

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO VIRTUAL DE
INGENIERÍA SÍSMICA**

Ing. LUIS FELIPE GUERRERO MOSQUERA

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
2015**

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO VIRTUAL DE
INGENIERÍA SÍSMICA**

Ing. LUIS FELIPE GUERRERO MOSQUERA

Tesis de Grado para optar al título Magíster en Ingeniería

**CODIRECTORES
DANIEL GÓMEZ M.Sc.
PETER THOMSON Ph.D.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
2015**

RESUMEN

Este proyecto tiene el propósito de desarrollar e implementar un laboratorio virtual para proporcionar un medio en línea para realizar experimentos en diversas áreas de ingeniería sísmica. Los laboratorios virtuales se han consolidado en la última década como una valiosa herramienta de apoyo para el ejercicio académico en diferentes áreas de la formación profesional.

Con este proyecto se pretende implementar prácticas virtuales para el aprendizaje, mediante el desarrollo de módulos para proporcionar un medio de experimentos interactivos en línea, destinados a proporcionar una comprensión conceptual de temas relacionados con la dinámica de estructuras y la ingeniería sísmica. Además el proyecto contempla el desarrollo de la página Web que albergará el laboratorio virtual. Adicionalmente se plantean estos escenarios como un medio para fortalecer las experiencias académicas e investigativas del estudiante por fuera del aula de clase.

Este trabajo está enmarcado en el proyecto de investigación “Desarrollo e implementación de un laboratorio virtual de Ingeniería sísmica”, que hace parte de la convocatoria “Innovación educativa con uso de las tecnologías de la información y la comunicación 2011-2012” del Ministerio de Educación Nacional [1].

Contenido

Introducción.....	6
1. Problema.....	8
1.1. Descripción del problema.....	8
1.2. Formulación del problema.....	8
1.3. Objetivos	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos.....	9
2. Marco de referencia	10
2.1. Antecedentes	10
2.2. Estado del arte	11
3. Marco teórico	13
3.1. Sistemas de múltiples grados de libertad.....	13
3.1. Matriz de rigidez.....	14
3.2. Matriz de masa consistente.....	15
3.3. Matriz de amortiguamiento clásico.....	17
4. Sismilab.....	18
4.1. Módulo de dinámica estructural	19
4.2. Módulo de geotecnia.....	21
4.3. Módulo de análisis ESTRUCTURAL	23
5. Aplicación MGDL	26
5.1. Descripción	26
5.2. Proceso básico.....	27
5.3. Interfaz del módulo de dinámica estructural.....	27
5.3.1 Panel de elementos.....	28
5.3.2 Panel central.....	29
5.3.3 Panel de gráficas	30
5.3.4 Panel de propiedades.....	30
5.3.5 Panel de opciones	30
5.4. Excitaciones dinámicas	33

5.4.1	Carga armónica	33
5.4.2	Aceleración armónica en el suelo	33
5.4.3	Sismos.....	33
5.4.4	Vibración libre	33
5.5.	Análisis y resultados.....	33
5.5.1	Modos de vibración.....	35
5.5.2	Reporte.....	35
5.5.3	Exportar datos	38
6.	Evaluación del impacto	40
7.	Conclusiones y perspectivas.....	47
8.	Bibliografía	49

INTRODUCCIÓN

La ingeniería sísmica estudia el comportamiento de las estructuras sometidas a cargas sísmicas y abarca una gran cantidad de áreas, tales como la dinámica estructural, sismología, geotecnia, análisis y diseño de estructuras. La mayoría de las pérdidas de vidas humanas, daños materiales y los costos en infraestructura que suceden durante un terremoto son debidas principalmente a un comportamiento sísmico deficiente. Se vuelve una necesidad, la preparación de los estudiantes de ingeniería, para que comprendan mejor los conceptos y el comportamiento de estructuras sismo resistentes. La mejor forma para la construcción de conocimiento, el desarrollo del pensamiento crítico y el abordaje de la solución de problemas por parte de los estudiantes es impartiendo la teoría acompañada de desarrollos experimentales que le permitan a los estudiantes entender de manera práctica los conocimientos adquiridos. Sin embargo esta metodología resulta ser costosa y en ocasiones difícil de realizar, debido a que no siempre se cuenta con las instalaciones o equipos necesarios para llevar a cabo los experimentos. Es aquí donde entran en juego los laboratorios simulados o virtuales mediante las tecnologías de la información y comunicación (TIC) [2]. Un laboratorio virtual contribuye en la preparación de ingenieros que comprendan mejor los conceptos relacionados con la ingeniería sísmica mediante la realización de experimentos a través de una plataforma virtual.

El uso del Internet hace posible que educadores y estudiantes puedan capacitarse sin estar sujetos a espacio o tiempo, por ello se hace necesario contar con herramientas que motiven el proceso de aprendizaje y despierten el interés de nuevos saberes frente a un mundo lleno de expectativas que impacten frente a los resultados de sus competencias, con el fin de lograr unos egresados de pregrado y postgrado de Ingeniería Civil en condiciones de resolver situaciones problemáticas que se presenten a lo largo de su profesión.

Con este proyecto se pretende implementar y desarrollar un laboratorio virtual para proporcionar un medio en línea con el fin de realizar experimentos en el área de Ingeniería sísmica. Por tal motivo se desarrolló un módulo académico de Dinámica estructural, que en conjunto con otros módulos desarrollados en la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, conforman el laboratorio virtual. Este módulo de dinámica estructural se programó utilizando el lenguaje html5 y JavaScript, lo cual permite una interfaz más amigable que facilita la interacción del estudiante con la aplicación. Además se desarrolló una página web

que alberga el laboratorio y permite que los usuarios puedan acceder desde internet y descargar los módulos del laboratorio virtual.

1. PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente uno de los retos de la enseñanza en los diferentes cursos de la ingeniería sísmica y dinámica estructural, es brindar una comprensión intuitiva de los temas con la ayuda de una componente de práctica en el laboratorio que permita el acercamiento de los estudiantes al comportamiento real de las estructuras. La mejor forma para la construcción de conocimiento, el desarrollo del pensamiento crítico, el abordaje de la solución de problemas por parte de los estudiantes y la realización de proyectos de investigación en niveles más avanzados de los cursos de pregrado y postgrado es impartiendo teoría acompañada de desarrollos experimentales que le permitan a los estudiantes entender de manera práctica los conocimientos adquiridos. Sin embargo, esta metodología resulta ser costosa y en ocasiones difícil de implementar ya que no siempre se cuenta con las instalaciones o equipos necesarios.

Para superar esta dificultad se hace necesario tener en cuenta las Nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), entre ellas los entornos virtuales de aprendizaje que hacen parte de la cultura tecnológica que nos rodea y con la que debemos convivir. Estas tecnologías amplían las capacidades de aprendizaje de los estudiantes, contribuyendo al desarrollo cultural, social y económico de una comunidad principalmente en países en vía de desarrollo.

En el campo de la ingeniería civil, estas nuevas tecnologías usadas como herramientas de aprendizaje, permiten a los estudiantes comprender mejor los conceptos y el comportamiento estructural por medio de diversas simulaciones. Al interactuar con los laboratorios virtuales los estudiantes se familiarizan con los temas ilustrados permitiéndoles afrontar con eficacia el diseño de estructuras sísmo resistentes.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo promover y facilitar el aprendizaje de los temas de las materias básicas de la ingeniería sísmica y dinámica estructural?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar e implementar un laboratorio virtual de ingeniería sísmica y dinámica estructural.

1.3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar una aplicación web para simular el comportamiento dinámico de estructuras con múltiples grados de libertad, ante cargas armónicas, vibración libre y excitación en la base.
- Diseñar y programar una interfaz gráfica de fácil manejo e intuitiva para el usuario.
- Incluir la generación de reportes de ejercicios en la aplicación web.
- Diseñar y construir la página web para el laboratorio virtual.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. ANTECEDENTES

Actualmente la aplicación del concepto de nuevas tecnologías en la enseñanza, especialmente en el ámbito de prácticas de laboratorio ha dado lugar a la aparición de diferentes modalidades de entornos de experimentación. Desde el punto de vista del estudiante/usuario, los criterios que permiten establecer una clasificación muy clara de estos nuevos entornos son dos: la forma de acceder a los recursos sobre los que se experimenta y la naturaleza del sistema sobre el que se opera. En cuanto al primer criterio, el acceso puede ser local o remoto a través de una red. En lo referente al segundo criterio, los sistemas en los que se operan pueden ser modelos simulados o sistemas reales. Al combinar estos dos criterios se obtienen cuatro clases de entornos [3]:

- El acceso local-recurso real. El alumno realiza la práctica frente a un computador conectado a un sistema real [3].
- El acceso local-recurso simulado. El alumno realiza la práctica correspondiente usando un software de un sistema simulado, virtual e inexistente físicamente [3].
- El acceso remoto-recurso real. El alumno opera y controla de forma remota sistemas reales mediante una interfaz que se ejecuta en un computador conectado a la red. Este enfoque es lo que se denomina laboratorio remoto [3].
- El acceso remoto-recurso simulado. El alumno trabaja sobre un sistema virtual accesible a través de Internet. Es similar a la anterior en cuanto al acceso pero el sistema real se sustituye por un modelo, además presenta como diferencia que pueden trabajar múltiples usuarios simultáneamente sobre el mismo sistema virtual. Estamos pues ante la figura del laboratorio virtual multiusuario o simulación basada en la web [3].

La figura del laboratorio virtual empezó a desarrollarse en 1997 en el Centro de Investigación Académica de la Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica, para los cursos de Biología [4]. Cuatro años después, se realizó un proyecto comercial similar, *Virtual Frog Dissection Kit 1.0* [5], el cual es una aplicación educativa que ayuda a los estudiantes a aprender todo sobre las ranas y sus funciones biológicas, como alternativa a una disección de una rana viva. También encontramos proyectos académicos como *Diffusion Processes Virtual Laboratory* [6], desarrollado en la

Universidad Johns Hopkins de Baltimore, Estados Unidos, para los estudiantes principiantes de ingeniería y ciencias; y el *Virtual Hand Laboratory* [7], un laboratorio de realidad virtual para el estudio de los movimientos de la mano humana de la Universidad de Columbia Británica.

2.2. ESTADO DEL ARTE

La Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle actualmente tienen un laboratorio remoto de estructuras, ingeniería sísmica y dinámica estructural donde se pueden realizar ensayos a distancia. Este laboratorio remoto consta de 3 módulos, correspondientes al Módulo de Estabilidad, Módulo de Resistencia de Materiales y Módulo del Marco Universal [8]. Además en el 2008 se desarrolló una aplicación interactiva para la educación en Dinámica Estructural, ESIDE [9], siendo este el primer intento de la escuela de conformar un laboratorio virtual.

Los laboratorios virtuales son representaciones realizadas a través de software que muestran en una pantalla, objetos que imitan las características físicas de objetos reales. Estos laboratorios enfatizan en técnicas de experimentación práctica y aplicaciones destinadas a realizar un seguimiento continuo de las actividades de los estudiantes [10].

Las principales razones para el uso de laboratorios virtuales son: la disminución en la inversión de costosas máquinas, la poca disponibilidad de tiempo libre en los laboratorios para realizar prácticas que permitan afianzar el conocimiento en un tema específico y la reducción del gasto de elementos. Para la realización de ensayos en ingeniería civil se requieren equipos costosos, personal especializado, grandes instalaciones para ensayar sistemas estructurales a escala real e inversiones costosas en material para el desarrollo de prototipos. Una de las características que mejor define un laboratorio virtual es la interacción, ya que el usuario hace realmente un experimento: sólo se progresa si se suministra al programa informático los datos que necesita para hacer las transformaciones que se desean [11].

Gracias a los laboratorios virtuales, las prácticas de laboratorio se llevan a la pantalla del ordenador y eso permite que cada uno de los estudiantes de todo un curso vea y haga la misma práctica. Además, una vez aprendida la técnica, cualquier estudiante puede repetir individualmente el experimento y sus variantes tantas veces como quiera. Por otra parte, ofrece también la posibilidad de utilizar todo tipo de técnicas y a un costo moderado [11].

