

Sandoval Moreno, John Anderson; Ramirez Scarpetta, José Miguel; Valencia De Oro, Ana Lilian
DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LOS LABORATORIOS REMOTOS DE ESTRUCTURAS E
INGENIERÍA SÍSMICA Y DINÁMICA ESTRUCTURAL

Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 18, núm. 2, diciembre, 2008
Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91100205>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LOS LABORATORIOS REMOTOS DE ESTRUCTURAS E INGENIERÍA SÍSMICA Y DINÁMICA ESTRUCTURAL

TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF REMOTE LABORATORY OF STRUCTURES, AND REMOTE LABORATORY OF SEISMIC ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS

John Anderson, Sandoval Moreno

Ing. Electrónico, Estudiante de Maestría en Control Automático,
Investigador Grupo GICI. Universidad del Valle, Cali, Colombia, johnasanm@gmail.com

José Miguel, Ramirez Scarpetta

Ing. Electricista, Ph.D., Profesor titular, Facultad de Ingeniería, Director e Investigador Grupo GICI.
Universidad del Valle, Cali, Colombia, jomiram@univalle.edu.co

Ana Lilian, Valencia De Oro

Ing. Electricista, Estudiante de Maestría en Control Automático,
Investigadora Grupo GICI. Universidad del Valle, Cali, Colombia, bonny338@yahoo.es

Fecha de recepción: 28 agosto de 2008

Fecha de aprobación: 15 de diciembre de 2008

RESUMEN

Este documento presenta el diseño y automatización de dos Laboratorios Remotos manejados virtualmente a través de Internet: *Laboratorio Remoto de Estructuras* y *Laboratorio Remoto de Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural*; el laboratorio de estructuras consta de 3 módulos correspondientes al Módulo de Estabilidad, Módulo de Resistencia de Materiales y Módulo del Marco Universal. El módulo de dinámica estructural es una mesa vibratoria que a través de un sistema de control reproduce diferentes movimientos como sismos, impulsos y vibraciones armónicas y permite realizar ensayos con pequeñas estructuras modelo. A cada módulo se le adicionaron actuadores y sensores electrónicos de desplazamiento, aceleración, y fuerza, una tarjeta de adquisición de datos para enviar y recibir señales y comunicar el hardware de experimentación con el computador asociado; los cuales se interconectan a un Servidor Central que recibe a los usuarios y autoriza el acceso al módulo experimental adecuado gracias a la interconexión de estos equipos por medio de un *switch*. Además, se presenta la estructura general de las interfaces de experimentación y el procedimiento realizado por el estudiante para utilizar los laboratorios remotos.

Palabras clave: Laboratorios Remotos, Ingeniería Estructural, Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural.

ABSTRACT

This paper presents the design and automation for two remote laboratories virtually operated through Internet: *Remote Laboratory of Structures and Remote Laboratory of Seismic Engineering and Structural Dynamics*. The Remote Laboratory of Structures contains 3 modules which correspond to Stability Module, Strength of Materials Module and Universal Testing Machine Module. The Remote Laboratory of Structural Dynamics is a shaking table, which with a control system reproduces different movements as earthquakes, impulses and harmonic vibrations and permits to use model structures. To each module have been attached actuators and displacement, acceleration and force electronic sensors, a data acquisition card for sending and receiving signals and for communicating the hardware of experiments with the assigned computer of each module; which interconnect to a Central Server that receives the users and authorizes the access to the adequate experimental module, by the interconnection of these equipments through a switch. Besides, this paper presents the general structure of the interfaces of experimentation and the procedure made by the student for using the remote laboratories.

Keywords: Remote Laboratory, Structural Engineering, Seismic Engineering, Structural Dynamic.

INTRODUCCIÓN

Las tendencias mundiales actuales relacionadas con la educación en ingeniería se han direccionado hacia metodologías de aprendizaje activo que les permitan a los estudiantes la construcción de su propio conocimiento y hacia la incorporación de las Tecnologías de Información y Comunicaciones como apoyo a la educación universitaria, con el fin de superar las falencias observadas en muchos ingenieros cuando se enfrentan a la solución de problemas de la vida real y se les dificulta la integración de los conceptos con su aplicación práctica.

Documentos como el reporte de la National Science Foundation (NSF) [1], proponen crear alternativas en educación que apunten al trabajo virtual, institucional y multidisciplinario mediante el uso de laboratorios remotos y/o virtuales, dado que pueden crearse herramientas y ambientes bien estructurados gracias a los constantes avances en informática, telecomunicaciones, electrónica y afines. Los primeros interactúan con un sistema físico real (no simulado), con su respectiva instrumentación y software de control donde el estudiante controla los recursos a través de internet o mediante una red local; los segundos, permiten experimentar con modelos matemáticos de sistemas simples ó complejos, de acuerdo a los intereses del laboratorio. Una de las ventajas de los laboratorios remotos es el permitir aprovechar los recursos tanto humanos como materiales de los laboratorios presenciales sin perder la perspectiva real del experimento, ya que los instrumentos virtuales diseñados son idénticos a los reales y la respuesta de los sistemas es la de

un sistema real que utiliza la simulación solo para la comparación de resultados; otra ventaja es la oportunidad de ampliar la oferta horaria del alumno en su formación, al permitir realizar el trabajo de laboratorio sin límites espaciales y temporales, donde es posible llevar a cabo experimentos de forma estructurada o incluso más abierta, en la que los estudiantes desarrollan habilidades de resolución de problemas, observación, interpretación y análisis de los resultados, de forma similar a la que los investigadores realizan, en donde en muchos casos también se facilita la visualización de los experimentos al permitir al estudiante observar e interactuar con el laboratorio desde su computador.

El presente documento se realizó en el marco de un proyecto de desarrollo tecnológico para la automatización y teleoperatividad de dos Laboratorios Remotos utilizados en los cursos básicos de Mecánica de Sólidos (Estática, Dinámica, Resistencia de Materiales y Análisis Estructural) de varios programas académicos de pregrado en varias ingenierías (Civil, Mecánica, Industrial, Materiales) de la Universidad del Valle [25], denominados Laboratorios Remotos de Estructuras e Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural (LREISDE). La motivación principal al desarrollo de este proyecto fue el resolver inconvenientes debidos a cantidad insuficiente de módulos para la realización de los laboratorios con todos los estudiantes, dificultades de observación en la prácticas debido a espacios reducidos, entre otros, que hicieron que los laboratorios remotos fueran concebidos para complementar la componente práctica de los cursos, brindar un entorno para investigadores y ampliar el alcance del laboratorio al ser empleado por otros centros educativos Nacionales y/o Internacionales con los que puedan realizarse convenios educativos.

En los últimos años se han desarrollado varios entornos remotos de experimentación en Ingeniería, principalmente en sistemas de control y robótica, donde es común configurar sistemas físicos para que realicen funciones específicas. Algunos Laboratorios Remotos que pueden encontrarse en estas áreas son [6], [7], [24] y [26], los cuales cuentan con interfaces gráficas para el acceso, manipulación, configuración y visualización de los datos provenientes del proceso en páginas web o recursos desarrollados en lenguajes como Java, Flash o Javascript. Los resultados mostrados por sus autores demuestran la efectividad de sus arquitecturas hardware y la buena operatividad del software incluído en estas aplicaciones. Además, herramientas de diseño de interfaces como Easy Java Simulations [4], y recomendaciones de diseño de entornos de experimentación a distancia como los propuestos en [21] y [22] han mostrado ser útiles para el desarrollo de estas aplicaciones.

