



INSTITUTO
MEXICANO DEL
TRANSPORTE



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Análisis del Método de Búsqueda Global para la detección de daño y monitoreo estructural de puentes

Juan Antonio Quintana Rodríguez
Didier Samayoa Ochoa
Francisco Javier Carrión Viramontes
Andrés Hernández Guzmán
Saúl Enrique Crespo Sánchez
José Alfredo López López

**Publicación Técnica No. 367
Sanfandila, Qro, 2012**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Análisis del Método de Búsqueda Global para la
detección de daño y monitoreo estructural de
puentes**

Publicación Técnica No. 367
Sanfandila, Qro, 2012

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, el Dr. Didier Samayoa Ochoa, el Dr. Francisco Carrión Viramontes, el Ing. Andrés Hernández Guzmán, el M. C. Saúl Enrique Crespo Sánchez y el Dr. José Alfredo López López.

Se agradece la colaboración del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por la revisión y las facilidades para la realización del presente trabajo.

Índice

Resumen	V
Abstract	Vii
Resumen ejecutivo	Ix
Capítulo 1 Introducción	1
Capítulo 2 Antecedentes del Puente Río Papaloapan	5
Capítulo 3 Método de Búsqueda Global	15
3.1 Fundamento teórico del Método de Búsqueda Global	15
3.2 Diseño experimental para la aplicación del Método de Búsqueda Global	17
3.3 Desarrollo y calibración de modelos de elemento finito	18
3.4 Algoritmo de optimización para detección de daño	23
Capítulo 4 Análisis de patrones del Método de Búsqueda Global	29
4.1 Análisis de daño en una viga	29
4.2 Evaluación de un marco estructural	37
Capítulo 5 Evaluación experimental en el Puente Río Papaloapan	47
5.1 Procedimiento experimental	49
5.2 Modelo de Elemento Finito	55
5.3 Identificación de daño	65
Capítulo 6 Monitoreo estructural del Puente Río Papaloapan	71
6.1 Evaluación estructural de las condiciones con carga viva	71
6.2 Simulación MonteCarlo para determinar las distribuciones estadísticas de las tensiones de los cables	77
Capítulo 7 Conclusiones	83
7.1 Trabajo futuro	84
Bibliografía	85
Anexo 1 Distribuciones estadísticas de la carga total transportada para las diferentes configuraciones vehiculares	89
A1.1 Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo C2	89
A1.2 Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo C3	90

Al.3	Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo T3-S2	91
Al.4	Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo T3-S3	92
Al.5	Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo T3-S2-R4	93
Al.6	Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo T3-S2-R4 (Sobre cargados I)	94
Al.7	Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo T3-S2-R4 (Sobre cargados I)	95
Anexo II	Programa para calcular las tensiones de los 112 tirantes bajo diferentes escenarios de carga aleatoria	97
Anexo III	Ecuaciones de las distribuciones estadísticas de los 112 tirantes con diferentes perspectivas de crecimiento de tráfico	129

Resumen

En este trabajo se desarrolla y aplica a casos reales una técnica de evaluación no destructiva del tipo global, basada en el análisis de ondas de alta frecuencia en intervalos cortos de tiempo, denominada como Método de Búsqueda Global (MBG). El análisis de ondas en intervalos cortos de tiempo, es un método novedoso y práctico en el cual se evalúan las primeras ondas transmitidas y reflejadas que se registran en sensores colocados en puntos determinados de una estructura, y luego se comparan con sus correspondientes respuestas generadas por un modelo de elemento finito calibrado de la misma estructura. Esta metodología del Método de Búsqueda Global (MBG) se aplicó, en una fase inicial, en estructuras de laboratorio cuyos parámetros son conocidos; posteriormente se utilizó en una estructura real, como es el Puente Río Papaloapan.

El fundamento básico del MBG está en el hecho de que los fenómenos de propagación, dispersión y atenuación de ondas flexionantes en una estructura, dependen fuertemente de las propiedades mismas de la estructura (rigidez, densidad o área) y de las condiciones de frontera e interfases presentes en esta. Por lo tanto, cualquier variación en las propiedades o condiciones de frontera modifican la respuesta de las ondas flexionantes y, en principio, a partir de dicha variación es posible inferir el cambio en las propiedades que ocasionó dicha variación.

La sensibilidad del MBG para detectar daño depende de tres aspectos fundamentales: el experimental, el de simulación y del proceso de análisis. En lo que respecta al experimental, influyen el ruido electrónico de la instrumentación, la configuración y el tipo de los sensores, la forma de excitación, y la sensibilidad de la instrumentación. En cuanto a la simulación, las principales dificultades están en la capacidad del modelo para representar al sistema real; por lo tanto, la calibración, el tipo de modelo matemático, la representación de las condiciones de frontera, la interacción entre materiales y la representación de materiales compuestos, son los principales factores que afectan al resultado. Finalmente, sobre el proceso de análisis, la resolución de las variables de búsqueda y la eficiencia del algoritmo de optimización son los elementos principales que deben tomarse en cuenta para buscar una mayor efectividad del método.

El puente Río Papaloapan es del tipo atirantado con una longitud total de 407,2 m, el puente tiene ocho arpas cada una con 14 tirantes. A partir de estudios desarrollados en los pasados años, se determinó rehabilitar 20 de los elementos de anclaje superior. Para validar la metodología del MBG se realizó una prueba de detección de daño durante los trabajos de mantenimiento del puente, donde la prueba consistió en la identificación del daño por la pérdida de un tirante, lo cual

se simuló cuando uno de estos fue distensado para sustituir el elemento de anclaje superior. Para esta prueba, se realizaron dos mediciones dinámicas, la primera antes del distensado de uno de los tirantes para la calibración del modelo a la condición “sin daño”, y la segunda estando distensado el tirante para la condición dañada. Los resultados mostraron que los sensores cercanos al lugar donde se rehabilitó el elemento de anclaje superior pueden identificar el tirante que fue distensado, mientras que los sensores alejados más de 65 m. no pueden detectarlo debido a la rápida dispersión de la señal. Lo anterior concluye que el MBG puede ser utilizado como un método de evaluación no destructiva para la detección de daño en un sistema de administración de puentes.

Adicionalmente, usando el Modelo Calibrado del Puente Río Papaloapan y con la arquitectura de la simulación de escenarios de daño del MBG, se generaron las distribuciones estadísticas de las tensiones de los 112 tirantes del Puente mediante un programa de simulación MonteCarlo, en el cual se consideraran las distribuciones estadísticas del flujo vehicular actual y proyectado, carga transportada y viento para representar las entradas y generar escenarios de carga viva sobre el puente Río Papaloapan.

Abstract

In this work, the Global Search Method (MBG), a global non destructive evaluation technique based on the short time analysis of high frequency waves, is developed and applied to practical cases. The wave analysis in short time intervals, is an innovative and practical method in which the initial transmitted and reflected waves are registered in sensors located at specific places in the structure, and then compared to the corresponding responses generated from a finite element calibrated model of the same structure. This Global Search Method is applied, in an initial stage, to laboratory structures where their parameters are well known; then used in a real structure, such as the Río Papaloapan Bridge.

The basic fundamental of the MBG is based on the fact that the flexural waves' propagation, dispersion and attenuation, is a phenomena highly dependent on the structural properties (stiffness, density, or area), and on the boundary conditions and interfaces within the structure. Therefore, any change on the properties or boundary conditions, modifies the responses of the flexural waves and, in principle, from that variation is possible to calculate the change in the properties that caused such variation.

The MBG sensitivity for damage detection depends on three main aspects: the experimental, the simulation, and the analysis process. As to the experimental, the electronic noise, sensor configuration and type, excitation form, and the sensitivity of the instrumentation, are the main factors to be considered. With respect to the simulation, main difficulties are found on the capacity of the mathematical model to represent the real system; therefore, the calibration, model type, boundary conditions representation, material's interaction, and composite materials representation, are the most important factors affecting the main result. Finally, on the analysis process, the variable search resolution and the efficiency of the optimization algorithm are the key elements that must be taken into account to achieve a more effective method.

The Río Papaloapan bridge is a cable stayed structure with 407,20 m total length, 8 semi harps with 14 cables each. From previous studies, it was identified the necessity to replace 20 upper anchorage elements. To validate the MBG technique, during the maintenance program a test was planned to detect damage due an unfastened cable, which was simulated when one of these cables was released to substitute the upper anchorage element. For this tests, two dynamic measurements were performed; the first, prior to the cable removal, to calibrate the model to the "undamaged condition", and the second after the cable was released, for the damaged condition.

Results showed that near sensors, no more than 65 meters to the damage and impact location, were able to detect the cable removed position. Far sensors were unable to detect the damage due to the dispersion of the waves. Test concluded that the MBG can be utilized as a damage detection method in a bridge management system.

Additionally, using the calibrated model of the Río Papaloapan bridge and with the damage scenarios simulation architecture for the MBG, the statistical distribution for the tensions of each one of the 112 stayed cables on the bridge were generated from a MonteCarlo simulation program, where statistical data for the traffic, loads and wind, were considered as inputs to generate the live load scenarios on the bridge, and consequently, the loads on the cables.

Resumen ejecutivo

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) cuenta con el Sistema de Puentes de México (SIPUMEX), el cual es un sistema integral para planificar la conservación de la infraestructura a partir de una calificación otorgada por técnicos especializados, quienes realizan inspecciones visuales a los puentes. Cabe destacar que el promedio de vida de los siete mil doscientos puentes que conforman la red federal de carreteras es de 39 años; incluyendo los más recientes que han sido construidos con altas especificaciones técnicas, tales como los puentes Río Papaloapan, Chiapas, y Tampico. Asimismo, es importante señalar que la mayoría de los puentes están ubicados en zonas de alto riesgo ambiental que justifican el monitoreo permanente; particularmente por los cambios climáticos, caída de lluvias torrenciales y huracanes que cada vez son más severos.

Si bien es cierto que el SIPUMEX es una herramienta que ha sido útil para administrar los puentes mexicanos, este puede ser mejorado y actualizado aprovechando la tecnología más reciente y considerando que existen riesgos que no pueden ser detectados por las inspecciones visuales. Una solución es establecer un Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CMPEI) mediante el cual se puede obtener, procesar y analizar la información de cada uno de los puentes instrumentados. Sin embargo, el (CMPEI) requiere de metodologías de inspección, detección y evaluación de daño y confiabilidad estructural para cumplir con su propósito.

El Método de Búsqueda Global (MBG) es una técnica de evaluación no destructiva del tipo global basada en la propagación de ondas de alta frecuencia. EL MBG es un método cuyo análisis se fundamenta en la evaluación de fenómenos transitorio en el tiempo y cuya ventaja radica en el análisis de las señales en los primeros instantes de tiempo en el que no existe múltiples reflexiones de las ondas propagadas, lo cual permite una mayor facilidad para la detección de daño asociado a cambios en las propiedades mecánicas de los materiales que conforman la estructura. Su originalidad le permite ser un método de fácil aplicación y evaluación y por tanto factible para ser parte de las herramientas del CMPEI.

Para probar que el MBG se puede utilizar como una herramienta de análisis dentro del CMPEI, en este trabajo se presenta una prueba de detección de daño en el Puente Río Papaloapan aprovechando los trabajos de mantenimiento por el remplazo de los elementos de anclaje superior. Los resultados serán analizados y se determinará la factibilidad de incorporar al MBG como una solución para la inspección, detección y evaluación de daño del CMPEI.

1 Introducción

En el año 2000, uno de los 112 elementos de anclaje superior del puente Río Papaloapan presentó una falla repentina que provocó que el puente estuviera trabajando con 111 tirantes, bajara el índice de desempeño del puente y produjera una deformación al centro que ya no fue posible recuperar después de ser reparado el elemento de anclaje dañado. Empresas especializadas y centros de investigación en México en evaluación de estructuras y materiales dictaminaron que la causa principal de la falla fue el daño por fatiga asociado a un material de fundición con un tratamiento térmico posterior deficiente y con alto contenido de poros. Ante esta circunstancia, la preocupación era conocer el estado de los 111 elementos restantes, en el sentido de poder determinar si solo había sido un elemento de anclaje superior con deficiencias de fabricación, algunos de ellos o todos los elementos de anclaje. Estudios de ultrasonido industrial posteriores concluyeron que 16 de los elementos de anclaje superior tenían patrones similares al que había fallado -alta porosidad y fragilidad del material constitutivo- por lo que fueron remplazados junto con otros cuatro en buen estado, para una muestra representativa de los 92 restantes y, con ello, realizar un estudio que determinara la probabilidad de falla del Puente Río Papaloapan.

Este ejemplo es típico de un puente de gran envergadura, que por su ubicación estratégica para el flujo de personas y carga en el país, costo y problemática que presentó, es conveniente instrumentar para tener un monitoreo y evaluación en tiempo real. A nivel mundial el monitoreo ha sido implementado para la detección y evaluación de daño. En general, el monitoreo de la condición de una estructura es definida como “la medida de las condiciones de operación y de carga, y de las respuestas críticas de una estructura para dar seguimiento y evaluar síntomas anormales de operación y o deterioro o daño que afecten el servicio, seguridad o confiabilidad de la misma” (Aktan, 1999).

El monitoreo y evaluación estructural –hoy- son posibles y necesarios en la conservación de la infraestructura de un país. La problemática en países desarrollados estriba en la cantidad de puentes que conforman la red de carreteras, los cuales necesitan ser evaluados periódicamente debido a dos factores fundamentales: el tiempo de servicio de los puentes y el incremento en el flujo vehicular. En México, esta problemática no es la excepción, salvo con una ligera ventaja; de que varios de los puentes con más de 30 años de servicio fueron diseñados con factores de seguridad elevados (Carrión, 2002). No obstante esta ventaja, es necesario determinar la vida útil de las estructuras, conocer su índice de desempeño, realizar programas de mantenimiento preventivo, elaborar planes de restricción de tráfico en caso de daño repentino ocasionado por accidentes o condiciones climáticas extremas. El contar con sistemas de monitoreo y

evaluación estructural constante adicionalmente tiene dos ventajas: la primera de ellas es que la vida útil de las estructuras puede ser incrementada si se siguen los planes de mantenimiento preventivo derivados de la evaluación estructural, y la segunda ventaja es que el costo de una póliza de seguro baja cuando hay sistemas de monitoreo y evaluación.

Existe una amplia investigación en los últimos 30 años para la detección de daño en estructuras civiles, aeronáuticas, mecánicas basadas en métodos globales por vibraciones mecánicas y propagación de ondas (Carrión, 2002). La idea básica de estos métodos es observar el comportamiento de los parámetros modales (frecuencias, modos de vibrar, amortiguamiento modal) los cuales se correlacionan con cambios en los parámetros estructurales en las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento. Algunos de los trabajos desarrollados de detección de daño en puentes se han basado en el cambio en las frecuencias naturales y modos de vibrar (Kato y Shimada, 1986), cambios en los propiedades modales (Kato y Shimada, 1986; Turner, 1988; Allampalli y Fu 1988), otros en determinar índices de daño a través de los modos de vibrar y sus derivados como el Criterio de Aseguramiento Modal (MAC) (Allemang, 1982), el Factor de escala modal (MSF) (Ewins, 2000), criterio desplazamiento-frecuencia (Bert, 1993), criterios basados en la energía de deformación (Linag y Lee, 1993), Criterio de Aseguramiento Modal Coordinado (Abdel y De Roeck, 1999; Salawu, 1997; Saitoh y Takei, 1996), Cambios de la curvatura modal (MSC) (Pandey y Biswas, 1991), y cambios en las matriz de rigidez a partir de las formas modales (Zimmerman y Kauk, 1994); mientras que otros autores han desarrollado métodos como el método por subdomio inverso (Carrión at all, 2003) que se basa en el análisis del fenómeno de propagación de ondas flexionantes y en la detección de daño por propagación de ondas (Quintana, 2004). En todos los métodos de detección de daño, una parte fundamental es la calibración del modelo matemático que represente la dinámica y estática de las estructuras en estudio. Una inadecuada representación de los fenómenos físicos conllevará al fracaso de cualquiera de los métodos empleados.

Aunado a la investigación desarrollada hoy; el costo, tamaño y peso de los sensores ha disminuido gracias a los avances en tecnología; lo que hace posible pensar en estructuras instrumentadas con miles (Aktan at all, 1998) de diferentes tipo de sensores, acelerómetros, inclinómetros, sismógrafos, medidores de deformación, estaciones meteorológicas, cámaras de video, velocímetros e inclusive actuadores (Fuhr at all, 1992; Inman, 2001; Carrión at all, 2007) que permitan disminuir la vibración o evitar frecuencias que induzcan resonancia a la estructura o componente estructural. Los avances en informática y tecnologías de comunicación hacen posible la formación de Sistemas Integrales de Administración de Puentes (Aktan y Grimmelman, 1999), en donde todos los datos no solo del monitoreo estructural del puente sino también datos sobre el tráfico, modelos paramétricos pueden ser almacenados, procesados y analizados para la toma de decisiones y administración de recursos financieros de una red federal de carreteras.

Dentro de las técnicas de evaluación de daño, el análisis de la propagación de ondas en la estructura es un método que permite conocer el daño a partir de los cambios en la propagación de las ondas transmitidas y reflejadas sobre la estructura (Doyle, 1997; Doyle, 2004). El Método de Búsqueda Global se basa en un algoritmo de búsqueda de cambios en los parámetros estructurales que minimiza una función de mínimos cuadrados. De manera muy simple, cuando hay daño, existe un cambio entre las respuestas dinámicas de la estructura respecto a la condición sin daño. Como metodología de detección, este enfoque tiene una limitante y es el hecho de que se requiere una referencia de la condición actual de la estructura (antes del daño). Una alternativa para dar mayor flexibilidad al método es remplazar la información de la estructura original con un modelo de elemento finito calibrado (Quintana, 2004; Doyle, 2004) a través de pruebas dinámicas sobre la estructura.

Una ventaja del Método de Búsqueda Global (MBG) es que puede ser adaptado para obtener información adicional de la estructura, como los niveles de esfuerzos, las deformaciones o las cargas sobre un elemento estructural a partir de diferentes condiciones de carga; lo que permite generar distribuciones estadísticas del comportamiento dinámico o estático del elemento estructural. Si bien el MBG discretiza y realiza las búsquedas sobre ventanas definidas realizando un barrido sobre todo el conjunto de soluciones de manera automática, también puede ser modificado para realizar simulación MonteCarlo sobre las variables de interés para estudios de confiabilidad estructural basados en modelos probabilísticos.

El MBG fue probado para la detección de daño en los tirantes del Puente Río Papaloapan y utilizado para conocer las distribuciones estadísticas de carga de los 112 tirantes bajo diferentes escenarios de flujo vehicular utilizado simulación MonteCarlo.

2 Antecedentes del puente Río Papaloapan

El Puente Río Papaloapan está localizado en el kilómetro 85 + 980 de la autopista la Tinaja-Acayucan, en el estado de Veracruz; fue construido en el año de 1994 y se puso en servicio en el año de 1995, es del tipo atirantado con un claro de 203 m y una longitud total de 407.21 m. El puente tiene 112 cables distribuidos en ocho semi-arpas con 14 cables cada uno. Para simplificar la identificación, las semi-arpas fueron etiquetadas de la 1 a la 8 según se indica en la figura 1.1 y los cables fueron marcados del 1 al 14, iniciando del más corto al más largo (López at all, 2009).

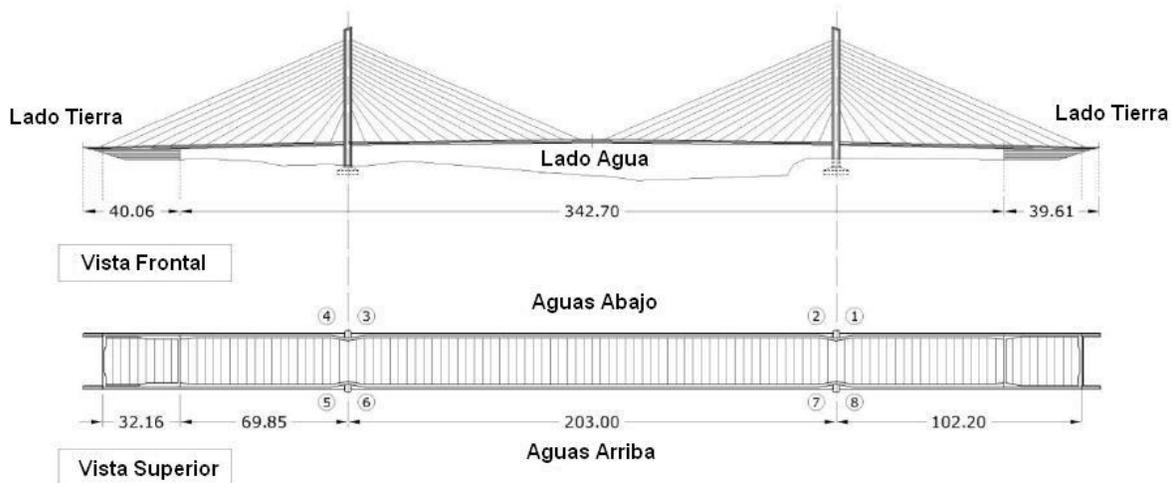


Figura 2.1 Vista de frente y superior del puente Río Papaloapan

El diseño único del sistema de anclaje superior de los cables fue desarrollado por Astiz (1997) y consiste de una placa de acero soldado al elemento de anclaje, el cual es de forma cilíndrica en un lado donde va enroscado el capuchón que sostiene el cable; y plano del otro lado, en donde se une por soldadura a la placa (figura 2.2). El puente tiene tres diseños diferentes para los elementos de anclaje superior: 26 son catalogados como tipo 1, 62 son del tipo 2 y 24 son del tipo 3; donde la diferencia principal radica en la longitud total del elemento de anclaje superior.

El 5 enero de 2000 se presentó una falla en el dispositivo de soporte superior del anclaje (botella) del tirante número 11 de la semi-arpa 7 en el Puente Río Papaloapan (figura 2.3), la fractura en la botella fue detectada en la zona cercana a la soldadura entre la placa de material A-50 y la parte plana de la botella; la falla ocurrió bajo condiciones de operación normal, ya que no existen registros de sobrecarga o condiciones anómalas de operación o ambientales. Para determinar

la causa raíz del problema y tomar acciones para prevenir fallas futuras se realizaron una serie de estudios para determinar las propiedades mecánicas del material y la causa de la falla. En general, de los análisis de falla, se concluyó que el material constitutivo estaba estructuralmente deficiente (Aguirre y Carbajal, 2000; López y Poblano, 2000) por tener una gran cantidad de poros y defectos internos, y no cumplir con todas las especificaciones mecánicas de diseño para este tipo de aplicación.

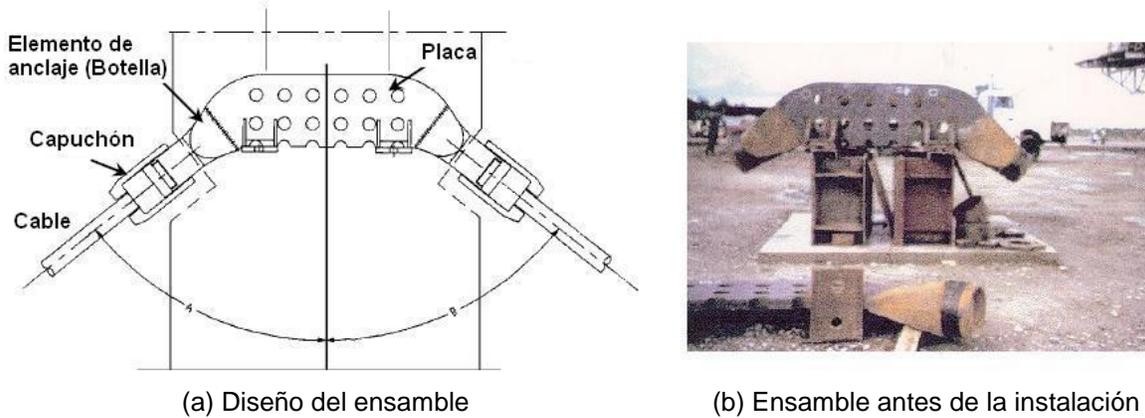


Figura 2.2 Ensamblaje del anclaje superior utilizado en el sistema de cables del puente Río Papaloapan

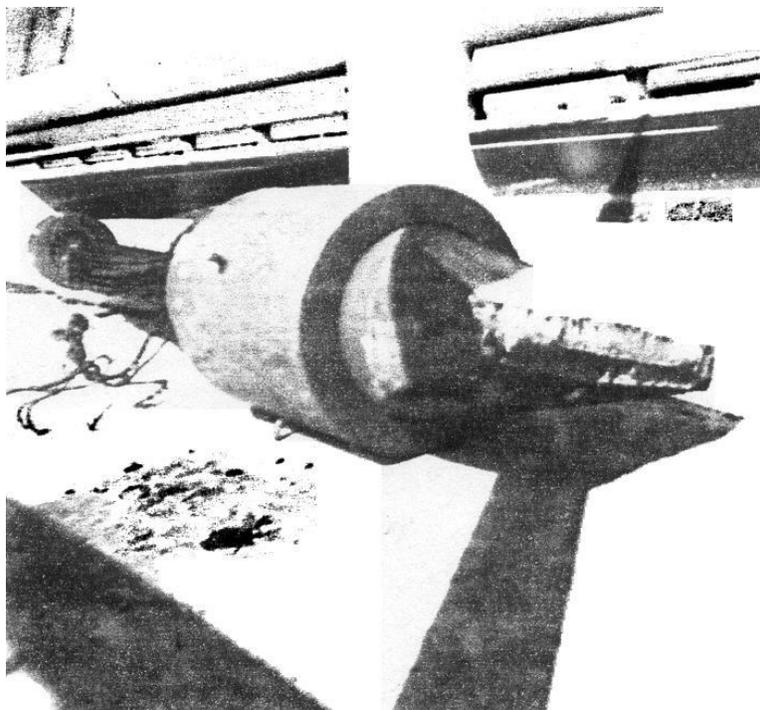


Figura 2.3 Falla del elemento de anclaje superior del cable 11, semi-arpa 7, ocurrida en enero de 2000

A partir de los resultados obtenidos se pudo comprobar que la composición química del acero, el esfuerzo de cedencia y el esfuerzo último de ruptura estaban dentro de las especificaciones de diseño, para un acero ASTM A148-80/50 (ASTM, 2005); por otra parte, de la prueba de tensión (Norma ASTM E-8), se encontró que el alargamiento era del 3%, menor al especificado según la norma ASTM A-148 GR 80-50, la cual establece valor del 22%. De los análisis se detectaron tres problemas principales (Aguirre y Carbajal, 2000): un alto contenido de poros (figura 2.4), una microestructura con un tamaño de grano grande ASTM 2 (figura 2.5) y un porcentaje de elongación del 3%. Como la pieza fue fabricada a partir de un proceso de fundición; se concluyó que el principal problema se originó por un deficiente control de calidad en este proceso, no se evitaron los poros y no se aplicó un adecuado tratamiento térmico de normalizado que permite obtener una microestructura de tamaño de grano fino (ASTM 8), con lo cual hubiera cumplido con las especificaciones mecánicas requeridas.

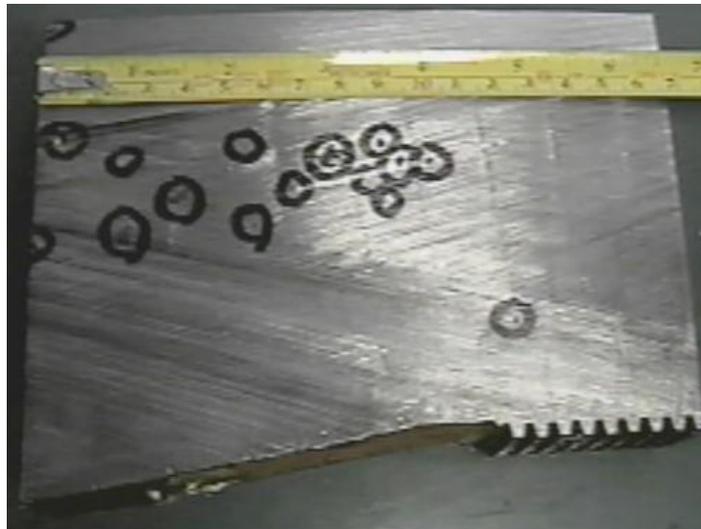


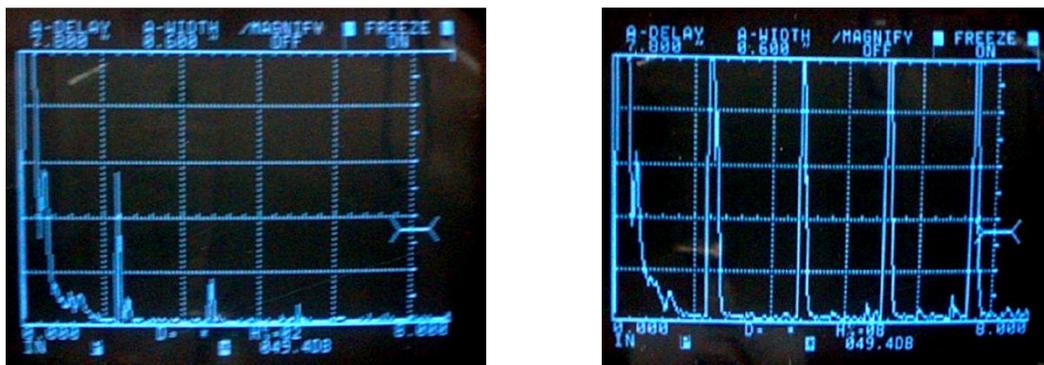
Figura 2.4 Sección del elemento de anclaje superior con alto contenido de poros



Figura 2.5 Imagen de la microestructura del elemento de anclaje superior

Para complementar el análisis, se realizaron ensayos de fatiga para estimar la tenacidad a la fractura y determinar los parámetros que describen la propagación de grietas de acuerdo al modelo de Paris (Anderson, 1991). De los ensayos se obtuvo un valor de 10,9 para el exponente de la ecuación de Paris (m), este valor corresponde al de un acero frágil con alta velocidad de crecimiento de grietas, comparado con los valores típicos del acero para el exponente los cuales oscilan entre 2 y 4.

De los estudios y conclusiones obtenidos del análisis efectuado en el año 2000 se determinó la necesidad de evaluar y analizar las propiedades mecánicas de los 111 elementos de anclaje superior del Puente Río Papaloapan con particular atención en la microestructura e integridad de las botellas. Se estableció utilizar la técnica ultrasonido que tiene la capacidad de evaluar la microestructura del acero y detectar defectos en el interior del material. Para evaluar la microestructura de los elementos de anclaje superior se fabricó un bloque de referencia con el acero del elemento de anclaje que falló en 2000, el cual se manufacturó con dos tamaños diferentes de grano, ASTM entre 1 y 2 grueso y ASTM entre 7 y 8 fino. La evaluación de la microestructura se basa en el análisis de las reflexiones de la pared posterior de un haz de ultrasonido o en el nivel de ruido electrónico, el cual es altamente dependiente del tamaño de grano del material (ASM, 1997), para un tamaño de grano fino se tiene una señal casi sin ruido con múltiples reflexiones de la pared posterior del material evaluado, mientras que para una tamaño de grano grueso se obtiene una señal con ruido electrónico y con pocas o nulas reflexiones de la pared posterior del material evaluado, figura 2.6.



(a) Reflejo de pared posterior de un material con tamaño de grano ASTM 1 y 2

(b) Reflejo de pared posterior de un material con tamaño de grano ASTM 7 y 8

Figura 2.6 Comparación de las reflexiones de pared posterior de dos materiales con tamaño de grano diferente de un block de referencia

Para la evaluación en campo de los 111 tirantes se diseñaron pruebas especiales debido a que los elementos de anclaje están en casi en su totalidad embebidos en concreto con excepción de 10 cm. por lo tanto la accesibilidad a evaluar la botella y se limita a la superficie expuesta (figura 2.7). Debido a que el área de exposición está inclinada se fabricaron zapatas especiales para evaluar con haz recto y se

utilizó la técnica con haz angular a 45° para examinar las zonas internas de los elementos de anclaje cercanas a la zona de soldadura para detectar defectos en el material (figura 2.8).

Una vez evaluados y analizados los 111 elementos de anclaje superior, se codificaron los resultados de la microestructura e integridad de los elementos como microestructura de tamaño de grano grande, microestructura con probable tamaño grande y microestructura con alto contenido de poros (Carrión at all, 2003). La clasificación de probable tamaño grande fue definida por una dispersión de energía alta, pero menor que la observada con un tamaño ASTM 2. La tabla 2.1 muestra un resumen de los resultados de las inspecciones por ultrasonido. Los elementos de anclaje superior encontrados con tamaños de grano grande y probable tamaño grande fueron del tipo 2, mientras que los que tuvieron un alto contenido de poros fueron del tipo 1 y 3.