Actualmente se han presentado algunos proyectos sobre la utilización del laboratorio virtual, que permiten que los estudiantes puedan acceder a ellos. Entre estos podemos enumerar:

- Proyecto “5a Fachada”: Es un software comercial para el diseño de cubiertas usado por la empresa mexicana Tejas El Águila. Consiste en un laboratorio virtual que realiza el análisis, el cálculo y la optimización de estructuras de acero rolado en frío, así como la cuantificación de los materiales utilizados en la construcción de la techumbre completa [12].
- PhET Interactive Simulations: PhET es un conjunto de simulaciones interactivas para la ciencia y las matemáticas. La mayoría de estas simulaciones se encuentran programadas en HTML5, pero también tienen aplicaciones programadas en otros lenguajes como Java o Flash. Estas simulaciones educativas se pueden ejecutar en línea o descargarse al computador y son de código abierto [13].
- *Virtual Laboratories for Earthquake Engineering (VLEE)*: Es un proyecto del Laboratorio de Tecnología de Estructuras inteligentes en la Universidad de Illinois [14]. Esta herramienta interactiva, de acceso libre, permite realizar “Experimentos Virtuales” sin el uso directo de software especializado en simulación estructural [15]. Este laboratorio se encuentra desarrollado en Java, y cuenta con una serie de simulaciones que describen el comportamiento estructural cuando se utilizan sistemas de control estructural, tales como TMDs y AMDs. Estas simulaciones permiten comparar las diferentes respuestas de un sistema de varios grados de libertad. También permite el análisis de múltiples grados de libertad de pórticos planos de una sola luz [14].
- Laboratorio Virtual de Ingeniería Sísmica LVIS: Ha sido desarrollado como una herramienta para la educación e investigación en ingeniería sísmica en la Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador. En los experimentos virtuales se describe el fundamento teórico, los objetivos y procedimientos de cada experimento. El laboratorio cuenta con unas herramientas de diseño en línea para varios tipos de estructuras y otras herramientas para la simulación del comportamiento estructural. Algunas de estas herramientas usan Opensees como motor de simulación [16]. En la categoría de dinámica estructural este laboratorio está limitado al análisis en el tiempo de sistemas de uno y dos grados de libertad, y el análisis dinámico de un pórtico simple de dos pisos. Por otro lado no muestra al usuario el paso a paso seguido por la aplicación para calcular la respuesta del modelo analizado. Además no realiza una animación de la respuesta del sistema que le permita al usuario familiarizarse con el comportamiento estructural.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. SISTEMAS DE MÚLTIPLES GRADOS DE LIBERTAD

Al número de desplazamientos independientes requerido para definir las posiciones de desplazamiento de todos los nodos de un sistema relativas a su posición de equilibrio original, se le denomina como el número de grados de libertad. Cada nodo en el plano tiene un total de 3 grados de libertad: traslación en x y y , y rotación en el eje z . La respuesta dinámica de sistemas con múltiples grados de libertad, ante una excitación $P(t)$, está dada por la siguiente ecuación de movimiento [17]:

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u = P(t) \quad (1)$$

Éste es un sistema de N ecuaciones diferenciales ordinarias que controlan los desplazamientos $u(t)$ debidos a las fuerzas $P(t)$ aplicadas, en donde: M representa la matriz de Masa, C la matriz de amortiguamiento y K la matriz de rigidez.

La respuesta dinámica de los sistemas lineales con amortiguamiento clásico, puede determinarse usando el análisis modal clásico, el cual, consiste en desacoplar las ecuaciones de movimiento transformándolas a coordenadas modales q_n ($n=1,2,\dots, N$ grados de libertad), como se muestra en la ecuación (2).

$$u(t) = \Phi \cdot q(t) \quad (2)$$

en donde, Φ es la matriz modal del sistema, que se obtiene al resolver el problema matricial de valores propios de la ecuación (3).

$$K \cdot \Phi = M \cdot \Phi \cdot \Omega^2 \quad (3)$$

en donde, Ω es una matriz diagonal con los N valores propios ω_n , que se conoce como la matriz espectral del problema de valores propios. Introduciendo en la ecuación (1) la transformación de coordenadas y pre multiplicando por la transpuesta de la matriz modal, Φ^T , resulta:

$$\Phi^T \cdot M \cdot \Phi \cdot \ddot{q} + \Phi^T \cdot C \cdot \Phi \cdot \dot{q} + \Phi^T \cdot K \cdot \Phi \cdot q = \Phi^T \cdot P(t) \quad (4)$$

La ortogonalidad de los modos naturales implica que las siguientes matrices cuadradas son diagonales:

$$\mathbf{m} = \Phi^T \cdot M \cdot \Phi; \mathbf{c} = \Phi^T \cdot C \cdot \Phi; \mathbf{k} = \Phi^T \cdot K \cdot \Phi$$

Para los sistemas clásicamente amortiguados cada una de las N ecuaciones diferenciales desacopladas tiene la siguiente forma:

$$\mathbf{m}_n \cdot \ddot{q}_n + \mathbf{c}_n \cdot \dot{q}_n + \mathbf{k}_n \cdot q_n = p_n(t) \quad (5)$$

En donde, m_n , c_n y k_n son los elementos de la diagonal de las matrices M , C y K , respectivamente.

Luego se calcula de forma independiente la respuesta en cada modo natural de vibración, $q_n(t)$, y la respuesta total, $u(t)$, se determina mediante la combinación de las N respuestas modales.

3.1. MATRIZ DE RIGIDEZ

La rigidez se define como la fuerza necesaria para producir un desplazamiento unitario en la dirección de la carga. El análisis estructural relaciona la rigidez, el desplazamiento y la fuerza, por medio de la ecuación de equilibrio estático $\{F\} = [K]\{u\}$. Este modelo matemático de múltiples ecuaciones simultáneas, describe el comportamiento de la estructura ante unas cargas estáticas [18].

Para obtener la matriz de rigidez del sistema, se divide la estructura en elementos y se identifican los nodos y las coordenadas nodales que puedan experimentar desplazamientos. Por último se obtiene la matriz de rigidez de cada elemento del sistema y se suma apropiadamente los coeficientes de rigidez, para obtener la matriz del sistema. Este método se denomina método de la rigidez directa [18] [19].

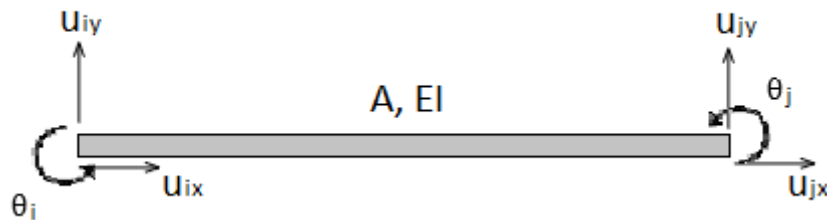


Figura 1. Coordenadas nodales, elemento viga

Para calcular la matriz de rigidez de un elemento, se aplica un desplazamiento unitario a lo largo de una coordenada del nodo j , manteniendo los demás desplazamientos en ceros; para mantener estos desplazamientos es necesario aplicar fuerzas a lo largo de todos los grados de libertad. El coeficiente de rigidez k_{ij} es la fuerza requerida a lo largo del grado de libertad i , debido al desplazamiento unitario en el grado de libertad j [17]. Por lo tanto, para un elemento uniforme, en el plano, unido rígidamente en sus dos extremos la matriz de rigidez elemental que representa su comportamiento, sin tener en cuenta los efectos cortantes, viene dada por:

$$[K] = \begin{bmatrix} A \cdot E/L & 0 & 0 & -A \cdot E/L & 0 & 0 \\ 0 & 12 \cdot EI/L^3 & 6 \cdot EI/L^2 & 0 & -12 \cdot EI/L^3 & 6 \cdot EI/L^2 \\ 0 & 6 \cdot EI/L^2 & 4 \cdot EI/L & 0 & -6 \cdot EI/L^2 & 2 \cdot EI/L \\ -A \cdot E/L & 0 & 0 & A \cdot E/L & 0 & 0 \\ 0 & -12 \cdot EI/L^3 & -6 \cdot EI/L^2 & 0 & 12 \cdot EI/L^3 & -6 \cdot EI/L^2 \\ 0 & 6 \cdot EI/L^2 & 2 \cdot EI/L & 0 & -6 \cdot EI/L^2 & 4 \cdot EI/L \end{bmatrix} \quad (6)$$

En donde L , A , I , son las magnitudes geométricas: longitud, área y momento de inercia, respectivamente, y E la constante de elasticidad longitudinal.

La aplicación de dinámica estructural para múltiples grados de libertad, permite realizar diferentes simplificaciones en cuanto al número de grados de libertad que se quieren usar para el análisis dinámico. Si se desea idealizar la estructura como pórticos a cortante se supone que las vigas en el sistema son rígidas (rigidez infinita) a flexión, y se ignoran otros factores como la deformación axial de las vigas y columnas. Esta idealización de un pórtico, aunque no es real, es conveniente para ilustrar el desarrollo de la ecuación de movimiento de un sistema de MGD.

3.2. MATRIZ DE MASA CONSISTENTE

En un análisis dinámico la masa de una estructura es usada para calcular las fuerzas inerciales. La masa está distribuida en todos los elementos que componen la estructura, aunque puede ser idealizada como una masa concentrada en los nodos de la estructura, es decir, no se consideran efectos inerciales dentro del propio elemento. No obstante, el utilizar matrices de masa consistente da resultados más exactos comparados con los obtenidos usando matrices de masa concentradas con la misma discretización de elementos [18].

Para obtener la matriz de masa, se considera un elemento (Figura 2) con masa distribuida dm y se acelera cada nodo en cada dirección, generando una fuerza inercial en x e y , en el elemento de masa diferencial dm .

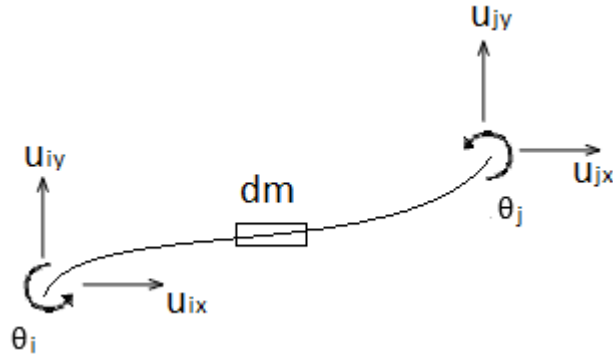


Figura 2. Viga con elemento diferencial dm .

El coeficiente m_{ij} , de la matriz de masa del elemento, se define como la fuerza en la coordenada nodal i ocasionada por una aceleración unitaria en la coordenada nodal j , mientras que todas las otras coordenadas nodales se mantienen con aceleración cero. Al aplicar la segunda ley de Newton, que relaciona el movimiento de la masa con la fuerza inercial, se encuentra la siguiente matriz de masa consistente, en coordenadas locales para un elemento con una masa uniformemente distribuida (m/L) [18] [19].

$$[M] = \frac{m}{420} \cdot \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Una vez que se ha calculado la matriz de masa para cada elemento de la estructura, la matriz de masa para el sistema se compone usando el mismo procedimiento para la composición de la matriz de rigidez, ensamblando cada una de las matrices de masa de los elementos en coordenadas globales.

Para eficiencia computacional se puede utilizar matrices de masas concentradas. Esto significa que no hay acoplamiento de masa entre grados de libertad en nodo o entre diferentes nodos. Pero como se mencionó anteriormente el usar matrices de masa consistente da resultados más exactos. Los valores de masa a lo largo de los grados de libertad restringidos no se tienen en cuenta.

3.3. MATRIZ DE AMORTIGUAMIENTO CLÁSICO

El amortiguamiento clásico es una idealización apropiada si los mecanismos de amortiguamiento que se distribuyen a lo largo de toda la estructura son similares. La forma general de una matriz de amortiguamiento clásico se conoce como el amortiguamiento de Caughey [17]:

$$C = M \sum_{i=0}^{N-1} a_i \cdot [M^{-1} \cdot K]^i \quad (8)$$

Donde, N es el número de grados de libertad en el sistema y a_i son constantes. Si se especifican las razones de amortiguamiento para J modos de un sistema de N grados de libertad, es necesario incluir J términos en la serie Caughey. Si se incluyen los primeros J términos:

$$C = M \sum_{i=0}^{J-1} a_i \cdot [M^{-1} \cdot K]^i \quad (9)$$

y la razón de amortiguamiento modal ζ_n :

$$\zeta_n = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{J-1} a_i \cdot \omega_n^{2 \cdot i - 1} \quad (10)$$

A partir de las razones de amortiguamiento especificadas en J modos, se pueden determinar los coeficientes a_i resolviendo para las incógnitas a_i , en las ecuaciones algebraicas (10).

4. SISMLAB

SISMLAB es un laboratorio virtual de Ingeniería Sísmica, con el propósito de ilustrar de manera didáctica conceptos de diferentes campos de conocimiento, como mecánica de sólidos, dinámica estructural, sismología, geotecnia, geología, análisis estructural y diseño de estructuras. Para el acceso al laboratorio virtual se diseñó una página web (Figura 3), con dirección sismilab.univalle.edu.co, utilizando HTML5 y CSS3 con el fin de lograr un diseño web adaptable, conocido por las siglas RWD del inglés, *Responsive Web Design*. RWD es una filosofía de diseño y desarrollo cuyo objetivo es adaptar la apariencia de las páginas web al dispositivo que se esté utilizando para visualizarla [20]. En la página web encontramos la descripción del laboratorio virtual y se tiene acceso a las diferentes aplicaciones de SISMLAB. La página web se encuentra disponible en inglés y en español.



Figura 3. Página web de SISMLAB

SISMLAB contiene varias aplicaciones agrupadas según el área de interés en tres módulos: Dinámica Estructural, Geotecnia y Análisis de estructuras. Estas aplicaciones se pueden descargar de la página del laboratorio virtual, junto con sus

manuales de usuario. Como característica principal, todas las aplicaciones del laboratorio cuentan con la opción de realizar un reporte en el que se muestra los datos ingresados a la aplicación, el procedimiento y los resultados de los cálculos llevados a cabo por el usuario en la aplicación.