En las áreas que abarcan los LREISDE se han encontrado algunos entornos que disponen de sistemas equivalentes a los desarrollados en el proyecto, especialmente en Dinámica Estructural. La Red de Simulación en Ingeniería de Terremotos [17] (NEES - *Network for Earthquake Engineering Simulation*) de los Estados Unidos es una asociación de 16 Universidades que cuentan diversos equipos para la experimentación a distancia y dispone de una infraestructura informática desde la cual se pueden realizar ensayos virtuales ó teleoperables con realimentación de

datos y video [18] [28]. Entre los módulos experimentales se destacan tres simuladores sísmicos presentes en la Universidad de Buffalo [14], Universidad de California con sede en San Diego [15] y la Universidad de Nevada con sede en Reno [16]. Este entorno es un buen ejemplo de accesibilidad, teleoperatividad y trabajo interinstitucional, que permite pensar en adaptar estas tecnologías en otras aplicaciones similares.

Respecto a las áreas de Resistencia de Materiales, Estática y Análisis de Estructuras, se encuentran aportes de entornos de experimentación virtual, recopilados en [8] y donde pueden estudiarse cerchas, vigas, pórticos, columnas, entre otros componentes estructurales. Compañías como GUNT [5] y QUANSER [20] comercializan algunos módulos para este tipo de estructuras, pero no son teleoperables y suelen tener costos muy elevados. En [19] se plantea una alternativa para conectividad con un módulo experimental de una viga desde un dispositivo móvil, pero solamente para evaluar conceptos dentro de una sesión magistral, dado que no se cuenta con un sistema de gestión de acceso a usuarios y herramientas computacionales bien estructuradas, para usarla con varios estudiantes a la vez.

En Colombia no se encuentran reportes de Laboratorios Remotos similares o con temáticas similares a los LREISDE; a nuestro conocimiento, este es el primer laboratorio remoto en esta área en el país; igualmente no se han encontrado reportes de laboratorios remotos en estructuras estáticas y dinámicas en un ambiente integrado como el desarrollado en este trabajo, en el cual se utilizaron los principios para el mando a distancia y la administración de laboratorios remotos en sistemas de control y robótica mencionados con anterioridad. Respecto a la visión planteada en el documento de la NSF, el Gobierno Nacional a través de los Ministerios de Educación Nacional y Comunicaciones desarrolló un proyecto para la Interconexión de las instituciones de educación superior del país con instituciones afines a nivel mundial. En la actualidad, se está llevando a cabo la conformación de la Red Nacional Académica de Tecnología Avanzada (RENATA) [27] que reúne las redes regionales del país incluyendo la Red Universitaria de Alta Velocidad del Valle del Cauca con el fin de incorporarse a CLARA (Cooperación Latinoamericana de Redes Avanzadas), luego a GEANT la Red Avanzada Europea a través del proyecto ALICE (América Latina Interconectada con Europa) y posteriormente al Internet de Estados Unidos.

1. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para desarrollar los laboratorios remotos consistió en realizar un análisis de las pruebas, requerimientos de cada laboratorio y equipos existentes, revisión de trabajos anteriores, seguido del diseño del esquema de automatización de cada módulo con su correspondiente selección de sensores y actuadores, de la evaluación y selección del software y hardware, y de la integración final de todos los módulos para su manejo remoto. A continuación se describe en qué consisten las pruebas y como se realizaban.

1.1. LABORATORIO DE ESTRUCTURAS

Consta de tres módulos, el de Resistencia de Materiales, Estabilidad y Marco Universal. Los ensayos se realizaban utilizando instrumentos de muchos años de servicio y con lecturas visuales en la mayoría de los casos muy desviadas de su valor real debido al desgaste de indicadores visuales y dificultad de observación de resultados por los estudiantes participantes en los laboratorios, pese al poco espacio disponible para una ubicación adecuada para la lectura.

1.1.1. Módulo de Resistencia de Materiales.

Este módulo realiza las pruebas de resistencia de materiales: tracción, compresión y cortante, en una Máquina Universal controlada manualmente. En los ensayos de tracción y compresión se aplica carga axial a una probeta y se registran visualmente la carga y la deformación hasta la ruptura de la probeta, mediante el indicador de carga del tablero de la máquina y un deformímetro de carátula instalado sobre la probeta. Los datos se toman de forma visual y discreta para construir la gráfica Esfuerzo vs Deformación (Figura 1), con la que se determinan el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad del material de la probeta [29]. En los ensayos de cortante se aplica una carga transversal al eje axial de una probeta y se registra la carga en la que se presenta ruptura, con la que se calcula el esfuerzo máximo a cortante que resiste el material. La diferencia entre los dos ensayos radica en las dimensiones de la probeta y el dispositivo de apoyo de la misma. Las lecturas se realizan de la misma manera que en los ensayos de tracción y compresión.

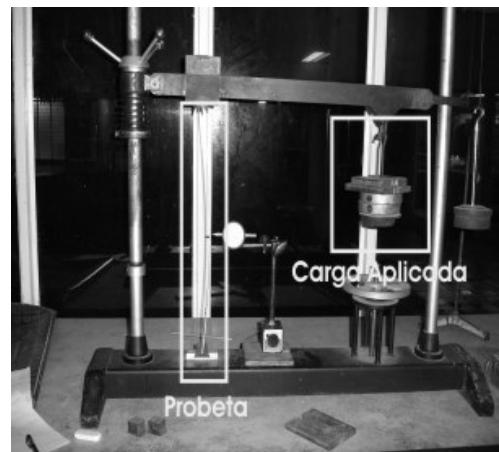
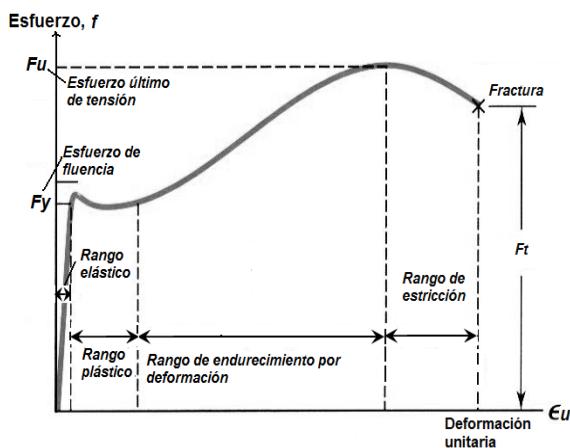


Figura 2. Máquina para ensayo de estabilidad.

1.1.2. Módulo de Estabilidad.

Para determinar la carga crítica de pandeo de una probeta esbelta, es decir, la carga axial con la que la probeta pierde su estabilidad, se emplean las relaciones de Leonhard Euler [12]. En el experimento la carga se aplica indirectamente mediante

el incremento de pesas en un extremo de la viga que se encuentra articulada en el extremo opuesto. La viga transmite la carga a la probeta de manera axial y la probeta se deforma hasta que pierde su estabilidad y se padea. En la Figura 2 se muestra la máquina de estabilidad. La carga aplicada se mide con el conteo de las pesas.