Figura 2.7 Accesibilidad para la inspección por ultrasonido de un elemento de anclaje superior

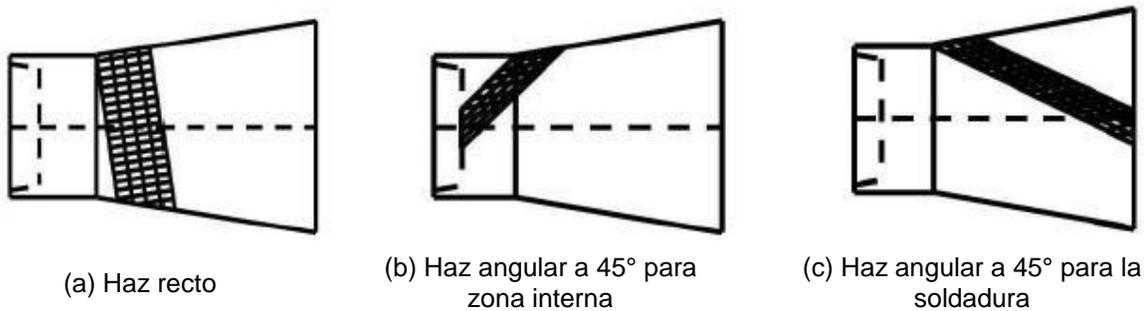


Figura 2.8 Regiones inspeccionadas con haz recto y angular con la técnica de ultrasonido

Tabla 2.1 Sumario de resultados de las pruebas por ultrasonido

Deficiencia estructural	Número de elementos de anclaje	Tipo de elemento
Tamaño de grano grande (ASTM 2)	8	2
Alto contenido de poros	2	1 y 3
Probable tamaño de grano grande	6	2

Del estudio por ultrasonido, se concluyó que era necesario reparar los 16 elementos de anclaje superior identificados como estructuralmente disfuncionales y que la mejor alternativa para asegurar la integridad del puente, era sustituir los elementos ya identificados como deficientes, junto con cuatro elementos clasificados como buenos para obtener información y realizar un estudio de confiabilidad estructural para determinar la probabilidad de falla en los 92 elementos restantes.

Los trabajos de sustitución, remplazo y rehabilitación de los elementos de anclaje superior iniciaron en julio de 2007 y concluyeron en marzo de 2009. En estos trabajos se incluyó la realización de pruebas no destructivas de ultrasonido y líquidos penetrantes, el seguimiento de la redistribución de las tensiones de los 112 tirantes durante la sustitución y remplazo de cada uno de los elementos de anclaje superior y la ejecución de pruebas de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas del material.

Los resultados de las inspecciones por ultrasonido permitieron corroborar las calificaciones realizadas en 2003 (Carrión at all, 2003), como podemos observar en la tabla 2.2 (López at all, 2009). Las diferencias encontradas se deben a la presencia de porosidades por lo que se registra una pérdida de la energía del haz ultrasónico y porque la distancia donde es evaluado el reflejo de pared posterior es más corto que en la evaluación efectuada en 2003, lo que permite una mejor apreciación en la pérdida de energía.

Los resultados de las inspecciones con ultrasonido se indican en la tabla 2.3 (López at all, 2009), en ella se puede observar, que en dos botellas se observaron grietas, inspecciones 3 y 15; se encontraron grietas en la soldadura, inspección 13; y en la placa, inspecciones 10, 11 y 19.

Los resultados de la inspección por líquidos penetrantes muestran en todos los casos indicaciones de discontinuidades en diferentes zonas de las piezas inspeccionadas como: rechupes o segregaciones, presencia de poros, diversas discontinuidades en la soldadura; sin embargo, las principales indicaciones fueron la presencia de grietas de diversos tamaños en el sistema de sujeción de nueve tirantes, como podemos observar en la tabla 2.4 (López at all, 2009).

Tabla 2.2 Resultados de las inspecciones por ultrasonido en 2008, comparado con la realizada en 2003

# Inspección	Arpa	No. Tirante	Calificación 2003	Calificación 2008
1	3	10	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
2	1	6	Tamaño de grano fino	Tamaño de grano medio
3	3	11	Tamaño de grano grande	Tamaño de grano grande
4	1	13	Tamaño de grano grande	Tamaño de grano grande
5	3	12	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
6	2	4	Tamaño de grano fino	Tamaño de grano medio
7	4	8	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
8	2	12	Tamaño de grano grande	Tamaño de grano grande
9	2	13	Tamaño de grano grande	Tamaño de grano grande
10	7	1	Tamaño de grano fino con alto contenido de poros	Tamaño de grano fino
11	6	13	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
12	7	8	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano fino
13	6	3	Tamaño de grano fino con alto contenido de poros	Tamaño de grano fino
14	7	9	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
15	6	1	Tamaño de grano fino	Tamaño de grano fino
16	7	10	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
17	5	5	Tamaño de grano fino	Tamaño de grano fino
18	7	12	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
19	5	10	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande
20	7	13	Tamaño de grano probablemente grande	Tamaño de grano grande

Tabla 2.3 Resultados de las grietas encontradas en las botellas por ultrasonido

Inspección			Botella		En la soldadura		En la placa	
#	Arpa	No. Tirante	Cantidad	Long Max (mm)	Cantida d	Long Max (mm)	Cantidad	Long Max (mm)
3	3	11	2	18,5				
10	7	1					1	40
11	6	13					1	340
13	6	3			4	7,15		
15	6	1	1	14				
19	5	10					2	20

Tabla 2.4 Resultados de las grietas encontradas en las botellas por líquidos penetrantes

Inspección			En la botella		En la soldadura		En la placa	
#	Arpa	No. Tirante	Cantidad	Long Max (mm)	Cantidad	Long Max (mm)	Cantidad	Long Max (mm)
2	1	6			1	50		
3	3	11	2	8	1	63	1	27
4	1	13	4	31				
7	4	8	1	15	1	76		
10	7	1	5	83				
11	6	13			3	26		
12	7	8			1	110		
15	6	1	Varios	327				
17	5	5	7	66				

De los resultados obtenidos a través de la serie de estudios llevados a cabo sobre el Puente Río Papaloapan, se propone tener un seguimiento del comportamiento de los elementos de anclaje superior y un monitoreo del comportamiento dinámico del puente, debido a las grietas encontradas en los elementos de anclaje superior catalogados como buenos respecto a su microestructura; mas no en lo referente a porosidades originadas por el proceso de manufactura de los elementos de anclaje superior. De allí la necesidad de evaluar nuevas herramientas como el Método de Búsqueda Global para la detección de daño (Capítulo 4) y la utilización del modelo de elemento finito calibrado del Puente Río Papaloapan para obtener las distribuciones estadísticas de las tensiones de los 112 tirantes originadas por las cargas muertas y cargas vivas (Tráfico y viento) presentes y futuras (Capítulo

5). La segunda parte será de utilidad para el desarrollo del estudio de confiabilidad estructural que se realizará del Puente Río Papaloapan.

3 Método de Búsqueda Global

3.1 Fundamento teórico del Método de Búsqueda Global

El Método de Búsqueda Global se enfoca al problema de localización de daño mediante la identificación de cambios en los parámetros estructurales, a partir de la propagación de ondas de alta frecuencia en la estructura. La base de este método radica en tres módulos básicos; el primero, la existencia de un modelo estructural de EF previamente calibrado que represente el comportamiento dinámico de la estructura en su condición de referencia o “sin daño”; el segundo, la parte experimental, cuyo objetivo es obtener la respuesta dinámica de la estructura ante una excitación de este en puntos específicos de interés, es decir, recolectar las ondas de propagación que pasan en un punto de la estructura; y el tercero, un algoritmo que almacena, compara, evalúa las respuestas dinámicas experimentales con las generadas por el modelo de elemento finito de la estructura.

Las ondas que se propagan ante la excitación de la estructura son transmitidas, reflejadas y atenuadas por la interacción de los diferentes materiales en la estructura, por cambios en la geometría en el medio de propagación, por las condiciones de frontera, etc. (Doyle, 1997). Estas propiedades de las ondas flexionantes son utilizadas para la detección y ubicación de daño; si se parte de una estructura sin daño, las ondas registradas tendrán un patrón de propagación acorde con las propiedades mecánicas de los materiales y su geometría en la estructura; cuando existe un daño, una alteración en las propiedades o geometría de la estructura el patrón de propagación cambia, haciendo posible la detección de daño y asumiendo el daño como un cambio en los parámetros estructurales.

Un parámetro, en el presente contexto, es cualquier variable estructural que describa al modelo de EF y que pueda ser modificado sin cambiar la estructura básica del modelo mismo. Ejemplos de parámetros estructurales son: el módulo de elasticidad y rigidez, la densidad, la geometría y el amortiguamiento (Doyle, 2004; Quintana 2004). Por otro lado, existen otras variables a las cuales se refiere como indirectas; ya que no describen una característica directa del modelo, sino que son resultado de la respuesta del modelo ante una fuerza, carga o acción; tal es el caso del factor de intensidad de esfuerzos, la frecuencia natural de vibración o la velocidad de propagación de ondas. Todas las variables indirectas pueden cambiar por efecto de los cambios en los parámetros estructurales o mediante la modificación del programa fuente al cambiar el modelo matemático que describe el fenómeno físico en cuestión. En el desarrollo de esta investigación, para la calibración de un modelo, solo se consideran los parámetros estructurales

directos, especialmente los siguientes: módulo de elasticidad y rigidez, masa (densidad), tamaño del elemento finito y geometría (tamaño o área). En consecuencia, una vez calibrado el modelo, los cambios subsecuentes en los parámetros estructurales serán considerados como daño.

El daño es sinónimo a cambios en la estructura que demeritan la capacidad estructural inicial. Estos cambios, directamente o indirectamente, se manifiestan en pérdida de masa o de rigidez en el modelo estructural. La presencia de daño en una primera etapa puede ser detectada comparando la respuesta dinámica experimental de una estructura dañada con respecto a otra similar sin daño; sin embargo, tener dos modelos estructurales para comparación no es muy factible. Comparar las repuestas experimentales de una estructura dañada con las repuestas experimentales previas a la existencia de daño, aunque sea posible, es muy restrictivo ya que solo se limita al análisis de las condiciones de prueba en las cuales fueron obtenidas las repuestas experimentales sin daño; lo cual implica cierto nivel de repetibilidad y puede estar restringido por la sensibilidad misma del sistema. Por lo anterior, se concluye que la mejor opción es involucrar un modelo de EF calibrado de la estructura para que asuma el papel de la estructura sin daño y, a la vez, permita modificar los parámetros estructurales para identificar y analizar el daño asociado al cambio en ellos.

Así, podemos establecer que el daño es todo aquel cambio en la estructura que involucre los parámetros estructurales; como son el módulo de elasticidad, la densidad, el espesor o el amortiguamiento.

Partiendo de la definición de daño anterior, se propone un Método de Búsqueda Global para la localización e identificación de daño en una estructura. Este método se basa en el análisis comparativo de las repuestas experimentales del modelo físico, con las repuestas de un modelo de EF calibrado al que se le modifican sus parámetros estructurales, hasta igualar ambas repuestas. Para ello, es necesario el diseño de una estrategia secuencial para la modificación de los parámetros estructurales y de un método de optimización para minimizar la diferencia entre las repuestas experimentales y las del modelo de EF.

Para lo anterior, además de definir intervalos de variación para los parámetros estructurales, se adicionan dos variables de búsqueda relacionadas con el tamaño del daño (número de elementos involucrados) y la ubicación de este (posición del elemento modificado). Una vez establecido un intervalo de variación más adecuado para los parámetros desconocidos (incluyendo posición), un programa de elemento finito puede ser usado para determinar el valor de los parámetros estructurales asociados al daño (Doyle, 2004; Quintana 2004).

3.2 Diseño experimental para la aplicación del Método de Búsqueda Global

Una de las partes fundamentales para la aplicación del Método de Búsqueda Global es el diseño de la prueba experimental. Las pruebas experimentales consisten en la medición de la respuesta de la estructura por efecto de una fuerza de excitación conocida en condiciones de prueba controladas. En el diseño de la prueba experimental se debe tomar en cuenta las características del sistema de adquisición de datos, el tipo de sensores, la frecuencia de excitación, la velocidad de muestreo y la distribución de los sensores en la estructura; todo ello para garantizar que la señal adquirida corresponda a las respuestas dinámicas de la estructura.

Un sistema de adquisición de datos consta de sensores, preamplificadores, suministros de energía y un sistema electrónico que convierte las señales analógicas en señales digitales; estos últimos son los que se almacenan y procesan posteriormente. Los sensores, por lo general van conectados a un suministro de energía y a un preamplificador. Mientras que las tarjetas de conversión de datos van insertadas en computadoras personales o portátiles que cuentan con un software que controla la velocidad de muestreo; el número de canales, tiempo de muestreo etc., aunque también hay equipos de aplicación específica que suplen a las computadoras personales.

Por lo general, el sistema de adquisición de datos determina el número y tipo de sensores que pueden ser utilizados y la máxima frecuencia de adquisición de datos. La mayor limitación de los sistemas de adquisición de datos es la máxima frecuencia de adquisición. En estructuras como los puentes, dado que las frecuencias de excitación son bajas, no se requiere de una velocidad de muestreo mayor a 2000 Hz; sin embargo, en estructuras más cortas, metálicas, esta velocidad de muestreo puede llegar hasta los 100 kHz. En general, la velocidad de muestreo estará regida por el contenido de frecuencia de la fuerza de excitación, por lo que la velocidad de muestreo debe ser diez veces mayor al contenido de frecuencia (Quintana, 2004). Un aspecto por considerar en las tarjetas de adquisición de los sistemas de adquisición de datos es la sincronización entre los sensores y la excitación, ya que normalmente el registro se realiza en forma secuencial; lo que genera un retardo en el tiempo que debe ser corregido, principalmente cuando la frecuencia de muestreo es muy alta.

Los sensores utilizados por el Método de Búsqueda Global son temporales, y estos pueden ser sensores de desplazamiento, velocidad o aceleración. Para el registro del impacto, con el cual se excita la estructura, se requiere de un transductor de fuerza o en su defecto de un acelerómetro montado sobre una masa conocida. Para las pruebas dinámicas utilizando un acelerómetro sobre la masa, esta es liberada desde una altura y luego registrada la aceleración para conocer la fuerza en función del tiempo, por lo que es necesario un postprocesamiento de los datos registrados.

La distribución de los sensores en la estructura depende, en principio, del número de canales en el sistema de adquisición de datos y de la sensibilidad requerida en las pruebas dinámicas. Una de las ventajas del Método de Búsqueda Global es que se puede realizar con un arreglo experimental localizado para analizar en detalle una zona de interés -concentrando sensores, o expandir los sensores sobre toda la estructura, según convenga. Esto permite evaluar toda la estructura con mayor sensibilidad utilizando un conjunto de sensores que se puede mover en regiones realizando una prueba por cada una de ellas hasta cumplir el 100% de la estructura. En todo momento se debe buscar que los sensores queden distribuidos en líneas longitudinales y transversales al punto de excitación de la estructura para medir la velocidad de propagación de las ondas y su atenuación.

El periodo de adquisición obedece al tiempo que tardan las ondas flexionantes en recorrer toda la estructura, aunque es recomendable acortar este tiempo para evitar el registro de las reflexiones de las condiciones de frontera.

3.3 Desarrollo y calibración de modelos de elemento finito

La parte más importante en la aplicación del Método de Búsqueda Global es la calibración dinámica del modelo de elemento finito. Si no hay una calibración adecuada del modelo de elemento finito, es imposible que cualquier método de detección de daño resulte satisfactorio; como consecuencia, es la parte donde se requiere mayor precisión y por lo mismo, consume mucho tiempo para su finalización.

El Método de Elemento Finito (MEF) es una herramienta fundamental para analizar una estructura real y es aplicado en diferentes tipos de análisis o evaluaciones de una estructura; por ejemplo, se pueden determinar, las respuestas dinámicas del sistema, la distribución de esfuerzos y las cargas térmicas o dinámicas, entre otras. Para ello, es fundamental que el modelo de EF esté debidamente calibrado, para que represente el comportamiento de la estructura real bajo las condiciones de operación consideradas; lo que implica conocer con aceptable exactitud todas las propiedades estructurales del sistema (Carrión at all, 2003; Bathe, 1995). La calibración de un modelo no es una tarea sencilla y por lo general se realiza mediante pruebas experimentales cuyos resultados son aplicados directamente o utilizados con métodos inversos para determinar los parámetros estructurales del modelo de EF (Doyle, 2004; Quintana 2004). El grado de exactitud en la calibración de un modelo de EF está en relación directa con el tipo de información que será extraída del modelo. En algunos casos no es necesario un alto nivel de exactitud, por ejemplo, para conocer la distribución de esfuerzos; en otros casos, es necesario un nivel mayor en la calibración, por ejemplo, en la reconstrucción de cargas dinámicas o en la generación de las respuestas dinámicas del sistema.

Para calibrar un modelo de elemento finito de manera detallada es necesario que todos los parámetros estructurales tengan valores apropiados, similares o casi iguales a los del modelo físico; de tal forma que el comportamiento dinámico y estático del modelo de EF sea igual o con poca variación respecto a la respuesta dinámica o estática experimental del modelo físico. En este caso, un modelo de un sistema lineal puede ser representado como:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (3.1)$$

Cabe destacar que las matrices de rigidez, amortiguamiento y masa respectivamente son las que contienen la información de las propiedades de la estructura (parámetros estructurales).

Generalmente, la calibración de un modelo de EF es un proceso complejo que consume mucho tiempo. Es por ello que se desarrolló una metodología para la calibración de modelos estructurales con la finalidad de optimizar el tiempo empleado en dicha calibración. Los modelos ya calibrados pueden ser utilizados para el monitoreo estructural y la detección y evaluación de daño asociado con cambios en los parámetros estructurales y que pueden ser inferidos a través de las mediciones experimentales, como lo es en el caso del Método de Búsqueda Global.

Para la calibración sistemática de un modelo de EF se propone una serie de pasos, para disminuir el tiempo y optimizar el proceso. En este caso la primera fase consiste en seleccionar el número de elementos y el tipo de elementos de acuerdo con el tipo de estructura que se va a representar; En esta etapa no es necesario conocer con exactitud los parámetros estructurales del modelo físico. Los estudios para seleccionar el tipo de elementos y el número de elementos pueden ser realizados generando valores en un programa de EF previamente validado. La segunda etapa radica en obtener los valores por pruebas experimentales de los parámetros estructurales directos y posteriormente obtener por una combinación de pruebas experimentales y métodos inversos los parámetros restantes. La última fase consiste en la validación del modelo de elemento finito por medio de la comparación de las respuestas dinámicas experimentales y las generadas por el modelo y por la reconstrucción del impacto de excitación en función del tiempo. En general, este es un proceso iterativo mediante el cual se ajustan gradualmente los parámetros hasta lograr la precisión deseada.

En resumen, se proponen los siguientes pasos para la calibración dinámica de una estructura.

- Análisis de convergencia del modelo de elemento finito
- Selección de los elementos para el modelo físico
- Análisis de los parámetros estructurales

- Caracterización de parámetros estructurales
- Validación del modelo de elemento finito

El estudio de convergencia se requiere para determinar el número mínimo de elementos que se deben usar en un modelo para representar el comportamiento real de la estructura. El estudio es de gran importancia ya que de este depende el ahorro en tiempo computacional que se puede lograr en cualquier tipo de análisis. Si consideramos el costo computacional:

$$\text{Costo} \approx n^3 \quad (3.2)$$

Para realizar el estudio de convergencia, la prueba consiste en generar con el modelo de EF las respuestas dinámicas de dos modelos con diferente número de elementos por unidad de longitud (uno con el doble del primero) y compararlas entre sí. Cuando exista una diferencia entre las dos respuestas (un retraso o un cambio en la magnitud entre las señales), se genera otro modelo con el doble de elementos respecto al más refinado para que se comparen nuevamente, las diferencias entre las señales pueden ser evaluadas calculando la variación, error cuadrático medio de ambas señales. El proceso continúa hasta que la variación entre las respuestas dinámicas es pequeña, estableciendo un criterio para refinar el modelo a cambio de una reducción en la variación de las respuestas dinámicas muy pequeña para obtener la variación pero con un menor tiempo computacional.

El análisis de convergencia está vinculado con la selección del tipo de elementos, por lo que cualquiera de los dos análisis puede ser realizada inicialmente. Para esta metodología se decidió comenzar con el análisis del número de elementos mínimos requeridos por unidad de longitud; sin embargo, para desarrollar este paso se debe tomar en cuenta el estudio de convergencia para cada uno de los tipos de elemento integrados en un paquete de elemento finito específico, que pueden representar el comportamiento dinámico de la estructura en estudio.

Para seleccionar el tipo de elementos para el modelo de elemento finito, se deben realizar pruebas experimentales con el propósito de generar una referencia de comparación con la respuesta del modelo de EF, variando los diferentes tipos de elementos que un paquete de EF puede operar.

En el análisis de los parámetros estructurales, se deben identificar los parámetros que puedan ser determinados realizando mediciones directas y los que se obtendrán a través de problemas inversos, los cuales son conocidos como parámetros estructurales indirectos. Uno de los parámetros estructurales son las dimensiones geométricas del modelo, las cuales pueden ser medidas con gran precisión utilizando diferentes dispositivos de medición como el vernier, el micrómetro o, como última opción, se puede utilizar los planos de diseño de la estructura en estudio. A partir de la determinación de las dimensiones geométricas se calculan los momentos de inercia y áreas de cada uno de los materiales involucrados en el desarrollo del modelo.

Otro parámetro que se debe determinar de manera directa es uno de los dos en el cociente entre, el módulo de elasticidad o la densidad de cada uno de los materiales; ya que para cualquier tipo de elemento, ambos parámetros están relacionados en las ecuaciones matriciales que describen su comportamiento dinámico. Una vez determinado o calibrado este cociente, si se requiere alguno de ellos, es necesario asignar un valor al otro siguiendo un criterio congruente con la información disponible y las condiciones del modelo real.

Para la solución de los valores de los parámetros estructurales indirectos, se parte del hecho de que un sistema dinámico estructural, representado por el modelo de elemento finito, tiene un conjunto de parámetros desconocidos a_j , un conjunto de respuestas (dinámicas) $\{d\}$ y una fuerza de excitación conocida $\{P\}$; estas dos últimas son obtenidas de las pruebas experimentales realizadas en campo. Para encontrar los valores de los parámetros indirectos, un valor inicial a_j^0 , es asignado a cada uno de ellos de la experiencia y aquellos encontrados en la bibliografía. Posteriormente, son calculadas las respuestas dinámicas $\{u\}_0$ a partir de modelo de elemento finito, la fuerza experimental aplicada en campo y los parámetros estructurales directos e indirectos (desconocidos). Entonces, los parámetros estructurales indirectos o desconocidos se actualizan, uno a la vez, por una cantidad definida da_j para calcular las correspondientes respuestas dinámicas $\{u\}_j$, hasta obtener un vector de sensibilidad $\{\psi\}_j$ de la siguiente ecuación:

$$\{\psi\}_j = \frac{\partial u}{\partial a_j} \equiv \left(\frac{u_j - u_{j-1}}{da_j} \right) \bar{a}_j \quad (3.3)$$

En este caso, el término \bar{a}_j es un factor normalizado, basado en una ventana de búsqueda para cada uno de los parámetros desconocidos.

La respuesta dinámica que da la solución para los parámetros estructurales calibrados es diferente con respecto a los parámetros inferidos de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\{u\} = \{u\}_0 + \sum_j \left\{ \frac{u_j - u_0}{da_j} \right\} \Delta a_j = \{u\}_0 + \sum_j \{\psi\}_j \Delta \tilde{P}_j \quad (3.4)$$

Donde aún resta determinar Δa_j o dicho de otra forma el incremento en los parámetros estructurales $\Delta \tilde{P}_j = \tilde{P}_j - \tilde{P}_j^0$; con $\tilde{P}_j = \frac{a_j}{\bar{a}_j}$ y $\tilde{P}_j^0 = \frac{a_j^0}{\bar{a}_j}$.

De esta ecuación, el problema inverso es resuelto a través de la siguiente función de error:

$$\chi^2 = \sum_i W_i \left\{ d_i - u_{0i} + \sum_j \psi_{ij} \tilde{P}_j^0 - \sum_j \psi_{ij} \tilde{P}_j \right\} \quad (3.5)$$

Minimizando la ecuación respecto al término \tilde{P}_j y reagrupando matricialmente se obtiene:

$$[[\psi]^T[W][\psi] + \lambda[H]]\{\tilde{P}^0\} = [\psi]^T[W]\{d - u_0 + [\psi]\{\tilde{P}^0\}\} \quad (3.6)$$

Este sistema de ecuaciones se resuelve iterando con los nuevos valores de los parámetros estructurales hasta que el programa converge.

Otro parámetro que debe ser evaluado es el amortiguamiento, el cual se manifiesta como un decremento en la amplitud de la respuesta dinámica conforme las ondas viajan a través de la estructura. Los paquetes de EF, en los sistemas lineales, ajustan el valor de amortiguamiento por medio de la matriz de amortiguamiento; que por lo general está en función de la matriz de masa, de rigidez o de la combinación de ambas (Doyle, 1997; Quintana 2004). Para determinar el amortiguamiento de una estructura se deben realizar pruebas experimentales para ajustar la magnitud de la respuesta dinámica generada por el paquete de EF de los sensores más cercanos y alejados respecto al lugar de excitación. Es conveniente seleccionar el lugar de excitación cerca de uno de los extremos de la estructura. El factor de amortiguamiento es único de cada estructura, por lo que para cada una se debe realizar una prueba experimental en particular.

Para verificar un modelo de EF se considera la reconstrucción de la fuerza en función del tiempo, porque la solución de este problema inverso es muy sensible al grado de calibración de los parámetros estructurales. Cuando el modelo de EF no contiene un grado de calibración adecuado, se obtiene una pobre representación de la fuerza. La reconstrucción de una o varias fuerzas en función del tiempo es un problema inverso. Conociendo los parámetros estructurales con exactitud, el comportamiento dinámico de la estructura (a partir de su modelo de EF), la respuesta dinámica experimental y la ubicación de las fuerzas, es posible conocer la magnitud de la o las fuerzas en función del tiempo empleando un algoritmo de solución inversa. StrIDent es el algoritmo empleado para dar solución a este tipo de problema (Doyle, 1997; Doyle, 2004), ya que básicamente considera la optimización de una función de error por la introducción de un parámetro de regularización para eliminar el mal condicionamiento del sistema y mediante un proceso iterativo que permite seleccionar la mejor solución (Adams y Doyle, 2002; Alifanov, 198).

Otra manera de verificar el grado de calibración de un modelo de elemento finito es calcular la variación de las respuestas dinámicas experimentales y las del modelo de elemento finito calibrado utilizando un arreglo experimental que los efectuados para realizar la calibración dinámica.

3.4 Algoritmo de optimización para detección de daño

El objetivo principal del Método de Búsqueda Global es detectar el cambio en los parámetros estructurales de una manera sensible y única, partiendo de un experimento diseñado en forma adecuada para que las respuestas dinámicas sean registradas por los sensores colocados en diferentes lugares de la estructura. Así, el daño puede ser detectado; sin embargo, no es necesariamente cuantificado en magnitud, ni posición. En esto último radica el verdadero reto y se evalúa la utilidad y conveniencia de tener un modelo de EF calibrado (Bathe, 1995; Friswell y Mottershead, 1995; Hollandsworth y Busby, 1996).

Tomando ventaja del modelo de EF, es posible calcular la respuesta dinámica sin daño de la estructura, a la cual se le nombrará respuesta dinámica simulada. En la figura 3.1 se puede ver un ejemplo de la respuesta dinámica experimental y simulada cuando hay un daño, comparando ambas señales, se puede concluir que la estructura está dañada. Si ambas respuestas fueran similares, significaría que la estructura no tiene daño. Como primera fase, el daño es muy sencillo de determinar; sin embargo, el encontrar los parámetros asociados a este daño y su ubicación es el reto primordial.

El rango en cada uno de los parámetros estructurales determina su correspondiente ventana de búsqueda individual. Lo anterior significa que, basado en conocimiento previo de la estructura o por experiencia de los inspectores, se pueda definir de inicio los parámetros estructurales y su rango; por ejemplo, si consideramos una reducción en la sección transversal de un material que conforma una estructura en un determinado lugar y lo asociamos con daño, se comenzará con un intervalo de variación pre-definido con un pequeño incremento con respecto a su valor inicial; por lo tanto, esta ventana puede ser escogida, desde un valor inicial conocido --valor de diseño del material-- hasta una variación pequeña (por ejemplo un 10%) de reducción respecto al valor inicial. En relación con el nivel del daño, se puede usar el mismo criterio, considerando que el tamaño inicial es cero y si se realiza una inspección rutinaria de la estructura se puede inferir que el daño no se expandirá de manera súbita y por lo tanto también establecer un valor máximo aceptable. Finalmente, la posición -que es la variable más complicada (debido a que puede aparecer en cualquier lugar)- debe ser realizada en toda la estructura; es decir, se debe utilizar un esquema de búsqueda global.

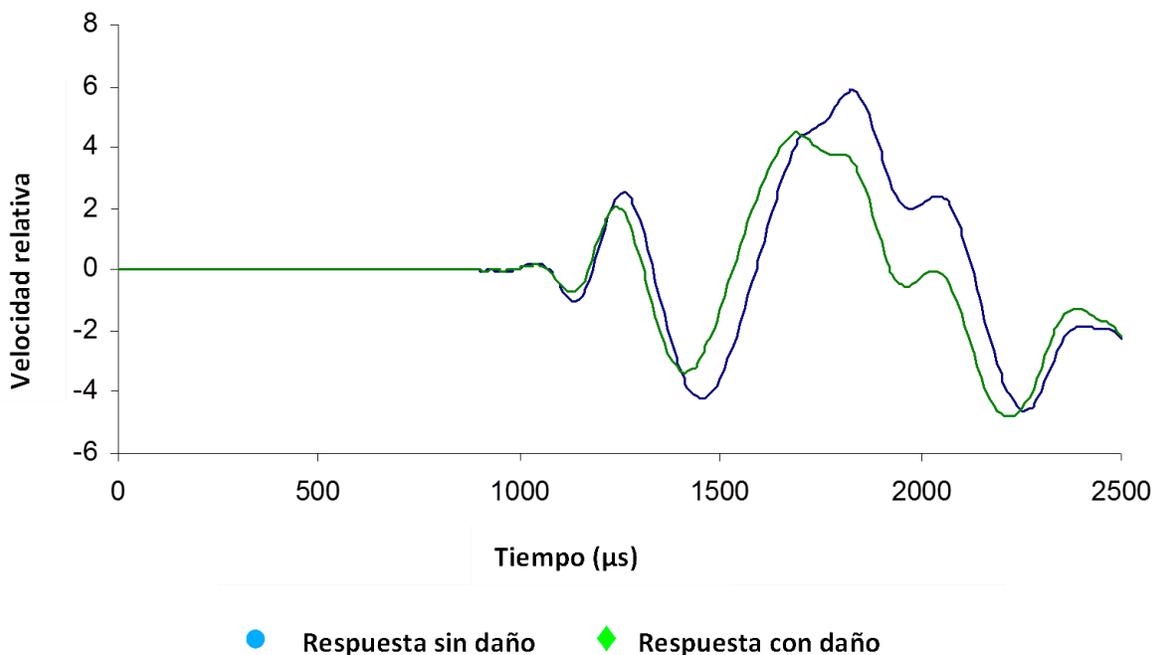


Figura 3.1 Respuestas dinámicas antes y después del daño

Cuando se selecciona la ventana de búsqueda para los parámetros estructurales, otros factores pueden jugar un papel importante; por ejemplo, si la estructura está más expuesta a daño en algunas regiones que en otras. Un puente sería un caso de este tipo, ya que puede tener secciones en contacto con agua salina por intervalos de tiempo y, por lo tanto, estar expuesto a tener daño por corrosión; en cuyo caso, se conocerían los lugares más factibles de daño y se delimitaría la ventana de búsqueda a dichos parámetros.

Una nueva etapa del problema comienza cuando se sabe que la estructura tiene daño y el objetivo es cuantificarlo; lo que implica encontrar los valores de los parámetros que representan dicha condición y producen la respuesta dinámica registrada experimentalmente. Para ello, definimos una función de error de mínimos cuadrados entre la respuesta experimental y simulada, que puede ser aplicada de manera independiente para cada nodo instrumentado. Así, la variación asociada a un cambio en los parámetros estructurales es cuantificada usando esta función de mínimos cuadrados (Ecuación 3.1) que se obtiene de la diferencia entre la respuesta dinámica experimental en el nodo j $\{r_{exp}\}_j$ y la respuesta del modelo de EF en ese mismo nodo j $\{r_{mod}\}_j$. En este caso, el vector de respuestas $\{r\}_j$ puede estar definido por los desplazamientos $\{u\}$, las velocidades $\{\dot{u}\}$ o las aceleraciones $\{\ddot{u}\}$, según el tipo de sensor que sea utilizado. Si no hay diferencia entre ambas respuestas, significa que los parámetros estructurales utilizados en el modelo corresponden con los de la estructura real. Así, cuando la variación de las respuestas dinámicas es significativa, se infiere que existe daño y que, mediante

un proceso recursivo, es posible cambiar los parámetros estructurales del modelo para minimizar dicha variación de las respuestas dinámicas e inferir las cualidades del daño.

$$V_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (r_{i,j,\text{exp}} - r_{i,j,\text{mod}})^2}{N}} \quad (3.7)$$

El término r_i representa la respuesta dinámica en el nodo j al tiempo i y N es el número de datos en el que dicha respuesta es discretizada en el tiempo. El tiempo total y la frecuencia de muestreo determinarán el número de datos en la ecuación de variación de las respuestas dinámicas; por ejemplo, si los datos son adquiridos a una frecuencia de 100 kHz durante un periodo de 2500 μs , los puntos por evaluar en la ecuación de variación serán 250. La figura 3.3 representa un segmento de la figura 3.2 para visualizar en más detalle la idea de la cuantificación de los puntos discretos para todos los instantes.