A continuación se describe cada módulo con las aplicaciones que lo componen.

4.1. MÓDULO DE DINÁMICA ESTRUCTURAL

El módulo de Dinámica estructural permite al usuario simular la respuesta dinámica de una estructura. Para este fin el módulo cuenta con dos aplicaciones, una para sistemas de 1 GDL y otra para múltiples GDL.

La aplicación de 1 GDL permite al usuario simular la respuesta dinámica de una estructura modelada como un sistema Masa-Resorte-Amortiguador, tipo Columna o pórtico sometida ante diferentes excitaciones como sistemas de 1 GDL [21] [22].

Esta aplicación fue desarrollada en el marco de un trabajo de grado [21] realizado dentro del proyecto de investigación “Desarrollo e implementación de un laboratorio virtual de Ingeniería Sísmica” [1]. La aplicación de 1GDL se desarrolló en el lenguaje de programación del paquete matemático MATLAB [23]; la cual se encuentra disponible en la página web del laboratorio para su descarga y cuenta con una interfaz que está dividida en cuatro paneles: excitaciones, propiedades del sistema, respuesta y animación del modelo como se muestra en la Figura 4.

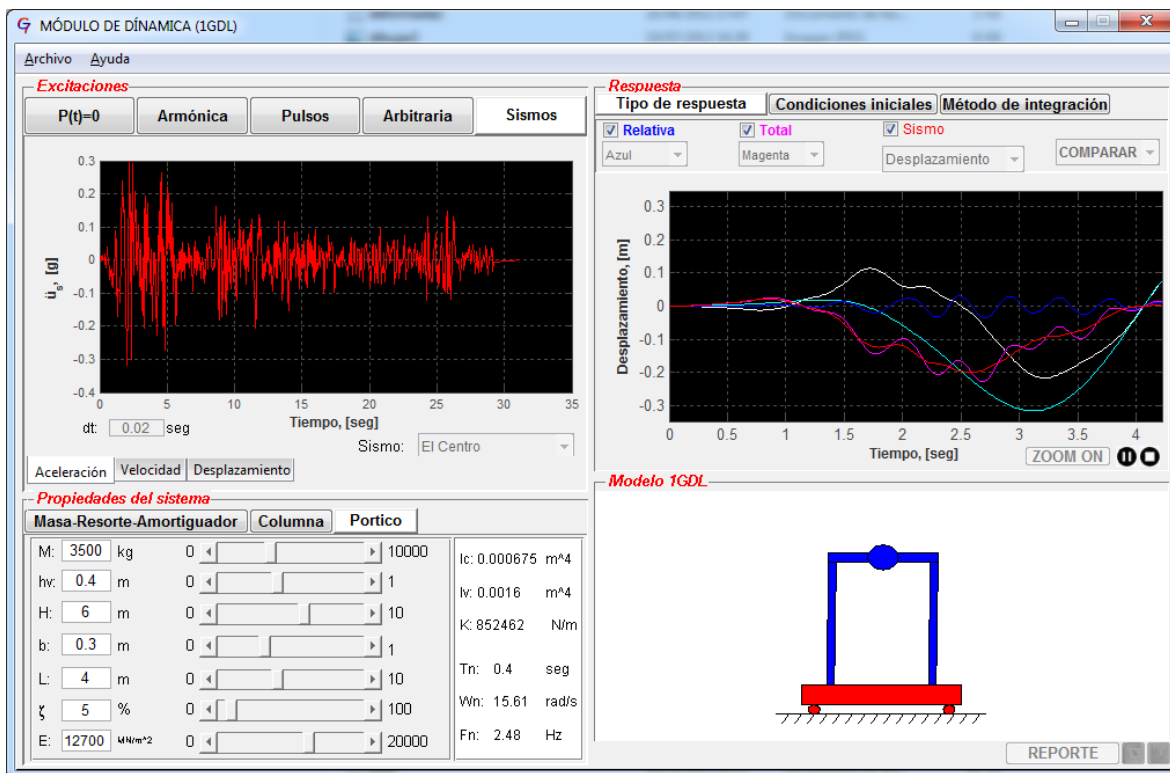


Figura 4. Interfaz gráfica aplicación de sistemas 1GDL.

El usuario puede escoger el tipo de modelo de simulación, entre el sistema masa-resorte-amortiguador, la columna o el pórtico, los cuales simulan una estructura de 1GDL, y variar cuantas veces desee las propiedades del sistema seleccionado.

En el panel de respuesta se grafican las respuestas totales o relativas en desplazamiento, velocidad o aceleración del modelo. En este panel el usuario puede escoger entre los siguientes métodos de integración numérica para calcular la respuesta: Newmark (aceleración promedio o lineal), interpolación de la excitación, diferencias centrales o Runge Kutta.

La aplicación para sistemas de MGDLe permite al usuario crear el sistema estructural que desee modelar mediante una interfaz interactiva (Figura 5), arrastrando unos elementos que se encuentran predefinidos en el panel izquierdo, al panel central e ir armando la estructura. Además, cuenta con diferentes elementos para aplicar excitaciones dinámicas a la estructura, por ejemplo, el usuario puede usar un elemento tipo motor, para cargas o aceleraciones armónicas, y/o un elemento tipo sismo, donde se puede seleccionar uno de los sismos precargados en la aplicación o subir el archivo del sismo que desee usar [22].

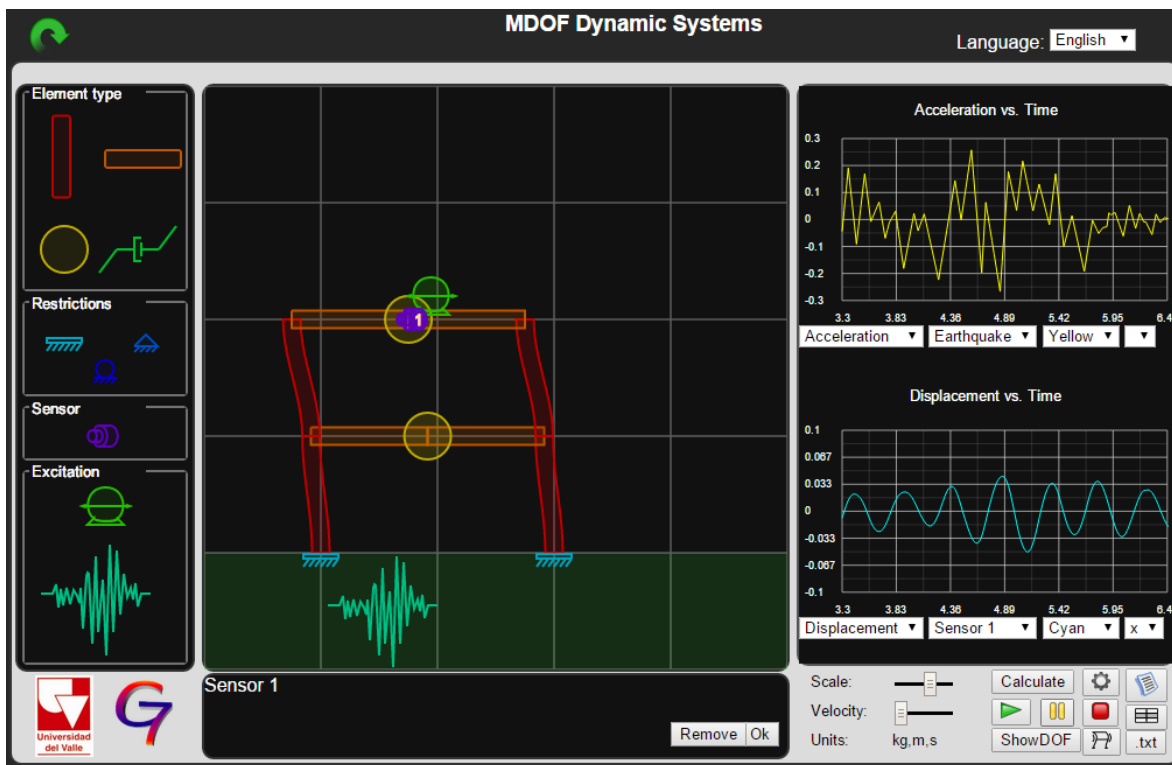


Figura 5. . Interfaz gráfica sistemas de múltiples grados de libertad (MGDL).

La respuesta dinámica del sistema modelado se obtiene mediante la solución de la ecuación de movimiento de un sistema de MGDL, usando su solución exacta para el caso de cargas armónicas y resolviendo mediante método numérico Runge Kutta para excitaciones sísmicas; determinando la respuesta dinámica en desplazamiento, velocidad y aceleración. Esta aplicación se encuentra programada en lenguaje html5 y JavaScript, siendo la única aplicación del laboratorio virtual SISMILAB que se puede ejecutar en línea. En el capítulo 5 se encuentra una descripción detallada de la aplicación.

4.2. MÓDULO DE GEOTECNIA

El módulo de geotecnia le permite al usuario considerar la influencia del suelo sobre la respuesta dinámica de la estructura, permitiendo realizar un análisis más real. Este se encuentra conformado por dos aplicaciones realizadas en el paquete matemático MATLAB: Interacción estática suelo-estructura (IESE) y Efectos de Sitio (EFE-SIO), las cuales se desarrollaron en el marco de dos trabajos de grado realizados dentro del proyecto de investigación “Desarrollo e implementación de un laboratorio virtual de Ingeniería Sísmica” [1]. La aplicación IESE (Figura 6) tiene como finalidad el análisis y la comparación de los diagramas de solicitaciones internas en una cimentación superficial considerando aspectos como las

deflexiones, la rigidez y las distribuciones de presiones en el contacto del suelo, además cuenta con ayudas para determinar las propiedades esfuerzo-deformación para diferentes tipos de suelo [24].

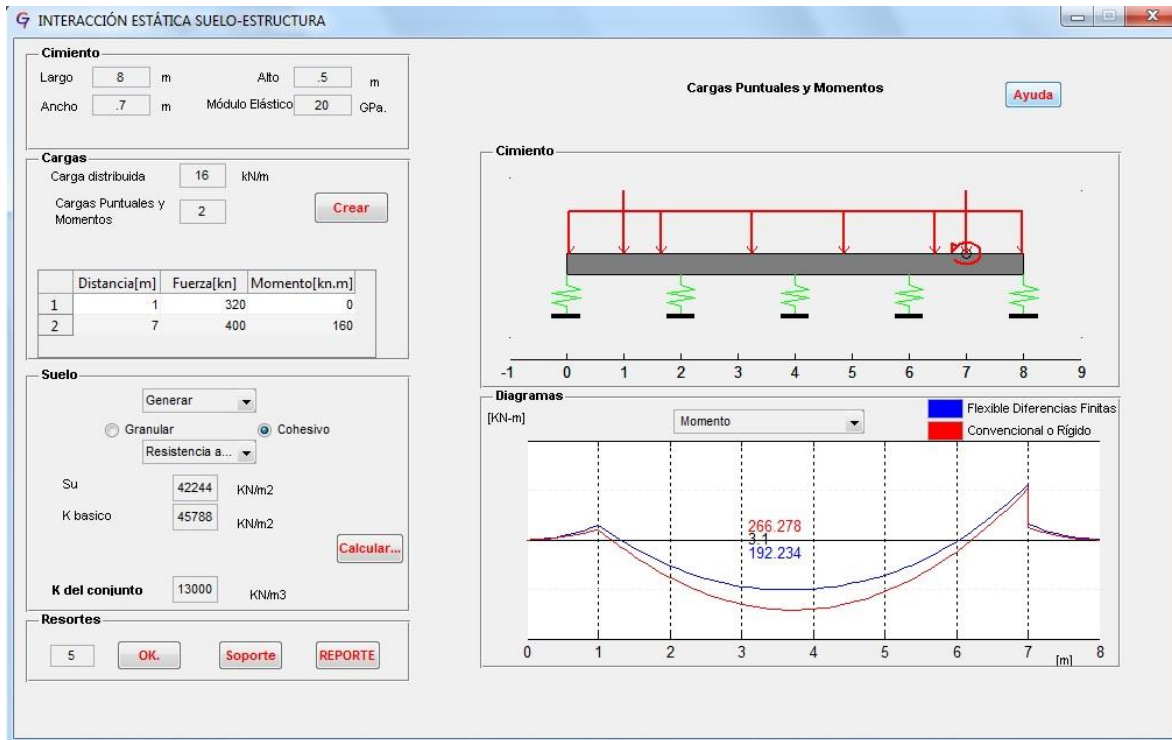


Figura 6. Interfaz gráfica IESE.