1.1.3. Módulo del Marco Universal.

Para obtener este módulo se realiza el ensayo de flexión en vigas con un pequeño banco para realizar pruebas con diversas condiciones de apoyo, usando una carga puntual que es posible aplicar en varios puntos sobre la viga (Figura 3). La carga aplicada se mide con el incremento de pesas y la deformación se registra visualmente mediante un deformímetro de carátula, con el fin de contrastar las mediciones con los resultados analíticos de la teoría de flexión en vigas.



Figura 3. Módulo del marco universal: ensayo de flexión.

1.2. LABORATORIO DE INGENIERÍA SÍSMICA Y DINÁMICA ESTRUCTURAL

Este laboratorio consiste en la aplicación de diferentes cargas dinámicas tipo armónicas, sísmicas, entre otras, mediante una mesa vibratoria o simulador sísmico, al cual son acopladas estructuras modelo para determinar esfuerzos, deformaciones y demás parámetros, como modos de vibración, razones de amortiguamiento, entre otras, que permitan conocer y evaluar el comportamiento dinámico de la estructura.

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

2.1. MÓDULO AUTOMATIZADO DE RESISTENCIA DE MATERIALES.

Para determinar este módulo experimentalmente se instrumentó la Máquina Universal INSTRON (Figura 4a) que aplica carga variante con el tiempo mediante un controlador embebido, cuya consigna es manipulada por el usuario remoto.

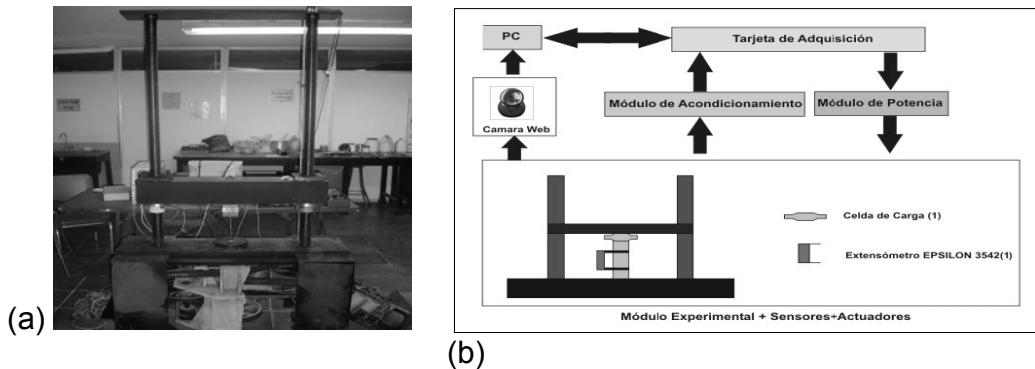


Figura 4. Módulo automatizado de Resistencia de Materiales.
 (a) Máquina universal INSTRON. (b) Esquema de automatización del módulo experimental.

A la máquina se le adicionó una celda de carga para determinar la fuerza aplicada a la probeta y los registros de deformación del elemento de prueba se tomaron mediante un extensómetro. Las señales de estos sensores fueron acondicionadas y enviadas a un sistema de adquisición de datos incorporado en un computador en el que se procesan y se manipulan para ser accesibles remotamente. La Figura 4b muestra el esquema general del Módulo de Resistencia de Materiales automatizado.

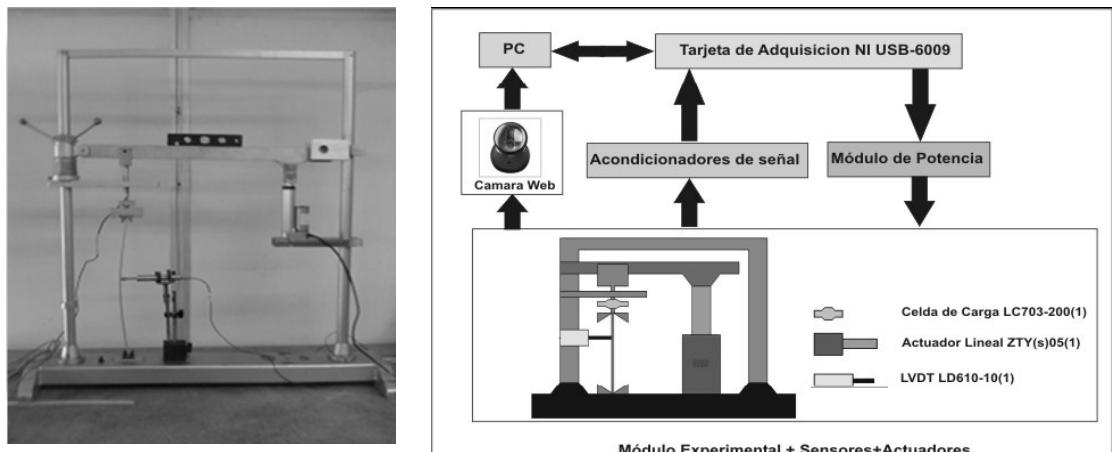


Figura 5. Módulo automatizado de Estabilidad.
 (a) Módulo de estabilidad
 (b) Esquema de automatización del módulo experimental.

2.2. MÓDULO AUTOMATIZADO DE ESTABILIDAD.

Este módulo experimental permite realizar ensayos para determinar la carga crítica de pandeo de una columna de acuerdo a diferentes condiciones de apoyo. Para el desarrollo de este módulo se acondicionó la máquina de estabilidad que se encuentra en el Laboratorio de Estructuras de la EICG, para controlarla por computador y posteriormente mediante Internet. Se empleó un actuador lineal electromecánico para aplicar carga a la probeta y una celda de carga para controlar la fuerza aplicada a la probeta. Los registros de desplazamiento correspondientes al pandeo de la probeta fueron medidos mediante un sensor de desplazamiento tipo

LVDT, con su respectivo sistema de acondicionamiento. Las señales acondicionadas fueron enviadas a un sistema de adquisición de datos incorporado en un computador en el que son procesadas y manipuladas para ser accesibles remotamente. La Figura 5a muestra el Módulo de Estabilidad automatizado y la Figura 5b su esquema general.

2.3. MÓDULO AUTOMATIZADO MARCO UNIVERSAL.

Este módulo experimental permite realizar ensayos en pequeñas estructuras (cercha, viga o pórtico). Se acondicionó para aplicar la carga por actuadores lineales y medirse por medio de celdas de carga. Se emplearon galgas extensiométricas para medición de cargas en elementos de unión (cercha), sensores de desplazamiento LVDT y celdas de carga, para medición de deformación y fuerzas en los apoyos. Las señales acondicionadas fueron enviadas a un sistema de adquisición de datos incorporado en un computador en el que son procesadas y manipuladas para ser accesibles remotamente. La Figura 6a muestra el Módulo de Marco Universal con una cercha, mientras que la Figura 6b muestra el esquema general del experimento de la cercha del marco universal, el cuál requiere de la mayor cantidad de sensores y actuadores disponibles para este módulo.