La aplicación de esta función de variación tiene muchas ventajas; la primera, permite el uso de diferente tipos de sensores como acelerómetros, velocímetros, extensómetros, etc.; segunda, sirve para cualquier tipo de estructura; tercera, no se restringe a problemas lineales, siempre y cuando pueda ser modelado el comportamiento dinámico no lineal para cualquier evento; y cuarta, no depende del tipo de prueba, por lo que evaluar vibraciones mecánicas (caracterizadas por tener largos periodos y bajas frecuencias) o la propagación de ondas (normalmente definida por periodos muy cortos y contenido de altas frecuencias).

Para identificar los parámetros asociados con daño; es necesario generar datos, respuestas de simulación, con diferentes valores en los parámetros estructurales. La idea básica supone un daño inicial, al cual se le atribuye una posición, un tamaño y otros parámetros iniciales; para los cuales será calculada la respuesta de simulación para determinar la variación, error cuadrático, respecto a la señal experimental de la estructura dañada. Estos valores iniciales y su rango quedan definidos en las ventanas de búsqueda.

El siguiente paso es cambiar uno de los parámetros estructurales, dejando los otros constantes, y calcular tanto su respuesta simulada como su variación con la respuesta dinámica experimental, repitiendo este proceso hasta abarcar todos los valores dentro del rango para un parámetro, para todos los parámetros seleccionados inicialmente en las ventanas de búsqueda. La posición del daño es determinada bajo las condiciones para las cuales la función de variación se minimiza.

El concepto descrito fue implementado en un código de computadora que permite modificar los valores de los parámetros estructurales automáticamente sobre el rango de variación de los parámetros. El código llamado Método de Búsqueda Global MBG es básicamente una serie de ciclos iterativos que efectúan los

programas GenMesh y StaDyn en cada ciclo (Doyle, 1997; Doyle, 2004; Quintana 2004). GenMesh es un código que modifica el archivo que define la estructura del modelo de EF y que permite cambiar el valor de los parámetros estructurales de forma automática. StaDyn es un programa el software de EF, para calcular la respuesta dinámica simulada del modelo. Una vez generada la respuesta de simulación, la variación entre las respuestas dinámicas es calculada y almacenada en el disco duro junto con la respuesta.

El diagrama del programa para la búsqueda global se muestra en la figura 3.2. El programa tiene algunas características importantes que vale la pena señalar para mejorar la búsqueda de los parámetros en toda una estructura. La primera de ellas es que la ventana de búsqueda puede ser de cualquier tamaño para cualquier parámetro, lo que da la pauta para que la búsqueda sea sobre todo el conjunto de valores en un parámetro o solo para una pequeña parte de este; por ejemplo, en el caso de la posición, esta puede ser en toda la estructura o solo sobre un miembro o sección en particular. La segunda ventaja es que es posible discretizar cada uno de los parámetros en forma individual, con cualquier valor de discretización; por ejemplo, si tomamos de nueva cuenta la posición, la búsqueda puede ser realizada sobre cada nodo de la estructura o sobre cada cuatro nodos. La tercera ventaja es que las respuestas dinámicas generadas por el cambio en los valores de los parámetros pueden ser almacenadas en una base de datos, lo anterior significa que una sola corrida es necesaria para un experimento en particular y para evaluar la estructura en un futuro. Si bien las respuestas pueden ser diferentes debido al impacto de la excitación, estas pueden ser guardadas en funciones de respuesta en el dominio de la frecuencia y por tanto hacerlas independientes del impacto de excitación. Estas respuestas pueden ser usadas para toda la vida útil de la estructura y hacen las búsquedas de daño altamente eficientes. La cuarta ventaja es que múltiples conjuntos de datos se pueden calcular simultáneamente, porque se puede asignar diversas tareas a diferentes procesadores.

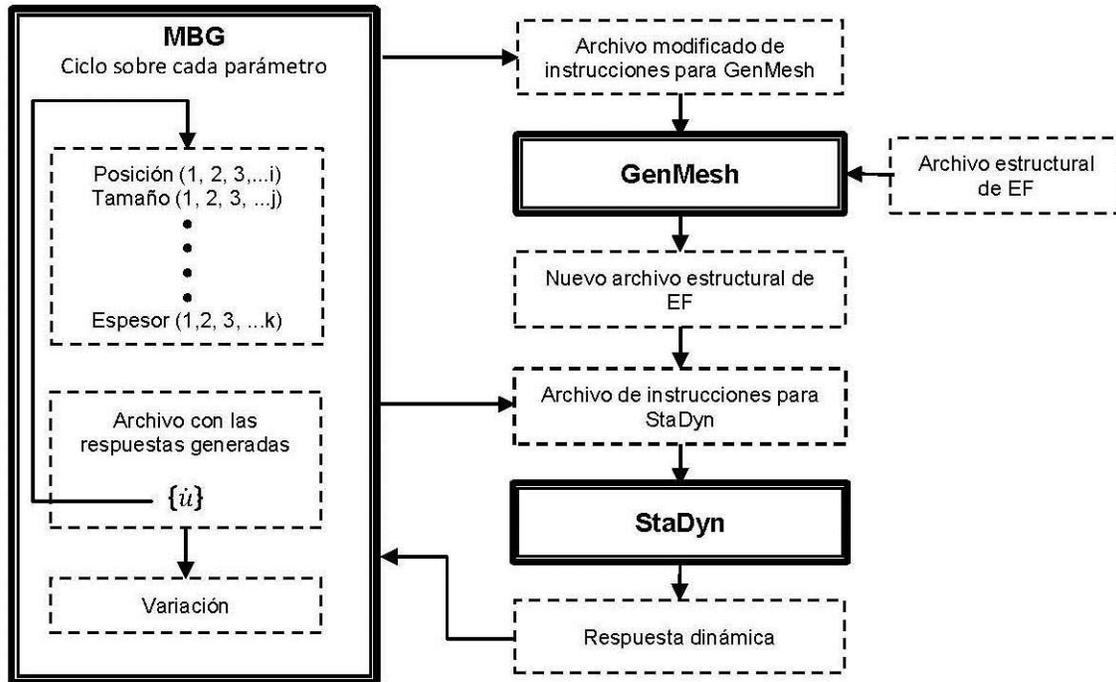


Figura 3.2 Esquemático del programa de búsqueda global

Una vez que las respuestas dinámicas han sido calculadas para cada una de las combinaciones de los parámetros estructurales, la variación asociada a cada una de ellas es calculada. Para calcular la variación de las respuestas dinámicas se generó un subrutina llamada “Variación”, cuyo diagrama de flujo se puede ver esquemáticamente en la figura 3.3; y básicamente se puede ver que el subprograma consiste en dos ciclos iterativos: uno que calcula la variación de las respuestas dinámicas mediante la ecuación 3.7 y el segundo que llama a cada una de las respuestas dinámicas asociadas con un combinación de cambios en los parámetros estructurales. Posteriormente el subprograma almacena el valor de la variación de las respuestas dinámicas así como los parámetros estructurales que produjeron dicha variación. El subprograma variación permite al usuario tener alternativas para calcular las variaciones, una de ellas es que se puede calcular la variación de las respuestas dinámicas de una o dos posiciones de excitación de la fuerza, otra es que permite calcular la variación usando un sensor o una combinación de sensores.

Para visualizar los datos, existen múltiples posibilidades; sin embargo, siempre existe la dificultad de analizar más de tres parámetros en un solo gráfico. Generalmente en una gráfica en dos dimensiones, dos variables son independientes y las otras son fijas. Por simplicidad, en el estudio que se muestra, se manejarán tres parámetros estructurales y la variación de las respuestas dinámicas asociada a ellos, sin que necesariamente esté limitado a tres variables ya es posible calcular tantos parámetros estructurales como variables pueda manejar el archivo que contiene la información del modelo de EF. Para visualizar

los datos se utilizan gráficos bidimensionales a los que se les agrega un parámetro más, con lo que se pueden visualizar dos parámetros estructurales y la variación de las respuestas dinámicas asociada a ellos en una sola gráfica. El parámetro adicional se observa en el gráfico como múltiples líneas, el número de líneas depende de la discretización realizada sobre el parámetro graficado. Decidida la forma de visualizar los datos el siguiente paso consiste en analizar las gráficas de variación de las respuestas dinámicas.

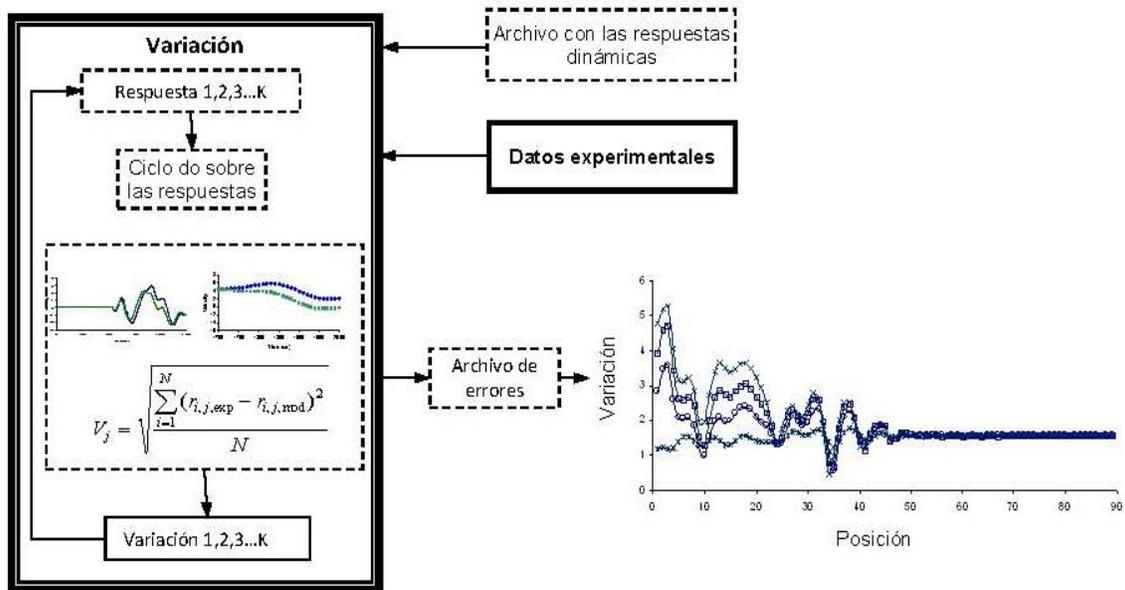


Figura 3.3 Esquemático del subprograma Variación

4 Análisis de patrones del Método de Búsqueda Global

4.1 Análisis de daño en una viga

El análisis de los patrones generados por las gráficas de variación de las respuestas dinámicas tiene como finalidad extraer información de ellos para la identificación de daño. Para este análisis se desarrolló un estudio en el que fueron utilizados los datos simulados por el modelo de EF de una viga, figura 4.1, por ser un modelo sencillo y se varió el espesor de la viga de 0,0127 m (0,5 in) a 0,00762 m (0,3 in) en un segmento con una longitud de 0,04445 m (1.75 in), ubicado a una distancia de 0,8636 m (34,0 in) medida a partir de su lado izquierdo. Sobre la viga se simuló una instrumentación de seis sensores de los cuales se obtuvo su respuesta dinámica. El uso de información de simulación generada por un modelo de EF permitió una mejor evaluación del algoritmo [16].

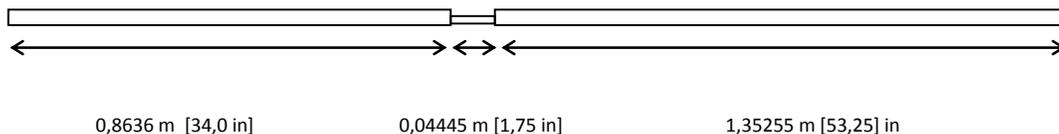


Figura 4.1 Reducción de espesor en una viga

Para este problema, el programa MBG utilizó la siguiente selección de ventanas y nivel de discretización por variable: para la posición toda la viga, es decir de 0 a 2,2606 m (89,0 in) con un nivel de discretización de 0,0254 m (1,0 in); para la longitud del daño, de 1 a 13 elementos, es decir de 0,00635 m (0,25 in) a 0,08255 m (3,25 in) con un nivel de discretización de cuatro elementos (0,0254 m (1,0 in)) lo que implica magnitudes de 1, 5, 9 y 13 elementos; y para el espesor, de 0,00381 m (0,15 in) a 0,01143 m (0,45 in) con un nivel de discretización de 0,00254 m (0,10 in). Los gráficos serán representados con un espesor constante, la posición en el eje “X”, con diferentes longitudes de daño a lo largo del mismo, y en el eje “Y”, la variación de las respuestas dinámicas asociada a los parámetros.

El primer conjunto de gráficos de variación para analizar es generado usando un sensor y seis posiciones diferentes de impacto. Estos datos son mostrados en la figura 4.2, de la cual se pueden observar patrones definidos de los gráficos. Primeramente, se puede visualizar la presencia de una línea recta en todos los gráficos. Esta línea será conocida como línea de referencia, y será asociada con aquellas posiciones donde no hay información. En el resto del gráfico hay variaciones en los valores, y por tanto es posible extraer información. La variación

de los valores depende de la distancia entre el sensor y la posición de impacto y la posición relativa de ambos al lugar donde se encuentra el daño. Por ejemplo en el gráfico de variación de las respuestas dinámicas generado por el sensor 2 y la posición de impacto 6, P_6S_2 , la distancia es más de 1,524 m (60 in), y la línea de referencia tiene un valor menor a 1, mientras que en otro gráfico donde se utiliza el sensor 2 y la posición de impacto 4, P_4S_2 , la distancia es menos de 1,27 m (50 in) y la línea de referencia tiene un valor mayor a 1. Estas distancias influyen en el valor de la línea de referencia y entre más cercana se encuentren al daño mayor es el valor de la línea de referencia.

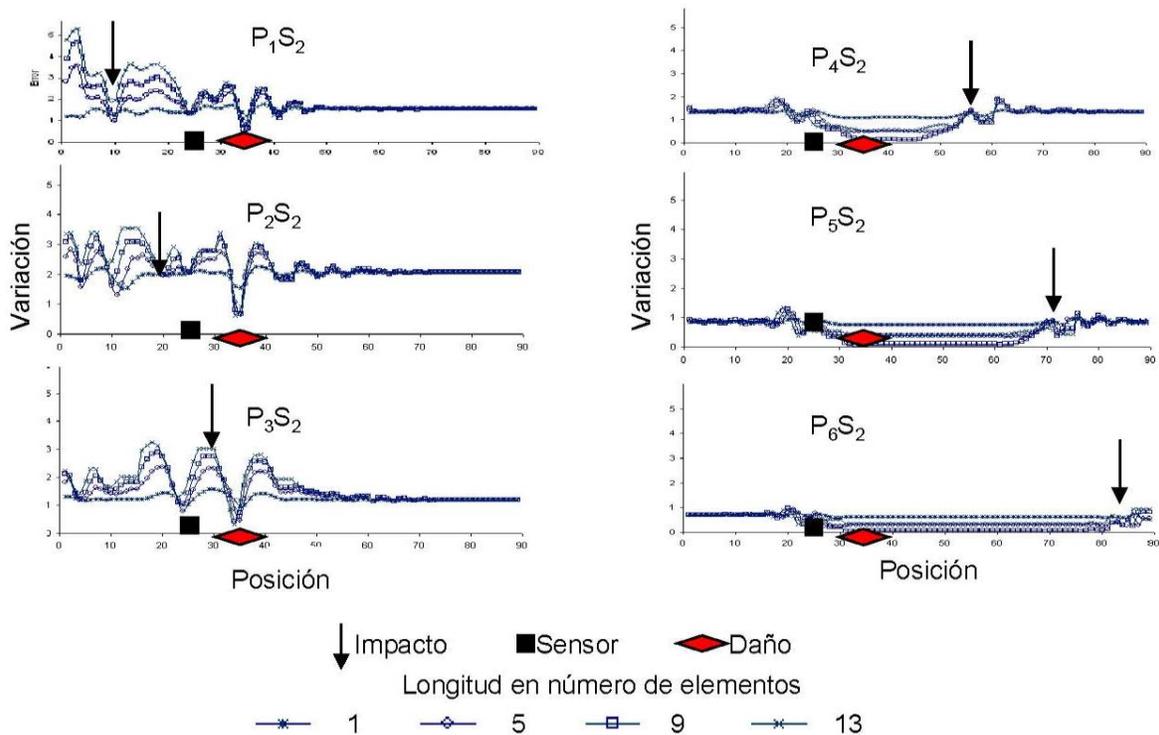


Figura 4.2 Gráficos generados usando un sensor y diferentes lugares de excitación, manteniendo el espesor constante

De los gráficos también es posible observar que hay puntos por arriba y por debajo de la línea de referencia. Los valores por debajo de la línea de referencia son mínimos, y estas posiciones es donde existe la probabilidad de encontrar daño. Se puede ver que todos los gráficos del primer conjunto de datos presentan más de un mínimo, por lo que no se podría utilizar un método iterativo directo para ubicar el daño. Por otra parte, si solo una prueba fuera realizada, sería casi imposible encontrar la posición del daño. Algunos gráficos, como P_4S_2 , P_5S_2 y P_6S_2 , tienen una extensión muy grande del mínimo por lo que es posible determinar una ubicación incorrecta para la localización del daño. De los gráficos de la figura 4.2 también se puede observar que hay valores por encima de la línea de referencia, que son puntos donde hay una alta probabilidad de que no exista daño en esa zona. Otra característica importante de señalar es que no hay

información donde se impacta la estructura y donde es colocado el sensor, como consecuencia en estas posiciones aparecen como mínimos o máximos en los gráficos. No es claro por qué se tiene este fenómeno en los lugares donde se impacta y se coloca el sensor.

El segundo conjunto de datos analizado, es aquel donde la posición del sensor será cambiada respecto a la posición del daño y la posición del impacto será variable en cada gráfico. Esta prueba permite cubrir las cuatro posibilidades de localización del sensor y el punto de impacto respecto al lugar donde se encuentra el daño: cuando el sensor y el lugar de excitación se encuentran al lado izquierdo del daño o al lado derecho, cuando el impacto es al lado izquierdo y el sensor al lado derecho del daño y viceversa. El segundo conjunto de datos también puede ser visto, como los datos cuando el sensor está a la derecha del daño, el cual abarca dos posibilidades de las cuatro. El gráfico es mostrado en la figura 4.3 y corrobora los patrones discutidos en el gráfico de la figura 4.2.

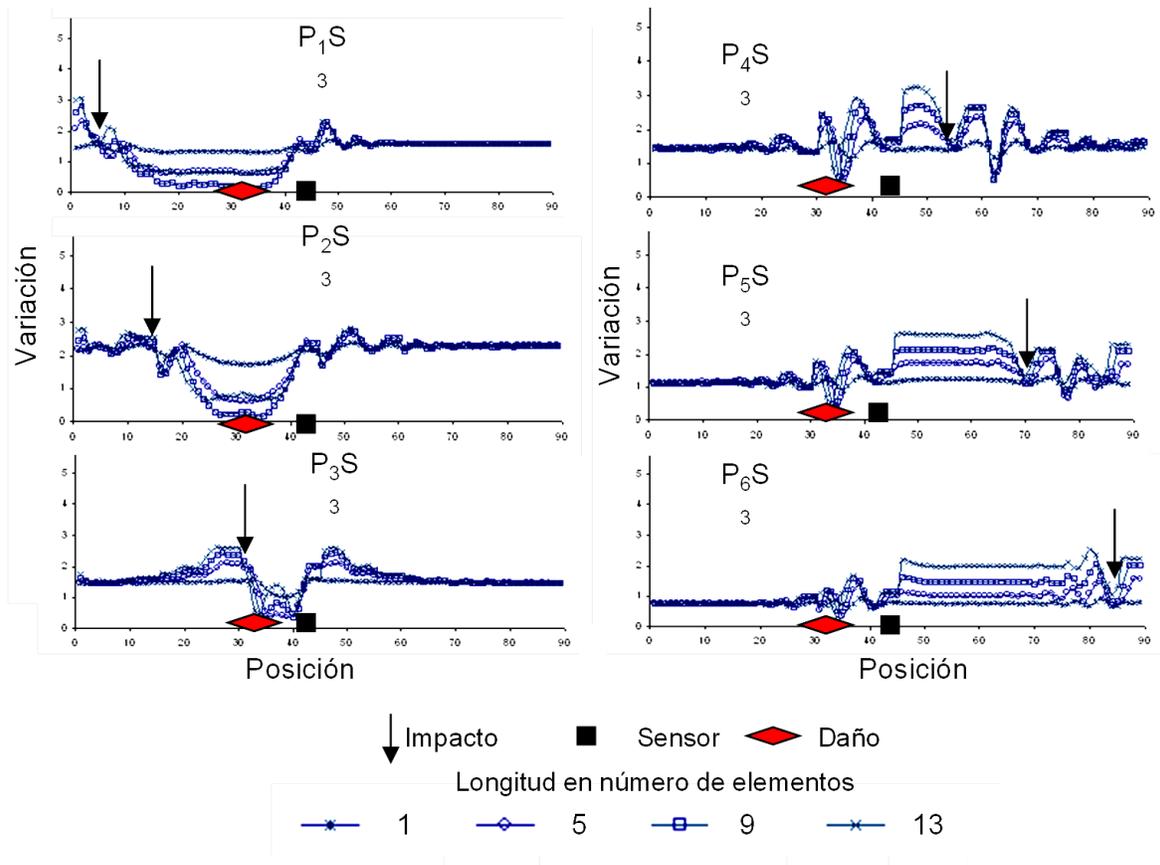


Figura 4.3 Gráficos generados usando un sensor y diferentes lugares de excitación

De este nuevo conjunto de datos, es posible extraer información adicional a la que se generó del primer conjunto. De los dos conjuntos es claro que si el daño está entre el sensor y la posición de impacto, todas las variaciones en esa zona estarán por debajo de la línea de referencia. Lo anterior se puede observar en los gráficos

P_1S_3 , y P_2S_3 de la figura 4.3 y P_4S_2 , P_5S_2 y P_6S_2 de la figura 4.2. Por otro lado, las variaciones están por arriba de la línea de referencia cuando el daño está afuera de la región delimitada por el sensor y el lugar de impacto. Este patrón puede ser visto en los casos P_4S_3 , P_5S_3 y P_6S_3 de la figura 4.7 y P_1S_2 y P_2S_2 de la figura 4.2.

De los dos conjuntos de gráficos analizados se puede concluir que no es posible localizar el daño utilizando solamente una prueba. Un caso crítico es el ejemplo P_4S_3 , este gráfico muestra dos mínimos que son muy competitivos entre ellos y además tiene regiones donde no es posible inferir si existe daño o no; por lo tanto es muy probable que si solo se analizará este gráfico se terminaría concluyendo con una respuesta errónea.

Un último análisis fue ejecutado usando solo un lugar para excitar la viga con múltiples sensores posicionados a lo largo de esta. Los datos son mostrados en la figura 4.4; los gráficos de la figura confirman los patrones descritos en los párrafos anteriores y permite obtener nueva información. La información nueva es originada por la línea de referencia. Debido a que el impacto es el mismo para cada uno de los gráficos, un sensor por gráfica, la línea de referencia puede ser comparado para los diferentes gráficos; esto permite concluir que cuando el lugar de excitación y el sensor son cercanos a la zona donde se encuentra el daño, la línea de referencia tiende a tener valores más altos que cuando están lejos del lugar del daño. Por ejemplo, usando los gráficos P_2S_2 y P_2S_3 la línea de referencia tiene un valor cercano a 2,0, debido a que están cerca de la posición de daño, pero en cambio cuando se observa el gráfico P_2S_6 la línea de referencia tiene un valor aproximado de 0,5 porque el sensor está lejos de la posición del daño.

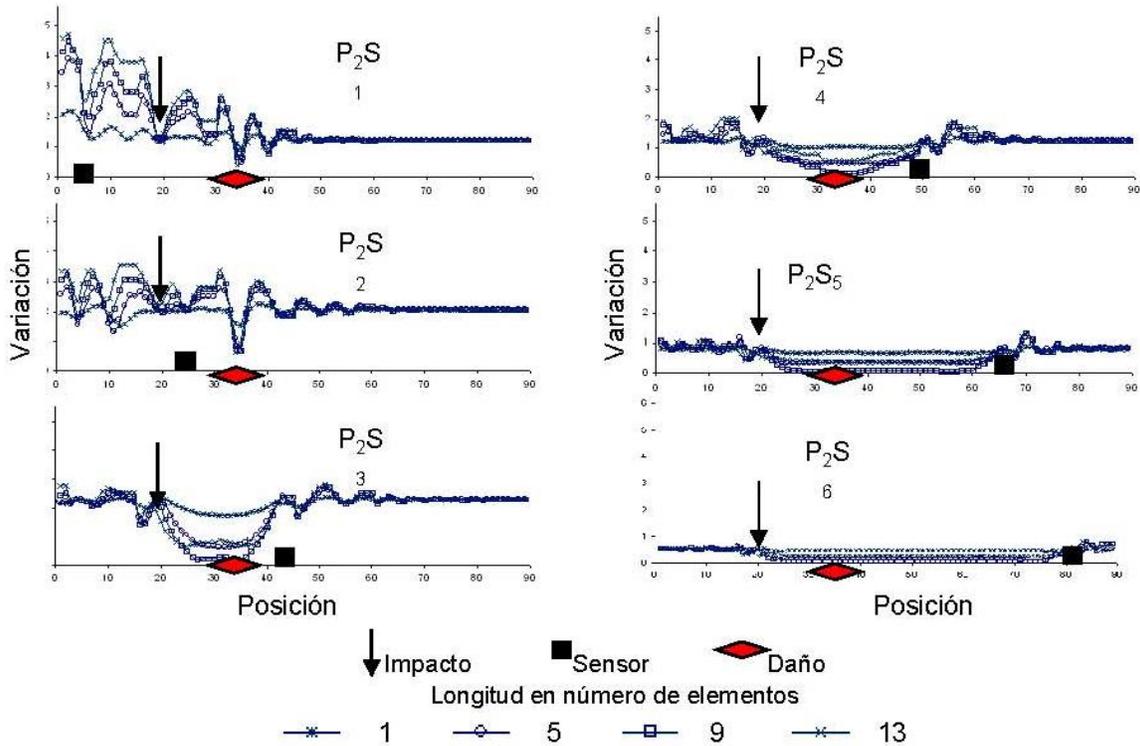


Figura 4.4 Gráficos generados usando una posición de excitación y diferentes sensores simultáneos

Sintetizando toda la información obtenida de los diferentes gráficos se puede ver los siguientes patrones:

I. Línea de referencia

- Se genera una línea recta a lo largo de la cual no es posible inferir información.
- Entre más cercano se encuentre el impacto y el sensor de la zona de daño, más grande es el valor de la línea de referencia.

II. Datos por arriba de la línea de referencia.

- Cuando el daño está fuera de la región delimitada por el sensor y el lugar de excitación, el valor de las variaciones será mayor que el de la línea de referencia para esta región delimitada.
- Los datos, variaciones, estarán también por arriba de la línea de referencia, cuando no hay daño en esa área.

III. Datos por debajo de la línea de referencia.

- Cuando el daño está dentro de la región delimitada por el sensor y el lugar de excitación, el valor de las variaciones será menor que el de la línea de referencia para esta región delimitada.
- Los datos, variaciones, estarán también por debajo de la línea de referencia cuando hay la probabilidad de daño en esa área.

Del análisis de los datos, también es posible concluir que existe intercambio entre los sensores y el número de impactos; esto es, pocos sensores con muchos impactos o muchos sensores con pocos impactos.

De acuerdo con el número de sensores y el número de experimentos ejecutados se pueden identificar tres tipos de pruebas que se pueden realizar en una estructura; la primera de las tres pruebas es cuando un solo experimento es realizado, para la cual un solo impacto es usado para excitar la estructura, y múltiples sensores son colocados en toda la estructura; el segundo de ellos, cuando solo se dispone de un sensor y se efectúan múltiples impactos en diferentes lugares de la estructura conservando la posición del sensor fija; es decir, se realizan varios experimentos independientes, lo que depende del número de secciones en la estructura; el tercer tipo es cuando un sensor, un impacto y un experimento se realizan por sección, el sensor no es fijo, se mueve al lugar de la sección que se evalúa y se ejecutan múltiples experimentos como secciones hay en la estructura.

Los tipos de prueba se pueden visualizar en una matriz, donde las columnas representan los sensores y los renglones representan los impactos de excitación, el subíndice i representa la sección donde la estructura fue excitada y el subíndice j , la sección donde el sensor es colocado en la estructura. Toda la información dinámica de la estructura se puede extraer en N experimentos donde N es igual al número de secciones en que la estructura fue dividida, los tipos de prueba se visualizan en la matriz de la siguiente manera; los renglones representan las pruebas que son del tipo 1, las columnas representan las pruebas que son del tipo 2 y la diagonal corresponde a una prueba del tipo 3. La figura 4.5 muestra la matriz que se genera cuando se usa la viga dividida del ejemplo de la sección anterior, la cual fue dividida en seis secciones, en esta figura también se muestra esquemáticamente los tres posibles tipos de prueba.

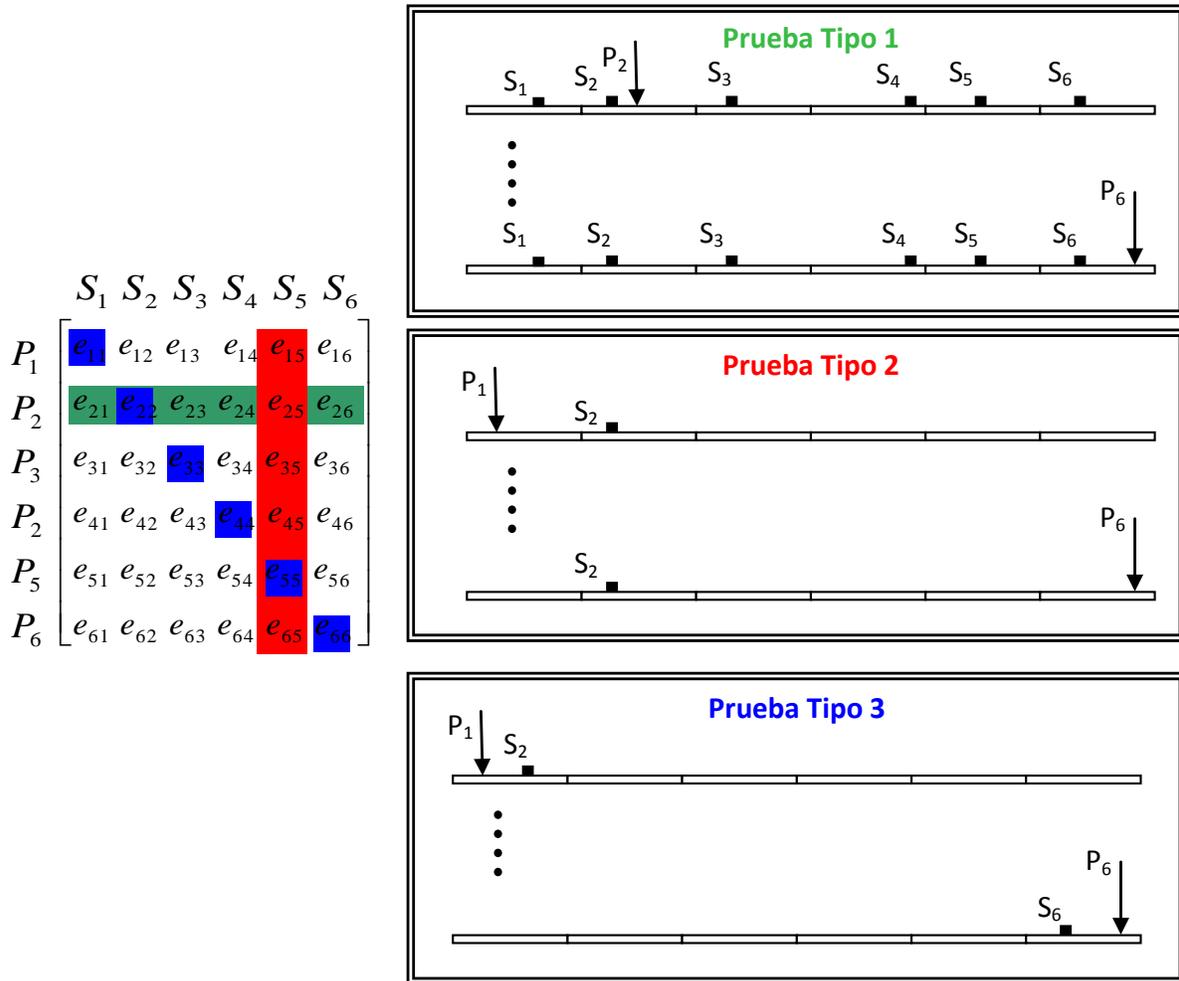


Figura 4.5 Esquemático de los tipos de prueba que se pueden realizar en una estructura

La evaluación de las variaciones es una de las tareas principales para valorar la estructura, por lo cual es necesario establecer un método que permita su evaluación. El método consiste en dividir el modelo de EF en varias secciones virtuales; las cuales serán evaluadas una a una dependiendo de la ubicación de las variaciones respecto a la línea de referencia. Lo anterior permitirá la eliminación de mínimos falsos y hará más robusta la sección donde se encuentre el daño. La longitud de la sección es escogida por el usuario, y se recomienda tener secciones de tamaño razonable alrededor de 0,254 m (10,0 in) a 0,381 m (15,0 in). Cuando el tamaño de la sección es demasiado pequeño, será necesario realizar una mayor cantidad de pruebas para evitar la ambigüedad; y si es demasiada larga, el promedio se perderá y tenderá al valor de la línea de referencia.