EFE-SIO es una aplicación para el análisis de efectos de sitio y la propagación de ondas en una dimensión [24] [25]. Cuenta con una interfaz gráfica intuitiva (Figura 7) en donde el usuario puede evaluar cuatro tipos de perfiles estratigráficos ante una solicitación sísmica, ésta puede ser seleccionada de entre los sismos de la base de datos de la aplicación u otro ingresado por el usuario. La aplicación muestra los resultados de la respuesta del estrato de suelo en aceleración, velocidad, esfuerzo cortante y desplazamiento, para cuatro condiciones: suelo uniforme no amortiguado sobre roca rígida, suelo uniforme amortiguado sobre roca rígida, suelo uniforme amortiguado sobre roca elástica, y suelo uniforme estratificado sobre roca elástica [25].

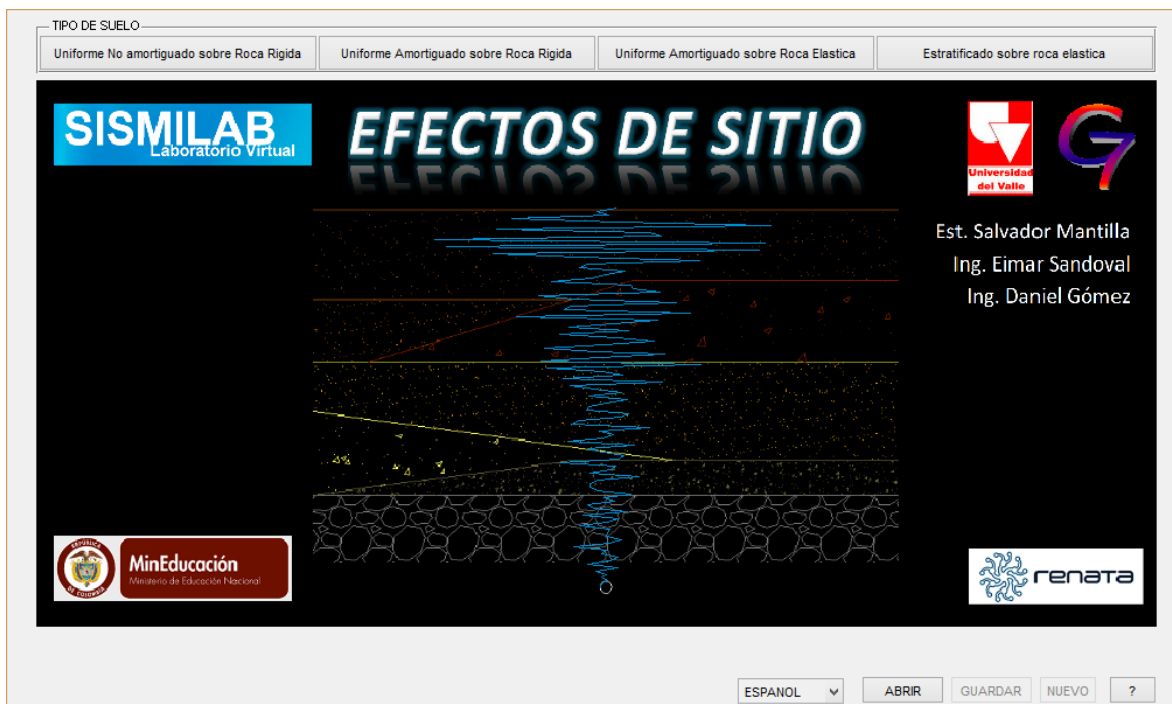


Figura 7. Interfaz gráfica aplicación EFE-SIO.

4.3. MÓDULO DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El módulo de Análisis estructural cuenta con dos aplicaciones realizadas en el paquete matemático MATLAB: Una aplicación realiza el análisis de vigas basado en métodos energéticos y el método de Cross, SAM, y la segunda que realiza el análisis por el método matricial de las rigideces, a pórticos planos, emparrillados y pórticos en el espacio, MODES. Las cuales son producto de dos trabajos de grado [26] [27] realizados en el marco del proyecto de investigación “Desarrollo e implementación de un laboratorio virtual de Ingeniería Sísmica”

SAM (Figura 8) es un programa [28] computacional para el análisis estructural de vigas estáticamente determinadas o indeterminadas. Adicionalmente cuenta con una aplicación para el análisis de esfuerzos en el plano y otra para determinar las propiedades geométricas de secciones. Mediante SAM, el usuario puede determinar los diagramas de momento, cortante y reacciones, por tres métodos diferentes: método de distribución de momentos (Cross), método de las deformaciones y método de las fuerzas. De igual manera permite determinar la línea de influencia para momento y cortante de un sistema definido previamente por el usuario [26] [28].



Figura 8. Interfaz gráfica aplicación SAM.

La aplicación MODES (Figura 9) permite crear estructuras en dos y tres dimensiones, los nudos y elementos de las estructuras pueden estar sometidos a cargas puntuales (fuerzas o momentos concentrados) y los elementos a cargas distribuidas (constantes o trapezoidales). Además de poder asignar cualquier tipo de restricción a los nodos, tiene una opción para asignarles resortes y desplazamientos. El análisis estructural se realiza por el método matricial de las rigideces, y se puede realizar para pórticos planos, emparrillados y pórticos en el espacio, con la opción de considerar la energía de deformación por esfuerzo cortante y efectos P-Delta o de segundo orden. Los resultados finales del análisis estructural son los diagramas de momentos, cortantes y normales en los elementos, las reacciones en los apoyos, las deformaciones, y la gráfica de la estructura deformada [27] [28].

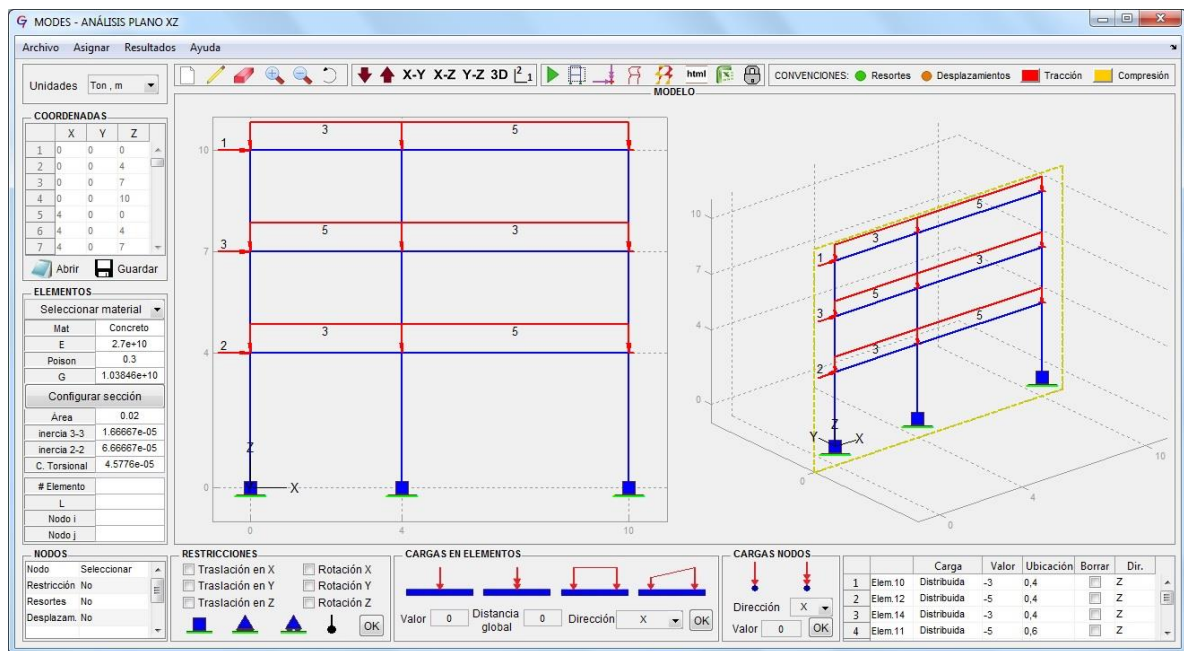


Figura 9. Interfaz gráfica aplicación MODES.

5. APLICACIÓN MGD

5.1. DESCRIPCIÓN

MGD es una aplicación web que permite modelar sistemas de múltiples grados de libertad (MGD) y simular su respuesta ante diferentes cargas dinámicas. El usuario puede construir el modelo a partir de unos elementos definidos y formar hasta un pórtico plano de 5 vanos y 4 pisos. Para el análisis dinámico de la estructura la aplicación permite escoger los grados de libertad con los que el usuario quiere trabajar; en el caso de las cargas, el usuario puede simular la respuesta dinámica del sistema ante las siguientes excitaciones:

- Fuerzas armónicas sobre la estructura.
- Aceleración armónica en la base.
- Sismos predefinidos (Sismo de Armenia, El Centro, Loma Prieta, México, Páez) o cargados por el usuario.
- Condiciones iniciales (vibración libre).

La respuesta dinámica del sistema modelado se obtiene mediante la solución de la ecuación de movimiento de un sistema de MGD, usando su solución exacta para el caso de cargas armónicas y resolviendo mediante método numérico Runge Kutta para excitaciones sísmicas; determinando la respuesta dinámica en desplazamiento, velocidad y aceleración. La aplicación también cuenta con la opción de exportar los resultados del análisis en un reporte, con los parámetros dinámicos (matriz de rigidez, masa y amortiguamiento), las propiedades dinámicas (Matriz modal y frecuencias naturales) de la estructura modelada y las gráficas de la excitación y la respuesta dinámica de la estructura en los nodos seleccionados por el usuario.

La aplicación cuenta con una interfaz gráfica amigable con el usuario, que le permite crear diferentes configuraciones para el sistema estructural que desee modelar. Además, se encuentra programada en lenguaje html5 y JavaScript con el fin de poder utilizarlo en línea. Para el diseño de esta interfaz se utilizó la librería de JavaScript Raphaël.js [6], para las gráficas y animaciones, y las librerías Matrix.js, LUDecomposition.js, QRDecomposition.js y EVDecomposition.js [7] para los cálculos con matrices.

5.2. PROCESO BÁSICO

Los pasos básicos para la modelación de una estructura como un sistema dinámico de MGD, usando el módulo de dinámica de estructuras de MGD, se mencionan a continuación:

1. Crear la estructura arrastrando los elementos predefinidos en el panel de elementos (panel izquierdo), al panel central.
2. Definir las propiedades de cada uno de los elementos.
3. Asignar los apoyos.
4. Agregar las diferentes excitaciones dinámicas al modelo.
5. Ejecutar el análisis.
6. Iniciar la simulación de la respuesta dinámica.

5.3. INTERFAZ DEL MÓDULO DE DINÁMICA ESTRUCTURAL

El Módulo de dinámica estructural de MGD cuenta con una interfaz gráfica amigable con el usuario programada en el lenguaje html5 y JavaScript, como se muestra en la Figura 10. Esta interfaz cuenta con cinco paneles, numerados a continuación:

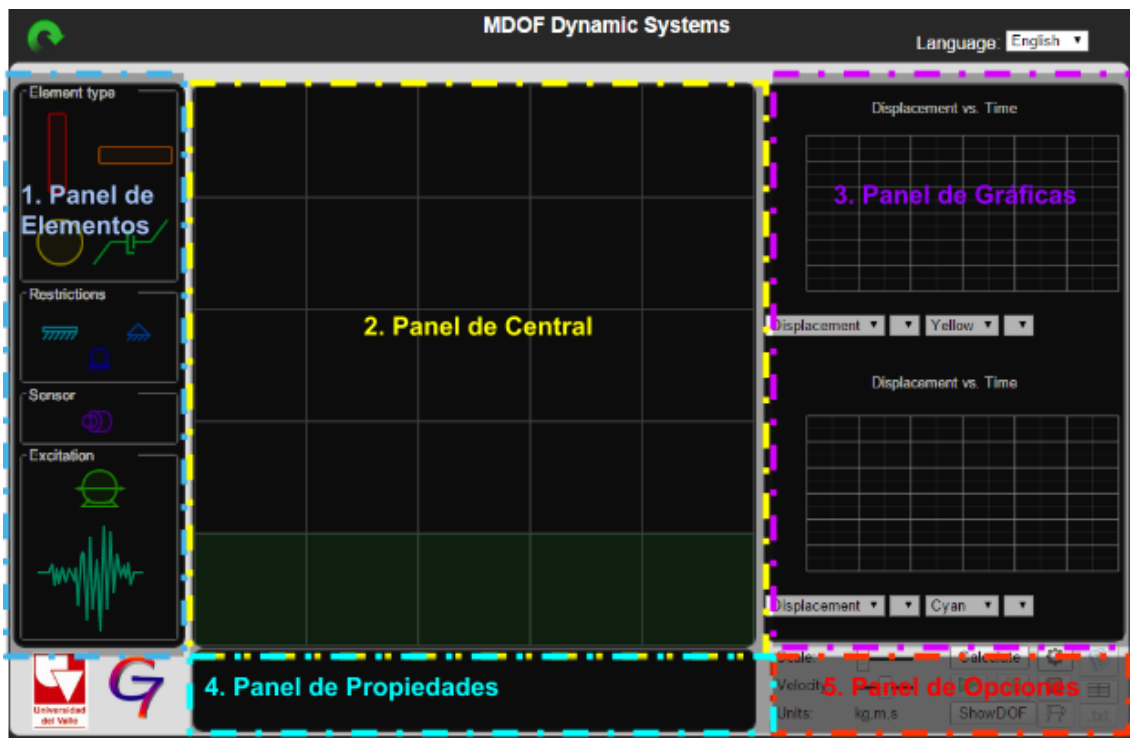
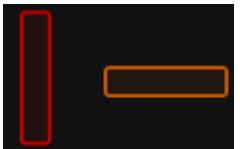


Figura 10. Interfaz de MGD

5.3.1 Panel de elementos

Este panel, ubicado al lado izquierdo, contiene los elementos con que el usuario dispone para poder crear la configuración estructural deseada. A continuación, en la Tabla 1, se encuentra una descripción de algunos de los elementos:

	<i>Elemento tipo viga y tipo columna:</i> elementos estructurales para armar la estructura.
	<i>Masa:</i> asigna una masa concentrada en el grado de libertad en el que se ubique.
	<i>Amortiguador:</i> se utiliza para asignar el amortiguamiento por pisos.