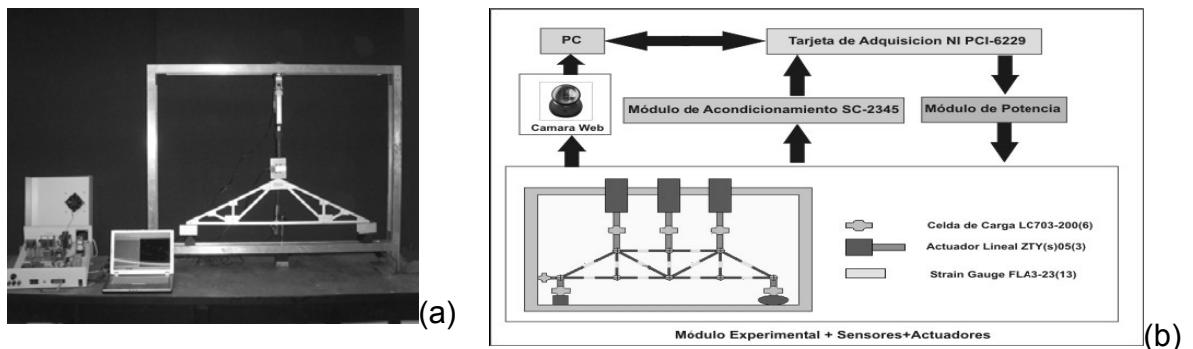


Figura 6. Módulo automatizado Marco Universal.

(a) Módulo automatizado con una configuración particular de Cercha.

(b) Esquema de automatización del módulo experimental para una cercha con numerosos sensores y actuadores.

2.4. MÓDULO AUTOMATIZADO SIMULADOR SÍSMICO.

Para el desarrollo de este módulo se partió de cero, mediante el diseño y construcción de una pequeña mesa vibratoria como Simulador Sísmico, cumpliendo con las especificaciones tenidas en cuenta en el Consorcio Universitario de Mesas Sísmicas Instruccionales [3] (*UCIST - University Consortium of Instructional Shake Tables*), con las características enunciadas en la Tabla 1, para permitir realizar ensayos de vibración libre, armónica, aleatoria (sismos), y en general, ensayos para la obtención de modelos dinámicos de estructuras (caracterización y/o control).

Tabla 1. Especificaciones del simulador sísmico

Características	Valor
Dimensión del área de carga (L x W x H)	50cm x 50cm x 1.2cm
Máxima capacidad de carga	15 Kg-f
Recorrido máximo*	15cm
Frecuencia de operación máxima**	20Hz

*La mesa vibratoria se desplaza 7.5cm a lado y lado desde su posición de reposo

**La mesa vibratoria puede hacer barridos de frecuencia desde 0.01Hz hasta 20Hz, donde a la mínima frecuencia puede alcanzar el máximo recorrido y a la máxima frecuencia tiene una amplitud de 1.5mm

Además, se desarrolló una estructura modelo de dos grados de libertad para someterla a las vibraciones generadas por la mesa y realizar los respectivos análisis con los estudiantes. El movimiento de la mesa fue controlado por un actuador lineal electromagnético que mueve la base de la estructura en una sola dirección (se emplea un sistema de rieles y cojinetes) utilizando un controlador embebido, alimentado por sensores de efecto Hall y un *encoder*. Para el sistema de instrumentación se utilizaron sensores de aceleración destinados a medir las aceleraciones de la base de la mesa vibratoria y de los pisos de la estructura modelo. También se incluyó una tarjeta de adquisición de datos para tomar las señales de los sensores y colocar una señal de referencia al controlador acoplado al motor de la mesa vibratoria. La figura 7a muestra la mesa vibratoria construida para este Laboratorio Remoto y la Figura 7b contiene un esquema general de los elementos que permiten automatizar la mesa.

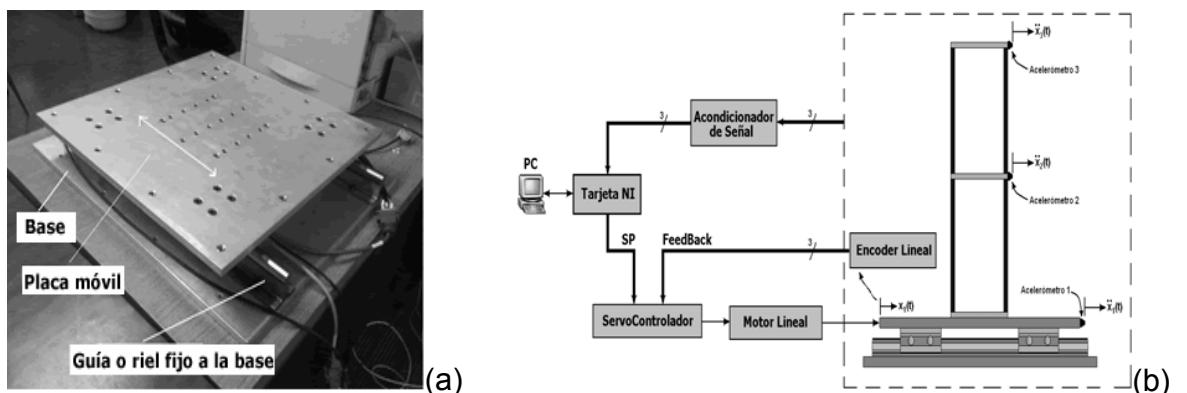


Figura 7. Módulo automatizado Simulador Sísmico.

(a) Mesa vibratoria construida para el
Laboratorio Remoto de Ingeniería Sísmica
y Dinámica Estructural.

(b) Esquema de automatización de la mesa vibratoria.

2.5. HARDWARE INCLUIDO EN LOS MÓDULOS TELEOPERABLES.

De manera general, el hardware de cada uno de los módulos experimentales (ver Figura 8a) consta de un computador personal (terminal de experimentación), el cual se interconecta al proceso a través de una tarjeta de adquisición de datos (NI USB-6029 -Módulos de Estabilidad y Resistencia de Materiales - y NI PCI-6229 – Módulos Marco Universal y Simulador Sísmico - de National Instruments [13]) de forma bidireccional. La tarjeta recibe las señales provenientes de los acondicionadores de

señal de cada sensor (ver Figura 8b) instalado de acuerdo a las necesidades de los experimentos. Entre los sensores se destacan: celdas de carga de ± 200 Lb (tracción ó compresión), sensores de desplazamiento LVDTs de ± 15 mm, galgas extensiométricas (strain Gauges), extensómetro axial de 50mm, acelerómetros uniaxiales que registran $\pm 5g$.

Cada terminal cuenta con sus respectivos actuadores encargados en manejar los elementos electromecánicos para generar la excitación apropiada de acuerdo a las referencias enviadas por los usuarios. De igual manera, se tiene incorporada una cámara web a cada módulo experimental para la respectiva captura y transmisión de video, como estrategia pertinente para realimentar eventos a los usuarios distanciados del experimento.

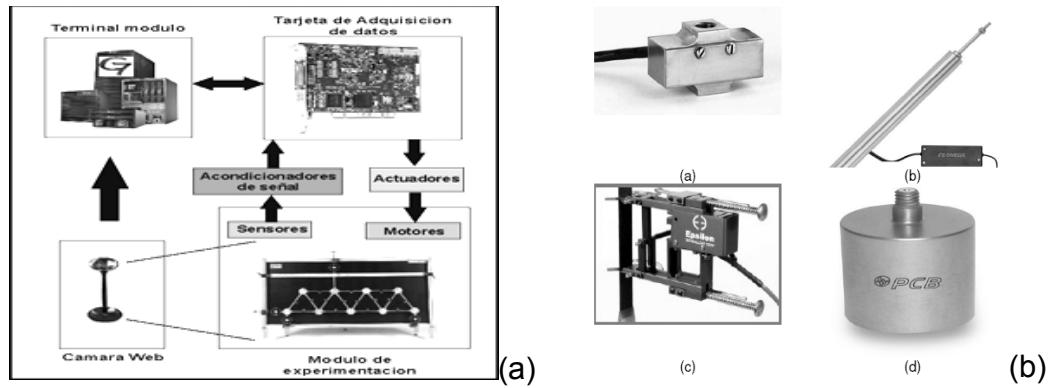


Figura 8. Configuración de los bloques Hardware en los módulos experimentales.
 (a) Esquema de interconexión de bloques general. (b) Sensores presentes en los módulos experimentales: Sensores presentes en los laboratorios remotos. (a)Celda de carga. (b)LVDT. (c)Extensómetro axial. (d)Acelerómetro uniaxial.