Para clarificar la idea de la evaluación dividiendo la estructura en secciones, se realizará un ejemplo en la viga, la cual es dividida en seis secciones cinco de 0,381 m (15,0 in) y la última de 0,3556 m (14,0 in). Cada región se identificó con

una letra y se simuló daño en la viga, el cual corresponde a una disminución de espesor del 40%, en la región C. En la figura 4.6 se puede ver el esquema de la viga dividida en secciones y el daño en la región C.

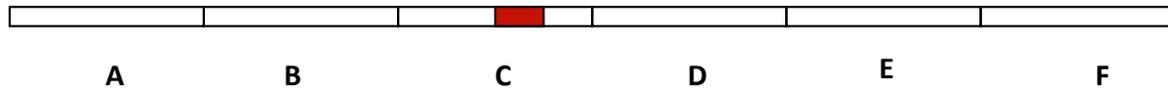


Figura 4.6 Viga dividida en secciones, con daño en la sección C

La figura 4.7 muestra los gráficos con las variaciones para dos pruebas diferentes, cada gráfico tiene diferentes patrones los cuales serán evaluados y representan todos los casos posibles. Una calificación será asignada a cada sección para evaluar la estructura en todas sus secciones. Para los datos que se encuentran por arriba de la línea de referencia se puede tener dos calificaciones, la mayor, calificación de 2, para cuando los datos tengan un valor alto respecto al valor de la línea de referencia, y la siguiente, calificación de 1, cuando los datos están por arriba de la línea de referencia pero estén cercanos a ella. Los puntos sobre la línea de referencia tienen solo una calificación, calificación cero. Para los datos debajo de la línea de referencia también se tienen dos calificaciones, cuando todos los datos están por debajo de la línea de referencia a esta sección se le asignará la calificación más baja, calificación de menos 2, y si, solamente parte de ellos está por debajo de la línea de referencia se asignará la calificación siguiente mayor, calificación de menos 1.

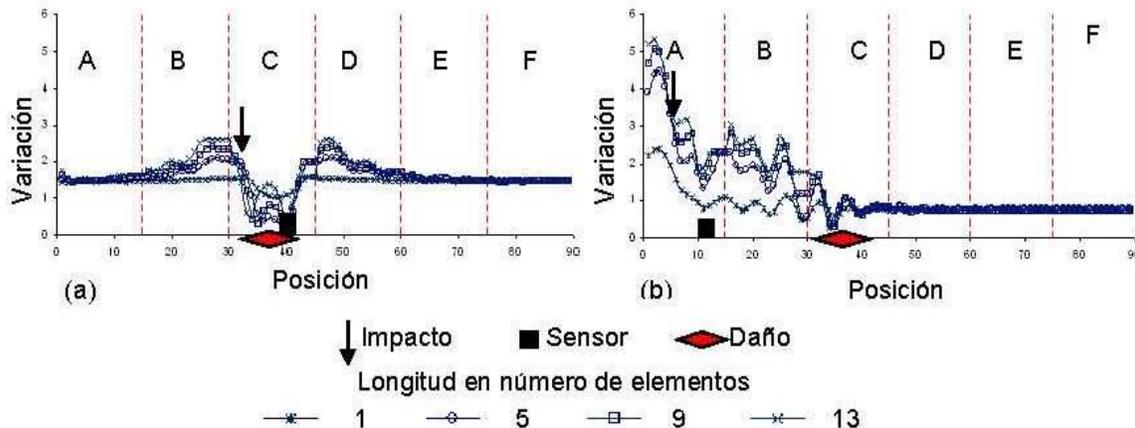


Figura 4.7 Gráficos de variación de las respuestas dinámicas con diferentes patrones

De esta manera las secciones pueden tener cinco calificaciones, a las cuales se les asignarán valores de 2 a -2. Las calificaciones y los tipos de secciones se pueden resumir como:

- 2 Regiones sin daño, con alta probabilidad
- 1 Regiones ambiguas, probablemente sin daño
- 0 Regiones sin información
- 1 Regiones que son ambiguas, probablemente con daño.
- 2 Regiones con daño, alta probabilidad.

4.2 Evaluación de un marco estructural

Para probar el Método de Búsqueda Global se utilizó una estructura tipo marco, figura 4.8, fabricada en el laboratorio y dividida en diez secciones virtuales para su análisis, la estructura es de aluminio, mide 1,397 m (55,0 in) de longitud por 0,2667 m (10,5 in) de ancho; la sección transversal de las vigas de aluminio es de $1,6129 \times 10^{-4}$ m (0,25 in²). La estructura fue calibrada previamente [16] y posteriormente se diseñó un arreglo experimental para simular daño, figura 4.8, el cual se produjo agregando dos barras de aluminio en una de las secciones de la estructura, evitando dañarla permanentemente y tenerla disponible para pruebas futuras. Las barras de aluminio se pegaron con adhesivo epóxico a las caras laterales de la sección F de la estructura y, como estas barras tienen una sección transversal de 0,00762 m por 0,0127 m (0,3 in por 0,5 in), el incremento de espesor fue de 0,01524 m (0,6 in) respecto al valor original de la sección transversal. En la figura 4.9 se observa una fotografía de las barras de aluminio adheridas a la sección F, la cual es uno de los miembros verticales de la estructura.

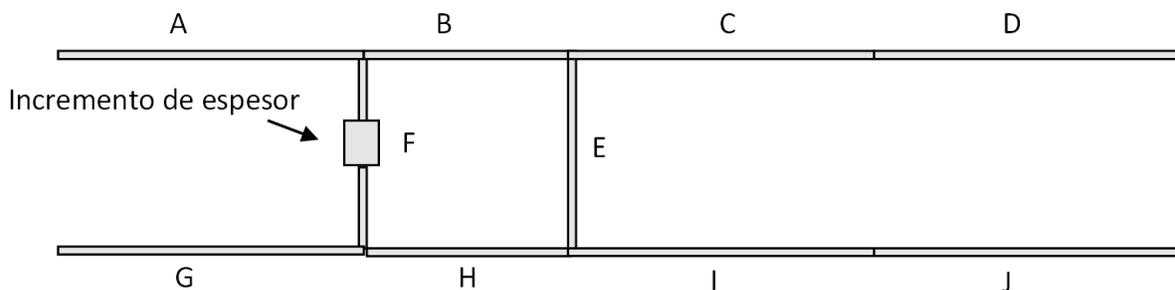


Figura 4.8 Secciones de la estructura H

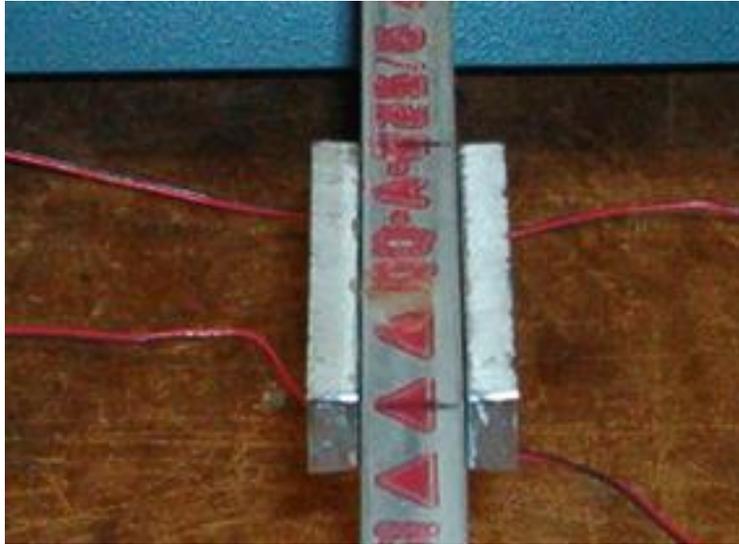


Figura 4.9 Barras de aluminio adheridas a la estructura H

Con el objetivo de tener mayor sensibilidad en las cuatro secciones del centro, B, F, E y H, los sensores de movimiento se colocaron cerca de éstas, en las secciones A, C, G e I, y el impacto para excitar la estructura fue la sección H. Este arreglo permitió tener información de las secciones A, B, C, F, E, G, H, I por la cercanía de los sensores y el lugar de impacto, mientras que las regiones J y D tenían poca sensibilidad por estar más alejadas de los sensores. En el esquema de la figura 4.10 se aprecian las posiciones de los sensores en la estructura, así como el lugar de excitación. La figura 4.11 presenta una fotografía tomada del arreglo experimental antes descrito.

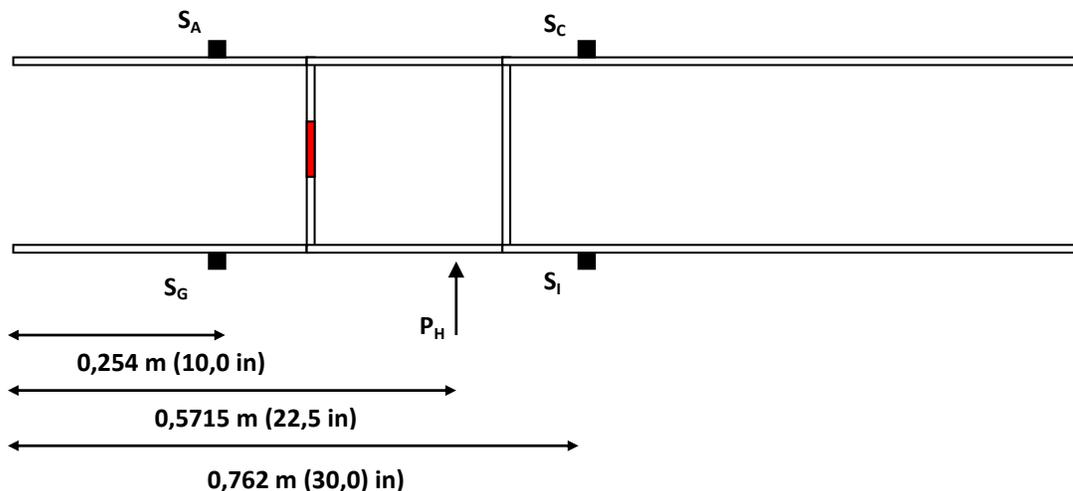


Figura 4.10 Ubicación de los sensores de la estructura H



Figura 4.11 Fotografía del arreglo experimental

Los datos experimentales, al igual que para la viga, fueron adquiridos por el sistema de adquisición Dash-18, con una frecuencia de muestreo de 100 mil muestras por segundo para cada uno de los canales durante un periodo de tiempo de 2500 μ s. La sensibilidad de los acelerómetros y del transductor de fuerza utilizados durante la prueba se puede consultar en la referencia (Quintana, 2004).

Una vez detallado el arreglo experimental se fijaron los parámetros y ventanas de búsqueda que utilizó el MBG. En este problema en particular se analizaron tres parámetros, la ubicación, la extensión del daño, y el cambio en el espesor original. Las ventanas de búsqueda que se establecieron para estos parámetros fueron: para la ubicación del elemento 1 al elemento 4132, con un nivel de discretización de búsqueda de cada cuatro elementos, para la extensión del daño desde un elemento hasta 13 elementos dañados con un nivel de discretización de 4 y, finalmente, para el espesor desde 0.02286 m hasta 0,0381 m (0,9 in hasta 1,5 in) con una discretización de 0,00762 m (0,3 in).

Las respuestas dinámicas de la medición experimental con daño en dos sensores (G y C), comparadas con las correspondientes generadas por el modelo de elemento finito del modelo H, se aprecian en las figuras 4.12 y 4.13. De la información de los gráficos, es evidente que la diferencia que existe entre las respuestas dinámicas se debe a la presencia del daño y, por tanto, el análisis de dicha diferencia puede aportar información sobre el daño mismo.

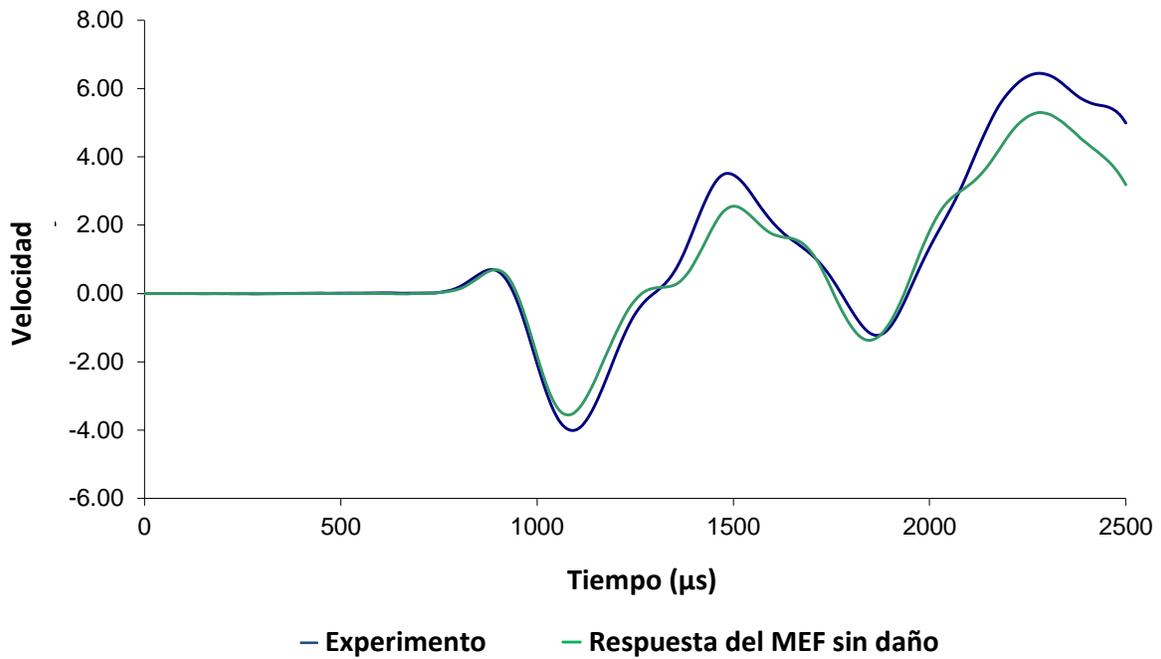


Figura 4.12 Respuesta dinámica experimental y del MEF sin daño en el sensor G

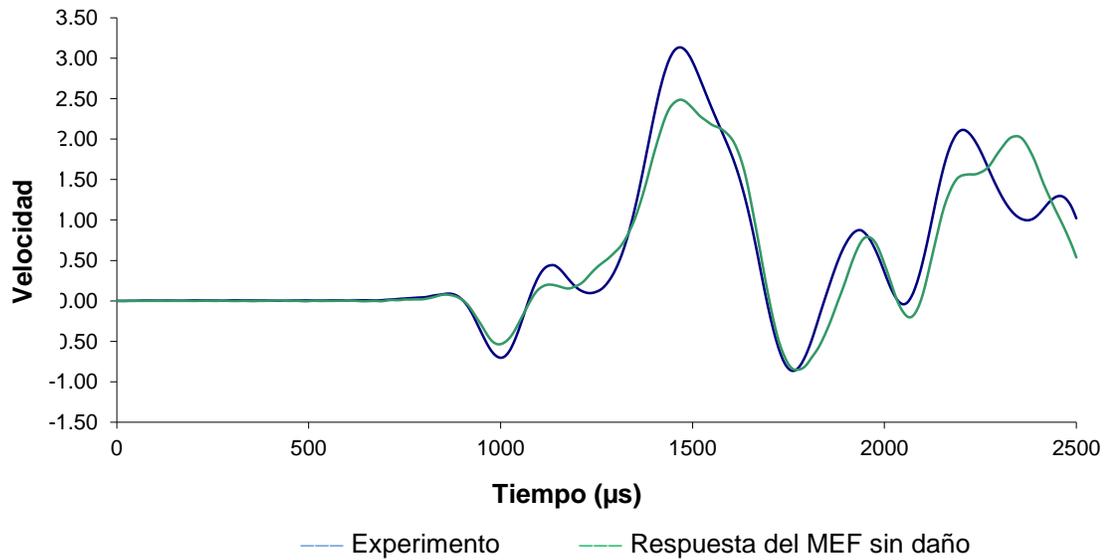


Figura 4.13 Respuesta dinámica experimental y del MEF sin daño en el sensor C

Para determinar la posición del daño, la variación de las respuestas dinámicas se calculó inicialmente suponiendo un espesor de 0,0381 m (1,5 in). Los gráficos para estos resultados se pueden ver en la figura 4.14.

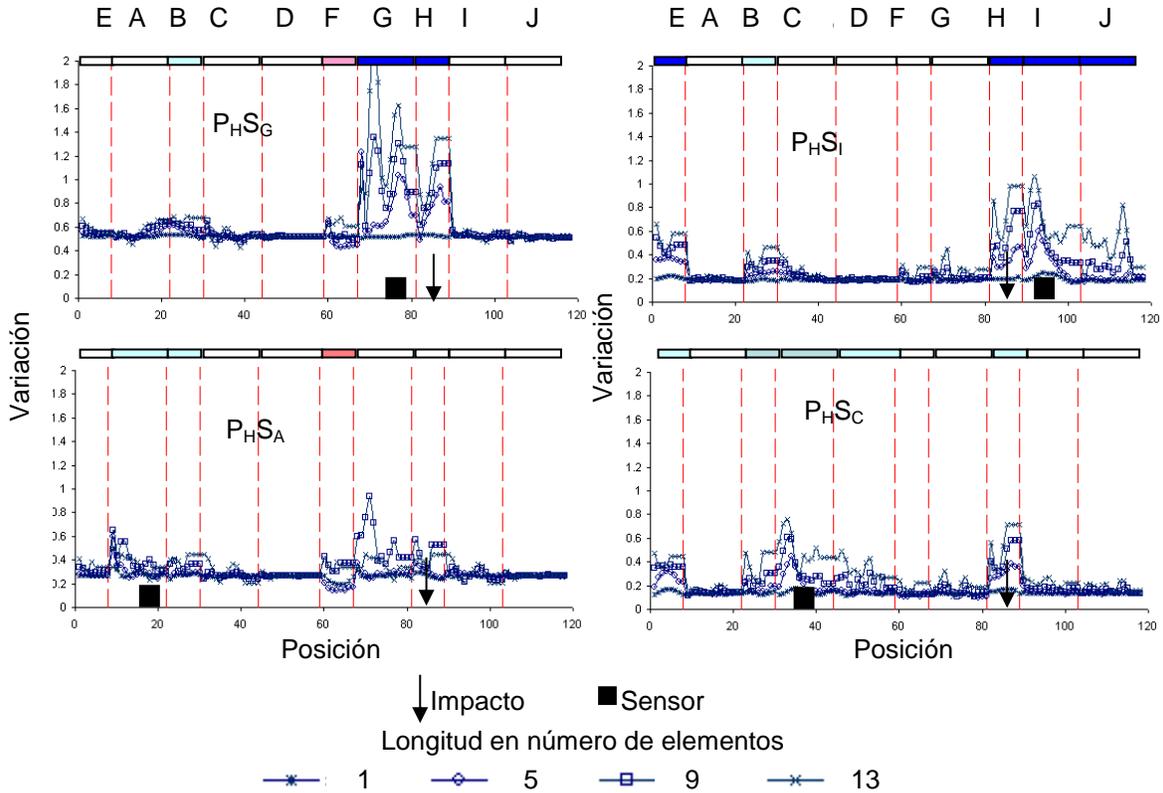


Figura 4.14 Gráficos de variación de las respuestas dinámicas generados manteniendo un espesor constante de 0,0381 m

En la figura 4.14, es fácil apreciar la variación de los datos respecto a la línea de referencia, donde el valor más alto de la línea de referencia es el P_HS_G debido a la cercanía que tiene con el lugar de impacto, el sensor y el daño. En la misma figura, también se distinguen las regiones que se encuentran libres de daño, respecto a las regiones donde es posible encontrarlo. En la figura 4.15 se presenta la calificación de las secciones.

Se concluye que la región con mayor probabilidad de tener daño es la región F; adicionalmente, cuando se analizan los gráficos se observa que las regiones D y J no tienen información, como resultado de la distancia que hay entre la posición de impacto, el lugar de los sensores y la posición del daño. Se pueden descartar las secciones D y J, debido a que se pueden ver datos por encima de la línea de referencia en los gráficos P_HS_I y P_HS_C. La región que tiene mayor sensibilidad es la región H, lo cual es normal debido a que fue en esta región donde se excitó la estructura.

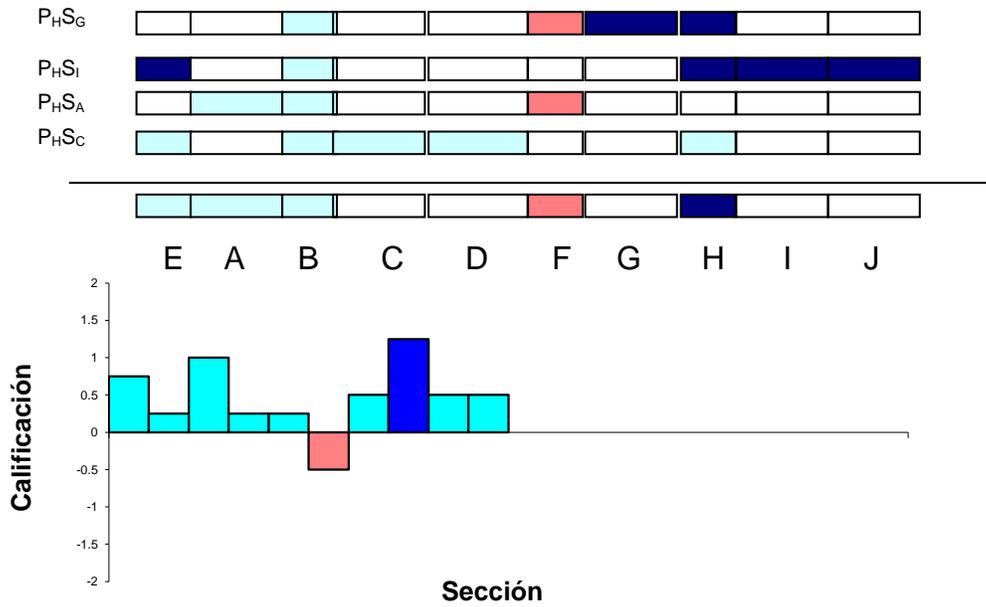


Figura 4.15 Calificaciones asignadas por el MBG a las secciones del modelo H

Con el objetivo de extraer más información y analizar el comportamiento de los gráficos de variación de las respuestas dinámicas utilizando datos experimentales, se realizó la evaluación de los gráficos utilizando un espesor de 0,02286 m (0,9 in), el resultado de la evaluación se puede ver en las figura 4.16. De los resultados se puede concluir terminantemente que la región que tiene la mayor probabilidad de tener el daño es la región F.

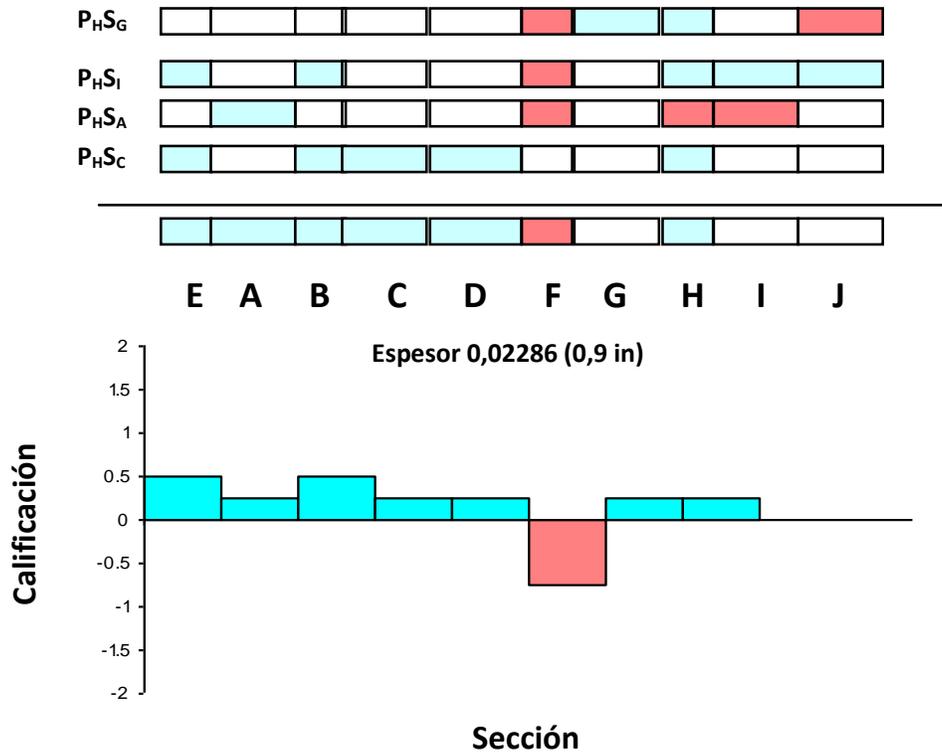


Figura 4.16 Calificaciones asignadas por el MBG a las secciones del modelo H utilizando un espesor de 0,002286 (0,9 in)

El siguiente paso fue calificar cada uno de los elementos dentro de la sección F para identificar aquellos que presentaran la mayor probabilidad de tener el daño. En la figura 4.17 se muestra la calificación para los cuatro gráficos de variación de las respuestas dinámicas para cada uno de los elementos de la sección F usando un valor de espesor de 0,0381 m (1,5 in).

Como se puede ver en la figura 4.17, se realizó un cambio en el valor máximo y mínimo de las escalas para evaluar las posiciones más fácilmente. Con el cambio efectuado, es sencillo visualizar el valor de la variación de las respuestas dinámicas para cada una de las magnitudes del daño y evaluar las posiciones, las cuales son mostradas en la figura 4.18. De esta última figura se observa que las posiciones con mayor probabilidad de daño son las que corresponden a las posiciones 3 y 4. La posición 3 se relaciona con el elemento 9, mientras que la 4 con el elemento 13. Las barras de aluminio fueron colocadas en el modelo H de tal forma que el daño comenzara en el elemento 12, por lo que se puede concluir que la aproximación del MBG es aceptable con respecto al valor real.

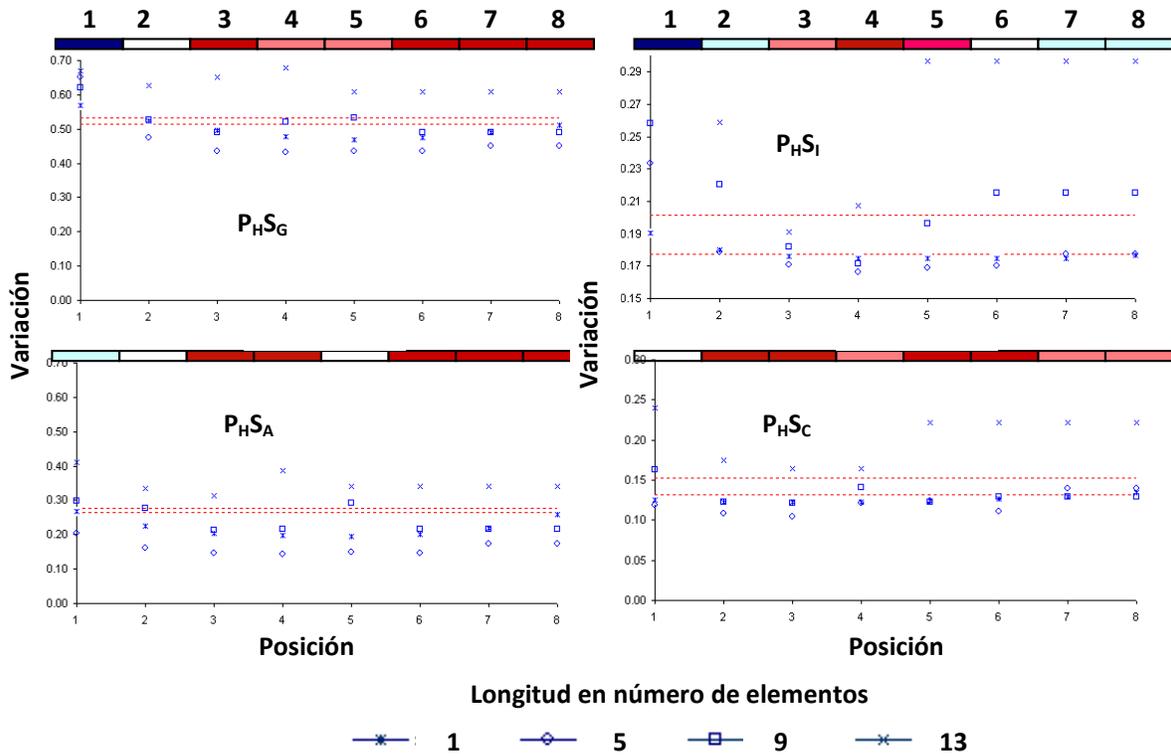


Figura 4.17 Gráficos de variación para la sección F, usando un espesor constante de 0,0381 m (1,5 in)

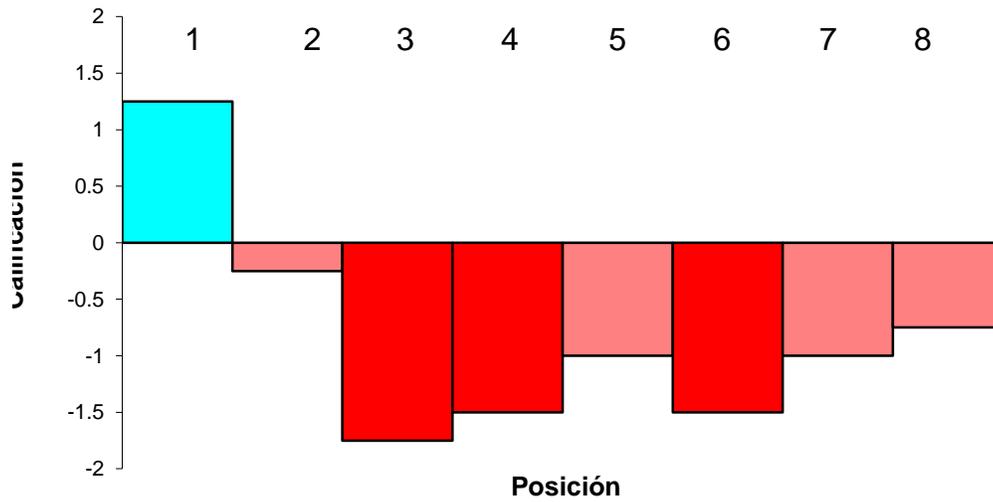


Figura 4.18 Evaluación de los elementos de la sección F, para un espesor de 0,0381 m (1,5 in)

Conociendo el elemento donde es posible que comience el daño, se graficaron los valores de la variación de las respuestas dinámicas para este elemento, dejando libres la magnitud, tamaño, y el espesor, pérdida o ganancia en la sección transversal. En la figura 4.19 se puede ver los gráficos de variación de las respuestas dinámicas y en la tabla 4.1 se puede ver estos valores.