	Apoyos: asigna restricciones en los nodos. Los apoyos disponibles son empotramiento, traslación y giro restringido; apoyo simple, permite el giro; y rodillo, solo restringe traslación en Y.
---	--

Tabla 1. Elementos para definir la estructura

5.3.2 Panel central

En este panel se crea la estructura a analizar, arrastrando los elementos del primer panel armando la estructura como se muestra en la Figura 11. Este panel tiene predefinida una cuadrícula que permite crear pórticos de hasta 5 luces y 4 pisos. La sección de color verde es la superficie de apoyo para las estructuras, y en donde se colocan los elementos, como motores o sismos, para indicar movimientos de suelo.

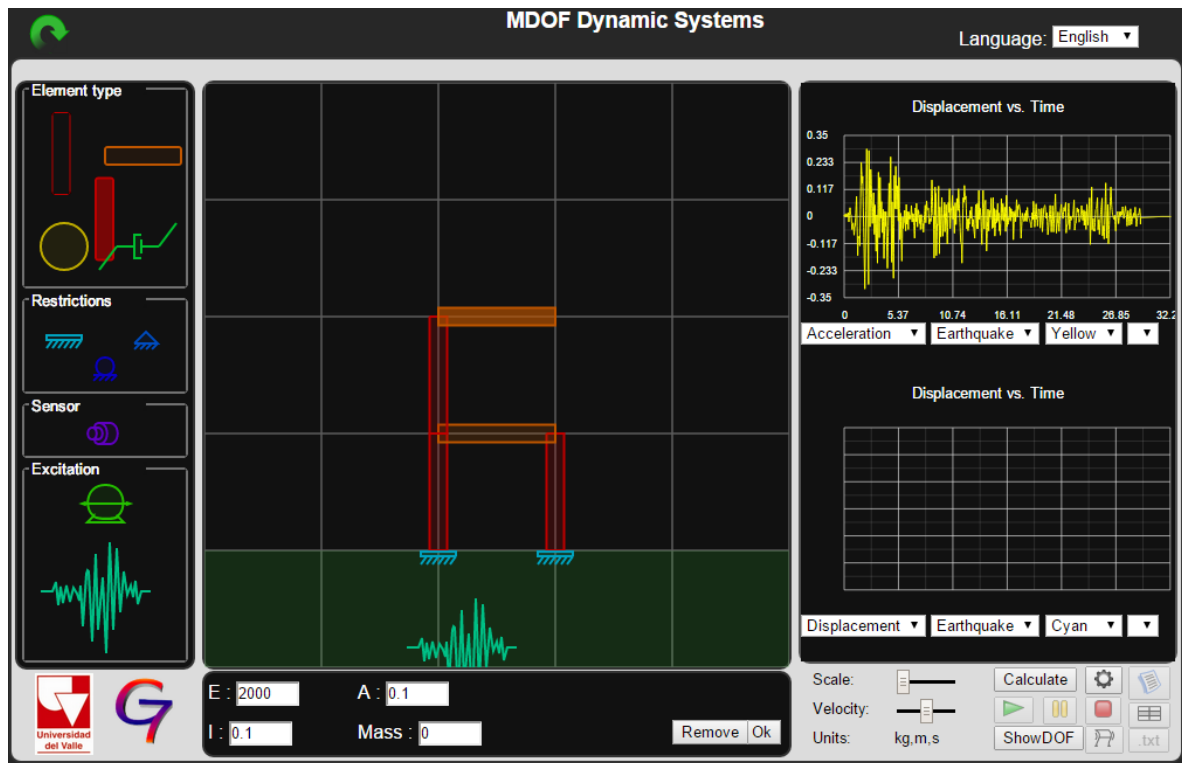


Figura 11. Ejemplo definición de estructura

5.3.3 Panel de gráficas

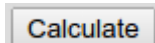
Este panel nos permite ver las gráficas de las cargas dinámicas y/o aceleraciones aplicadas al sistema y la respuesta de los sensores que el usuario agregue a la estructura, en desplazamiento, velocidad y aceleración. Cuenta con dos gráficas en las cuales se puede seleccionar el elemento a graficar (sismo, respuesta en sensor o motor), tipo de gráfica (desplazamiento, velocidad o aceleración), el color de la gráfica y en el caso de los sensores, el grado de libertad del nodo (en x o en y).

5.3.4 Panel de propiedades

En este panel se muestran las propiedades del elemento seleccionado en el panel central y éstas pueden ser modificadas. En la Figura 11 se puede observar las propiedades de un elemento en el panel de propiedades.

5.3.5 Panel de opciones

En la Tabla 2 se muestran los botones del panel de opciones:

	Configuración, se despliega un menú (Figura 12) con las opciones de configuración, entre estas opciones encontramos la longitud de la cuadrícula y la selección de las unidades para la gravedad.
	Ejecuta los cálculos de las propiedades dinámicas y la respuesta del sistema.
	Corre la simulación del sistema dinámico.
	Pausa la simulación.
	Para la simulación y grafica la respuesta.
	Permite ver al usuario un reporte con las propiedades y parámetros dinámicos del sistema, las gráficas de las excitaciones y las gráficas

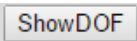
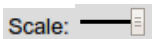
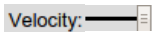
	de la respuesta en desplazamiento, velocidad y aceleración de los sensores.
	Despliega una página web con los datos tabulados de la respuesta dinámica en desplazamiento, velocidad y aceleración.
	Permite ver la animación de los modos propios de vibración de la estructura.
	Permite al usuario exportar un archivo con las propiedades y parámetros dinámicos del sistema, los datos de las excitaciones y la respuesta en desplazamiento, velocidad y aceleración de cada grado de libertad.
	Despliega un menú con las opciones para seleccionar los grados de libertad que se desea usar en el análisis dinámico, con opciones rápidas como condensar giros, analizar como pórtico a cortante y desprestigiar deformaciones axiales en las columnas. Además muestra en el panel central los grados de libertad activos sobre los elementos (Figura 13).
	Escala la respuesta durante la simulación en el panel central.
	Cambia la velocidad de la simulación.

Tabla 2. Botones del panel de opciones

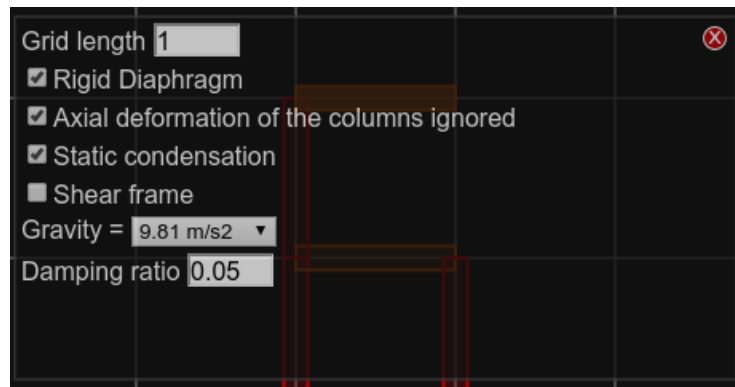


Figura 12. Menú de opciones

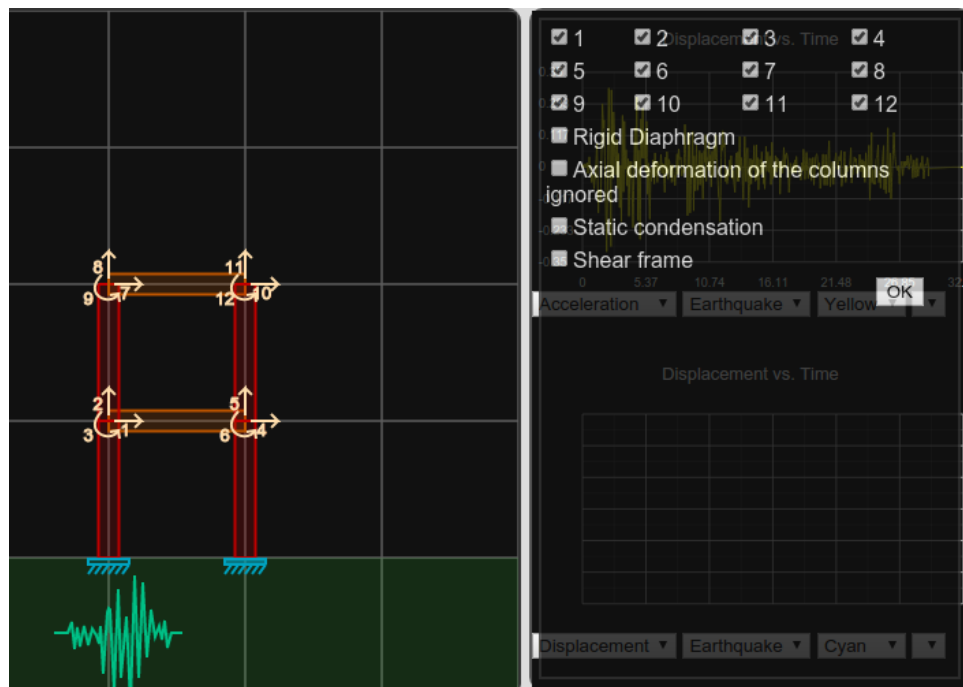


Figura 13. Grados de libertad

La aplicación permite alternar el idioma mediante un menú desplegable en la parte superior derecha. Además cuenta con un botón  en la parte superior izquierda para recargar la página y poder realizar un nuevo análisis dinámico.

Al sistema dinámico introducido en los pasos anteriores, el usuario le puede agregar una combinación de las siguientes excitaciones dinámicas:

5.4. EXCITACIONES DINÁMICAS

A la estructura creada, el usuario le puede agregar una combinación de las siguientes excitaciones dinámicas:

5.4.1 Carga armónica



Motor: Con este elemento se pueden agregar una o más cargas armónicas en los pisos donde se coloque. En cada elemento se puede modificar el valor de la amplitud de la fuerza, P_0 , y la frecuencia de excitación, ω [rad/seg].

5.4.2 Aceleración armónica en el suelo



Al colocar un motor sobre el nivel del suelo, este cambia de ser una carga armónica a aplicar una aceleración armónica al suelo. A diferencia de las cargas en los diferentes pisos, solo se admite una aceleración armónica del suelo.

5.4.3 Sismos

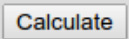


Sismo: junto con la carga armónica y la aceleración en el suelo, el usuario puede agregar un sismo a la estructura arrastrando este elemento al panel central. El programa cuenta con los siguientes sismos precargados: El centro, Armenia, Loma Prieta, México, Páez, Gilroy y La Vega. El usuario también puede subir los datos de un sismo, haciendo clic en *Seleccionar Archivo* de las propiedades del sismo. Los datos deben estar en un archivo de extensión *.txt*, en una sola columna, unidades de gravedad y el primer dato debe ser el paso del tiempo Δt .

5.4.4 Vibración libre

Para el caso de vibración libre la aplicación permite agregar condiciones iniciales a la estructura por medio de los elementos tipo masa. Al colocar un elemento tipo masa en un nodo, dentro de las propiedades del elemento se encuentra la opción para agregar condiciones iniciales distintas de cero en la dirección X del nodo donde se coloca. El usuario puede determinar el desplazamiento inicial, u_0 [Longitud] o la velocidad inicial, v_0 [Longitud/Tiempo (seg)].

5.5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para realizar el análisis dinámico del sistema ingresado, se presiona el botón Calcular  ubicado en el panel de opciones. La aplicación primero comprobará si el sistema es estable o inestable, si el sistema es inestable la

aplicación desplegará un aviso en el que le informa al usuario que su sistema es inestable. Si el sistema es estable, la aplicación calculará los parámetros dinámicos (matriz de rigidez, de masa y de amortiguamiento) y las propiedades dinámicas del sistema (frecuencias naturales y matriz modal).

Usando el botón *play*  el usuario puede empezar a reproducir la simulación del sistema dinámico en el panel central y en las gráficas. Durante la simulación es posible cambiar el elemento que se está graficando, por defecto la gráfica de arriba está dispuesta para las excitaciones y la de abajo para la respuesta de los sensores, como se muestra en la Figura 14. También es posible cambiar el color de la gráfica y ver la respuesta en aceleración, velocidad y desplazamiento.

