información, la persona encargada debe dejar el lugar en condiciones apropiadas; en especial, debe verificar que la caja metálica y la caseta de concreto queden debidamente aseguradas.

La información de los instrumentos meteorológicos y de nivel freático se debe realizar en los puntos en donde se haya realizado la ubicación del sistema de adquisición de datos y de acceso de la información. En el caso de los tramos instrumentados, estos puntos se encuentran al interior de las respectivas estaciones de Transmilenio (estación Escuela Militar en la Calle 80 y estación Alcalá en la Autopista Norte). En la estación de la Escuela Militar (Calle 80), existe un dispositivo USB externo a la caseta eléctrica ubicada al interior de la estación desde donde se puede acceder a dicha información. En la estación de Alcalá (Autopista Norte) se diseñó una caja metálica cerca al punto de toma de corriente desde donde se realiza el suministro de energía a la caseta de

instrumentación. En ese lugar se instaló el equipo de adquisición de datos para las variables mencionadas. La persona encargada debe acceder a la caja y extraer la información a través de la conexión USB allí disponible. Para acceder a la información de las variables meteorológicas, la persona debe contar con un computador portátil con entradas USB. Se recomienda llevar un registro cuidadoso de las visitas realizadas a las estaciones de instrumentación (día, hora y responsable).

- *Revisión del suministro de energía:* en cada visita que se realice a los tramos de interés es necesario verificar el suministro de energía dentro de las casetas de instrumentación. Se debe realizar un reporte de pérdida de energía al interior de la caseta cuando se observe que los indicadores luminosos de todos los equipos de adquisición de datos y de las fuentes de voltaje se encuentran apagados. Alternativamente, se puede determinar la ausencia de energía mediante la medición del voltaje en los *breakers* o protecciones eléctricas (tacos) que están ubicados dentro de la caja metálica. Cuando se realice un reporte de esta naturaleza, se deben revisar las condiciones en el punto de conexión al sistema eléctrico dentro las respectivas estaciones de buses y se deben realizar las actividades necesarias para recuperar, en el menor tiempo posible, el suministro de energía.
- *Actividades rutinarias para la preservación de los sistemas de adquisición de datos y cableado visible:* la persona encargada de realizar la captura de la información debe realizar en sus visitas una evaluación visual de las condiciones generales al interior de la caseta de instrumentación. En dicha evaluación se debe observar la calidad e integridad general del sistema de cableado que se encuentra a la vista, se debe verificar que la conexión de los cables a las bornas laterales de las cajas metálicas se encuentran en orden y se debe revisar que no exista presencia de agua o de otros agentes adversos al interior de la caseta. En el caso en el que alguno de estos eventos se presente, por ejemplo, cuando en la visita se detecta la desconexión de un cable de la borna, se

observa desgaste severo en los cables o se detecta la presencia de agua en la caseta metálica por infiltraciones de cualquier naturaleza, es necesario proceder a realizar un reporte detallado que permita evaluar la situación y, posteriormente, a tomar las medidas que se consideren apropiadas. Estas medidas deben contar con la aprobación previa de las personas encargadas de la administración de los sistemas de instrumentación.

- *Acciones a seguir cuando se reporten dificultades en las lecturas de los instrumentos:* en el caso en el que durante las actividades de recuperación de las mediciones o durante su análisis posterior se detecte que un sensor no está reportando lecturas o que las lecturas se encuentran fuera del rango normal, se deben realizar las siguientes verificaciones:
 1. Identificar el sensor que está produciendo lecturas erradas.
 2. Identificar dicho sensor en la bornera que se encuentran en el costado izquierdo de la caja metálica (códigos X1, X2, X3) y verificar su debida conexión.
 3. Cuando la situación es normal y el cable se encuentra debidamente conectado pero hay ausencia de lecturas, es necesario determinar si el daño proviene del sistema sensor-cableado o del sistema de adquisición de datos. En la mayoría de ocasiones es poco probable que la falla se deba a los sistemas de adquisición de datos, debido a que estos equipos son de alta confiabilidad. Para constatar si el daño proviene de estos sistemas se puede intercambiar el cable del sensor con el cable de un sensor afín y verificar si se detecta conexión y reporte de lecturas.
 4. Cuando del diagnóstico del problema se concluya que las dificultades provienen del equipo de adquisición de datos, es necesario referirse a los manuales del fabricante—disponibles en línea en las respectivas páginas de las compañías productoras—con el objetivo de realizar las actividades de chequeo y verificación allí especificadas. Para esto, es probable que se requiera desmontar el equipo por completo y trasladarlo al laboratorio para su inspección. Si las labores de

inspección básicas especificadas por el fabricante no permiten solucionar los problemas reportados, se recomienda reportar la situación como “pérdida del instrumento”. En tal caso, los responsables de la administración del sistema de instrumentación deberán evaluar la pertinencia técnica y financiera de adquirir nuevos equipos de adquisición de datos. En la situación en la cual se decida adquirir nuevos equipos, se debe proceder a su nueva instalación siguiendo los protocolos estipulados en el “Manual de Instrumentación de Pavimentos”.