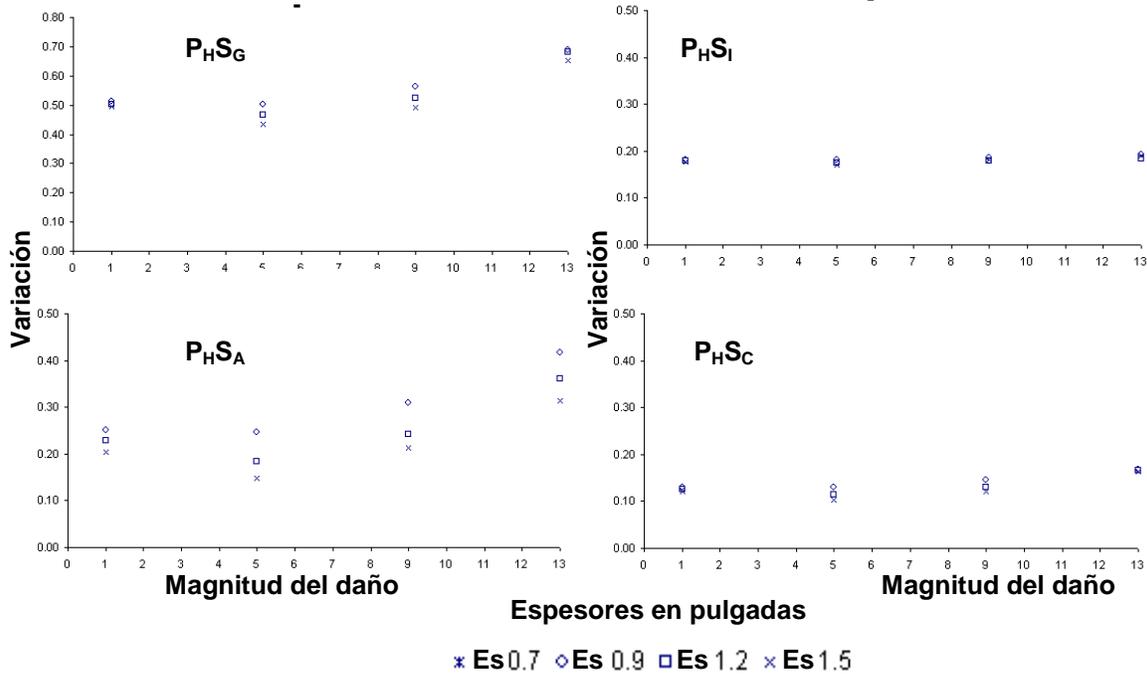


Figura 4.19 Valores de la función de variación en la posición 3, para diferentes espesores y magnitudes de daño

Tabla 4.1 Espesores y magnitudes de daño asociados al elemento 9 que minimizan la variación de las respuestas dinámicas

Elemento 9		
Prueba	Magnitud del daño (número de elementos dañados)	Espesor (m)
P _H S _G	5	0,0381 (1,5 in)
P _H S _I	5	0,0381 (1,5 in)
P _H S _A	5	0,0381 (1,5 in)
P _H S _C	5	0,0381 (1,5 in)

De la tabla 5.2 se puede concluir que los valores que minimizan la variación de la función son la magnitud de daño con 5 elementos, es decir 0,03175 m (1,25 in), y

un espesor de 0,0381 (1,5 in), que representa un aumento de 0,0254 m (1,0 in) respecto al valor sin colocar las barras de aluminio.

Resultados finales

De acuerdo con el análisis por el MBG, se determina que el daño comienza en la posición 9, con una extensión de cinco elementos y con un espesor de 0,0381 (1,5 in). Si comparamos estos resultados con los del daño real, que comienza en la posición 12, con una extensión de ocho elementos y un espesor de 0,02794 m (1,1 in), los datos obtenidos por el MBG representan una buena aproximación de los datos reales. Cabe recordar que el primer objetivo del MBG es localizar el daño en la estructura y posteriormente, caracterizar el daño.

5 Evaluación experimental en el puente Río Papaloapan

El Puente Río Papaloapan se localiza en el kilómetro 85 + 980 de la autopista la Tinaja-Acayucan, en el estado de Veracruz, fue construido en el año 1994 y se puso en servicio en el año de 1995; es del tipo atirantado con un claro de 203 m y una longitud total de 407.21 m. El puente tiene 112 cables distribuidos en ocho semiarpas con catorce cables cada uno (López et al., 2009).

Derivado de las evaluaciones efectuadas en el 2000 (López y Poblano, 2000) y 2003 (Carrión et al., 2003), descritas en los antecedentes de este trabajo, se propuso la rehabilitación de 20 elementos de anclaje superior del Puente Río Papaloapan, 16 clasificados como estructuralmente deficientes y cuatro clasificados en buen estado; los que fueron tomados como referencia para realizar un estudio de confiabilidad estructural de los 92 elementos restantes

Los trabajos de rehabilitación de cada uno de los 20 elementos de anclaje superior consistieron en la remoción del concreto para descubrir la pieza que originalmente estaba parcialmente embebida, evaluación en campo por líquidos penetrantes y ultrasonido de las botellas, corte de la pieza y remplazo por la botella nueva. El trabajo constó de dos etapas; durante la primera se rehabilitaron 9 botellas de las semi-arpas 1, 2, 3 y 4, finalizada esta tarea, se rehabilitó el concreto de los dos carriles con dirección a la Tinaja, para finalmente remover el concreto de los dos carriles con dirección a Acayucan. La segunda etapa consistió en la remoción de las 11 botellas restantes de las semi-arpas 5, 6, 7 y 8, concluida esta etapa se rehabilitó el concreto de estos dos carriles.

Un resumen de las características de cada uno de los elementos de anclaje superior removidos del puente por la rehabilitación y que fueron analizados para determinar la confiabilidad probabilística estructural, se presenta en la tabla 5.1. La figura 5.1 indica los tirantes que fueron removidos.

Tabla 5.1 Elementos de anclaje removidos

No. Elemento	Tipo de botella	Arpa	Cable
1	2	1	13
2	2	2	12
3	2	2	13
4	2	3	10
5	2	3	11
6	2	3	12
7	2	4	8
8	2	5	10
9	3	6	3
10	2	6	13
11	1	7	1
12	2	7	8
13	2	7	9
14	2	7	10
15	2	7	12
16	2	7	13
17	2	1	6
18	3	2	4
19	2	5	5
20	1	6	1

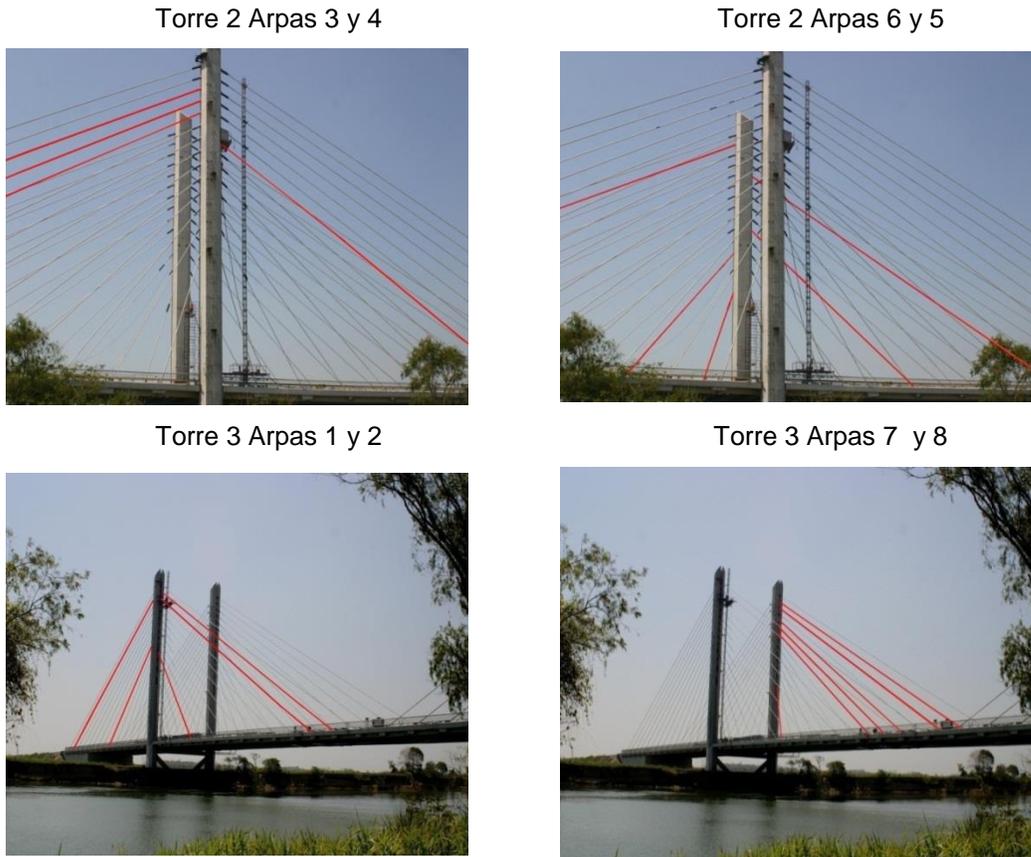


Figura 5.1 Tirantes que fueron programados para cambio ordenados por torre y arpa

Para determinar la eficacia del Método de Búsqueda Global como herramienta dentro de un sistema de monitoreo remoto o en un sistema integral de administración de puentes, se diseñó una serie de pruebas para detectar daño aprovechando los trabajos de rehabilitación del Puente Río Papaloapan. En este caso, el daño por detectarse fue la distensión de un cable, que equivale a detectar un daño súbito por la fractura de uno de los elementos de anclaje superior. Para evaluar el método de detección de daño, se realizaron pruebas dinámicas antes y después del distensado del tirante 1 de la semi-arpa 7; las pruebas dinámicas previas al distensado sirvieron de referencia para calibrar el modelo de elemento finito del puente Río Papaloapan a una condición inicial o de referencia (condición sin daño), y las pruebas posteriores al distensado fueron utilizadas para la detección de daño.

5.1 Procedimiento experimental

Para la calibración de los parámetros estructurales del modelo de elemento finito del Puente Río Papaloapan, normalmente se requiere de información

complementaria que está relacionada con el comportamiento dinámico de la estructura. Para obtener esta información, se diseñaron dos conjuntos de pruebas dinámicas: la primera del monitoreo de las tensiones de los 112 tirantes bajo cada uno de los 20 escenarios de remoción y rehabilitación de las botellas de anclaje superior del puente Río Papaloapan, más una prueba final con el puente rehabilitado. Estas pruebas sirvieron de base para obtener tres espectros de frecuencia para cada uno de los tirantes de sujeción por excitación ambiental. Una vez conocidas las frecuencias naturales de cada uno de los tirantes, se calculó con un modelo no lineal la tensión de cada tirante. El segundo grupo de pruebas fue para obtener, a partir de una prueba de impacto en condiciones controladas, las respuestas dinámicas de aceleración en diferentes puntos del puente. Para estas pruebas se instrumentó el puente con 11 acelerómetros de baja frecuencia en los carriles del cuerpo A, entre las torres 2 y 3, a un tercio y dos tercios de la longitud total de estos carriles; la figura 5.2 muestra un esquemático de posición de los sensores. La excitación del puente, a diferencia del primer grupo de pruebas, se hizo sin tráfico, utilizando el equipo de impacto Dynatest (figura 5.3). En este caso, este equipo funciona como excitador al liberar desde una altura controlada una masa conocida, la cual produce una excitación controlada sobre el puente.

DISTRIBUCION DE CANALES INSTRUMENTADOS

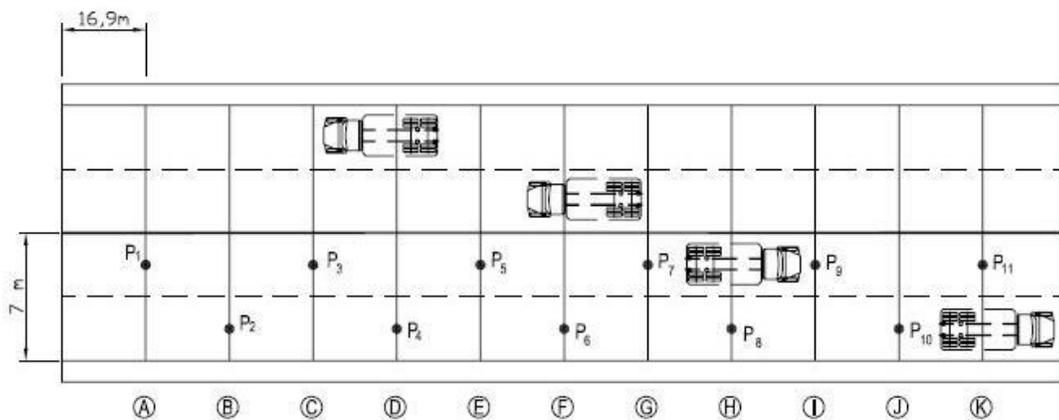


Figura 5.2 Arreglo experimental para las pruebas dinámicas controladas



Figura 5.3 Equipo Dynatest para realizar las pruebas dinámicas

El sistema de adquisición de datos fue utilizando una tarjeta de adquisición DAQ Card 6062-E de la marca National Instruments, con una capacidad de de adquisición de datos hasta 500 mil muestras por segundo. La tarjeta fue montada en una computadora portátil, la cual es controlada por un programa de adquisición de datos utilizando Lab-View. Una descripción detallada de los acelerómetros, acondicionadores, cables utilizados en el arreglo experimental se puede visualizar en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Sensores y accesorios utilizados durante las pruebas dinámicas

Canal de conexión	Punto de instrumentación	Instrumentos y accesorios	Marca	Modelo	Número de serie	Sensibilidad (V/g)	Longitud de cable
0	1	ACELEROMETRO CABLE	Crossbow	CXL02LF1	3006131	0,984	96 m
1	2	ACELEROMETRO CABLE	Crossbow	CXL02LF3	3003860	0,975	72m
2	3	ACELEROMETRO ACONDICIONADOR BNC BNC	TEC KISTLER	195 5118B2	272 2022072	0,487	2m Total 60m
3	4	ACELEROMETRO ACONDICIONADOR BNC BNC	VIBRAMETRICS KISTLER	CBM 2000 5118B2	160 2022070	-1,515	Total 40m 3m
4	5	ACELEROMETRO ACONDICIONADOR BNC BNC	B&K KISTLER	4507 B006 5118A2	30076 C73023	0,488	25m 2m
5	6	ACELEROMETRO ACONDICIONADOR BNC BNC	B&K KISTLER	4507 B006 5118B2	30077 C91690	0,49	2m 2m
6	7	ACELEROMETRO ACONDICIONADOR BNC BNC	VIBRAMETRICS KISTLER	CBM 2000 5118B2	159 2022073	-1,413	25,4m 3m
7	8	ACELEROMETRO ACONDICIONADOR BNC BNC	B&K KISTLER	4382 5118B2	30326 C91546	-0,981	45,3m 6m
8	9	ACELEROMETRO ACONDICIONADOR BNC BNC	ENDEVCO KISTLER	7751-500 5118B2	AN53 2022071	0,471	55,4m 1,7m
9	10	ACELEROMETRO CABLE	Crossbow	CXL04LP1Z-R	3003861	-0,974	72 m
10	11	ACELEROMETRO CABLE	Crossbow	CXL04LP1	3006132	-0,994	93 m
*11	12	ACELEROMETRO	B&K	4382	30325	0,098	93 m

*Acelerómetro montado sobre la masa liberada para obtener la magnitud de la fuerza de excitación en función del tiempo.

Para las pruebas dinámicas, se utilizó una frecuencia de muestreo de 2000 muestras por segundo para adquirir datos durante un periodo de adquisición de dos segundos; por lo que al final se obtuvieron 4000 muestras por canal de muestreo. De manera general las pruebas experimentales se desarrollaron de la siguiente manera:

- a) Instrumentación del puente (figura 5.2)
- b) Control del tráfico: En esta parte, detenemos el tráfico en ambas direcciones
- c) Inicio del programa de adquisición de datos
- d) Aplicación de la carga de impacto
- e) Recolección de las respuestas dinámicas del puente

En las figuras 5.4 y 5.5 se puede observar la señal dinámica típica de uno de los sensores y la fuerza de excitación en función del tiempo producida por la Dynatest.

En total, se realizaron 30 pruebas dinámicas sobre el puente Río Papaloapan en dos diferentes etapas de rehabilitación del puente. La primera, se realizó cuando terminó la sustitución de las botellas de las arpas 1, 2, 3 y 4 y se removió la carpeta asfáltica de los carriles del cuerpo A. La segunda, se llevó a cabo cuando las 20 botellas fueron rehabilitadas y aún sin la carpeta asfáltica. En ambos conjuntos de pruebas el arreglo y la metodología experimental utilizada fue la misma. Cada prueba dinámica fue repetida tres veces y las diferencias entre las pruebas dinámicas fueron el lugar de excitación (diez lugares diferentes), la condición del tirante 1 del semi-arpa 7, y la rehabilitación total de las botellas del puente Río Papaloapan. Por tanto, se obtuvo información de diez pruebas dinámicas con las arpas rehabilitadas 1, 2, 3 y 4; diez pruebas dinámicas con las arpas rehabilitadas 1, 2, 3 y 4, pero sin el tirante 1 del arpa 7; y diez pruebas más con el puente totalmente rehabilitado.

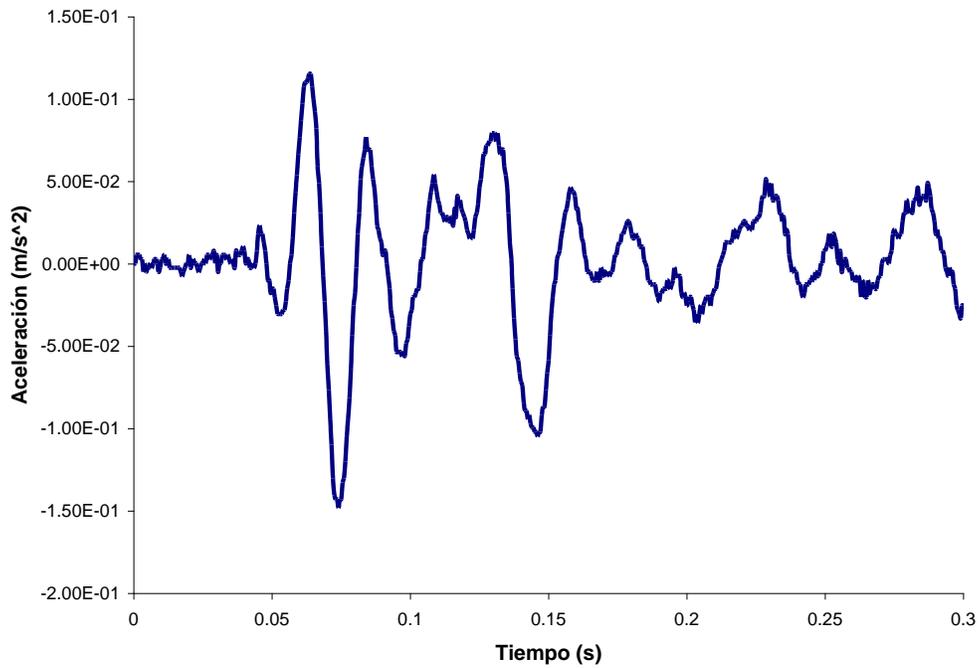


Figura 5.4 Respuesta dinámica típica de uno de los sensores colocados en el puente Río Papaloapan

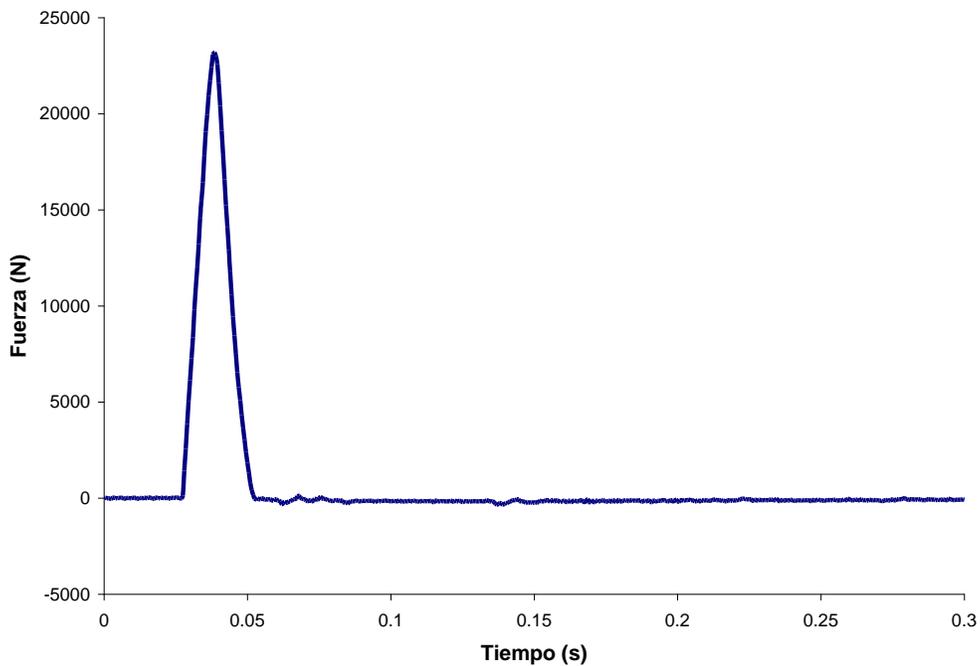


Figura 5.5 Carga dinámica típica aplicada por la DynaTest para excitar el puente Río Papaloapan

5.2 Modelo de Elemento Finito

Desarrollamos la construcción del modelo de elemento finito del Puente Río Papaloapan en cuatro etapas: la primera, la elaboración del modelo geométrico y que se realizó a partir de los planos estructurales del Puente Río Papaloapan; la segunda, corresponde a la asignación de las propiedades del material a través de datos técnicos recopilados en campo; la tercera, fue la etapa de ejecución de pruebas experimentales en campo para conocer la respuesta dinámica de la estructura o de algunos de sus componentes estructurales; y la cuarta etapa, la calibración del modelo de EF a partir de pruebas experimentales y la respuesta dinámica o estática del modelo elemento finito.

Para la construcción, calibración y simulación de los eventos estáticos y dinámicos se utilizó el paquete de elemento finito StaDyn versión 4.54 (Doyle, 1997; Doyle, 2004), el cual fue desarrollado en el Departamento de Aeronáutica de la Universidad de Purdue.

Modelo Geométrico

Para la construcción del modelo geométrico del modelo de elemento finito del puente, se utilizaron 8224 elementos y 4693 nodos. En promedio se utilizaron 12 elementos a lo ancho del puente en una longitud de 23.1 m y 580 elementos a lo largo del puente en una longitud de 407.2 m, adicionalmente se utilizaron alrededor de 1200 elementos para representar los 112 tirantes y las cuatro torres. Para representar la respuesta dinámica del puente se utilizaron elementos tipo placa para el tablero y las trabes laterales; elementos tipo viga para las costillas y torres; y elementos tipo barra para los tirantes de sujeción. Respecto a las condiciones de frontera, las cuatro torres se consideraron empotradas, se restringió el movimiento en la dirección z en los estribos que se encuentran cercanos al tirante 10 de las de las semi-arpas 1, 4, 5 y 8, semi-arpas lado tierra, el apoyo con dirección a la Tinaja se consideró simplemente apoyado, mientras que el apoyo con dirección a Acayucan se consideró un apoyo móvil. Por último, para representar los cambios de densidad a lo largo del tablero se agregó masa al puente en algunos nodos del tablero de acuerdo a la tabla de niveles y espesores proporcionada por Caminos y Puentes Federales (CAPUFE). En las figuras 5.6, 5.7 y 5.8 se pueden ver diferentes vistas del modelo de elemento finito del Puente Río Papaloapan.

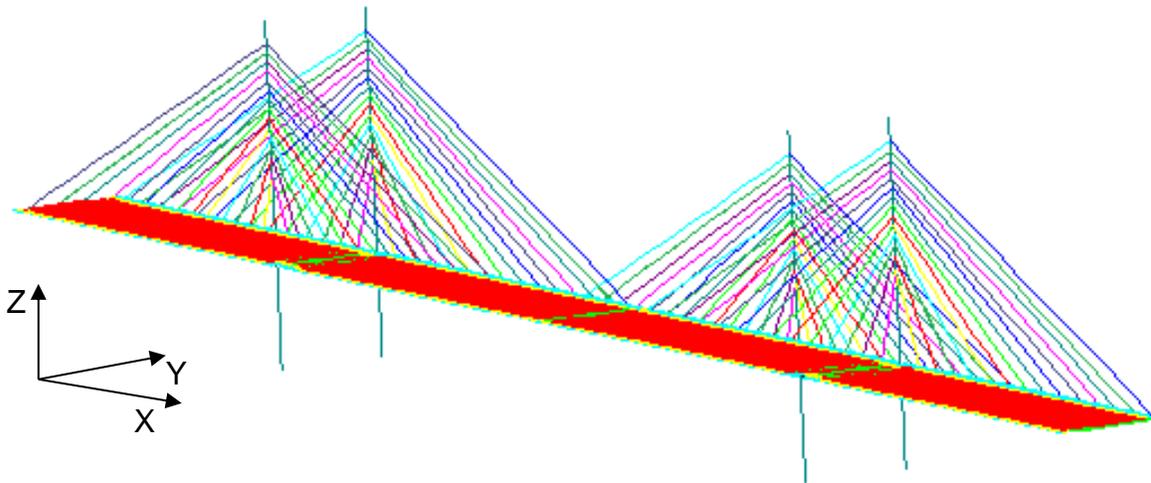


Figura 5.6 Vista en perspectiva del modelo de EF del Puente Río Papaloapan

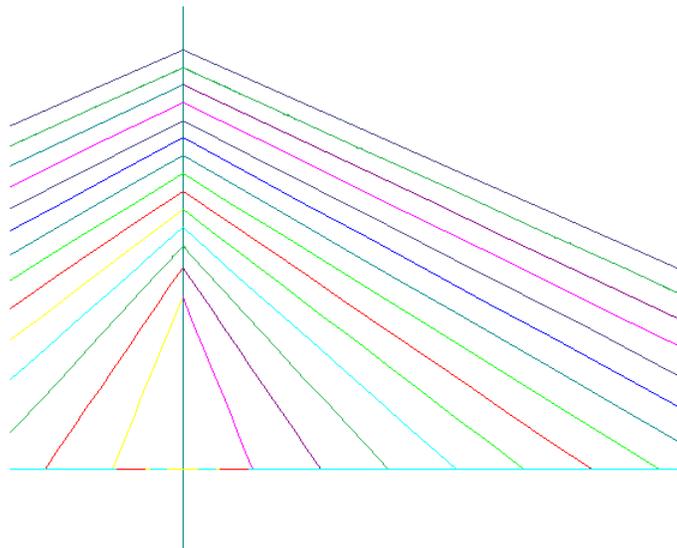


Figura 5.7 Vista lateral de una de las torres del MEF del Puente Río Papaloapan

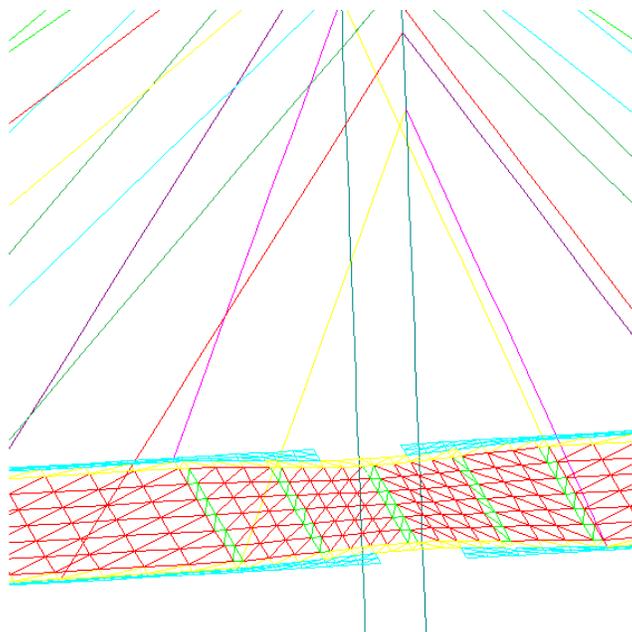


Figura 5.8 Acercamiento a la reducción del tablero en las torres del MEF del Puente Río Papaloapan

Propiedades del material

Para representar el comportamiento estático y dinámico del puente, fue necesario ajustar las propiedades de los materiales de los que está fabricado; para ello, se utilizaron 26 caracterizaciones de material, cada uno con propiedades mecánicas de acuerdo al elemento estructural que representaba. De los 26 materiales, 20 fueron utilizados para representar los 112 cables; parámetros estructurales como la densidad, el módulo de elasticidad, y el módulo de rigidez, fueron considerados constantes para los 112 cables (tabla 5.3); mientras que las áreas y momentos de inercia cambiaron de acuerdo al número de torones de los que estaban formados los tirantes de sujeción (tabla 5.4). El área efectiva de un torón es de $1.3935 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, y fue calculada a partir de la calibración dinámica de los tirantes utilizando las mediciones de vibraciones. El área efectiva de cada cable se obtuvo multiplicando el área de un torón por el número de éstos, contenido en dicho tirante; posteriormente, su correspondiente diámetro efectivo se calculó de dicha área efectiva, para obtener los correspondientes momentos de inercia I_{xx} , I_{yy} y I_{zz} ,

Tabla 5.3 Propiedades mecánicas de los tirantes de sujeción del Puente Río Papaloapan

Módulo de Elasticidad	Módulo de Rigidez	Densidad
200 Gpa	70,2 Gpa	8800 kg/m ³

Tabla 5.4 Número de torones por tirante de sujeción y arpa

Tirante	Arpa 1	Arpa 2	Arpa 3	Arpa 4	Arpa 5	Arpa 6	Arpa 7	Arpa 8
1	23	22	23	23	23	22	22	23
2	16	14	14	16	16	14	14	16
3	19	19	19	18	18	18	18	18
4	19	19	19	19	19	19	19	19
5	21	21	21	21	21	21	21	21
6	22	22	22	22	22	22	22	22
7	23	24	24	23	23	24	24	23
8	25	25	25	25	25	25	25	25
9	26	26	26	26	26	26	26	26
10	27	27	27	27	27	27	27	27
11	28	28	28	28	28	28	28	28
12	29	28	28	29	29	28	28	29
13	28	28	28	28	28	28	28	28
14	32	30	30	32	37	37	30	32

Los seis materiales restantes fueron utilizados para representar el tablero, las vigas longitudinales, el parapeto, las torres y las vigas transversales (costillas); estas últimas con dos materiales. Para todos los materiales mencionados se partió del hecho de que se encuentran sin daño y que cada uno de los elementos estructurales se pueden englobar dentro de un solo material, no obstante, si en el futuro es detectado daño que afecte a una región específica del puente, éste se puede modificar por un material que adopte la degradación en las propiedades o si alguna región es reforzada, se puede proceder a modificar un conjunto de elementos que representen un nuevo material que tome las nuevas propiedades mecánicas.

Para calcular las áreas y momentos de inercia del tablero, vigas transversales, vigas longitudinales, torres y del parapeto; se utilizó información de los planos del puente. En el caso de elementos tipo viga, usados para las vigas transversales y torres, se calcularon los momentos de inercia con respecto al eje X, Y y Z, y el área de la sección transversal; mientras que para los elementos tipo placa, solo se calculó el segundo momento de área para una placa I_p y el espesor de la sección transversal. La tabla 5.5 muestra los valores antes referidos para cada tipo de elemento y componente estructural.

Las propiedades mecánicas asociadas a los módulos de elasticidad, rigidez y densidad de cada uno de los componentes estructurales antes referidos, se calcularon a través de la solución de problemas dinámicos directos e inversos utilizando datos experimentales y las respuestas del modelo de elemento finito del

Puente Río Papaloapan. Una descripción más detallada y los valores obtenidos se encuentran en las siguientes secciones.

Ajuste del modelo de EF y calibración Dinámica

Para obtener los valores de los parámetros estructurales desconocidos se utilizaron las respuestas dinámicas de las pruebas experimentales con las botellas rehabilitadas, los datos geométricos iniciales, el modelo de elemento finito y el algoritmo de solución de problemas inversos StrIdent (Doyle, 1997; Doyle, 2004), mayor información sobre la solución de problemas inversos puede ser obtenida en el capítulo 2. Las iteraciones y el valor de convergencia del Módulo de elasticidad del concreto del tablero y el Módulo de elasticidad de las vigas longitudinales se pueden ver en las figuras 5.9 y 5.10, el resto de los valores de los módulos de elasticidad y densidad que se muestran en la tabla 5.6.