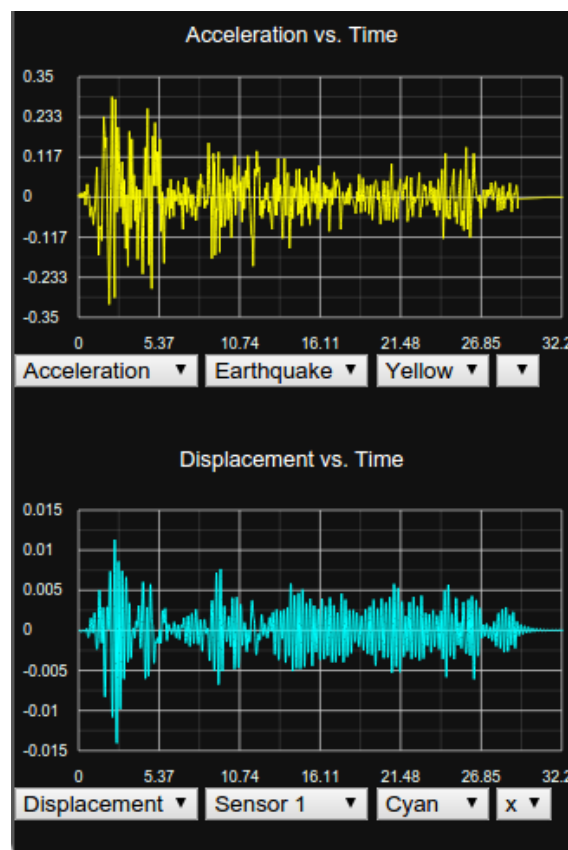


Figura 14. Gráficas de la excitación (arriba) y la respuesta (abajo)

Al utilizar un elemento tipo sensor  se grafica la respuesta del nodo en que se ubique. A cada sensor que se ubique en el panel central se le asigna un número que permite identificarlo de los demás.

5.5.1 Modos de vibración

La aplicación permite observar la animación de los modos de vibración de la estructura, usando el botón . Al presionarlo aparece un menú emergente preguntando al usuario el modo que desea ver. En la Figura 15 se muestra un ejemplo del segundo modo de vibración graficado de una estructura.

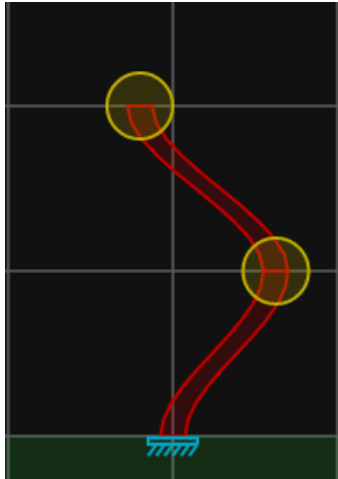


Figura 15. Animación de un modo de vibración

5.5.2 Reporte

Utilizando el botón , se despliega una página web con un reporte del análisis realizado con la aplicación. El reporte incluye:

5.5.2.1 Sistema dinámico

En esta primera sección se encuentran las configuraciones tomadas en cuenta para el análisis dinámico, longitud de la cuadrícula, consideraciones de los grados de libertad y el valor de la constante de gravedad, según las unidades. Además, se muestra una gráfica del modelo analizado con los grados de libertad tenidos en cuenta, como se observa en la Figura 16, los parámetros dinámicos de la estructura (Figura 17), es decir, las matrices de rigidez, masa y amortiguamiento, y las propiedades dinámicas del modelo (Figura 18), es decir, las frecuencias naturales y la matriz modal.

Analyzed Model

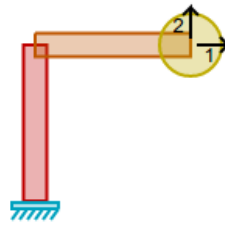


Figura 16. Grados de libertad de un modelo en el reporte.

Dynamic parameters of the model

Stiffness Matrix

	1	2
1	13301.205	-867.47
2	-867.47	578.313

Mass Matrix

	1	2
1	20	0
2	0	20

Damping Matrix

	1	2
1	0	0
2	0	0

Figura 17. Parámetros dinámicos de un modelo en el reporte.

Dynamic properties of the model

Natural frequency [rads/seg]

5.096
25.846

Modal Matrix Φ

-0.068	0.998
-0.998	-0.068

Figura 18. Propiedades dinámicas de un modelo en el reporte.

5.5.2.2 Excitación

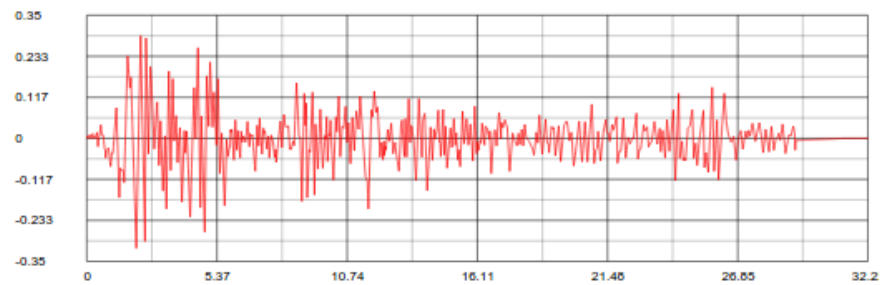
En esta sección del reporte, se muestran las gráficas y los respectivos datos de las diferentes excitaciones dinámicas aplicadas al modelo. En la Figura 19 se puede observar la gráfica de un sismo y de una aceleración armónica en la base aplicada a un modelo presentadas en un reporte.

2. Excitation

Earthquake

The earthquake excitation: El Centro

Time [s] vs Acceleration [g]



Harmonic acceleration at the base

Amplitude = 0.5 [g] $\omega = 3$ [rad]

Time [s] vs Acceleration [g]

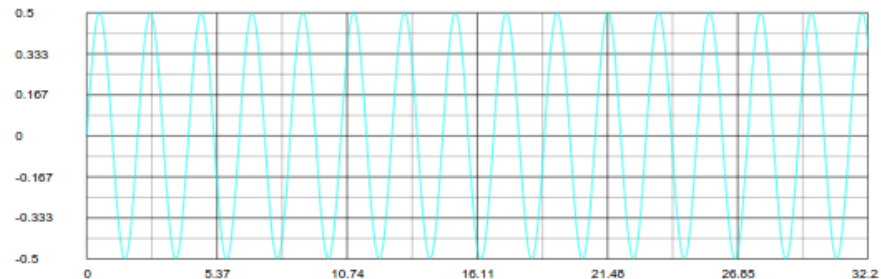


Figura 19. Excitaciones aplicadas a la estructura. Reporte.

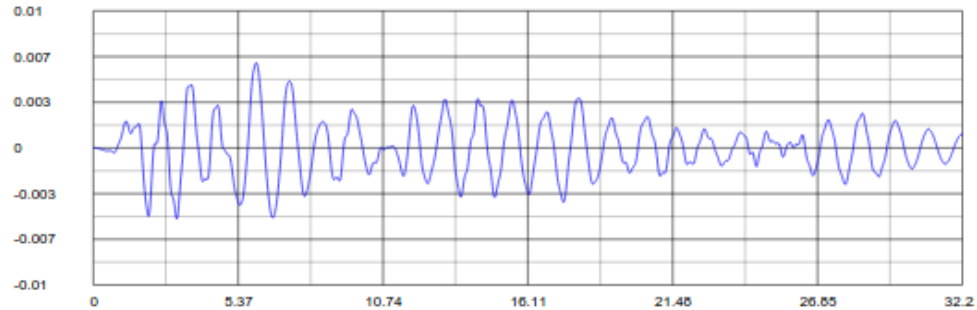
5.5.2.3 Resultados

En esta última sección se muestran las gráficas de desplazamiento, velocidad y aceleración vs tiempo, de cada uno de los sensores ubicados en la estructura. En la Figura 20, se puede observar las gráficas de la respuesta en desplazamiento, velocidad y aceleración del segundo grado de libertad de la estructura mostrada en la Figura 16.

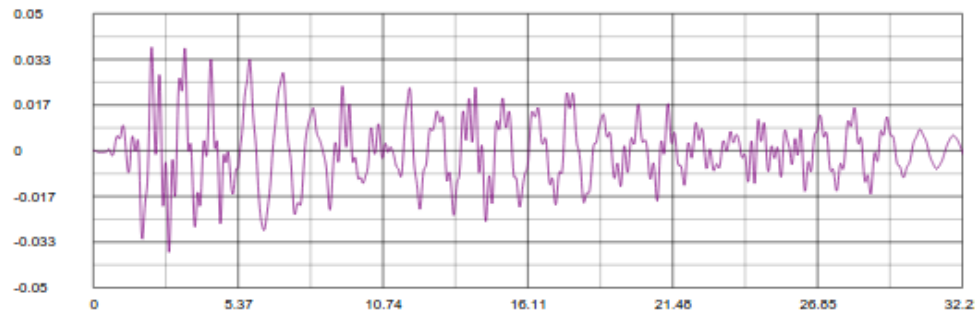
Time [s] vs. Acceleration [m/s^2]

Degree of freedom 2

Time [s] vs. Displacement [m]



Time [s] vs. Velocity [m/s]



Time [s] vs. Acceleration [m/s^2]

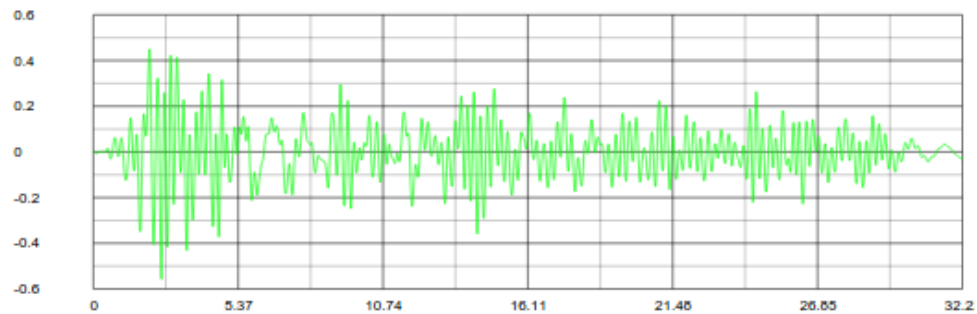


Figura 20. Respuesta en desplazamiento, velocidad y aceleración en un grado de libertad. Reporte.

5.5.3 Exportar datos

La aplicación de MGDL del módulo de dinámica estructural permite exportar los resultados haciendo clic en el botón **.txt**. La aplicación mostrará un menú (Figura 21), en el cual se puede seleccionar los datos a exportar en el archivo, entre los cuales están las propiedades y parámetros dinámicos del sistema, los datos de las excitaciones y la respuesta en desplazamiento, velocidad y aceleración de cada grado de libertad. Usando el botón , se despliega una página web con los datos tabulados de la respuesta dinámica en desplazamiento, velocidad y aceleración.



Figura 21. Menú de datos a exportar en un archivo .txt.

6. EVALUACIÓN DEL IMPACTO

Con el fin de evaluar el impacto del laboratorio virtual SISMILAB en el proceso de enseñanza-aprendizaje, se realizaron encuestas a estudiantes de varios cursos del Programa Académico de Ingeniería Civil de pregrado y del énfasis en Ingeniería Civil de la Maestría en Ingeniería de la Universidad del Valle, antes y después del uso de las aplicaciones del laboratorio. El procedimiento que se siguió para la realización de las encuestas se describe a continuación.

Primero, se realizó una introducción a la temática tratada en cada módulo, seguido de una encuesta antes de usar la aplicación, en la cual se evaluó la asimilación de la temática de manera tradicional. En segundo lugar, se les entregó a los estudiantes un taller correspondiente al tema tratado para desarrollarlo usando la aplicación. Por último se realizó una post-encuesta a los estudiantes, para evaluar la asimilación de los conceptos al usar la aplicación.

El objetivo de la pre-encuesta es evaluar la percepción del estudiante, la metodología y las ayudas didácticas utilizadas en el curso, en donde los estudiantes le otorgan una valoración entre 1 y 5 a cada punto, siendo 5 la valoración más alta. En la Tabla 3 se muestran las preguntas de la pre-encuesta.

1. ¿Qué tan fácil es visualizar e interpretar los conceptos teóricos de la materia con la metodología actual?
2. ¿Qué tan fácil es la comprensión del componente matemático relacionado con la materia o tema?
3. ¿Qué tan fácil es la visualización e interpretación del fenómeno físico con la metodología actual?
4. ¿Qué tan clara es la presentación de los diferentes temas de clase para la apropiación de los conceptos relacionados con la materia?
5. ¿Qué tan clara es la relación entre los conceptos presentados en el curso y los problemas de la vida real?
6. ¿Evalúe su capacidad para resolver los problemas relacionados con la materia?
7. ¿Qué tan eficiente es el material empleado en la materia (bibliografía, herramientas computacionales, internet, etc.) para la comprensión de los conceptos?
8. ¿Qué tan fácil es evaluar, con la formulación matemática vista en la materia, los diferentes resultados debidos a cambios en los parámetros de entrada?
9. ¿Qué tan manejables, intuitivas e interactivas son las herramientas computacionales relacionadas con el tema para facilitar la comprensión de los conceptos?
10. ¿Qué tan útil y didácticas son las herramientas computacionales actuales para comprender los conceptos de la materia o tema?