5. En el caso en el que la causa del evento provenga de defectos en el sistema instrumento-cableado, con algunas pocas excepciones especificadas en esta sección (referirse a la actividad *diagnóstico de sensores especiales*), se debe reportar la pérdida del sensor. En este caso **no** se recomienda realizar actividades para intentar la recuperación y reemplazo de los sensores. Esto se debe a que dichas actividades requieren acceder a los instrumentos de forma destructiva, creando alteraciones no deseables en la homogeneidad de la estructura de pavimento y poniendo en riesgo la integridad de otros instrumentos. El registro de pérdida de los sensores debe incluir la fecha en la que ocurrió el evento.
- *Diagnóstico de sensores especiales*: existen una serie de sensores que, en caso de presentar dificultades, pueden ser verificados sin necesidad de acceder destructivamente al pavimento. Estos instrumentos incluyen los equipos para medición de las condiciones meteorológicas (equipos marca Global que incluyen los instrumentos para la medición de la radiación solar, humedad relativa, precipitación y temperatura del aire), las cajas o balanzas para la medición de carga dinámica en superficie (WIM), y los deflectómetros que miden el desplazamiento relativo de cada capa. A continuación se describe las actividades de diagnóstico que se pueden realizar para cada uno de ellos en el caso en el que se detecten mediciones inapropiadas:

1. Instrumentos de medidas meteorológicas: en este caso es necesario revisar la información específica de los manuales de fabricante. De acuerdo con las instrucciones especificadas en dichos manuales, es probable que sea necesario desmontar los instrumentos para su evaluación.
2. Placas de pesaje dinámico de vehículos (WIM): existen dos posibles problemas que este instrumento podría presentar: 1) que no se detecte conectividad o continuidad del sensor, o 2) que no haya registro de datos. Cuando la resistencia reportada por el instrumento no es de 120 Ohmios (la cual corresponde a la resistencia de los deformímetros o *strain gauges* que se encuentran al interior del equipo) se puede concluir que existen dificultades en la conectividad. En este caso es probable que haya una interrupción en el cableado. Por lo tanto, es necesario destapar las cajas, revisar el cableado y, en caso de que esta sea la causa, reemplazar de nuevo los cables. Cuando no hay reporte de datos, se debe verificar si existe señal del instrumento ante el paso de los vehículos. Una vez se verifique la ausencia de señal, se debe destapar las cajas y revisar que los deformímetros se encuentren debidamente pegados a las vigas y en buen estado. En caso de que esos instrumentos estén despegados, deteriorados por corrosión o por otras causas, es necesario proceder a su reemplazo y posterior reconexión al sistema de cableado.
3. Deflectómetros: aunque es poco probable, estos instrumentos pueden presentar condiciones de *saturación*. Esta situación ocurre cuando se reportan valores de lectura superiores a +/- 50 mm, indicando que el desplazamiento del imán del instrumento alcanzó la máxima distancia permitida. Debido a que la parte superior de los dispositivos mecánicos de estos sensores se encuentran en superficie, es posible acceder sin mayor dificultad a ellos. Para esto, se debe realizar el siguiente procedimiento: 1) retirar los tornillos Bristol que se exhiben en superficie, 2) retirar la tapa metálica (momento en el cual se puede visualizar el sensor), 3)

retirar el segundo soporte metálico, teniendo especial cuidado con el cable del sensor, 4) medir la distancia a la que se encuentra el imán con respecto a la superficie; esta distancia no puede ser mayor a 300 mm, 5) cuando dicha distancia es excedida, se debe retirar el tubo de PVC que se encuentra pegado a la varilla de acero inoxidable, reemplazar el tubo por uno más largo, proceder a pegar el nuevo tubo a la varilla de acero y volver a enterrar el instrumento a la medida que está especificada dentro de los procedimientos de instalación.

Si por el contrario estos instrumentos dejan de reportar lecturas, es necesario verificar si el cable que está a la vista en la caseta de instrumentación está en buenas condiciones y proceder a reemplazar un segmento afectado en caso en que se detecte deterioro o daño. Si la causa no es el cable visible, se recomienda no realizar ninguna acción y reportar la pérdida del sensor.

Nota: una parte fundamental de un proyecto de instrumentación es el buen uso que se le da a la información recolectada. Esto significa el procesamiento adecuado de la información capturada en campo y su procesamiento y empleo posterior para diferentes propósitos. **Para garantizar el éxito en los procesos de análisis y empleo de la información es necesario que el procesamiento de la información obtenida de los sensores sea realizada por un profesional experto en el tema de procesamiento y análisis de señales.** Lo anterior se debe a que el sistema de instrumentación está operando en un ambiente altamente ruidoso y por lo tanto la obtención de la verdadera señal requiere un proceso que incluye: cálculo de funciones de coherencia, cálculo de las transformadas de Fourier de las señales, cálculo de funciones de autocorrelación y finalmente aplicación de un filtro adecuado.