2.6. ESTRUCTURA DE LA RED DE COMUNICACIÓN.

La topología de red para los Laboratorios Remotos está basada en arquitecturas ampliamente empleadas para este tipo de entorno, como la mostrada en [24] y algunas otras recopiladas en [9], donde se pueden observar servidores de aplicaciones y encargados de la gestión de usuarios. El ambiente consta de un Servidor Central (SCLR) que contiene las páginas de acceso web, los programas de gestión de usuarios y la única base de datos del entorno (elementos analizados más adelante). El SCLR se interconecta con los cuatro terminales de experimentación por medio de un *switch* que a su vez se encuentra integrado a la red de la Universidad del Valle y podrá ser accesible desde el Campus o desde la Internet, como lo muestra la Figura 9.

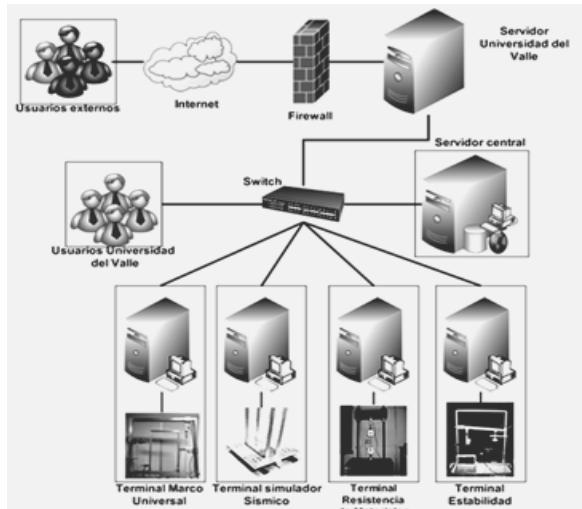


Figura 9. Topología de red para los laboratorios remotos.

2.7. SOFTWARE PRESENTE EN LOS LABORATORIOS REMOTOS.

2.7.1 Características de la base de datos del entorno.

La base de datos de los Laboratorios Remotos (*admin_lrcivil*) se encuentra alojada en un servidor MySQL utilizado principalmente por sencilla sintaxis, capacidad de almacenamiento, documentación y compatibilidad con varios sistemas operativos. Esta base de datos es usada tanto para la gestión de recursos y usuarios como para la intercomunicación entre el cliente y el proceso durante la experimentación, y dispone de los siguientes módulos:

- Módulo de Usuarios, Instituciones, Perfiles y Grupos: Se encuentra contenida la información relacionada de usuarios (nombre, código de acceso, contraseña, correo electrónico), perfiles de usuario (estudiante, profesor, etc), instituciones de los usuarios y grupos en los que puede encontrarse matriculado un usuario.
- Módulo de Horarios: Contiene la información que permite coordinar el acceso a los experimentos de acuerdo a la programación de los cursos que empleen los laboratorios, de acuerdo al calendario académico.
- Módulo de Experimentos y Variables: Contiene información de los módulos de experimentación, experimentos y variables de entrada/salida (canales de adquisición, rangos, periodo de muestreo, duración del experimento, entre otras) de las diferentes configuraciones experimentales adaptables en cada módulo.
- Módulo de Documentación: Incluye información asociada a la documentación de cada experimento (guías de laboratorio, datos históricos, aplicación cliente de control remoto).

2.7.2 Herramienta de administración de los Laboratorios Remotos.

La herramienta de administración de los Laboratorios Remotos, alojada en el SCLR, permite que por medio de páginas web, se administre fácilmente la Base de Datos del entorno de manera sencilla y sin requerir conocimientos en lenguajes o protocolos de base de datos. Fue implementada en HTML y PHP, alojada en un servidor web Apache HTTP e interactúa con la base de datos *admin_lrcivil*. El uso de PHP permite manejar contenido dinámico y enviar peticiones de consulta y actualización a la base de datos de manera directa.

2.7.3 Páginas web de acceso remoto.

La interfaz web para el acceso de los usuarios, desarrollada en HTML y PHP, consta de un conjunto de páginas de acceso libre que proporcionan información general de uso del entorno de experimentación y material didáctico de los cursos involucrados en los Laboratorios Remotos. También hay un conjunto de páginas de acceso restringido en donde el usuario debe utilizar su respectivo *login* y *password*, y mediante las cuales puede editar su información personal, reservar horarios de práctica, acceder a material didáctico restringido e iniciar sus experimentos. Los privilegios y recursos de los usuarios son definidos por el administrador por medio de la interfaz de experimentación. En la Figura 10 se muestra un ejemplo de esta interfaz de acceso a los usuarios para el Laboratorio Remoto de Estructuras.



Figura 10. Interfaces web de acceso a los usuarios del laboratorio remoto de Estructuras.

El proceso de autenticación (ver Figura 11) es realizado entre el cliente (usuario que accede a la interfaz web por medio de un navegador) y el Servidor Central de los Laboratorios Remotos. De esta manera se mantiene aislado el flujo de información de páginas web del flujo de datos durante la experimentación, de tal manera que los terminales de experimentación se dediquen solamente a este proceso.

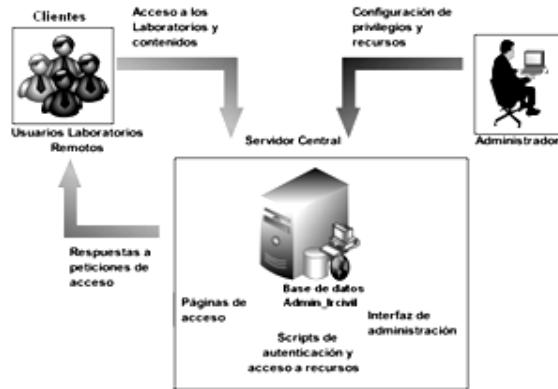


Figura 11. Comunicación de los recursos software en el proceso de autenticación de usuarios.

2.7.4 Interfaces de experimentación y software de adquisición de datos.

Una vez realizada la autenticación, los usuarios pueden realizar sus experimentos desde cualquier navegador web que tenga instalado el *plugin* de Java para cargar la aplicación cliente de control remoto. Los terminales de experimentación alojan el *applet* del cliente en sus respectivos servidores web, contienen una rutina de adquisición y procesamiento de datos, control y comunicación desarrollada en MATLAB®, disponen de *servlets* alojados en Apache TOMCAT, para la gestión de peticiones a la base de datos o el programa de adquisición por parte de los clientes e incluyen el servidor de cámara web Dorgem. En este proceso, interviene la base de datos *admin_Ircivil* alojada en el Servidor Central que permite la comunicación entre el cliente y el programa de adquisición de datos. Las interfaces de experimentación son empleadas para enviar peticiones y recibir información del proceso durante la experimentación, se desarrollaron en Java mediante el empleo de un entorno de programación llamado *Easy Java Simulations* [4]. En general, constan de cuatro paneles de acceso mediante pestañas, denominados *Mímico*, *WebCam*, *Datos* y *Documentación*; y un panel de control (referencias y ejecución del experimento) y visualización de tiempo transcurrido. En la Figura 12 se muestran los tres primeros paneles de la interfaz del Módulo de Estabilidad.