Tabla 3. Preguntas de la pre-encuesta

La post-encuesta intenta evaluar la percepción del estudiante después de conocer la herramienta computacional como ayuda metodológica del curso, en donde los estudiantes le otorgan a cada una valoración entre 1 y 5 a cada punto, siendo 5 la valoración más alta. En la Tabla 4 se muestran las preguntas de la post-encuesta.

1. ¿Con la herramienta computacional, qué tan fácil es visualizar e interpretar los conceptos teóricos de la materia?
2. ¿Con la herramienta computacional, qué tan fácil es la comprensión del componente matemático relacionado con la materia o tema?
3. ¿Con la herramienta computacional, qué tan fácil es la visualización e interpretación del fenómeno físico con la metodología actual?
4. ¿Con la herramienta computacional, qué tan clara es la presentación de los diferentes temas de clase para la apropiación de los conceptos relacionados con la materia?
5. ¿Con la herramienta computacional, qué tan clara es la relación entre los conceptos presentados en el curso y los problemas de la vida real?
6. ¿Con la herramienta computacional, evalúe su capacidad para resolver los problemas relacionados con la materia?
7. ¿Qué tan eficiente es la herramienta computacional como complemento al material disponible en el curso?
8. ¿Con la herramienta computacional, qué tan fácil es evaluar los diferentes resultados debidos a cambios en los parámetros de entrada?
9. ¿Qué tan manejable, intuitiva e interactiva es la herramienta computacional comparada con las que usted conocía?
10. ¿Qué tan útil y didáctica fue la herramienta computacional para comprender los conceptos de la materia o tema?

Tabla 4. Preguntas de la post-encuesta

De la Figura 22 a la Figura 26, se muestra las gráficas de barras de los resultados de las encuestas realizadas. Para la evaluación de los resultados se usó el Índice Alfa de Cronbach [29], el cual permite cuantificar el nivel de fiabilidad de los datos recolectados. La percepción sobre el uso del laboratorio se midió durante cuatro semestres, sin embargo, para medir realmente el impacto que tiene sobre el proceso de enseñanza-aprendizaje, debe hacerse un seguimiento de varios años.

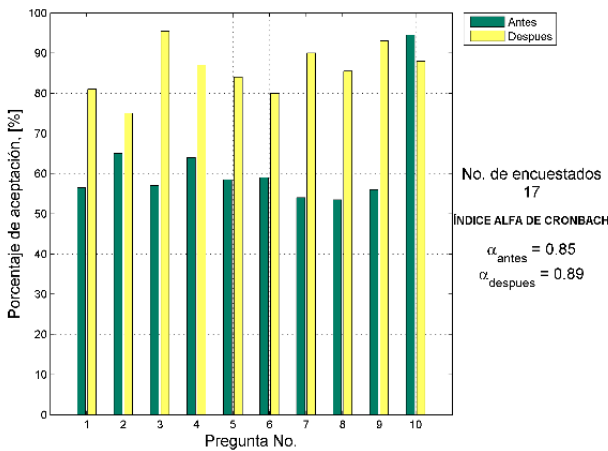


Figura 22 . Encuesta del curso dinámica avanzada de postgrado, en el 2012

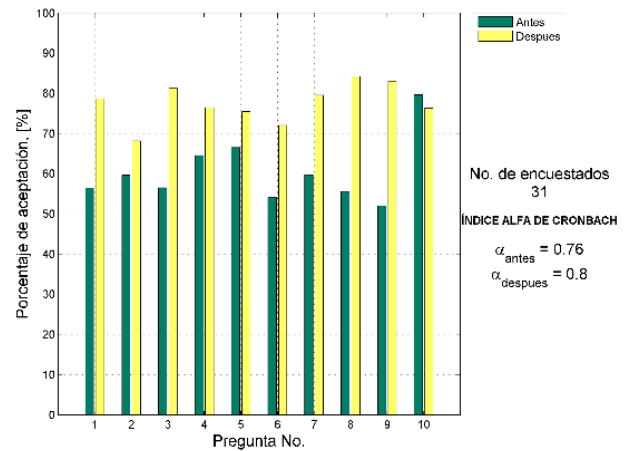


Figura 23 Encuesta del curso fundamentos de dinámica estructural de pregrado, en el 2012

En los resultados de las Figuras 22 y 23, se observa un incremento en el porcentaje de aceptación de al menos un 23% por los estudiantes de pregrado y de un 42% por los estudiantes de postgrado en la calificación dada a la pregunta número 3. Lo que nos permite concluir que para los estudiantes fue más fácil visualizar e interpretar los fenómenos físicos deducidos en clase, utilizando las aplicaciones del Módulo de Dinámica Estructural. Otro de los aspectos destacados por los estudiantes es la eficiencia de la herramienta computacional como complemento al material disponible en el curso, como se observa en la calificación de la pregunta número 7 de las encuestas.

Al analizar en la Figura 24, la calificación dada por los estudiantes del curso Ingeniería Sísmica a la pregunta número 8, se observa que la característica mejor valorada de las aplicaciones es que el usuario puede variar, cuantas veces desee, las propiedades del sistema seleccionado, sin necesidad de crear un nuevo modelo.

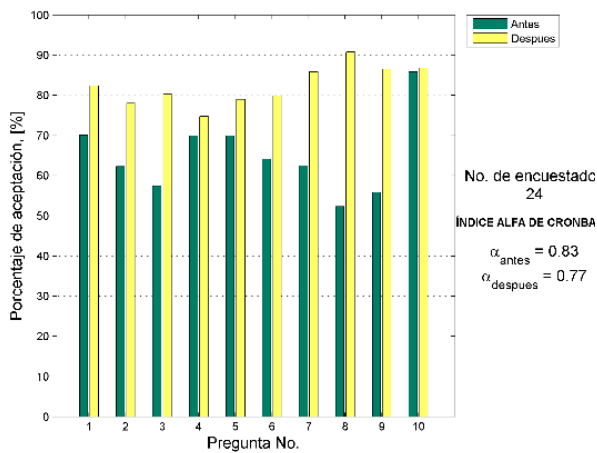


Figura 24. Encuesta del curso ingeniería sísmica de pregrado, en el 2013

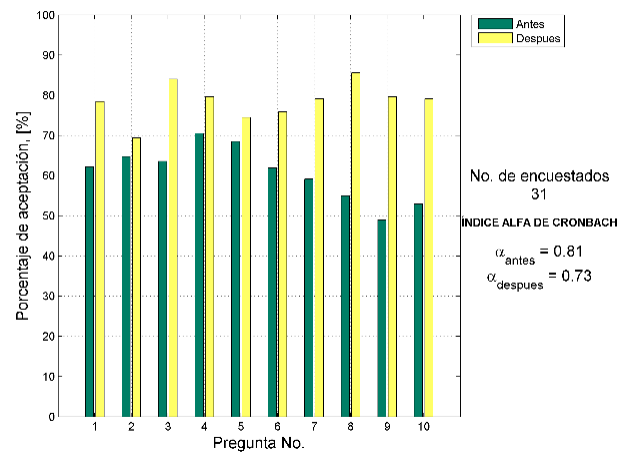


Figura 25 Encuesta del curso fundamentos de dinámica estructural de pregrado, en el 2013

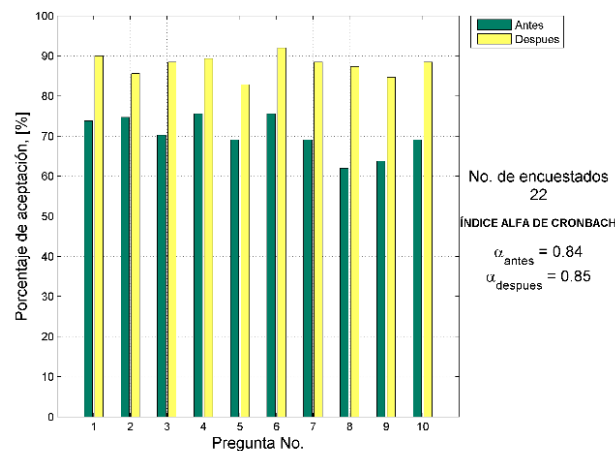


Figura 26 Encuesta del curso análisis matricial de estructuras en pregrado, en el 2014.

Se puede observar en todas las gráficas que las encuestas realizadas después de utilizar la aplicación obtuvieron una mejor calificación en comparación con las realizadas antes de usar la aplicación, demostrando así la aceptación que tienen las aplicaciones del laboratorio como herramientas para la asimilación de conceptos en la materias relacionadas con la Ingeniería Sísmica.

El índice alfa de Cronbach produce valores entre 0 y 1. Este valor muestra la correlación interna entre cada una de las preguntas, un valor inferior a 0.7 revela una débil relación entre ellas. En las encuestas encontramos valores del índice alfa de Cronbach mayores al mínimo aceptable de 0.7 y sólo en 3 ocasiones el coeficiente alfa de Cronbach es menor a 0.8 mostrando una alta confiabilidad en los resultados de las encuestas.

Junto con las encuestas a los estudiantes se realizó una pre-encuesta y otra post-encuesta para los profesores. En la pre-encuesta se evalúa la comprensión de los temas, por parte de los estudiantes, con la metodología y las ayudas didácticas utilizadas en el curso desde la perspectiva del profesor. En la Tabla 5 se muestran las preguntas de la post-encuestas realizadas a los profesores

1. ¿Qué tan fácil es explicar los conceptos teóricos de la materia con la metodología actual?
2. ¿Qué tan fácil es la comprensión por parte del estudiante del componente matemático relacionado con la materia?
3. ¿Qué tan fácil es la visualización e interpretación física de la respuesta dinámica con la metodología actual por parte de los estudiantes?
4. ¿Qué tan clara es la apropiación de los conceptos relacionados con la materia por parte de los estudiantes?
5. ¿Qué tan clara es la relación entre los conceptos presentados en el curso y los problemas de la vida real?
6. ¿Evalúe la percepción de la capacidad de los estudiantes para resolver los problemas relacionados con la materia?
7. ¿Qué tan suficiente es el material empleado en la materia (bibliografía, herramientas computacionales, internet, etc) para la comprensión de los conceptos?
8. ¿Qué tan fácil es realizar en la clase la variación de algunos parámetros estructurales para ver su incidencia en la respuesta dinámica?
9. ¿Qué tan manejables, intuitivas e interactivas son las herramientas computacionales relacionadas con el tema para facilitar la comprensión de los conceptos?
10. ¿Qué tan útil considera que podría ser una nueva herramienta computacional para comprender los conceptos de la materia?

Tabla 5 Preguntas pre-encuesta a profesores

La post-encuesta tiene como objetivo evaluar la aplicación como una herramienta pedagógica. En la Tabla 6 se muestran las preguntas de la post-encuestas realizadas a los profesores.

1. ¿Con la herramienta computacional, qué tan fácil es explicar los conceptos teóricos de la materia?
2. ¿Con la herramienta computacional, qué tan fácil es la comprensión por parte del estudiante del componente matemático relacionado con la materia?
3. ¿Con la herramienta computacional, que tan fácil es la visualización e interpretación física de la respuesta dinámica en comparación con la metodología actual para el estudiante?
4. ¿Con la herramienta computacional, qué tan clara es la apropiación de los conceptos relacionados con la materia por parte de los estudiantes?
5. ¿Con la herramienta computacional, que tan claro es mostrar la relación entre los conceptos presentados en el curso y los problemas de la vida real?
6. ¿Con la herramienta computacional, evalúe la percepción de capacidad de los estudiantes para resolver los

problemas relacionados con la materia?
7. ¿Qué tan suficiente es la herramienta computacional como complemento al material disponible de la curso?
8. ¿Con la herramienta computacional, que tan fácil es realizar en la clase la variación de algunos parámetros estructurales para ver su incidencia en la respuesta dinámica?
9. ¿Qué tan manejable, intuitiva e interactiva es la herramienta computacional comparada con la que usted conocía?
10. ¿Qué tan útil fue la herramienta computacional para transmitir los conceptos de la materia?

Tabla 6 Preguntas post-encuesta a profesores

En la Figura 27 se muestran los resultados de las encuestas a profesores de dos cursos del programa de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle. Se observa la aceptación de las aplicaciones como una herramienta pedagógica para la asimilación de conceptos.