RECOMENDACIONES

para futuros proyectos de instrumentación

De acuerdo con la experiencia obtenida en este contrato, y acorde con algunas recomendaciones reportadas en la literatura, se puede concluir que el éxito de un proyecto de instrumentación depende de 7 aspectos principales:

1. la conformación de un equipo de trabajo multidisciplinario altamente preparado que incluya ingenieros de pavimentos, programadores, especialistas en eléctrica y electrónica, etc.,
2. la selección de instrumentos confiables y el diseño e implementación de los dispositivos adicionales que sean necesarios para garantizar el buen funcionamiento de los sensores una vez éstos instalen en campo,
3. el diseño detallado de los esquemas de instalación (i.e., ubicación en planta y en perfil de los sensores dentro de la estructura de pavimento),
4. el diseño de un software confiable que garantice la debida y apropiada captura y almacenamiento de información,
5. pruebas de validación y pre-instalación de los sensores en laboratorio,
6. un plan detallado de las actividades de instalación que incluya las medidas a seguir en caso de identificar imprevistos o dificultades en obra, y
7. el diseño de un plan de trabajo que contemple el uso futuro que se le dará a la información recolectada.

En términos detallados, las siguientes son las recomendaciones para proyectos futuros que fueron identificadas con base en las experiencias realizadas:

- Algunas de las actividades realizadas durante la etapa de validación de las metodologías en campo tuvieron una duración superior a la esperada debido a condiciones que se salían de control para el equipo de trabajo. Uno de los principales atrasos se debió a los largos tiempos de envío, importación y nacionalización de los instrumentos y equipos. Estas actividades tuvieron un alto impacto en la programación global del proyecto. Se

recomienda tener este aspecto en cuenta en el momento de realizar las actividades de planeación de proyectos de esta naturaleza.

- En general, es deseable minimizar el tiempo total entre el inicio de la instalación de los sensores y la finalización de las actividades de puesta en operación de los esquemas de instrumentación. Esto permite minimizar potenciales riesgos sobre la integridad del sistema, tales como el deterioro o la corrosión de los cables que quedan expuestos a las condiciones externas circundantes al proyecto. Para cumplir con este objetivo, además de realizar un proceso de planeación detallado de la instalación de los sensores en campo, se recomienda realizar labores de coordinación con el personal encargado de ejecutar las actividades de construcción en campo.
- Es importante ser muy riguroso en la protección del cableado de todos los sensores. La instalación de tuberías de protección, la selección de los materiales de dichas tuberías y la adquisición y planificación para el empleo de cualquier otro tipo de protección, son actividades que se deben incluir en los esquemas de instalación generales.
- Las experiencias realizadas como parte del Contrato 118 de 2009 demostraron que el proceso de instalación en el tramo de pavimento flexible es más complejo y más agresivo para la integridad de los sensores que el proceso de instalación en el tramo de pavimento rígido. La pérdida de los deformímetros ubicados en la base de las capas asfálticas pudo haberse debido a las altas exigencias mecánicas a las que fueron sometidos los sensores durante los procesos de extensión y compactación de este material. En este sentido, se recomienda proteger a los sensores con una capa de material arena-asfalto de por lo menos 4 cm compactada manualmente antes de iniciar las actividades de extensión de la mezcla (en especial si se emplea una finisher para tal propósito). Así mismo, una vez extendido el material, se recomienda realizar una pre-compactación con equipo más sencillo en las cercanías del sensor para luego proceder con la compactación regular de la capa asfáltica. Naturalmente, estas actividades deben realizarse en el menor tiempo

posible con el objetivo de no afectar la temperatura de la mezcla y la calidad final de la compactación de la capa asfáltica.

- Con respecto a otros aspectos de tipo práctico, es recomendable revisar y garantizar que la ubicación de los computadores y otros equipos desde los cuales se va a extraer la información sean de fácil y seguro acceso. En este sentido, es también recomendable evaluar mecanismos para acceder remotamente a la información, como los descritos en la sección 4 de este informe.
- El análisis de los resultados obtenidos de las actividades de puesta en operación de los sistemas de instrumentación permitieron concluir que el esquema más recomendable para la captura de los datos correspondientes a las variables dinámicas es de tipo secuencial. Sin embargo, el esquema de tomar datos cuando se active un disparo que anuncie el paso inminente de un vehículo es muy recomendable ya que éste facilita el análisis posterior de la información y optimiza el empleo de la memoria para el almacenamiento de datos (sólo se toman datos cuando hay pasos de vehículos). En proyectos posteriores se recomienda el empleo de sensores de proximidad que permitan enviar señales confiables indicando el momento de inicio para la toma de datos.
- Finalmente se recomienda no dejar pasar ningún lapso de tiempo entre la finalización de la instalación de los equipos y el registro metódico de los datos. En efecto, dado que el sistema de instrumentación se deteriora con el tiempo, cualquier intervalo de tiempo que transcurra sin realizar medidas puede llevar a la pérdida del esfuerzo de instalación.

ANEXOS

Anexo A.1

Fichas técnicas de los sensores y equipos

Anexo A.2

Esquemas del procedimiento de instrumentación empleado