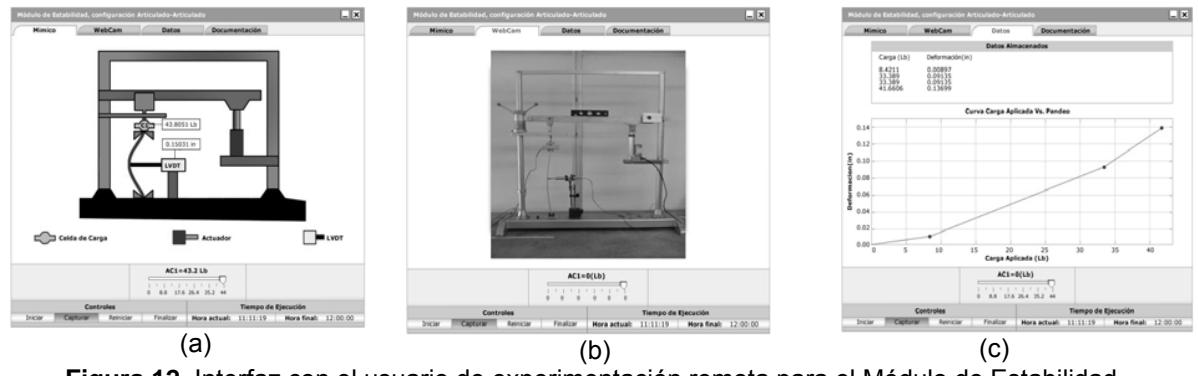


Figura 12. Interfaz con el usuario de experimentación remota para el Módulo de Estabilidad.

(a) Panel Mímico.

(b) Panel WebCam.

(c) Panel Datos

2.8 RESULTADOS DE LAS APLICACIONES DE RED Y ALGUNAS PRUEBAS.

2.8.1 Desempeño de las aplicaciones de red en teleoperación.

Debido a que los Laboratorios Remotos se basan en la Internet para su funcionamiento, es necesario que las aplicaciones de teleoperación cumplan con algunos parámetros mínimos de desempeño que permitan determinar sus capacidades operativas sin que se afecte la calidad de los experimentos que se llevarían a cabo. Se tomaron las recomendaciones consignadas en [9] y [10] donde se incluyen los valores típicos de algunas variables de red para las aplicaciones de video en tiempo real, intercambio de datos del proceso entre cliente y servidor, entre otras. Se realizaron múltiples accesos durante la etapa de validación de las aplicaciones, desde la red del Campus Universitario y se consignaron los valores típicos obtenidos de las variables más significativas en la Tabla 2. Puede apreciarse que estos servicios requieren un ancho de banda reducido para su funcionamiento y respecto a los retardos de comunicación de datos (peticiones a la base de datos principalmente) deberán ajustarse apropiadamente para el funcionamiento de la aplicación desde la red pública. Sin embargo, se recomienda que su acceso se realice mediante un enlace con altas capacidades de tráfico. Además, estas aplicaciones funcionen en una red con acceso compartido, lo que implica que el desempeño de las aplicaciones dependa del tráfico que pueda presentarse en un momento dado.

2.8.2 Resultados de teleoperación de un ensayo del módulo Marco Universal.

Una de las validaciones funcionales realizadas consistió en realizar un ensayo en el módulo Marco Universal con un pórtico, cuyo montaje y representación simbólica se muestran en la Figura 13. Para el montaje se tuvieron en cuenta las siguientes características: una de las bases del pórtico era articulada mientras que la otra era simplemente apoyada, se instaló un motor perpendicularmente a la columna derecha a la mitad de su altura, se instaló un LVDT a 40cm de la base izquierda para medir las deformaciones del pórtico; se instalaron 4 celdas de carga, una para controlar la carga aplicada por el motor, otra para medir la reacción vertical en la columna derecha y otras dos para medir las reacciones horizontal y vertical de la columna izquierda.

Tabla 2. Desempeño típico de las aplicaciones destinadas a la teleoperación (área local).

Variable	Valor obtenido	Valor recomendado	Observaciones
Ancho de banda Para la transmisión y recepción de video*	Entre 96kbps y 160kbps	Entre 10kbps y 5Mbps	Tramas de video transmitidas a 12FPS, formato I420, 320x240 pixeles. Este ancho de banda suele ser el utilizado por la aplicación cliente.
Ancho de banda para la transmisión de datos	8kbps	Según cantidad de datos y canal de comunicación	La aplicación de datos podría ser usada desde una conexión a 56kbps, con algunas limitaciones. Se empleó una conexión Applet-Servlet-Base de Datos.
Retardo	40mseg*,	Inferior a 200mseg	*Paquetes cortos (hora actual,

promedio en peticiones a la base de datos desde el cliente**	150mseg** 500mseg***		variables de estado). **Paquetes medianos (variables de proceso) ***Paquetes largos(configuración inicial, variables de proceso con gran cantidad de instrumentos-mas de 8 sensores)
--	-------------------------	--	--

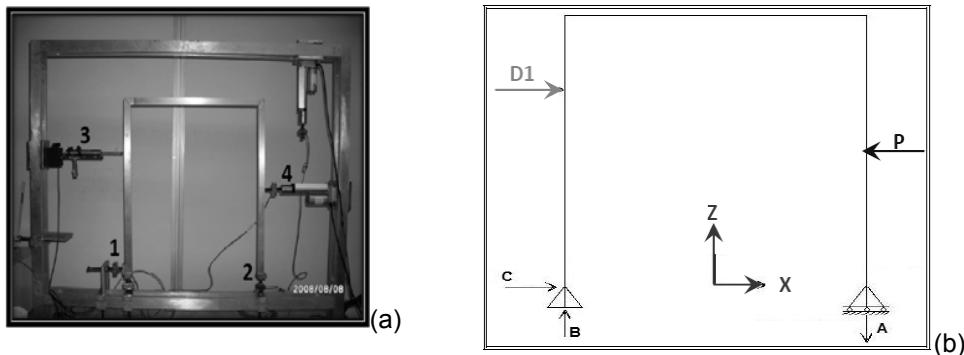


Figura 13. Montaje empleado para la el pórtico teleoperable.

(a) Montaje realizado. Se destacan: (1) base articulada y celdas de carga, (2) Base simplemente apoyada y celda de carga, (3) motor lineal y celda de carga, (4) Sensor tipo LVDT . (b) Esquema del experimento realizado.

Dado que este ensayo no se había realizado con anterioridad, los datos del experimento remoto se compararon con los resultados de simulación obtenidos para las mismas condiciones usando el software SAP2000®, herramienta de análisis, diseño y simulación de estructuras. Los resultados se muestran en la Tabla 3, donde pueden verificarse porcentajes de error pequeños en los desplazamientos medidos por el LVDT. Se concluyó además que los porcentajes de error en la deformación medida con el LVDT se incrementan con la carga aplicada en la columna derecha, debido a las fuerzas de rozamiento de los componentes mecánicos que se acoplan a la base del Marco Universal. La energía es disipada en esta base y no puede ser transmitida de manera adecuada a la estructura. Los resultados pueden mejorar lubricando esta unión o usando rieles con cojinetes para aminorar los efectos de la fricción producidos por las piezas metálicas en contacto [11].