Tabla 5.5 Parámetros estructurales de los componentes estructurales del Puente Río Papaloapan

Componente estructural	Tipo de elemento	Área de la sección transversal (m ²) o Espesor (m)	I _{xx} (m ⁴) o I _p (m ³)	I _{yy} (m ⁴) o I _a (adimensional)	I _{zz} (m ⁴) o I _b (adimensional)
Vigas Longitudinales (anclaje de tirantes)	Placa	1,2	1,44e-1	1,5	0,5
Parapeto	Placa	0,9	6.075e-2	1,5	0,5
Tablero	Placa	0,192	5,89e-4	1,5	0,5
Vigas transversales (costillas)	Placa	1,434	2,457e-1	1,5	0,5
Torres	Viga	5,6	4,192	3,2	7,392
Vigas Transversales (costillas)	Viga	0,4900	6,26e-2	6,88e-2	6,5813e-3

Tabla 5.6 Parámetros estructurales calculados de problemas inversos y directos

Componente estructural	Tipo de elemento	Módulo de elasticidad E (GPa)	Módulo de Rigidez E (GPa)	Densidad (kg/m3)
Vigas Longitudinales (anclaje de tirantes)	Placa	61,84	22	2643
Parapeto	Placa	66,24	22	2324
Tablero	Placa	61,4	22,5	2480
Vigas transversales (costillas)	Placa	70,83	21	2320
Torres	Viga	57	20	2400
Vigas Transversales (costillas)	Viga	56,48	25,56	2277
Cables	Cable	200	70,2	8800

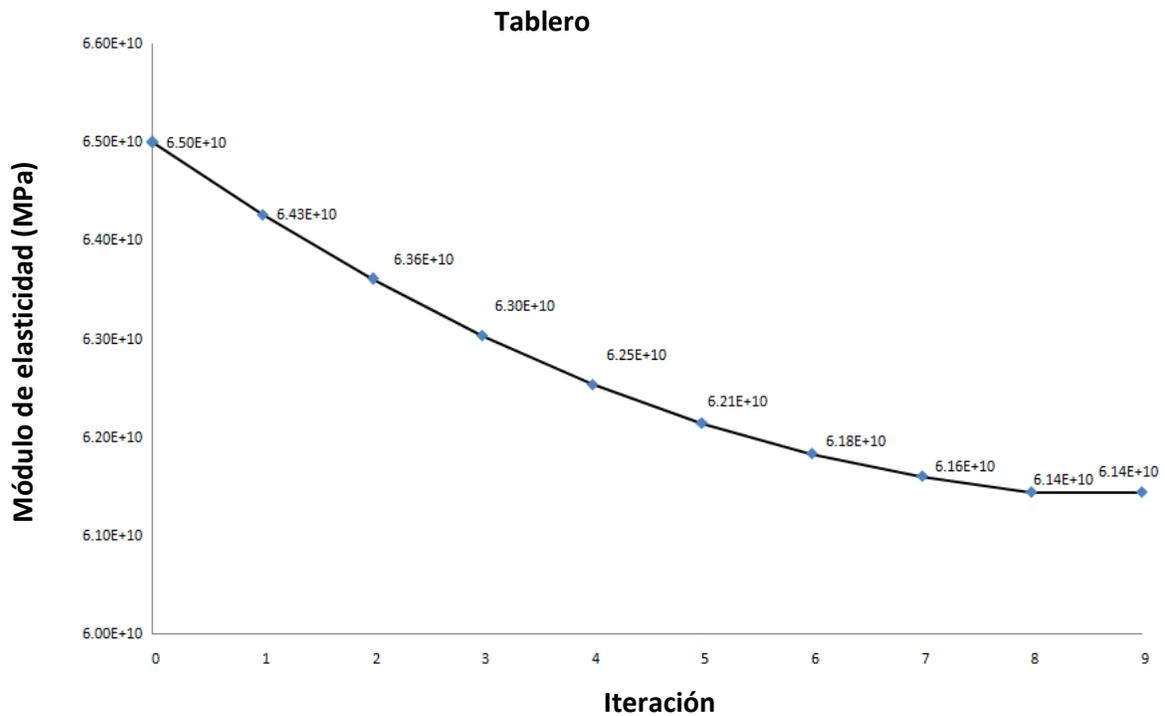


Figura 4.9 Módulo de elasticidad del Tablero aplicando problemas inversos

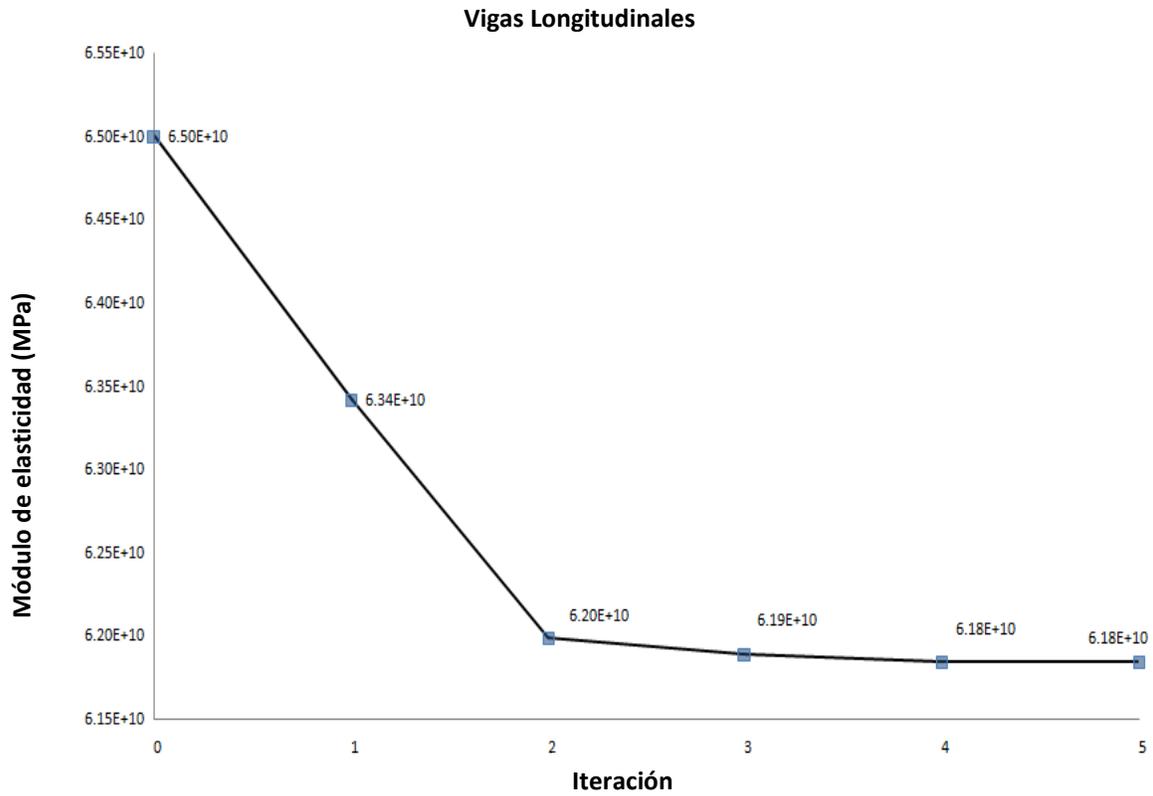


Figura 5.10 Módulo de las vigas longitudinales aplicando problemas inversos

Calibrados todos los parámetros estructurales del modelo de elemento finito del Puente Río Papaloapan, se realizó una comparación entre las respuestas dinámicas del modelo de elemento finito y las experimentales, figura 5.11.

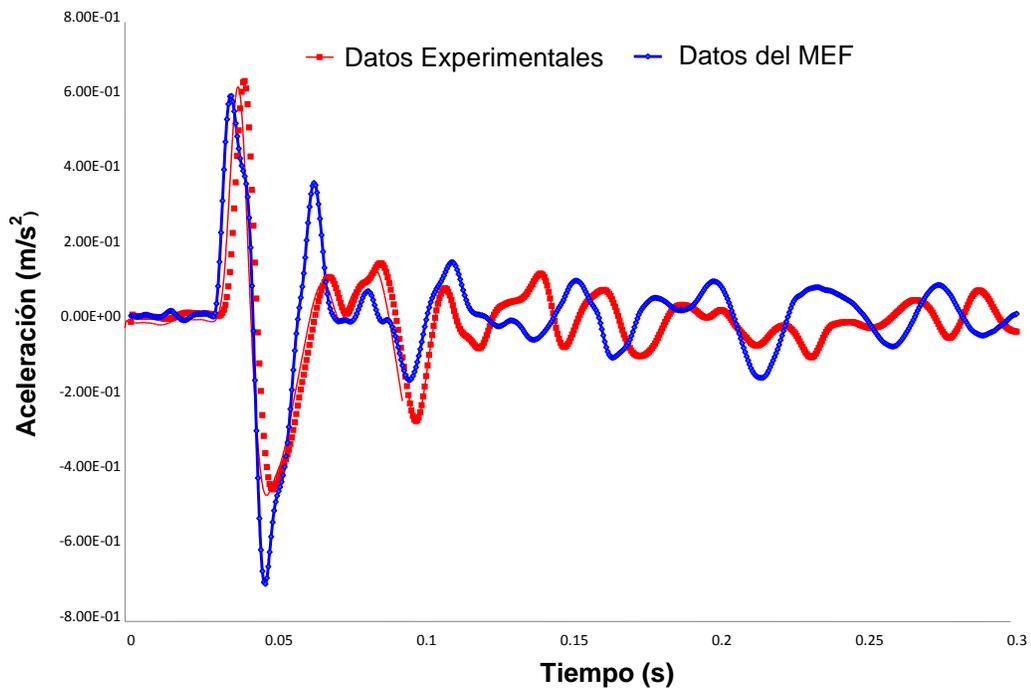


Figura 5.11 Respuesta dinámica experimental y del modelo de EF

En la última etapa de la calibración se realizó un proceso iterativo agregando masa en algunas secciones del puente; en la cuales, el perfil de la espesor del tablero cambio para poder dar la curvatura al puente establecida en diseño, por cada simulación los datos de la tensión resultante del cable fue comparada con las tensiones experimentales, del modelo no lineal, hasta que se obtuvo una variación que no excedió del 11%. Una vez calibrado el modelo de elemento finito se obtuvieron las resultantes de las tensiones de los 112 tirantes del Puente Río Papaloapan considerando únicamente cargas muertas y se compararon con las tensiones obtenidas a partir de pruebas experimentales del modelo no lineal del puente rehabilitado. Las tablas de la 5.7 a la 5.10 muestran las tensiones calculadas por el modelo de elemento finito calibrado para los 112 tirantes y las compara con las tensiones calculadas por las pruebas experimentales (Carrión et al., 2007).

Tabla 5.7 Tensión experimental y del Modelo de Elemento Finito (MEF) del puente Río Papaloapan de las semi-arpas 1 y 2

Tirante	Semi - arpa	Tensión Experimental (Ton)	Tensión MEF (Ton)	Error (%)	Tirante	Semi - arpa	Tensión Experimental (Ton)	MEF Tensión (Ton)	Error (%)
1	1	212.62	210.397	1.04	1	2	195.59	197.854	1.15
2	1	117.08	120.886	3.25	2	2	119.54	115.806	3.12
3	1	148.90	146.477	1.62	3	2	174.13	164.84	5.33
4	1	152.65	159.038	4.18	4	2	192.14	178.989	6.84
5	1	179.05	180.402	0.75	5	2	191.55	203.831	6.41
6	1	182.82	191.971	5.00	6	2	196.23	206.467	5.21
7	1	194.43	202.184	3.98	7	2	218.36	223.659	2.42
8	1	225.60	216.746	3.92	8	2	227.13	246.927	8.71
9	1	234.39	221.563	5.47	9	2	242.38	258.874	6.80
10	1	252.45	239.450	5.14	10	2	254.13	266.972	5.05
11	1	259.78	245.474	5.50	11	2	266.73	269.754	1.13
12	1	260.55	245.780	5.66	12	2	269.02	256.596	4.61
13	1	227.20	216.926	4.52	13	2	255.62	236.773	7.37
14	1	267.41	251.681	5.88	14	2	211.48	225.580	6.66

Tabla 5.8 Tensión experimental y del Modelo de Elemento Finito (MEF) del puente Río Papaloapan de las semi-arpas 3 y 4

Tirante	Semi - arpa	Tensión Experimental (Ton)	Tensión MEF (Ton)	Error (%)	Tirante	Semi - arpa	Tensión Experimental (Ton)	MEF Tensión (Ton)	Error (%)
1	3	191.48	207.923	8.58	1	4	199.80	216.945	8.58
2	3	129.41	134.23	3.72	2	4	123.83	117.463	5.14
3	3	167.18	152.054	9.04	3	4	154.45	144.24	6.60
4	3	157.75	165.970	5.21	4	4	148.27	152.032	2.53
5	3	172.75	190.155	10.07	5	4	161.69	178.647	10.48
6	3	184.85	200.910	8.68	6	4	188.95	184.29	2.46
7	3	212.49	22.12	9.63	7	4	205.50	197.618	3.83
8	3	221.79	242.350	9.27	8	4	239.56	215.485	10.04
9	3	247.78	259.329	3.04	9	4	257.84	223.128	9.60
10	3	279.35	262.501	6.03	10	4	276.13	248.651	9.95
11	3	294.23	264.74	10.02	11	4	274.96	246.841	10.22
12	3	293.66	270.712	7.84	12	4	279.94	250.172	10.64
13	3	281.52	252.50	10.3	13	4	259.63	235.690	9.22
14	3	234.89	236.598	0.727	14	4	256.61	229.994	10.37

Tabla 5.9 Tensión experimental y del Modelo de Elemento Finito (MEF) del puente Río Papaloapan de las semi-arpas 5 y 6

Tirante	Semi - arpa	Tensión Experimental (Ton)	Tensión MEF (Ton)	Error (%)	Tirante	Semi - arpa	Tensión Experimental (Ton)	MEF Tensión (Ton)	Error (%)
1	5	220.72	200.298	9.25	1	6	178.32	177.389	0.52
2	5	113.61	101.246	10.88	2	6	120.18	108.510	9.70
3	5	146.40	133.321	8.93	3	6	190.17	174.345	8.32
4	5	155.82	142.957	8.25	4	6	160.95	159.965	0.61
5	5	160.49	152.540	4.95	5	6	172.33	188.803	9.55
6	5	188.95	172.007	8.96	6	6	180.80	196.706	8.79
7	5	208.64	190.953	8.47	7	6	184.93	200.214	8.26
8	5	231.75	213.746	7.76	8	6	236.42	243.366	2.98
9	5	239.70	226.037	5.69	9	6	226.53	255.808	10.71
10	5	264.49	238.549	9.80	10	6	272.93	261.943	4.02
11	5	241.68	238.637	1.25	11	6	260.93	264.406	1.33
12	5	300.04	270.334	9.90	12	6	291.01	261.563	10.11
13	5	255.62	230.012	9.97	13	6	274.59	247.289	9.95
14	5	291.44	281.249	3.49	14	6	277.62	265.643	4.31

Tabla 5.10 Tensión experimental y del Modelo de Elemento Finito (MEF) del puente Río Papaloapan de las semi-arpas 7 y 8

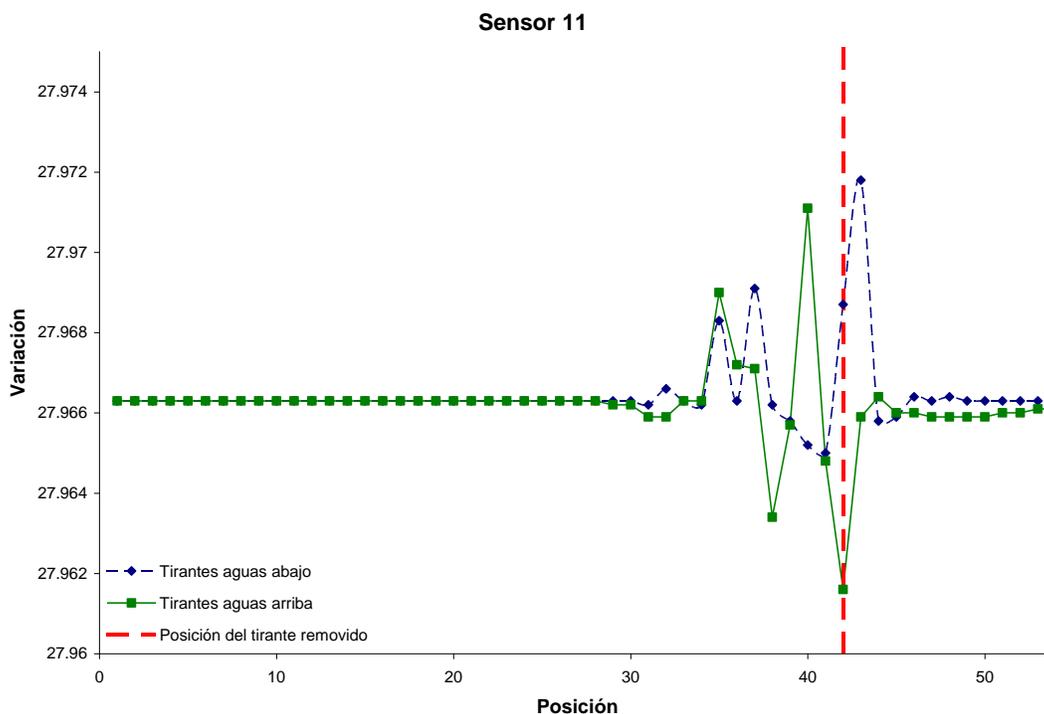
Tirante	Semi - arpa	Tensión Experimental (Ton)	Tensión MEF (Ton)	Error (%)	Tirante	Semi - arpa	Tensión Experimental (Ton)	MEF Tensión (Ton)	Error (%)
1	7	225.64	205.108	9.09	1	8	197.48	217.424	10.09
2	7	101.280	111.557	10.15	2	8	119.42	130.305	9.11
3	7	166.38	149.736	10.00	3	8	146.91	153.56	4.53
4	7	174.52	163.71	6.18	4	8	161.60	164.470	1.77
5	7	190.24	208.480	9.58	5	8	171.09	184.239	7.68
6	7	192.06	205.652	7.07	6	8	176.80	194.250	9.86
7	7	206.06	223.355	8.39	7	8	199.93	203.291	3.36
8	7	225.60	247.257	9.59	8	8	224.07	217.171	3.07
9	7	237.92	259.971	9.26	9	8	228.27	221.394	3.01
10	7	257.21	268.954	4.56	10	8	243.97	224.94	7.79
11	7	270.24	272.56	0.86	11	8	246.15	228.200	7.29
12	7	279.26	259.96	6.91	12	8	270.80	245.720	9.26
13	7	238.62	240.321	0.71	13	8	212.40	216.908	2.12
14	7	185.52	201.326	8.51	14	8	225.09	241.60	5.28

5.3 Identificación de daño

El MBG, es analizado y evaluado para determinar una condición planeada de daño. La condición consiste en la identificación del tirante 1 de la semi-arpa 7, el cual fue removido para realizar el mantenimiento de anclaje superior. Para realizar las pruebas de identificación de daño se utilizaron las señales de los sensores 11, 10, 9 y 8, el lugar donde se excitó la estructura fue en la intersección de los sensores 9, 10 y 11. El resto de los sensores no fue analizado, debido a la alta dispersión de las ondas propagadas como se muestra en la figura 5.11, lo anterior es consecuencia de la baja sensibilidad de los sensores al daño, respecto al ruido experimental y las incertidumbres de medición. Los parámetros de búsqueda del MBG fueron en dos direcciones: el primero, considerando cambios en el Módulo de Elasticidad de los elementos alrededor de cada uno de los 112 tirantes del puente Río Papaloapan, y el segundo, generando escenarios de daño obteniendo el comportamiento dinámico del puente sin cada uno de los 112 tirantes. Los primera corrida de datos no proporcionó información, los sensores no registraron cambios en el valor del módulo de Elasticidad de los elementos cercanos a cada uno de los tirantes; en la segunda corrida se obtuvo información la cual es analizada a continuación.

La figura 5.12 muestra el gráfico del variación de las respuesta dinámicas del sensor 11, el eje de las ordenadas representa el valor de la variación de las

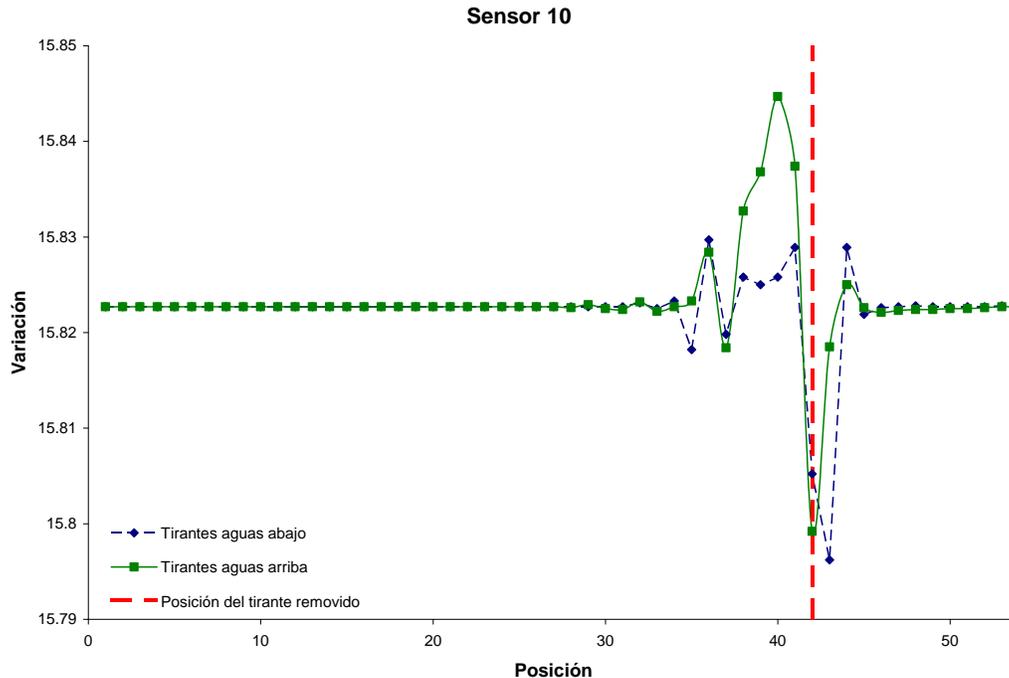
respuestas dinámicas, de las respuestas dinámicas experimental y del MEF, en la señal; mientras que el eje de las abscisas representa el número de posición del tirante de izquierda a derecha, como se encuentra en el puente Río Papaloapan, por ejemplo el tirante 1 de la semi-arpa 6, es representado por la posición 15 en el gráfico. Se puede observar en la figura tres curvas: la primera, representada por cuadrados verdes, son las posiciones de los tirantes aguas arriba; la segunda, representada por los rombos azules, son las posiciones de los tirantes aguas abajo; la tercera y última curva es un línea recta que representa la posición del tirante removido. Para el sensor 11, la variación de las respuestas dinámicas es minimizada, de acuerdo con la figura 5.12, en la posición 42 y la gráfica corresponde a las tirantes aguas abajo, lo cual coincide con el escenario real.



5.12 Gráfico de variación de las respuestas dinámicas generado por el sensor 11

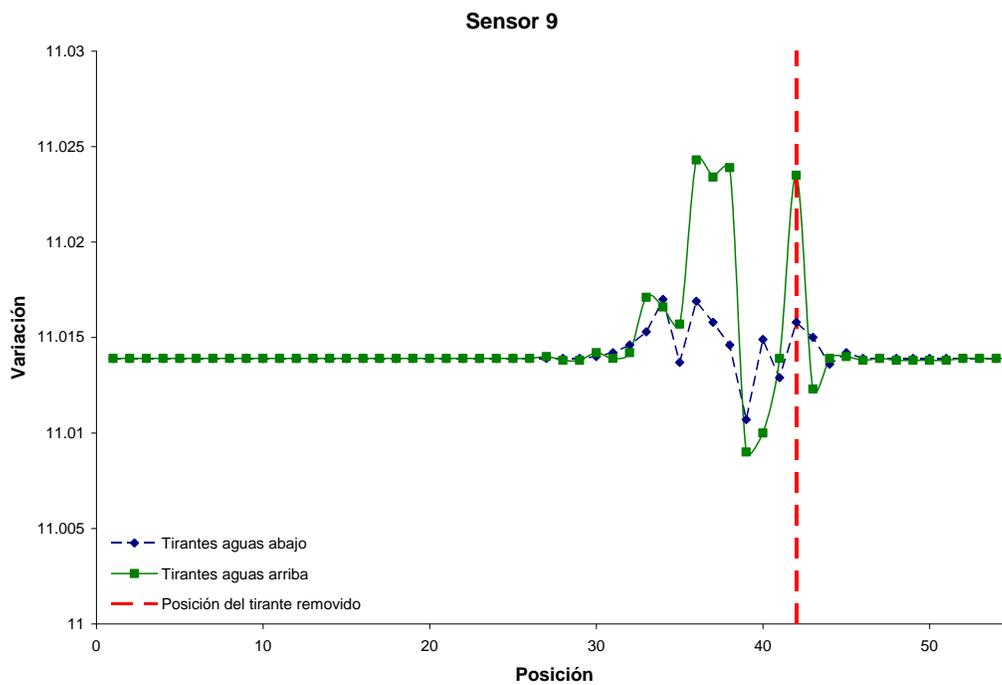
En la figura 5.13 se puede ver el gráfico de variación de las respuestas dinámicas obtenido para el sensor 10, lo primero que se observa es que la posición que minimiza al daño no corresponde al escenario real, el lugar mostrada por le gráfico pertenece al tirante 1 de la semi-arpa 1, el cual es un tirante que se encuentra aguas abajo contiguo al gemelo del tirante removido. El segundo valor que minimiza la función de daño es el que corresponde al escenario real; sin embargo, es interesante notar que hay una zona de daño detectada por el sensor 10, que muestra a tres tirantes que minimizan la variación de las respuestas dinámicas en más grado que el resto de los tirantes, y todos ellos están cercanos o tienen relación con el tirante que fue removido. Si el sensor 10 es comparado con

respecto al sensor 11, se observa que hay una mayor sensibilidad en el sensor 10, esto se puede deber a que el lugar del impacto es mucho más cercano, alrededor de 4 m, a diferencia del sensor 11 que es cercano a los 17 m; además el sensor 10 está a poca distancia de las vigas longitudinales del puente que soportan los cables atirantados.

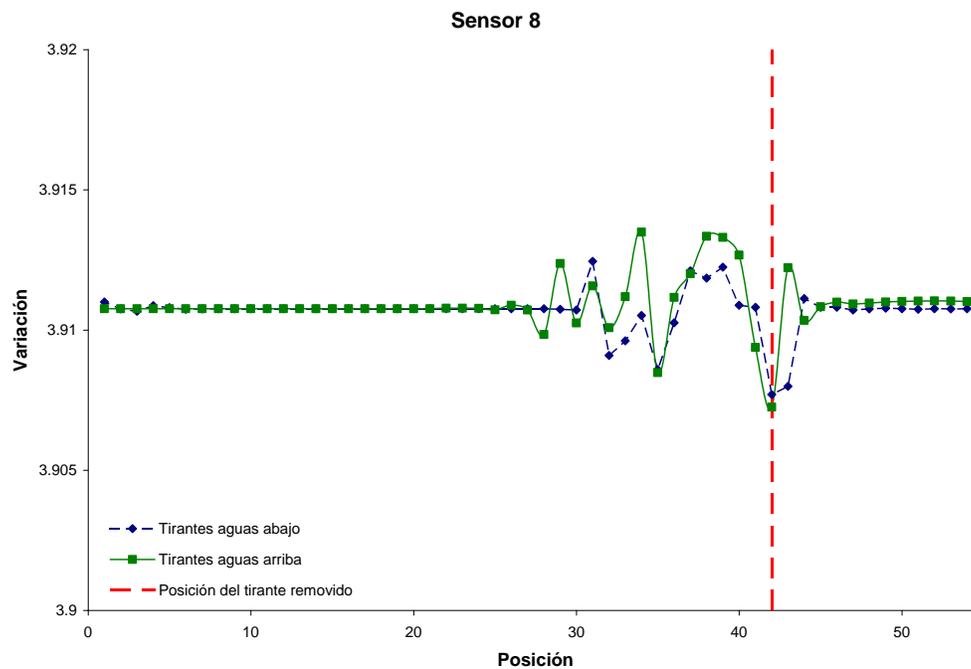


5.13 Gráfico de variación de las respuestas dinámicas generado por el sensor 10

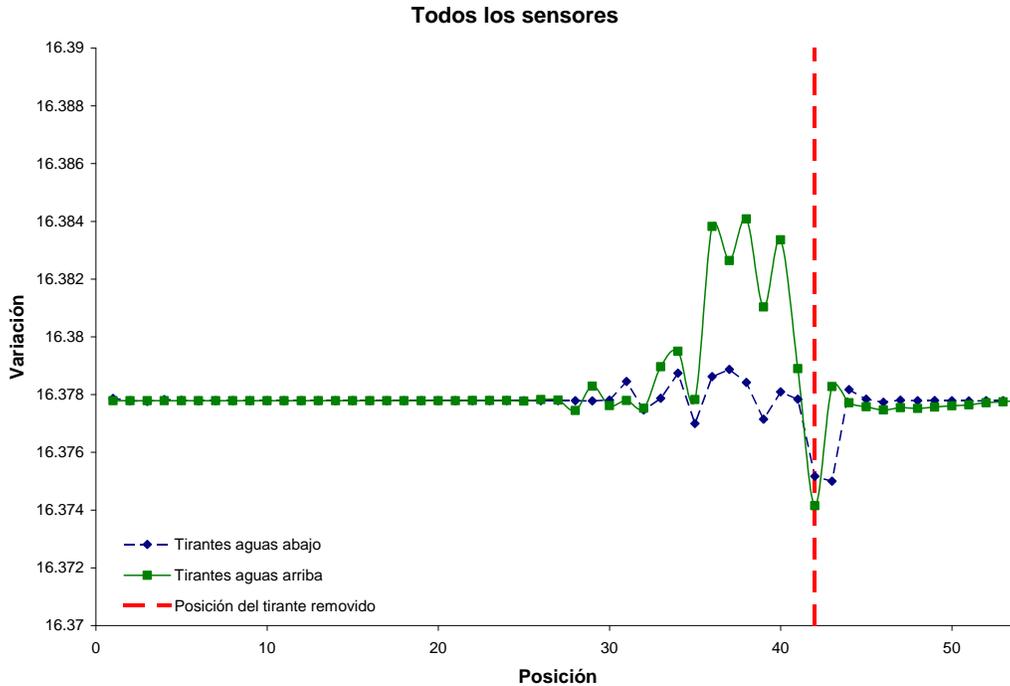
Los datos proporcionados por el sensor 9, se pueden ver en la figura 5.14; a diferencia de los sensores anteriores, que localizan el lugar apropiadamente, no puede localizar el lugar correcto e inclusive los datos muestran que en la posición que corresponde al escenario de daño no hay daño. El valor de la variación de las respuestas dinámicas se minimiza en los tirantes cercanos a excepción del tirante que fue removido. La figura 5.15, corresponde a los variaciones generados para el sensor 8, en esta gráfica se puede ver que nuevamente el escenario de daño es encontrado adecuadamente, nuevamente se observa que se minimiza la función de daño, al igual que para el sensor 10, principalmente en tres tirantes. De los análisis de los sensores 8 y 10 se puede observar a que hay una mejor sensibilidad a ubicar el daño para los sensores más cercanos a las vigas longitudinales. Por último en la figura 5.16, se puede ver el variación de las respuestas dinámicas calculado por la combinación de los 4 sensores. En esta figura se observa, que la condición de daño corresponde a la real y que la función también se minimiza para los tirantes 1 de las semi-arpas 1 y 2, que corresponden al tirante gemelo y contiguo de los tirantes situados aguas abajo.