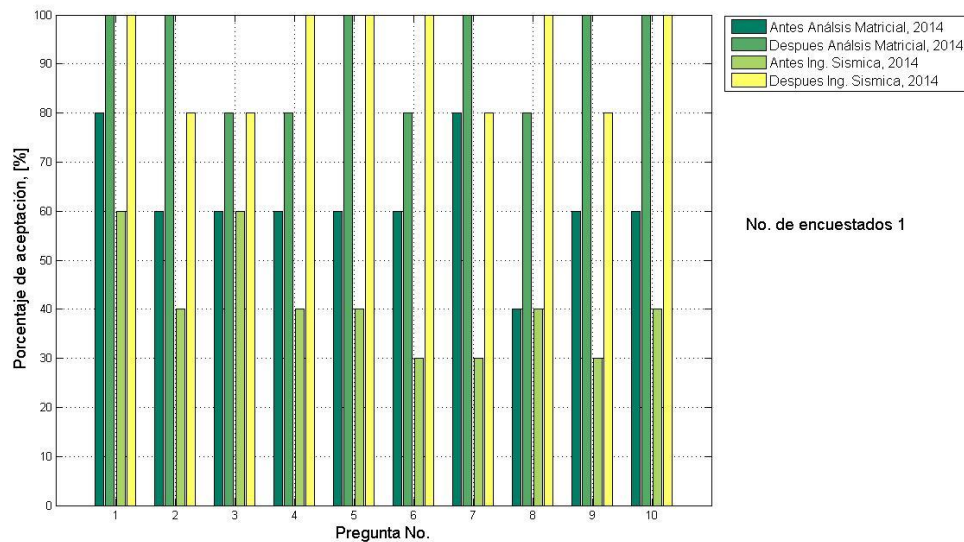


Figura 27. Resultados encuestas a profesores

Usando a herramienta analítica web Google Analytics [30], se realizó el seguimiento del tráfico que llega a la página web del laboratorio virtual SISMILAB. Está herramienta permite agrupar la información del tráfico según diferentes parámetros, como la fuente y la duración de las visitas. En la Figura 28 se observa el histórico de las entradas por país, a la página del laboratorio virtual SISMILAB en las fechas comprendidas entre julio de 2013 y octubre de 2015, donde se observa que la página web ha obtenido más de 2000 visitas. En el Anexo 1 e incluye el informe completo de Google Analytics en el cual se agrupan las visitas por diferentes parametros.

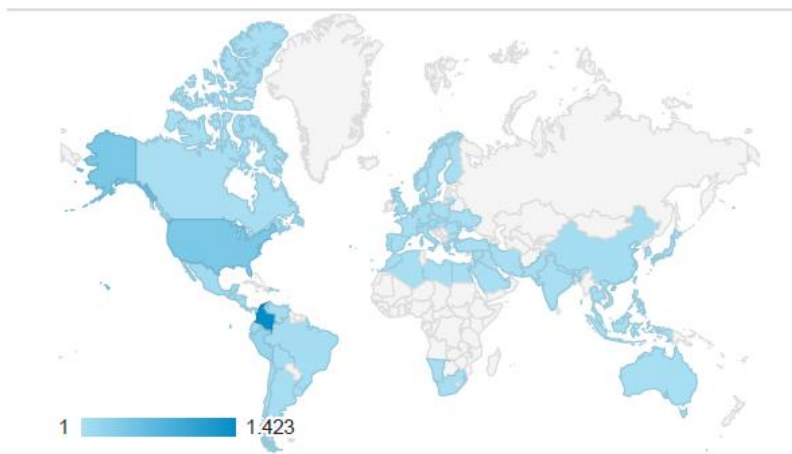


Figura 28. Histórico de entradas por país. Fuente: Google Analytics

7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Con este trabajo se logró implementar el laboratorio virtual de ingeniería sísmica SISMILAB, como una herramienta de enseñanza aprendizaje útil para diferentes campos de la Ingeniería Sísmica. La página web, construida para el laboratorio, permite un acceso fácil y gratuito a las aplicaciones, para los estudiantes de los diferentes cursos que abarca este laboratorio.

El laboratorio virtual de ingeniería sísmica (SISMILAB) permite la interacción del usuario con modelos representativos de la realidad a través de animaciones y simulaciones en tiempo real, contribuyendo a la comprensión de conceptos y motivando la interpretación de resultados. Las encuestas realizadas a los estudiantes demuestran la aceptación que tiene la aplicación y la alta efectividad para la comprensión de conceptos y la visualización e interpretación de resultados.

Actualmente la educación a nivel nacional se encuentra en un proceso de transición, con el fin de pasar de un sistema de aprendizaje mecánico a un proceso de aprendizaje didáctico. Los resultados de las encuestas demuestran que los profesores y estudiantes de Ingeniería Civil también tienen la necesidad de implementar estas herramientas de enseñanza-aprendizaje.

La calificación de los estudiantes, de los diferentes cursos encuestados, a las aplicaciones del laboratorio virtual es predominantemente favorable, lo cual representa un gran apoyo para el desarrollo de nuevas aplicaciones en otras áreas de la ingeniería a futuro.

Como factor diferenciador de SISMILAB, frente a los demás laboratorio virtuales mencionados en este documento, se presenta el hecho de que las aplicaciones permiten exportar un reporte en el cual se muestra la información ingresada por el usuario, el procedimiento y los resultados del análisis realizado en la aplicación.

La principal desventaja que tiene el laboratorio virtual se presenta en que la mayoría de las aplicaciones (aquellas que se programaron con el lenguaje matemático MATLAB) solo tienen descargas para el sistema operativo Windows, relegando así el acceso sólo a estos usuarios.

Como conclusiones específicas de la aplicación de Dinámica Estructural para MGD, encontramos las siguientes:

- El uso de HTML5 y JavaScript para la aplicación, permite que se pueda usar en línea sin la necesidad de descargas o instalaciones.

- Al estar programada para su ejecución en navegadores, permite que la aplicación se pueda utilizar desde diferentes dispositivos móviles, como celulares y tabletas. Aunque cabe resaltar que no se diseñó para su uso en dispositivos móviles
- Programar en HTML5 y JavaScript permite el acceso a la aplicación desde cualquier sistema operativo (SO), en este sentido, los usuarios de SO diferentes de Windows solo pueden usar esta aplicación del laboratorio virtual.

Como perspectivas de la aplicación de Dinámica Estructural para MGD, se recomienda:

- Optimizar la interfaz de la aplicación a pequeñas pantallas, para brindar una mejor experiencia de usuario desde dispositivos móviles.
- Incluir sistemas de control dinámico en la aplicación.
- Permitir al usuario elegir el paso del tiempo (Δt) para el cálculo de la respuesta.
- Incluir excitaciones en los grados de libertad verticales.

A futuro en la Universidad del Valle se continuará utilizando el laboratorio virtual como recurso de apoyo en clases y gracias a la visibilidad que ha obtenido la página se espera que sea acogida en otras universidades. En el Anexo 1, se observa un informe de las visitas que ha tenido la página del laboratorio virtual, desde el 2013, registrando más de 2000 visitas a octubre de 2015.

Como perspectiva se recomienda incluir más aplicaciones programadas en HTML5 para que los usuarios puedan acceder sin necesidad de instalar complementos o realizar descargas adicionales.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Gómez, P. Thomson, E. Sandoval y J. Marulanda. Desarrollo e implementación de un laboratorio virtual de ingeniería sísmica. Universidad del Valle, Cali, Colombia: Proyecto de Investigación, Contrato IF-006-11, Ministerio de educación Nacional, 2011.
- [2] M. Valencia. Las Nuevas Tecnologías de la información y la comunicación y el aprendizaje activo: Experiencia con el curso de “metodologías de multimedia”, Ingeniería y Competitividad, vol. 1, 2001.
- [3] M. A. Delgado y J. A. Lopez. Laboratorio virtual de control inteligente. Revista Educación en Ingeniería, ISSN 1900-8260, vol. 4, n°8, pp. 102-110, 2009.
- [4] J. Monge-Nájera, M. Rivas Rosi y V. H. Méndez Estrada. La evolución de los laboratorios virtuales durante una experiencia de cuatro, San Jose, Costa Rica, 2002. Versión en línea: <http://www.tropinature.com/cvitjmn/publications/educdist/labvirt/evollab4.pdf>.
- [5] F. Albalooshi. Virtual education: Cases in learning & teaching technologies, Hershey, PA: IGI Global, 2003.
- [6] M. Karweit. A virtual engineering / Science laboratory course. [En línea]. Available: <http://www.jhu.edu/virtlab/virtlab.html>. [Último acceso: Octubre 2013].
- [7] J. Harrison. Virtual hand laboratory. [En línea]. Available: <http://www.cs.ubc.ca/nest/magic/projects/hands/home>. [Último acceso: Octubre 2013].
- [8] D. Gómez, J. Marulanda, P. Thomson, J. M. Ramírez, J. T. Buitrago y E. Rosero. Desarrollo tecnológico de los laboratorios remotos de estructuras e ingeniería sísmica y dinámica estructural, Universidad del Valle, Cali, Colombia: Proyecto de investigación contrato No. 237-2005 Colciencias, 2008.
- [9] D. Gómez, P. Thomson, A. Valencia y J. Ramírez. Aplicación interactiva para la educación en dinámica estructural. Revista Dyna, n° 165, pp. 72-73, 2011.
- [10] L. A. Luengas, J. C. Guevara y G. Sánchez. Tise, 2009. [En línea]. Available: http://www.tise.cl/2009/tise_2009/pdf/20.pdf. [Último acceso: 2013].
- [11] J. Monge-Nájera y V.H. Méndez. . Ventajas y desventajas de usar laboratorios virtuales en educación a distancia. Revista Educación, ISSN: 0379-7082, vol. 31, n° 1, pp. 91-108, 2007.
- [12] M. Rodríguez, J. Gómez, L. Caudillo, H. Hernández, M. Escalante, D. Quiroz, E. Ayala y J. Yáñez. 5ª Fachada, un sistema para optimizar, diseñar y construir techos con estructuras metálicas ligeras basados en el sustento del ahorro de los

- materiales y energía. Empresa Tejas el Águila, 2010. [En línea]. Available: <http://www.cimat.mx/reportes/enlinea/I-10-07.pdf>
- [13] University of Colorado. PhET: Free online physics, chemistry, biology, earth science and math simulations, 2014. [En línea]. Available: <http://phet.colorado.edu/>. [Último acceso: 8 Diciembre 2014].
 - [14] Y. Gao, G. Yang, J. Spencer, B.F. y G. Lee. Java-Powered virtual laboratories for earthquake engineering education. MCEER Research progress and accomplishments 2003-2004, pp. 187-203, 2004.
 - [15] S. H. Sim, J. Spencer, B.F. y G. Lee. Virtual laboratory for experimental structural dynamics. Computer applications in engineering education, vol. 17, nº 1, pp. 80-88, 2009.
 - [16] UTPL, LVIS. Laboratorio virtual de ingeniería sísmica., [En línea]. Available: <http://vlee.utpl.edu.ec/VLEE/Bienvenidos/tabid/68/Default.aspx>. [Último acceso: Octubre 2013].
 - [17] A. Chopra. Dinámica de estructuras, México: Pearson, 2014.
 - [18] M. Paz. Dinámica estructural: teoría y cálculo, Barcelona: Reverté, 1992.
 - [19] J. L. Humar. Dynamics of structures, Balkema, 2002.
 - [20] Refsnes Data, w3schools.com. [En línea]. Available: http://www.w3schools.com/html/html_responsive.asp. [Último acceso: Noviembre 2014].
 - [21] A. Solarte. Desarrollo de una aplicación computacional para la simulación de sistemas dinámicos de un grado de libertad en un laboratorio virtual de Ingeniería Sísmica, Tesis de grado, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2013.
 - [22] A. Solarte, L. F. Guerrero Mosquera, D. Gómez y P. Thomson. Implementación de un módulo de dinámica estructural para un laboratorio virtual de ingeniería sísmica. Congreso nacional de ingeniería sísmica, Bucaramanga, 2013.
 - [23] Mathworks. MATLAB. The Mathworks, Inc. [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com> . [Último acceso: 6 Diciembre 2014].
 - [24] J. Mantilla, E. Chalparizan, E. Sandoval y D. Gómez. Desarrollo e implementación de un módulo de geotecnia en un laboratorio virtual de Ingeniería Sísmica. Congreso nacional de ingeniería sísmica, Bucaramanga, 2013.
 - [25] J. Mantilla. Desarrollo de una aplicación computacional para el análisis de efectos de sitio, en un laboratorio virtual de ingeniería sísmica, Tesis de grado, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2013.
 - [26] J. Saldarriaga. Desarrollo de una aplicación para la implementación del módulo de análisis estructural en un laboratorio virtual de ingeniería sísmica. Tesis de grado,

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2014.

- [27] J. Tocoche. Desarrollo de una aplicación para la docencia y la investigación en el análisis estructural matricial, Tesis de grado, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2014.
- [28] J. Saldarriaga, J. Tocoche, D. Gómez y J. Marulanda. Desarrollo e implementación del módulo de análisis estructural en un laboratorio virtual de ingeniería sísmica. Congreso nacional de ingeniería sísmica, Bucaramanga, 2013.
- [29] L.J. Cronbach. Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika, vol. 16, nº 3, pp. 297-334, 1951.
- [30] Google. Google Analytics [En línea]. Available: <https://www.google.com/analytics/web/>. [Último acceso: 6 Diciembre 2014].