Tabla 3. Resultados obtenidos en la teleoperación de un pórtico acoplado en el módulo Marco Universal

P(Lb)	Mediciones realizadas				Resultados con SAP2000®			
	RA(Lb)	RB(Lb)	RC(Lb)	D1(mm)	RA(Lb)	RB(Lb)	RC(Lb)	D1(mm)
10	-2.822	7.98	9.915	3.146	-2.84	8.07	10	3.11
20	-8.421	13.87	19.45	6.423	-8.29	13.53	20	6.25
50	-24.36	29.02	48.17	14.92	-24.66	29.89	50	15.67

P(Lb)	Porcentajes de error			
	RA(Lb)	RB(Lb)	RC(Lb)	D1(mm)
10	1.48%	1.12%	0.85%	1.16%
20	1.58%	-2.51%	2.75%	2.77%
50	1.22%	2.91%	3.66%	4.79%

*RA: Reacción vertical columna derecha, RB; reacción vertical Columna izquierda, RC: reacción horizontal columna izquierda, D1: Deformación columna izquierda, P: Carga horizontal aplicada a la columna derecha. **Fuente:** Lucuara, 2008 □[11]

2.8.3 Resultados de teleoperación del ensayo del módulo Simulador Sísmico.

Adicional al experimento con características estáticas del pórtico mostrado con anterioridad, se muestra la validación del funcionamiento del simulador sísmico en teleoperación, dadas las características dinámicas y la cantidad de datos que deben ser procesados en un experimento. La prueba consistió en excitar una estructura liviana construida con plexiglás y aluminio de un piso. Se ubicaron dos acelerómetros; uno en la base y otro en la losa superior. La señal usada para la excitación fue un barrido frecuencial dado que podía configurarse desde la interfaz del cliente. Dicha señal tenía una frecuencia inicial de 1Hz, una frecuencia final de 6Hz, duración de 40seg, retardo de 1seg y amplitud de 3mm.

Los resultados obtenidos demostraron dos cosas importantes. La primera es que la señal configurada por el cliente es seguida de manera eficiente por el simulador. El cliente configura una señal de excitación y previsualiza dicha señal. Al enviar la orden para activar el sistema, se envía una petición para que la rutina de adquisición en Matlab® construya una señal de las mismas características deseadas por el cliente. Es decir, el cliente solo enviará la función de excitación y los parámetros de ésta y son procesados en el servidor. La Figura 14 muestra la señal preconfigurada en el cliente para esta prueba.

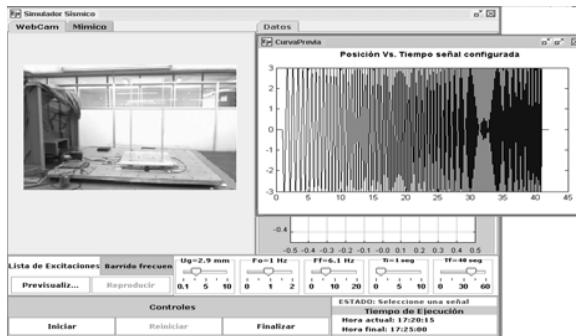


Figura 14. Configuración de la señal de excitación en el cliente

La segunda observación se basa en los resultados de la prueba. El terminal de experimentación se encarga de enviar video y ejecutar el programa de adquisición de datos que excita el sistema y toma los datos de los sensores. Al finalizar el proceso de excitación de la mesa, se guarda un archivo con los datos que a su vez son enviados al cliente, por medio de la base de datos, para que visualice las señales adquiridas de manera remota, de tal manera que pueda decidir si lo obtenido es suficiente para su proceso educativo o, si lo requiere, reinicia el proceso en esta misma sesión de experimentación. La Figura 15 compara los resultados que son mostrados en el cliente con los adquiridos por la instrumentación. Se aprecia como las señales de salida son similares y como la excitación no se ve afectada por la tele operación, confirmando la buena calidad del experimento, gracias tanto a la

calibración del simulador como a la estrategia de funcionamiento descrita anteriormente. Los posibles errores se deberían al sistema de control y a los cambios de formato de los datos enviados al cliente por medio de la base de datos. No obstante, los clientes obtendrán el archivo de datos creado al finalizar la excitación de la mesa.

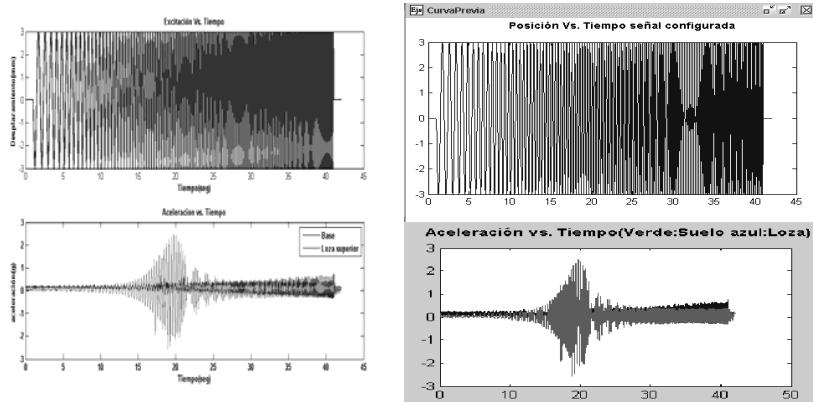


Figura 15. Comparación de resultados obtenidos en la prueba. Izquierda: Datos de excitación en la base (arriba) y datos de aceleración adquiridos (abajo). Derecha: señal configurada (arriba) y señales adquiridas (abajo) en el cliente.

2.9 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL.

En general, el proceso llevado a cabo por el usuario para realizar su experimentación remota consta de los pasos ilustrados en la Figura 16. Los dos primeros pasos pueden realizarse sin haber ingresado a las páginas de acceso restringido. Para cada experimento remoto se cuenta con su respectivo experimento virtual que consiste en la misma interfaz de experimentación, pero con datos y respuestas simuladas. El objeto del experimento virtual es entrenar al usuario previamente a la ejecución del laboratorio real y dar a conocer sus características a los usuarios que no cuentan con *password* válido de acceso. Para inscribirse al experimento en el tercer paso, se requiere de la autenticación del usuario, así como para acceder a la guía de laboratorio que puede descargarse al PC local. En el quinto paso nuevamente se sugiere la realización del experimento virtual para pasar a la ejecución del ensayo y almacenamiento de los datos para su análisis, que son guardados en un archivo de texto y quedan disponibles para su descarga en la respectiva sesión del usuario.