5.14 Gráfico de variación de las respuestas dinámicas generado por el sensor 9

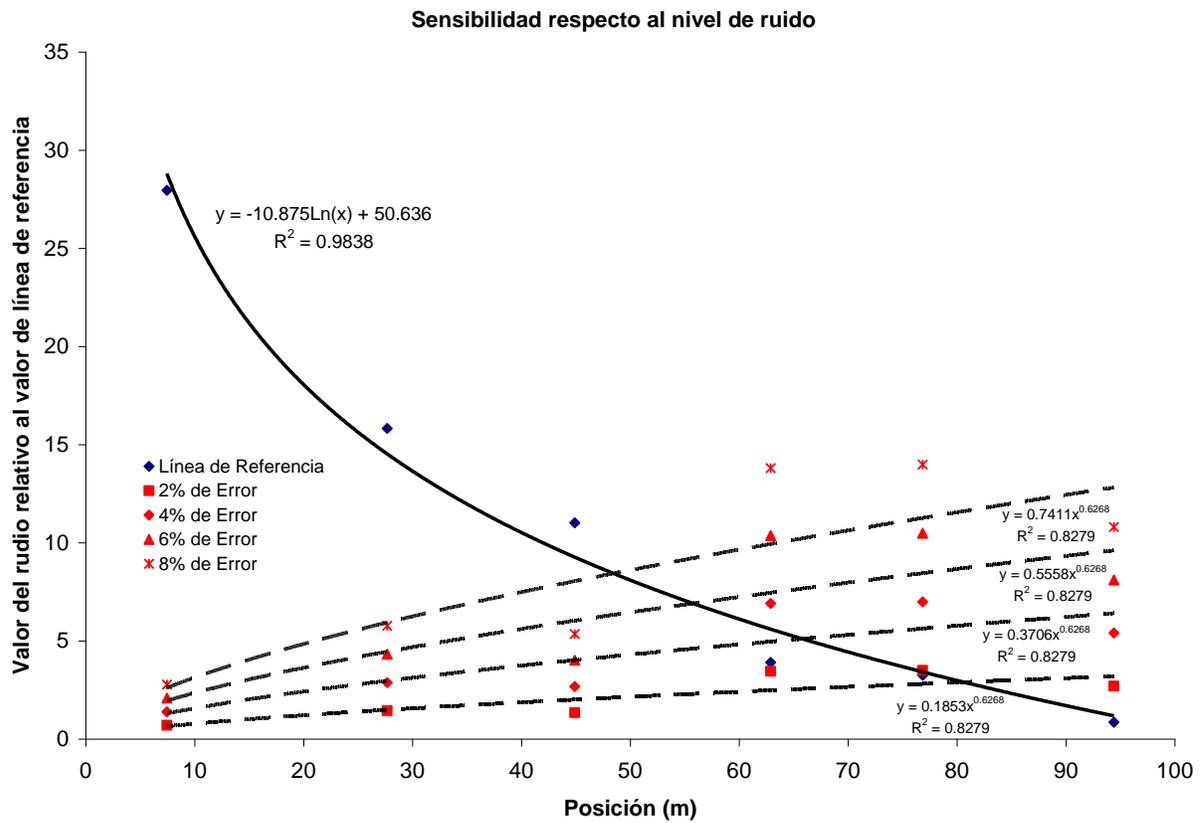


5.15 Gráfico de variación de las respuestas dinámicas generado por el sensor 8



5.16 Gráfico de variación de las respuestas dinámicas generado por el sensor 11, 10, 9 y 8

Para analizar la sensibilidad del MBG respecto a la posición de los sensores, la calibración del modelo de EF y el ruido electrónico, se calculó, a partir de los datos experimentales, el nivel de ruido con respecto a la magnitud de las ondas propagadas; posteriormente se normalizó al valor más alto de la línea de referencia generada por los gráficos de variación de las respuestas dinámicas y se graficaron diferentes valores del ruido relativos a cada señal; los valores graficados fueron del 2, 4, 6 y 8%, los cuales representan la variación del ruido de las respuestas dinámicas experimentales de las pruebas realizadas. La gráfica se puede ver en la figura 5.17, en ésta se puede ver que después del sensor, 3 ubicado a 45 m del daño, es difícil obtener información confiable del lugar del daño debido a la sensibilidad de los sensores, la diferencia en la calibración con respecto al modelo real, y el ruido electrónico. En el análisis de la variación de las respuestas dinámicas el sensor 4 obtiene buenos resultados debido a que la señal obtenida para este sensor tiene un error menor al 4% debido a la cercanía que tiene con las vigas longitudinales. De acuerdo a la gráfica mostrada del sensor 3, se debe obtener buenos resultados, aun teniendo un error del 8%; lo que supone que el error asociado a este sensor es mayor a este valor debido a que se encuentra más cercano al centro del tablero donde las deformaciones e inclinación del sensor es mayor, provocando un error en la medición experimental y una mayor complejidad para representar el fenómeno por parte del modelo de elemento finito.



5.17 Sensibilidad del MBG respecto a la posición de los sensores y el nivel de ruido de la respuesta dinámica experimental.

6 Monitoreo estructural del puente Río Papaloapan

6.1 Evaluación estructural de las condiciones con carga viva

Una vez calibrado el modelo de elemento finito del puente Río Papaloapan, se elaboró un algoritmo para determinar las distribuciones estadísticas de la tensión de los tirantes de anclaje superior bajo diferentes escenarios de flujo vehicular. La información obtenida en esta sección es usada para calcular la probabilidad de falla de los elementos de sujeción (botellas). El algoritmo es un programa de simulación MonteCarlo que considera las variables que afectan el comportamiento dinámico de los tirantes de sujeción; entre las cuales se destacan el porcentaje de ocupación del puente (i.e. el número de vehículos que sobre el puente en un instante dado), el porcentaje de vehículos por carril, el tipo de vehículos en sus diferentes configuraciones, las distribuciones de peso de acuerdo al tipo de vehículo, y las distribuciones estadísticas del viento.

Los datos obtenidos para simular de forma aleatoria las variables fueron obtenidos de diversas fuentes de información. En el caso del porcentaje de ocupación del puente, el tipo de vehículos y la recurrencia por carril fueron obtenidos de un aforo vehicular realizado por investigadores del Instituto Mexicano del Transporte. Las distribuciones de peso se tomaron del Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional “Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en el 2002”, documento técnico número 31 del IMT (Gutiérrez y Mendoza, 2002). Finalmente, la distribución estadística del viento fue generada a partir de los datos recopilados por la Comisión Nacional del Agua para el Puerto de Alvarado del año 2001.

El diagrama de flujo para el programa MonteCarlo para la obtención de las distribuciones de las tensiones se muestra en la figura 6.1 En general, el programa trabaja bajo el siguiente esquema: el primer paso secuencial es definir el número de situaciones aleatorias que se desea simular; lo siguiente es obtener el número de vehículos por cada simulación de acuerdo al porcentaje de ocupación del puente, el cual depende del número de vehículos que circula diariamente; una vez conocido el número de vehículos en cada simulación, se asigna el carril que ocupa cada uno de ellos en el puente de acuerdo con la probabilidad que existe de que un vehículo ocupe un carril determinado; posteriormente, es necesario asignar el tipo de vehículo con base en las estadísticas; es decir, saber si el vehículo es ligero o de carga y en el caso de ser de carga determinar su configuración; el siguiente paso consiste en dar una lugar físico al vehículo sobre el puente de

forma aleatoria; el penúltimo paso consiste en asignar, de acuerdo con las distribuciones de peso de los vehículos, la carga viva para cada vehículo; y por último, asignar la velocidad del viento para ese escenario. El programa con todos estos datos modifica el modelo de elemento finito del puente agregando las cargas vivas del puente y ejecuta una simulación por elemento finito usando StaDyn (Doyle, 1997; Doyle, 2004); los datos que se guardan corresponden a las tensiones de todos y cada uno de los 112 tirantes, para posteriormente generar las distribuciones estadísticas que corresponden a cada uno de ellos.

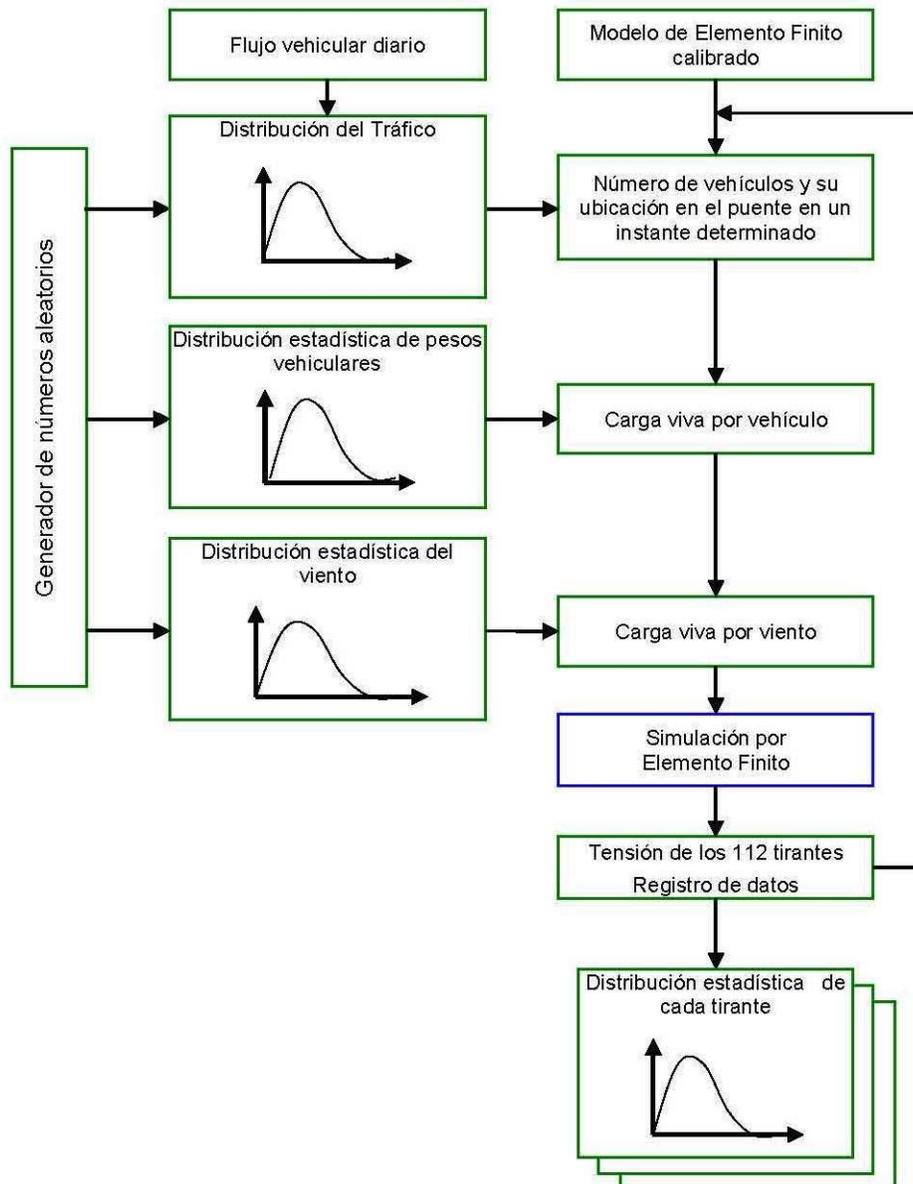


Figura 6.1 Esquema lógico del Programa para calcular las distribuciones estadísticas de los tirantes

El aforo vehicular utilizado para determinar el porcentaje de ocupación del puente, la recurrencia con la que circulan por cada carril y el tipo de vehículo que circula, se realizó el 11 y el 12 de marzo del 2009, en el puente Río Papaloapan. La metodología empleada para recopilar la información consistió en montar una cámara de video al centro del puente y registrar el paso de vehículos durante varios lapsos a diferentes horas del día, de acuerdo con la tabla 6.1 Una vez capturada la información, se procesó en el laboratorio para determinar el tiempo en el que un vehículo pasa en un punto específico, el tipo de vehículo, el carril que ocupa en el puente, el flujo vehicular diario y el porcentaje de ocupación del puente.

Tabla 6.1 Datos obtenidos del aforo vehicular en el Puente Río Papaloapan

Fecha	Hora de Inicio	Intervalo de tiempo	Flujo vehicular estimado por hora	Flujo vehicular estimado por Día
2009/03/11	18:08:39	0:53:29	329,8	7915,7
2009/03/12	06:53:48	1:00:00	367,0	8808,0
2009/03/12	07:53:48	1:00:00	350,0	8400,0
2009/03/12	08:53:48	0:37:27	363,7	8728,4
2009/03/12	12:52:31	1:00:00	436,0	10464,0
2009/03/12	13:52:31	0:18:31	463,4	11120,8
2009/03/12	17:26:33	1:00:00	477,0	11448,0
2009/03/11	18:26:33	0:13:29	511,7	12281,8
	Promedio		412,3	9895,8

Para poder asignar el porcentaje de ocupación del puente de acuerdo con el flujo vehicular diario, se registró el lapso de tiempo en el que los vehículos pasaban sobre un mismo punto. Considerando una velocidad promedio de 90 km. por hora, en una longitud total del puente de 407,6 m, se obtiene que un vehículo en promedio tarda en cruzar el puente 16,248 segundos. Con estos valores se hizo un programa que analiza intervalos de 16 segundos, con desplazamientos de un segundo por cada periodo de grabación, y calcula la frecuencia de los vehículos de acuerdo con el total de intervalos generados en un periodo de grabación. La tabla 6.2 contiene los datos de ocupación vehicular actual del puente Río Papaloapan generados por el programa a partir de las mediciones del aforo vehicular.

Tabla 6.2 Porcentajes de ocupación del puente Papaloapan del 2009

Número de vehículos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Probabilidad de ocurrencia (%)	19,98	26,31	28,74	15,17	6,51	2,43	0,67	0,10	0,040	0,002

La tabla 6.3 muestra el tipo de vehículos que circula sobre el puente Río Papaloapan y su respectivo porcentaje, y en la tabla 6.4 se puede ver la probabilidad que existe de que tome cada uno de los cuatro carriles. Las estadísticas mostradas en las tablas fueron obtenidas del procesamiento de los datos de la medición del aforo vehicular en el puente.

Tabla 6.3 Tipo de Vehículos y porcentajes de uso.

Tipo de Vehículos	Vehículos ligeros	B2	B3	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4
Porcentaje (%)	51,74	2,40	0,60	6,37	5,53	14,32	4,45	14,56

Tabla 6.4 Porcentajes de uso de carriles en el Puente Río Papaloapan

Carril	Dirección Tinaja		Dirección Acayucan	
	Carril de Baja velocidad	Carril de Alta velocidad	Carril de Baja velocidad	Carril de Alta velocidad
Porcentaje (%)	35,61	14,23	35,82	14,32

Las datos estadísticos de carga de los vehículos pesados fue recopilada del Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional “Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en el 2002”, documento técnico número 31 del IMT (Gutiérrez y Mendoza, 2002). Para el caso de los vehículos ligeros y vehículos tipo B2 y B3, se tomó un peso constante de 3,0, 17,5 y 26,0 toneladas fuerza respectivamente; el peso fue distribuido en cuatro puntos de apoyo, los cuales representan dos neumáticos por eje para dos ejes teóricos en el caso del vehículo tipo B3. El espacio entre ejes teórico, se consideró de 1,75 m para los vehículos particulares y 5,25 m para los vehículos B2 y B3. Para cada una de las configuraciones vehiculares se propuso un peso constante para los vehículos cuando circulan sin carga de acuerdo a la tabla 6.5, donde también se muestra el número de apoyos en los que se repartió la carga y la distancia entre ejes teórica tomada para cada configuración. Dado que las simulaciones se hicieron en condiciones estáticas, para considerar el efecto dinámico, las cargas

vivas por viento o flujo vehicular se multiplicaron por un factor de amplificación dinámica de 1,5.

Tabla 6.5 Pesos de los vehículos sin carga y distancia entre ejes teórica

Tipo de Vehículos	Vehículos ligeros	B2	B3	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4					
Peso del vehículo sin carga (Ton)	3,0	17,5	26,0	4,0	8,0	20,0	26,0	41,0					
Número de ejes teóricos	2	2	2	2	2	3	3	5					
Distancia entre ejes (m)	1,75	5,25	5,25	5,25	5,25	ejes 1-2 ejes 2-3 ejes 1-2 ejes 2-3 ejes 1-2 ejes 2-3 ejes 3-4 ejes 4-5							
						1,75	10,5	1,75	10,5	1,75	8,75	1,75	8,75

Otros datos obtenidos del procesamiento del Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional es el porcentaje de vehículos pesados con carga y sin carga, los cuales son mostrados en la tabla 6.6. Cabe mencionar que en el caso de los vehículos T3-S2-R4, fue necesario hacer dos subdivisiones adicionales con el objetivo de que representaran mejor el sobrepeso registrado en este tipo de vehículos.

Tabla 6.6 Porcentaje de vehículos con carga

Tipo de Vehículos	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4		
Porcentaje de vehículos sin carga	38,00%	22,54%	20,68%	36,30%	39,69%		
Porcentaje de vehículos con carga	62,00%	77,46%	79,32%	63,7%	Carga	Carga	Carga
					44 a 74 Ton	84 a 93 Ton	94 a 100 Ton
					44,73%	9,30%	6,28%

Finalmente, con los datos del Estudio Estadístico de Campo y la información de las estadísticas del Autotransporte Nacional, se obtuvieron las distribuciones estadísticas para cada uno de los vehículos de carga, las distribuciones y el tipo de distribución se muestran en el Anexo I.

Con respecto a los datos para generar las cargas vivas por viento, se tomaron los informes de la Comisión Nacional del Agua para el Puerto de Alvarado del año 2001. Con estos datos, obtuvimos una distribución tipo "Extreme Value" de las velocidades del viento para esta región, la cual es mostrada en la figura 6.2.

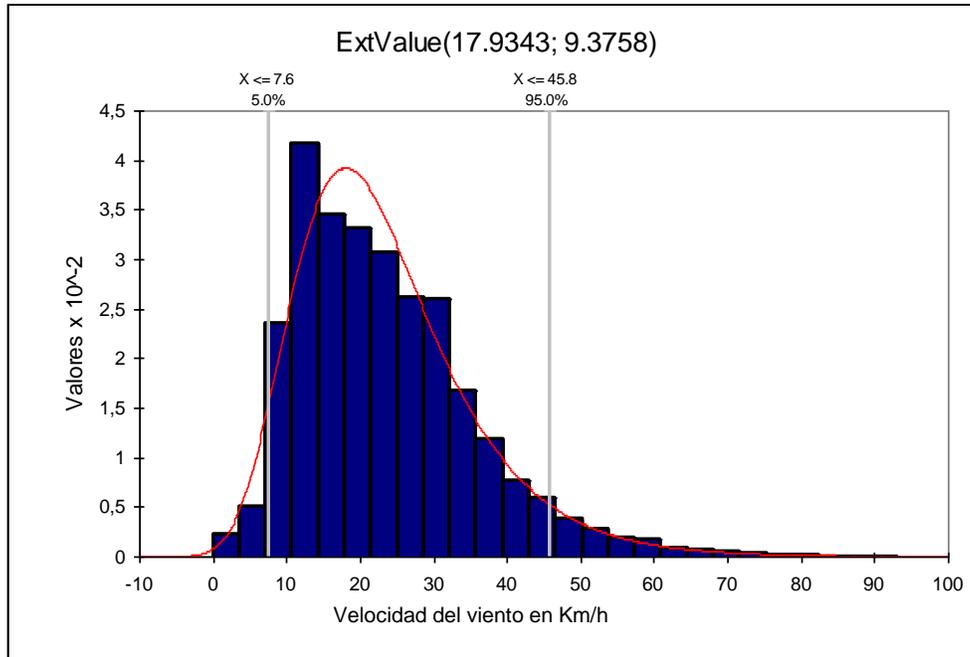


Figura 6.2 Distribución estadística del viento para el puerto de Alvarado en el 2001

Las cargas vivas originadas por viento fueron aplicadas lateralmente sobre el tablero y sobre cada uno de los tirantes. La carga equivalente aplicada al tablero fue calculada con un Factor de topografía de 1, que corresponde a campo abierto con terreno plano, y una altura de gradiente z de 70 m, un factor de ráfaga F_R de 1,3 m y un coeficiente de empuje C de 1,75; con base en la información anterior, se calcula la presión ejercida por el viento utilizando la siguiente ecuación.

$$P = 0,0048 * V_z^2 * [F_R * (0.1z)^{0.14}]^2 * C * G \quad 6.1$$

Donde G es el factor de reducción de densidad de la atmósfera, a la altura h , en kilómetros sobre el nivel del mar, para este caso se tomó un valor de 0,9914 y V_z es la velocidad del viento (km/h). De la ecuación 6.1, por tanto se obtiene que la presión ejercida sobre la parte lateral del tablero es $P = 0,02415 * V_z^2$, donde P tiene unidades de kg/m^2 , que al convertir a N/m^2 da un valor de:

$$P = 0,2369 * V_z^2$$

Para el caso de las cargas vivas en los tirantes se tomó la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{2} * C * \rho * V_z^2 \quad 6.2$$

En donde C es el coeficiente de empuje en un semicírculo y es igual a 0,42, ρ es la densidad del aire, la cual es igual a $1,165 \text{ Kg/m}^3$, por lo tanto:

$$P = 0,4893 (V_z)^2, \text{ en } \text{N/m}^2.$$

Estas presiones se ejercen sobre el tablero que tiene un área igual a 407.2 m de largo por 1.75 m de altura en promedio; mientras que en el caso de los tirantes, estos tienen diferentes áreas de acuerdo al número de torones que conforman el tirante y su longitud. Los valores del área efectiva fueron determinados a partir del número de torones promedio de los subconjuntos de tirantes clasificados de acuerdo a su longitud. Con este valor y mediciones en campo del perímetro de algunos tirantes, se pudo obtener el diámetro promedio de cada tirante. Estos datos pueden ser consultados en la tabla 6.7.

Tabla 6.7 Datos geométricos de los tirantes del puente Río Papaloapan

Tirante	Longitud (m)	Número de torones promedio por tipo de tirante	Diámetro promedio (m)	Área promedio (m^2)
1	18,38	22.5	0,12732395	2,340249612
2	24,64	15	0,10504226	2,588494135
3	30,96	18	0,10727043	3,321234271
4	37,55	19	0,10822536	4,064099224
5	44,33	21	0,12605071	5,587589337
6	51,23	22	0,12732395	6,523194759
7	58,22	23.5	0,12732395	7,412636716
8	65,26	25	0,12732395	8,308934264
9	72,34	26	0,12732395	9,211237033
10	79,46	27	0,12859719	10,21787834
11	86,59	28	0,13050705	11,30096475
12	93,74	28.5	0,13050705	12,23407352
13	100,91	28	0,13050705	13,16896604
14	108,09	32.5	0,14196621	15,34485568

6.2 Simulación MonteCarlo para determinar las distribuciones estadísticas de las tensiones de los cables

Con todos los valores estadísticos referidos anteriormente, se calculó la distribución estadística de los 112 tirantes para las condiciones actuales de flujo vehicular. Dada la necesidad de establecer condiciones futuras de carga en el puente se establecieron diferentes escenarios de flujo vehicular para los siguientes

10, 20 y 30 años, asumiendo tasas de crecimiento baja del 2%, media (esperada) del 4% y alta del 6%. Las proyecciones se tomaron considerando un flujo vehicular inicial de 9500 vehículos; los resultados de estas proyecciones se pueden ver en la figura 6.3.

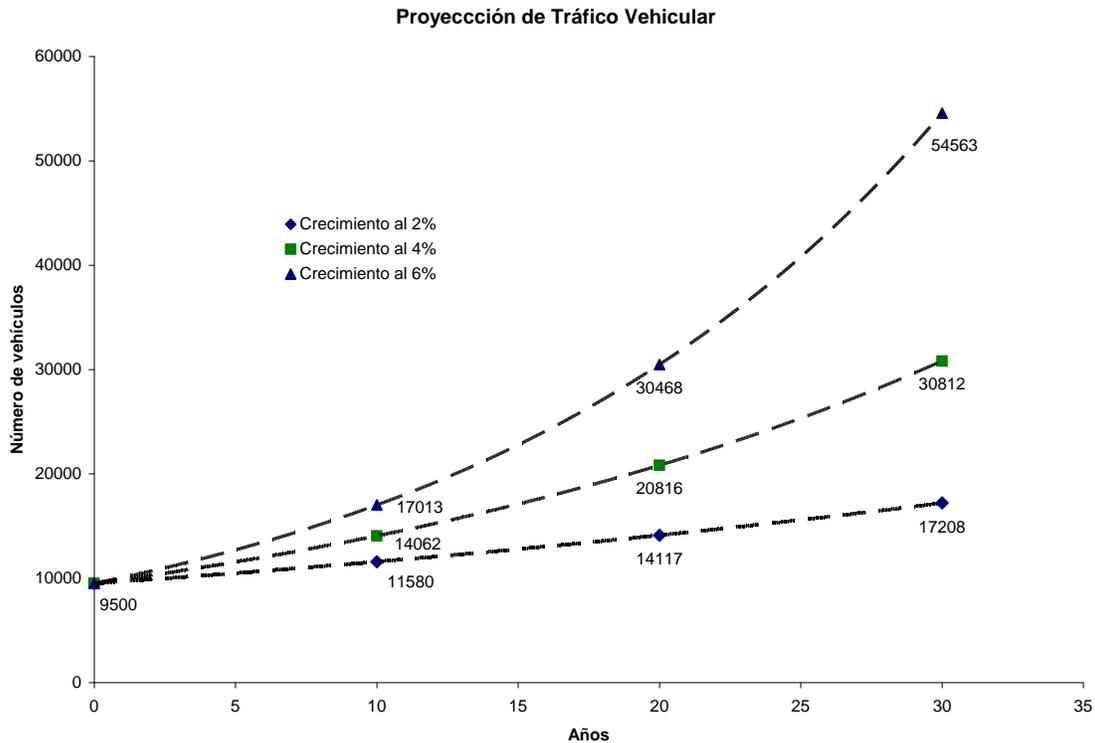


Figura 6.3. Flujo vehicular proyectado en los siguientes años con diferentes tasas de crecimiento anual.

Con los valores de flujo vehicular con diferente tasa de crecimiento anual, se modificó el programa para obtener las distribuciones estadísticas de las tensiones en los tirantes, considerando únicamente seis valores adicionales de flujo vehicular; 11580, 14117, 17208, 20816, 30812 y 54563 vehículos diarios; ya que el resto de los flujos vehiculares es muy cercano a los considerados en estos seis nuevos casos.

Para poder incorporar estos flujos vehiculares dentro del programa para obtener las distribuciones estadísticas de las tensiones en los tirantes, es necesario obtener el porcentaje de ocupación del puente que se tendría bajo estos nuevos escenarios de carga. Por lo cual se consideró el intervalo de tiempo en el que un vehículo pasa para cada flujo vehicular: por ejemplo, para un flujo de 11580 vehículos se tendría que un vehículo pasa cada 0.134 segundos. Con este valor y tomado una velocidad promedio de circulación sobre el puente de 90 Km./h, se dividió el puente en 16 ventanas de un segundo de duración, ya que para la velocidad referida un vehículo tarda aproximadamente en cruzar 16.248 segundos.

Siguiendo con el ejemplo de un flujo de 11580 vehículos, por tanto en un segundo se tendría una probabilidad de 13.4% de encontrar un vehículo, si se considera a cada ventana como un evento independiente la probabilidad de encontrar 0, 1, 2...hasta 16 vehículos está dada por:

Probabilidad de encontrar

0 vehículos	$(1 - P_v)^{16}$	5.3
1 vehículo	$16 * (1 - P_v)^{15} * (P_v)$	5.4
2 vehículos	$120 * (1 - P_v)^{14} * (P_v)^2$	5.5
3 vehículos	$560 * (1 - P_v)^{13} * (P_v)^3$	5.6
4 vehículos	$1820 * (1 - P_v)^{12} * (P_v)^4$	5.7
5 vehículos	$4368 * (1 - P_v)^{11} * (P_v)^5$	5.8
6 vehículos	$8008 * (1 - P_v)^{10} * (P_v)^6$	5.9
7 vehículos	$11420 * (1 - P_v)^9 * (P_v)^7$	5.10
8 vehículos	$12870 * (1 - P_v)^8 * (P_v)^8$	5.11
9 vehículos	$11420 * (1 - P_v)^7 * (P_v)^9$	5.12
10 vehículos	$8008 * (1 - P_v)^6 * (P_v)^{10}$	5.13
11 vehículos	$4368 * (1 - P_v)^5 * (P_v)^{11}$	5.14
12 vehículos	$1820 * (1 - P_v)^4 * (P_v)^{12}$	5.15
13 vehículos	$560 * (1 - P_v)^3 * (P_v)^{13}$	5.16
14 vehículos	$120 * (1 - P_v)^2 * (P_v)^{14}$	5.17
15 vehículos	$16 * (1 - P_v) * (P_v)^{15}$	5.18
16 vehículos	$(P_v)^{16}$	5.19

Donde P_v es la probabilidad de encontrar un vehículo en un segundo.

Al calcular cada uno de los seis nuevos escenarios de flujo vehicular se obtienen las siguientes probabilidades de ocupación del puente Río Papaloapan mostradas en la tabla 6.8.

Tabla 6.8 Ocupación del Puente Río Papaloapan con diferentes escenarios de flujo vehicular

Número de vehículos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Flujo vehicular diario
Probabilidad	10,00	24,76	28,74	20,76	10,44	3,87	1,10	0,24	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	11580
	5,76	17,99	26,36	24,02	15,24	7,14	2,55	0,71	0,15	0,02	-	-	-	-	-	-	-	14117
	2,86	11,39	21,24	24,65	19,92	11,89	5,42	1,92	0,53	0,11	0,02	-	-	-	-	-	-	17208
	1,21	6,17	14,68	21,75	22,43	17,09	9,94	4,50	1,60	0,45	0,10	0,01	-	-	-	-	-	20816
	0,08	0,76	3,17	8,22	14,80	19,69	20,01	15,85	9,88	4,87	1,88	0,57	0,13	0,02	-	-	-	30812
	-	-	-	0,03	0,18	0,74	2,34	5,73	11,06	16,85	20,22	18,90	13,50	7,11	2,61	0,59	0,06	-

Calculados los datos de ocupación del puente Río Papaloapan con diferentes flujos vehiculares -y con los datos estadísticos del tipo de vehículos, la carga que transportan y el viento- se modificó el algoritmo del MBG, en el sentido de generar condiciones aleatorias con base en las distribuciones estadísticas y obtener como salida las cargas solicitación para cada uno de los 112 tirantes por cada escenario generado. El programa en fortran para realizar la simulación MonteCarlo puede ser consultado en el anexo II.

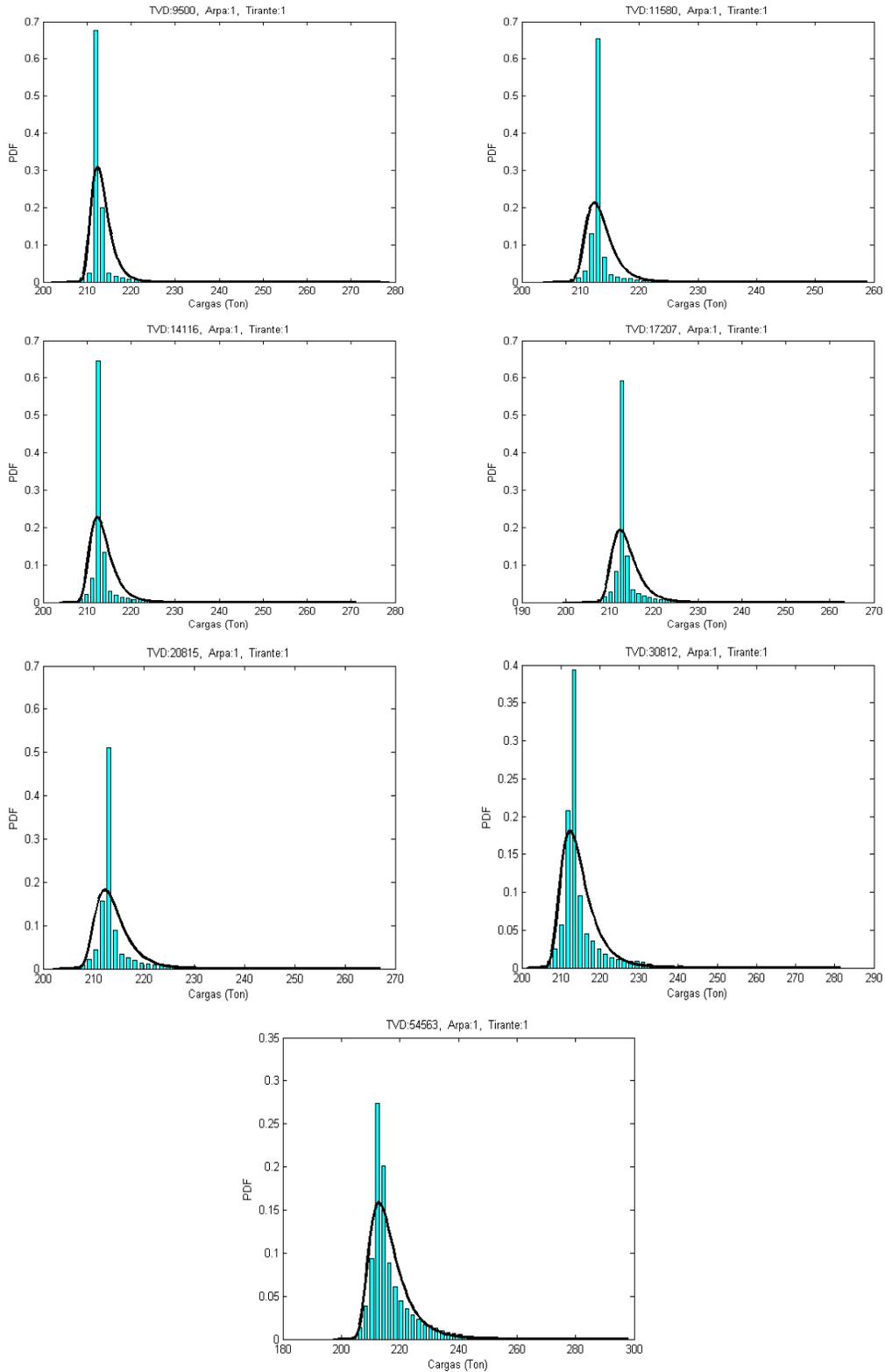
EL tipo de distribución estadística obtenida para representar la carga de tensión de los tirantes fue del tipo Extreme Value, el análisis se realizó utilizando el programa @Risk 4.5 y el programa de MATLAB 7.1 (www.paladise.com) mediante la comparación y ponderación de la calificación obtenida para cada tipo de distribución (la calificación es realizada de manera directa por el programa) para cada uno de los tirantes del Puente Río Papaloapan. Finalmente, se concluyó que el número de simulaciones necesarias para generar la distribución estadística es de 20 000 simulaciones; esta conclusión se basó en el análisis de la variación de los parámetros estadísticos al compararlos con diferentes tamaños de muestras hasta obtener una estabilidad en los valores de μ y σ .