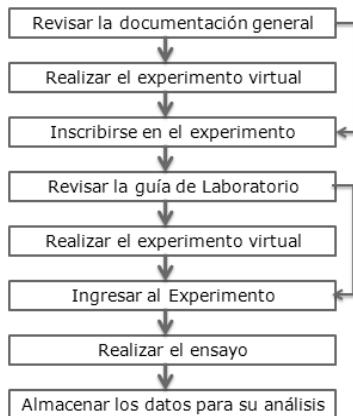


Figura 16. Procedimiento de experimentación del usuario remoto

3. CONCLUSIONES

En este artículo se presentaron los resultados generales del proceso de Automatización de los Laboratorios Remotos de Estructuras, que consta de los Módulos de Resistencia de Materiales, Estabilidad y Marco Universal y del Laboratorio Remoto de Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural, desarrollados en la Universidad del Valle. Además, se describen los recursos hardware y software utilizados para desarrollar el proyecto, la estructura de la red de comunicación, algunos pruebas de validación y el proceso de experimentación final llevado a cabo por el estudiante para utilizar los Laboratorios Remotos. Con el desarrollo de este proyecto se hace uso de la tecnología para proporcionar espacios de experimentación más asequibles a los estudiantes sin restricciones de espacio y tiempo que permiten complementar la componente práctica de los cursos a los que apoyan y mejorar sus recursos de autoaprendizaje e integración de la teoría con su aplicación práctica. Actualmente se está en proceso de aplicación del laboratorio a los cursos regulares. Se tramita también la vinculación al Consorcio UCIST para compartir recursos con otras Universidades del mundo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento:

Al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y La Tecnología “Francisco José de Caldas” – COLCIENCIAS y a La Universidad del Valle por la cofinanciación del proyecto, a través del Contrato No. 237-2005.

A los integrantes de los grupos de investigación G-7 y GICI que forman parte del proyecto “Desarrollo Tecnológico de los Laboratorios Remotos de Estructuras e Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ATKINS, Daniel; (2003). Revolutionizing Science and Engineering Through Cyberinfrastructure: Report of the National Science Foundation Blue-Ribbon Advisory Panel on Cyberinfrastructure. Página consultada en Octubre de 2008. En: <http://www.nsf.gov/od/oci/reports/atkins.pdf>
- [2] DYKE J, Shirley and VAZIRI, Parshaw and ROBLEE Cliff; (2006). Execution of the NEES Vision for Education, Outreach and Training. En: 9th International on Engineering Education, San Juan.
- [3] DYKE J., CAICEDO J.M y SOTO F. Manolo; (2003). University Consortium of Instructional Shake Tables: Enhancing Education in Earthquake Engineering. En: Proceedings of the International Meeting on Civil Engineering Education, Real Ciudad, España, SeSpain, Sept 18-20.
- [4] ESQUEMBRE, Francisco, 2008. Easy Java Simulations. Página consultada en Agosto 22 de 2008. En: <http://www.um.es/fem/Ejs>
- [5] GUNT, 2005. Enlace principal. Consultado en Octubre de 2008. En: <http://www.gunt.de>
- [6] INSTITUTO TECNOLOGICO DE BROOKLYN, 2001. Enlace al Laboratorio Remoto basado en Web en Mecatrónica y Control de Procesos del Instituto Tecnológico de Brooklyn. Página consultada en Octubre de 2008. En: <http://mechatronics.poly.edu/MPCRL/>
- [7] INSTITUTO TECNOLOGICO STEVENS. Enlace al Laboratorio Remoto en Sistemas Dinámicos del instituto Tecnológico Stevens. Página consultada en Octubre de 2008. En: <http://www.stevens.edu/remotelabs/Experiments.html>
- [8] INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING EDUCATION. Laboratorios Interactivos y demostrativos para estudiantes de pregrado en Ingeniería civil. Consultado en Octubre de 2008. En: http://www.ijee.dit.ie/interactive/Civil_Engineering.html
- [9] KHAMIS RASHWAN, Alaa Mohamed. Interacción Remota con Robots Móviles Basada en Internet; Madrid, 2003, 338p, Cap. 3-4. Tesis Doctoral (Doctor Ingeniero Industrial). Universidad Carlos III, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.
- [10] KUROSE, James y ROSS, Keith, 2005. Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet. Tercera Edición. Pearson Education.

- [11] LUCUARA MEDINA, Sebastián Camilo. Desarrollo Tecnológico del Marco Universal para el Laboratorio Remoto de Estructuras; Cali, 2008, 116p. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil). Universidad del Valle, Facultad de ingeniería.
- [12] NASH William A, 1970. Resistencia de Materiales. México. Mc Graw Hill.,205 p.
- [13] NATIONAL INSTRUMENTS, 2008. Página consultada en Diciembre de 2007. En: <http://www.ni.com>
- [14] [NEES@Buffalo](#), 2008. Enlace principal al sitio de NEES en la Universidad de Buffalo. Consultado en Octubre de 2008. En: <http://nees.buffalo.edu/>
- [15] [NEES@UCSD](#). Enlace principal al sitio de NEES en la Universidad de California, sede San Diego. Consultado en Octubre de 2008. En <http://nees.ucsd.edu/>
- [16] [NEES@UNR](#), 2007. Enlace principal al sitio de NEES en la Universidad Nevada, sede Reno. Consultado en Octubre de 2008. En: <http://nees.unr.edu/>
- [17] NETWORK FOR EARTHQUAKE ENGINEERING SIMULATION (NEES), 2008. Enlace principal de NESS. Consultado en Octubre de 2008. En: <http://www.nees.org>
- [18] NETWORK FOR EARTHQUAKE ENGINEERING SIMULATION (NEES), 2008. Página principal de NESS Cyberinfrastructure Center. Página consultada en Octubre de 2008. En: <http://it.ness.org>
- [19] PINES, Darryll y LOVELL, Philip; (1998). A Remote Demonstration System to Enhance Engineering Classroom Instruction and Student Learning. En: International Journal of Engineering Education, Vol. 14, No. 4, p. 257-264.
- [20] QUANSER, 2008. Enlace principal. Consultado en Octubre de 2008. En: <http://www.quanser.com>
- [21] RÖHRIG, Christof. y JOCHHEIM, Andreas; (1999). The Virtual Lab for Controlling Real Experiments Via Internet. En: IEEE International symposium on Computer – Aided Control System Design, CACSD'99, Kohala Coast Island of Hawaii, Estados Unidos.
- [22] RÖHRIG, Christof. y JOCHHEIM, Andreas; (2000) Java-based Framework for Remote Access to Laboratory Experiments. En: IFAC/IEEE Symposium on Advances in Control Education, ACE 2000, Gold Coast, Australia.
- [23] SANDOVAL MORENO, John Anderson. Desarrollo de la Herramienta para Acceso Remoto y Automatización de los Laboratorios de Estructuras e Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural; Cali, 2008, 174p. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Universidad del Valle, Facultad de ingeniería.

- [24] UNIVERSIDAD DE ALICANTE, 2008. Enlace principal de ROBOLAB. Página consultada en Octubre de 2008. En: <http://disclab.ua.es/robolab/index.html>
- [25] UNIVERSIDAD DEL VALLE, 2008. Página consultada en Octubre de 2008. En: <http://www.univalle.edu.co>
- [26] UNIVERSIDAD MIGUEL HERNANDEZ. Enlace principal de RECOLAB. Página consultada en Septiembre de 2007. En: <http://recolab.umh.es>
- [27] RENATA, 2008. Red Nacional Académica de Tecnología Avanzada. Página consultada en Octubre de 2008. En: <http://www.renata.edu.co/>
- [28] WHITMORE, S., VAN DEN EINDE, L., WARNOCK, T., DIEHL, D., HUBBARD, P y DENG, W. NEESIT Software Overview: IT Tools that Facilitate Earthquake Engineering Research and Education. Página consultada en Octubre de 2008. En: http://it.nees.org/documentation/pdf/software_overview.pdf
- [29] VINNAKOTA Sriramulu, (2006). Estructuras de acero: comportamiento y LFRD. México. Mc Graw Hill., 35 p.