Las distribuciones estadísticas para el tirante 1 del arpa 1 para los siete escenarios de crecimiento vehicular se pueden ver en la figura 6.4; las ecuaciones que representan las distribuciones estadísticas de los siete escenarios para cada uno de los 112 tirantes puede ser consultada en el anexo III y la ecuación (www.mathwave.com/articles/generalized_extreme_value_gev_distribution) que representa su función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\left(1 + kz\right)^{-1/k}\right) \left(1 + kz\right)^{\frac{-k-1}{k}}; \text{ Para } k \neq 0 \quad 6.20$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp(-z - \exp(-z)); \text{ Para } k = 0 \quad 6.21$$

$$\text{Dónde: } z \equiv \frac{x - \mu}{\sigma}$$



6.4 Distribuciones de carga para diferente tráfico vehicular diario (TVD) en el tirante 1 del arpa 1

7 Conclusiones

El Método de Búsqueda Global demostró que puede ser una herramienta para la evaluación de daño dentro de los esquemas de monitoreo remoto en tiempo real, en un sistema de administración de puentes. La sensibilidad del Método depende de tres aspectos fundamentales la calibración del modelo de elemento finito de la estructura, la cercanía de los sensores respecto al lugar de excitación y el daño y el nivel del ruido registrado en las pruebas experimentales. Para el Puente Río Papaloapan esta distancia no debe ser mayor de 65m, debido a la dispersión de la respuesta dinámica, el ruido registrado en las señales y la sensibilidad de los sensores, lo anterior ocasiona que la diferencia de las magnitudes de las respuestas dinámicas experimentales y del modelo de elemento finito sea menor conforme la onda se propaga y por lo tanto el ruido, la sensibilidad de los sensores y el ajuste de la calibración incida más en la evaluación de la variación de las respuestas dinámicas experimentales y del MEF con diferentes escenarios de daño.

La calibración del modelo de elemento finito de una estructura real es un proceso complicado, debido a los siguientes factores: primero, la información de los materiales, la ubicación y dimensiones no siempre los corresponden a los indicados en los planos estructurales; segundo los materiales que constituyen la estructura pueden tener defectos de fabricación o sufrir alteraciones durante el proceso de construcción; tercero la sensibilidad, incertidumbre, ruido eléctrico de los dispositivos electrónicos utilizados para las pruebas experimentales y finalmente las limitaciones en los modelos matemáticos para representar todos los fenómenos físicos debido a condiciones de frontera e interacción de materiales complejos. Por lo anterior, para lograr una mejor calibración de un modelo, se propone una planeación detallada de la ubicación de los sensores, calibrar y probar el sistema de adquisición de datos y seleccionar aquellos dispositivos con la menor incertidumbre y generación de ruido eléctrico y verificar con pruebas no destructivas puntuales las dimensiones físicas de los materiales que constituyen la estructura

El esquema de generación de escenarios de daño en el Método de Búsqueda Global en forma secuencial y bajo ventanas de búsqueda definidas puede ser modificado para trabajar con escenarios generados aleatoriamente, tener como entrada diferentes condiciones de carga viva sobre el puente y obtener -como salida- datos sobre cargas, esfuerzos y deformaciones de los componentes estructurales que conforman la estructura para obtener una distribución estadística de las variables de salida. Esta modificación fue realizada en el MBG obteniendo como resultado las distribuciones estadísticas de las tensiones de los 112 tirantes bajo diferentes escenarios de flujo vehicular.

El Método de Búsqueda Global también puede ser utilizado para volver a calibrar el modelo de elemento finito del puente, ya que una vez detectado un daño, si este no ha sido reparado, se incorpora su representación con el detrimento de los parámetros estructurales del modelo de elemento finito y cuando es reparado es posible identificar los cambios positivos en los parámetros estructurales identificando la nueva condición estructural.

Finalmente, una de las ventajas del Método de Búsqueda Global es que los escenarios de daño pueden ser almacenados en una base de datos; por lo que mientras no existan cambios en las respuestas dinámicas experimentales y del modelo de EF, la base de datos se puede incrementar refinando más el rango de la búsqueda e inclusive se pueden calcular escenarios donde existan múltiples condiciones de daños.

7.1 Trabajo futuro

Se ha desarrollado la optimización de diseños de estructuras y componentes estructurales a partir de la utilización de algoritmos genéticos, es posible utilizar esta metodología en el Método de Búsqueda Global para la detección de daño en estructuras a través de la generación, en un inicio aleatoria, de casos hipotéticos de daño y después a partir de algoritmos genéticos combinar, cambiar, permutar estos daños hasta encontrar la combinación apropiada que represente una condición estructural con daño.

El Método de Búsqueda Global, hasta ahora, ha sido utilizado para detectar daño estructural; sin embargo, es posible trasladarlo a detección de daño micro estructural siempre y cuando se realice investigación en la generación de pulsos eléctricos que exciten los componentes estructurales con frecuencias del orden de kHz o MHz con sus respectivos equipos de adquisición de datos.

Las pruebas con el MBG son realizadas bajo condiciones controladas con el objetivo de tener únicamente la propagación de las ondas originadas por la fuerza impacto puntual; en el futuro, es necesario incorporar esquemas donde sea posible evaluar las estructuras a través del viento o tráfico vehicular; para lo cual es necesario conocer como representar la fuerza que origina el viento sobre las estructuras en función del tiempo y el desarrollo de sensores para su registro, en el caso de vehículos el problema debe ser enfocado en la optimización de algoritmos de solución.

En el futuro, se tiene previsto comparar el Método de Búsqueda Global con algunos métodos basados en vibraciones, con el objetivo de obtener las ventajas y desventajas de los métodos bajo diferentes condiciones de daño estructural.

Finalmente, es necesario analizar matemáticamente el valor de la línea de referencia generada en los gráficos de variación de las respuestas dinámicas; debido a que se ha observado que a partir del valor promedio de la línea de referencia se puede obtener información sobre la severidad del daño y la ubicación parcial del daño.

Bibliografía

Abdel Wahab M. M., De Roeck G., "Damage Detection in bridges Using Modal Curvatures: Application to a Real Damage Scenario", *Journal of Sound and Vibration*, 222(2), 217-235, 1999.

Adams, R. A., and Doyle, J. F., "Multiple Force Identification for Complex Structures", *Experimental Mechanics*, 42(1), pp. 25-36, 2002.

Aguirre A., Carbajal J., "Análisis en el Tirante 11 del Puente Papaloapan", *Corporación Mexicana de Investigación de Materiales S. A. de C. V.*, Reporte Interno AF-IFT/00087, Saltillo, Coahuila, México, 2000.

Aktan A. E., Grimmelsman, K. A., "Structural identification: Analytical Aspects", *Journal of Structural Engineering*, 127(7), pp. 817-829, 1999.

Aktan A. E., Helmicki A. J., Hunt V. J., "Issues in Health Monitoring for Intelligent Infrastructure", 7(5), pp 674-692, 1998.

Alifanov, O. M., "Methods of Solving Ill-Posed Inverse Problems", *Journal of Engineering Physics*, 45(5), pp. 1237-1245, 1983.

Allampalli S., Fu, G., Dillon E. W., "On the Use of Measured Vibration for Detecting Bridge Damagae", *Proceedings of the Fourth International Bridge Engineering Conference*, San Francisco, California, U. S. A. , August 28-30, pp.125-137, 1995

Allemang, R. J., Brown D. L., "A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis", *Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference*, Orlando FL., 1982.

Anderson T. L., "Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications", *CRC Press*, Boca Ratón, U. S. A., 1991

ASM Handbook Committee, "Nondestructive Evaluation and Quality Control", *ASM International*, *ASM Handbook*, Vol 17, 1997

Astiz M. A., "Composite Construction in Cable-Stayed Bridge Towers", *International Conference on Composite Construction – Conventional and Innovative*, Conference Report, 16-18 September, Innsbruck, Austria, pp 127-132, 1997

ASTM, "Standard Specification for Steel Castings, High Strength, for Structural Purposes", *ASTM designation*, A148/A 148M-93B (rev 98), *West Conshohocken*, PA, U. S. A., 2005.

Bathe K.J., "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", *Prentice-Hall*, *Englewood Cliffs*, NJ, 1982, 2/E, 1995

Bert C. W., "Relationship Between Fundamental Natural Frequency and Maxim Static Deflection for Various Linear Vibratory Systems", *Journal of Sound and Vibration*, 162(3), pp 547-557, 1993.

Carrión F. J., Lomelí M. G., López J. A., Terán J., Jiménez R., "Estudio para la Evaluación de los Dispositivos de Soporte Superior (botellas) de los Anclajes de los Tirantes del Puente Río Papaloapan", Instituto Mexicano del Transporte, Reporte Interno, EE 05/03, Sanfandila, Querétaro, México, 2003.

Carrión-Viramontes F. J., "Aplicación de las Funciones Intermedias en Tiempo Frecuencia al Análisis de Sistemas Sujetos a Vibración", Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería División de Postgrado de la Universidad Autónoma de Querétaro, 2002.

Carrión Viramontes F. J., Doyle J. F., Lozano A., "Structural health Monitoring and Damage Detection using a sub-domain inverse Method", *Smart Materials and Structures*, 12(2003), pp 776-784, 2003.

Carrión Viramontes F. J., López López J. A., Quintana-Rodríguez J. A., Lozano Guzmán., "Nonlinear Assessment of Cable Vibration in a Stayed Bridge", *Experimental Mechanics*, 2007.

Doyle J. F., "Modern Experimental Stress Analysis", Wiley and Sons, New York, 2004.

Doyle J. F., "Wave Propagation in Structures", 2/E. Springer-Verlag, New York, 1997.

Ewins D. J., "Modal Testing, Practice and Application", 2nd edition, Research Studies Press LTD, Hertfordshire, England, 2000.

Friswell, M. I., and Mottershead, J. E., "Finite Element Model Updating in Structural Dynamic", Kluwer, The Netherlands, 1995.

Fuhr P. L., Huston D. R., Kajenski P. J., Ambrose T. P., "Performance and Health Monitoring of the Stafford Medical Building Using Embedded Sensors", *Journal Of smart Materials and Structures*, 1(1), pp 63-68, 1992.

Gutiérrez Hernández J. L., Mendoza Díaz A., "Análisis Estadístico de la Información Recopilada en las Estaciones Instaladas en el 2002", documento técnico número 31 del Instituto Mexicano del Transporte.

Hollandsworth, P. E., and Busby, H. R., "Impact Force Identification using the General Inverse Technique", *International Journal of Impact Engineering*, 8, pp. 315-322, 1996

Inman D., "Multifunctional Structures of the Next Millennium", *Structural Dynamics@2000: Current Status and Future Directions*, D. J. Ewins and D. J. Inman Eds., Research Studies Press LTD, Baldock, Hertfordshire, England, pp 59-70, 2001.

Kato M., Shimada S., "Vibration of PC Bridge During Failure Process", *Journal of Strutural Engineering*, 112(7), pp. 1692-1703, 1986.

Linag Z., Lee, G. C., "Damping of Structures Part I", NCEER Report, NCEER 91-0004, 1994.

López A., Poblano C., "Análisis de falla y Pruebas de Fatiga del Anclaje Desprendido del Tirante 11, Lado Agua, Torre 3, del Puente Río Papaloapan", Instituto Mexicano del Transporte, Reporte Interno, EQ001/00, Sanfandila, Querétaro, México, 2000.

López J. A., Carrión F. J., Quintana J. A., Samayoa D., Lomelí M. G., Orozco P. R., "Verification of the Ultrasonic Qualification for Structural Integrity of partially Embedded Steel Elements", *Advances Materials Research*, , 65(2009), pp. 69-78, 2009.

Pandey A. K., Biswas M., Samman M. M., "Damage Location from Changes in Curvature Mode Shape", *Journal of Sound and Vibration*, 145(2), 1991.

Quintana J. A., "A Global Search Method for Damage Detection in General Structures", Tesis de Maestría, Astronautics and Aeronautics Department, Purdue University, U. S. A., 2004

Saitoh M., Takei B. T., "Damage Estimation and Identification of Structural Faults Using Modal Parameters", *Proceedings of the 14th International Modal Analysis Conference*, Dearborn, MI, U. S. A., 1996

Salawu H. J., "Detection of Structural Damage through Changes in Frequenc: A Review", *Engineering Structures*, 19(9), pp 718-723, 1997.

Turner J. D., Pretolve A. J., "A Study of the Spectrum of Traffic-induced Bridge Vibration", *Journal of Sound and Vibration*. 122, 31-42, 1988.

www.mathwave.com/articles/generalized_extreme_value_gev_distribution

www.paladise.com

Zimmerman D. C., Kauk M., "Structural Damage Detection Using a Minimum Rank Update Theory", *Transactions of the ASME*, 116, pp. 222-231, 1994

Anexo 1 Distribuciones estadísticas de la carga total transportada para las diferentes configuraciones vehiculares

AI.1 Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo C2

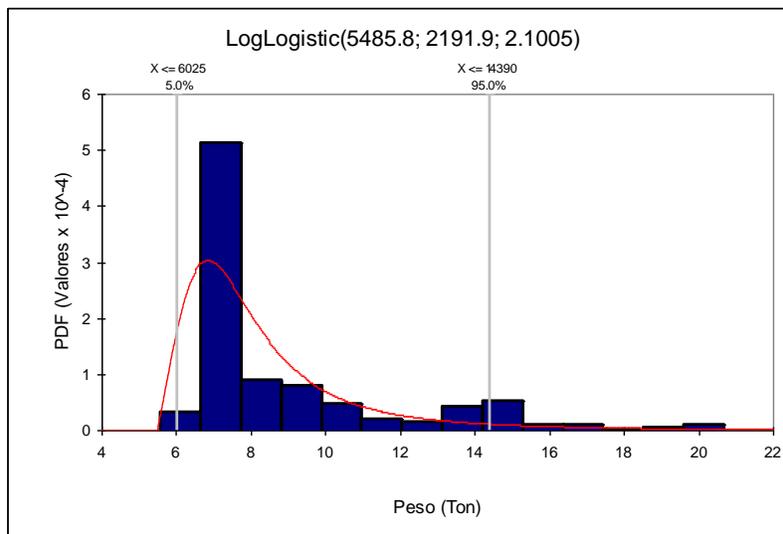


Figura AI.1 Dirección a La Tinaja

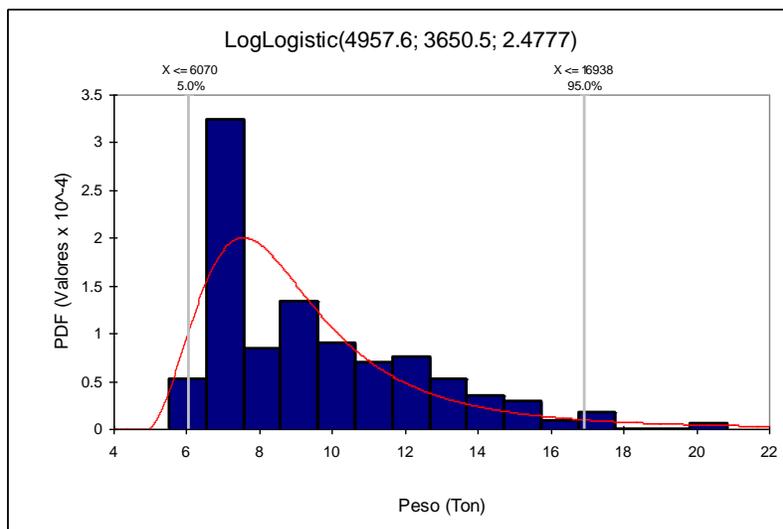


Figura AI.2 Dirección a Acayucan

AI.2 Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo C3

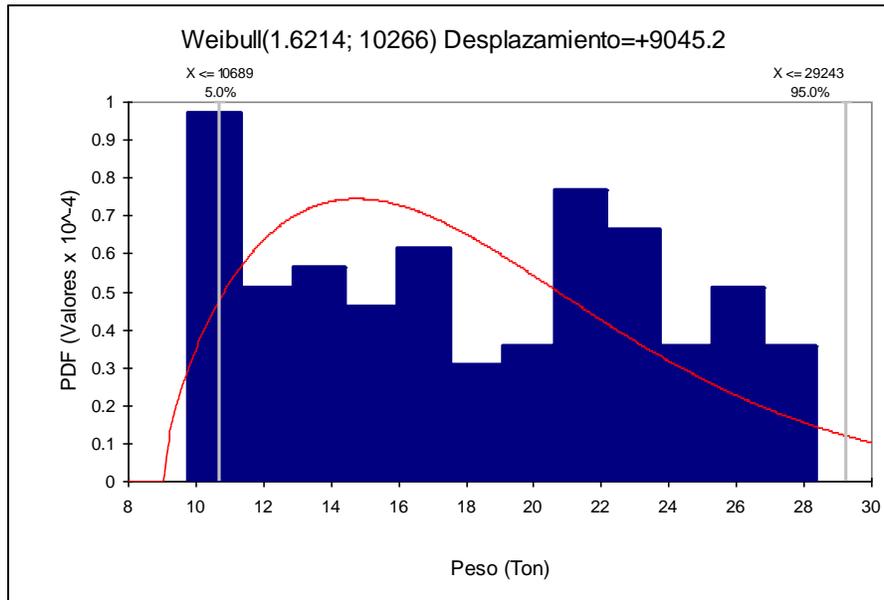


Figura AI.3 Dirección a La Tinaja

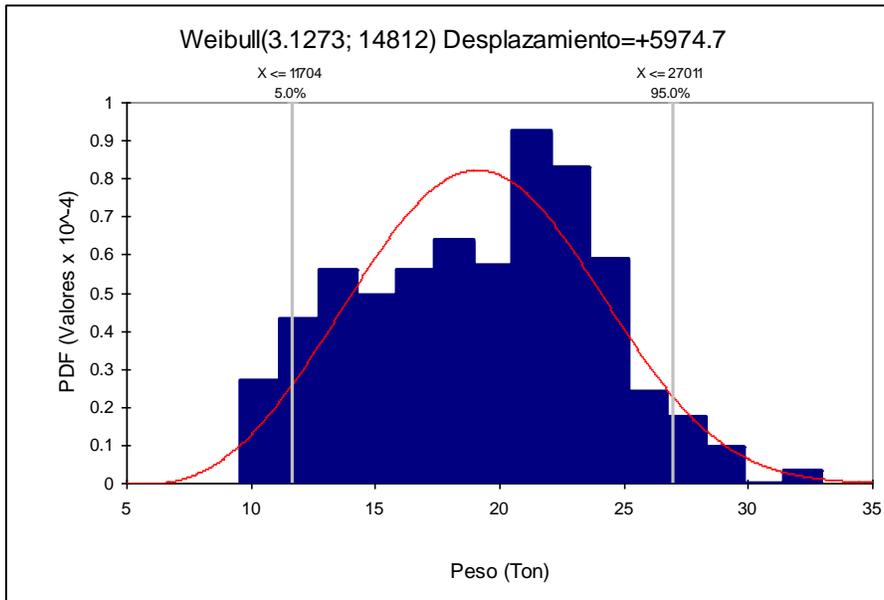


Figura AI.4 Dirección a Acayucan

AI.3 Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo T3-S2

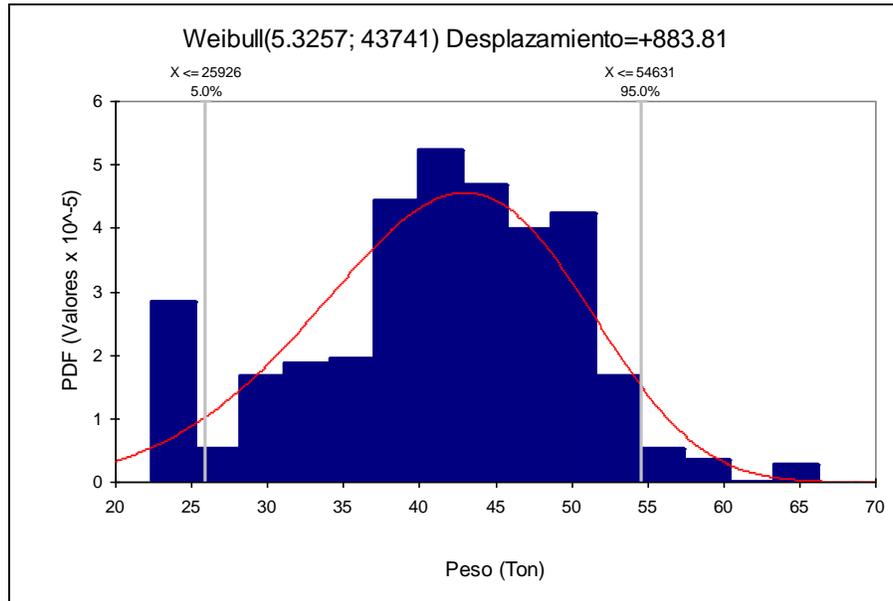


Figura AI.5 Dirección a La Tinaja

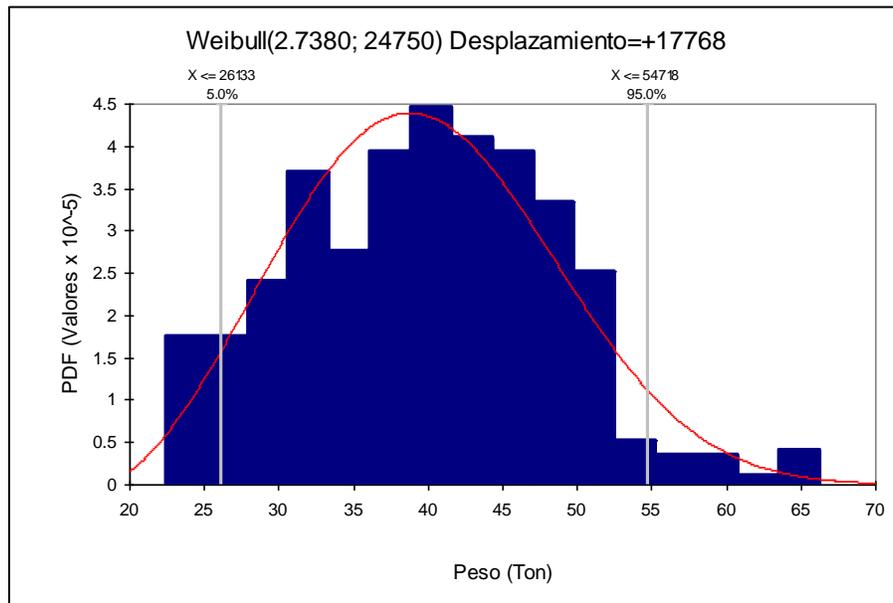


Figura AI.6 Dirección a Acayucan

AI.4 Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo T3-S3

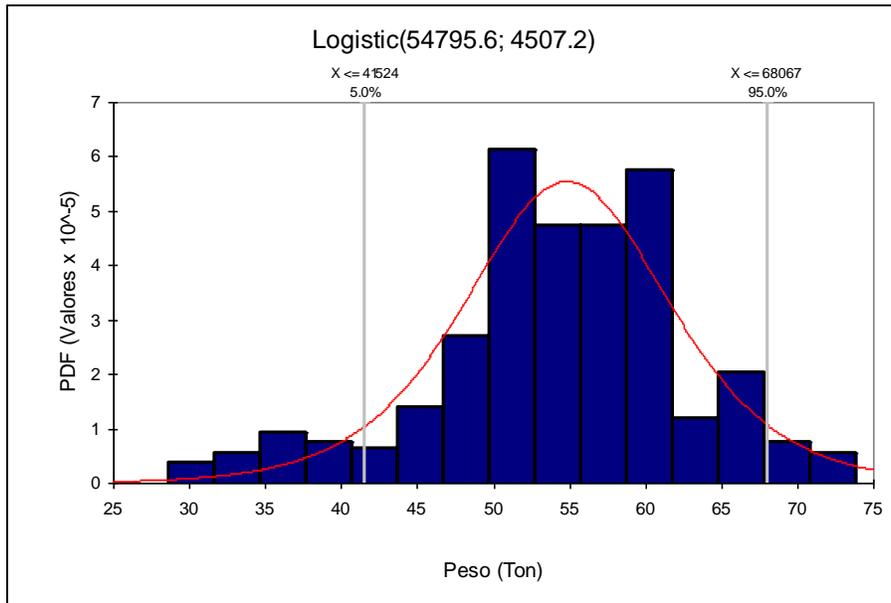


Figura AI.7 Dirección a La Tinaja

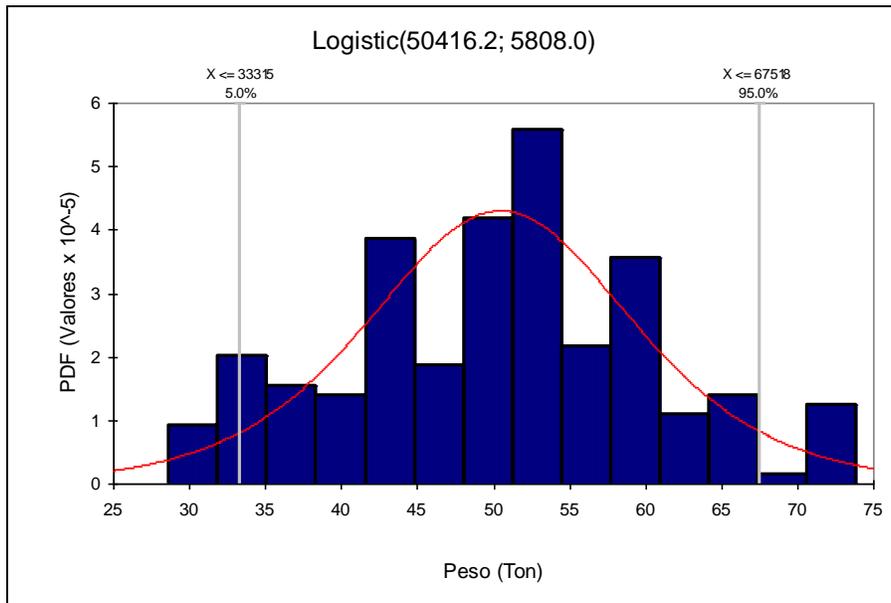


Figura AI.8 Dirección a Acayucan

AI.5 Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo T3-S2-R4

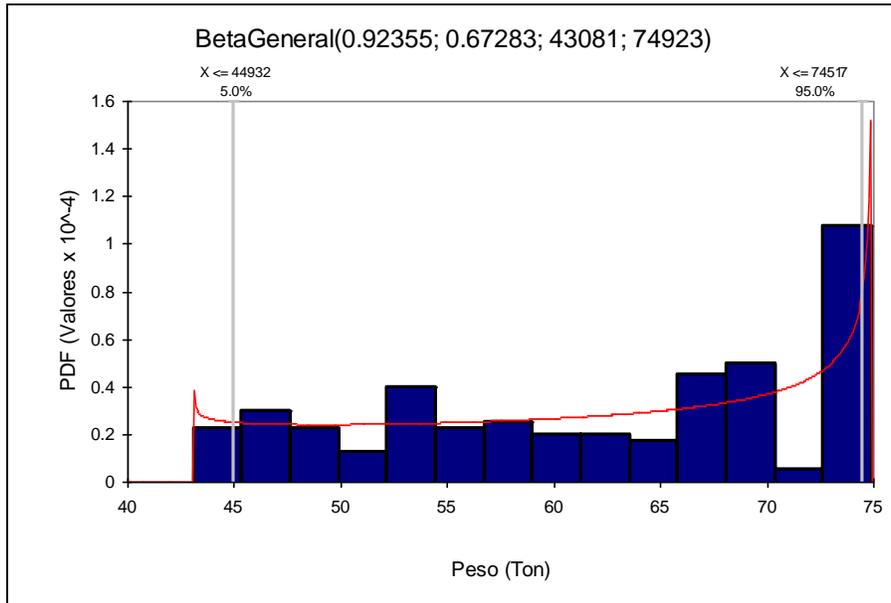


Figura AI.9 Dirección a La Tinaja

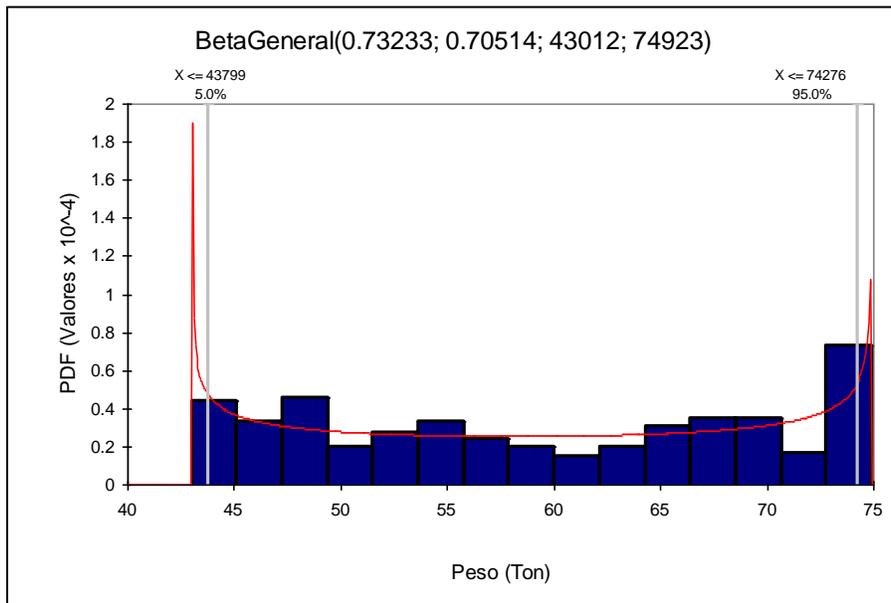


Figura AI.10 Dirección a Acayucan

AI.6 Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo T3-S2-R4 (Sobre cargados I)

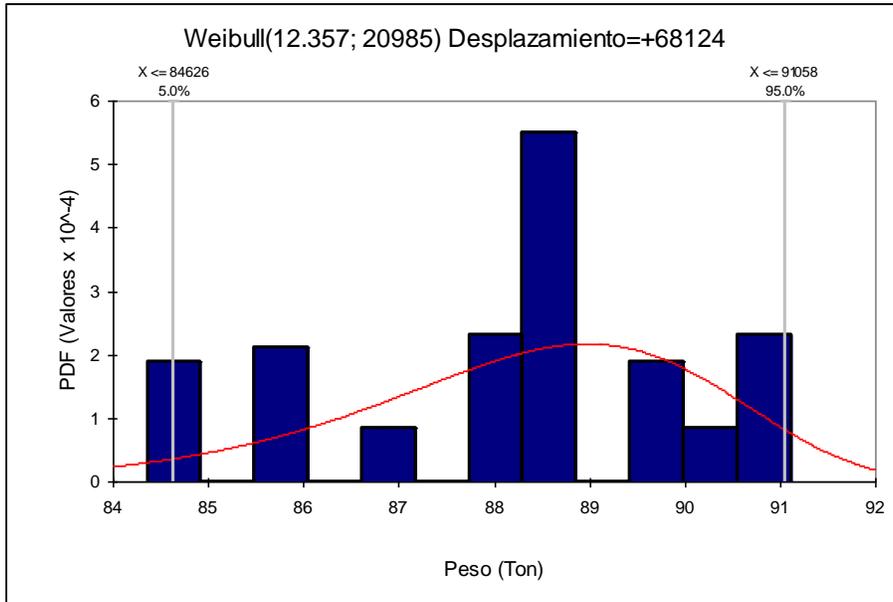


Figura AI.11 Dirección a La Tinaja

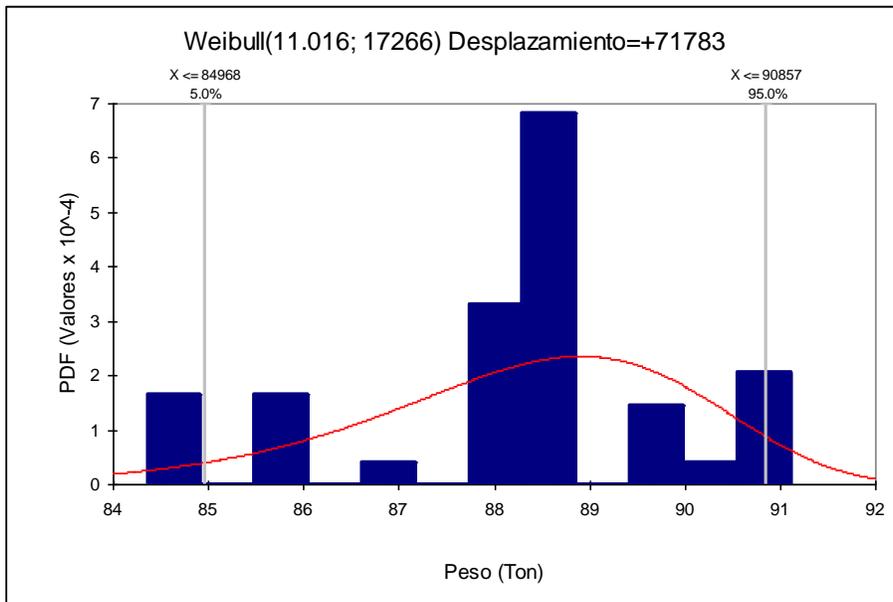


Figura AI.12 Dirección a Acayucan

AI.7 Distribuciones Estadísticas para los vehículos tipo T3-S2-R4 (Sobre cargados I)

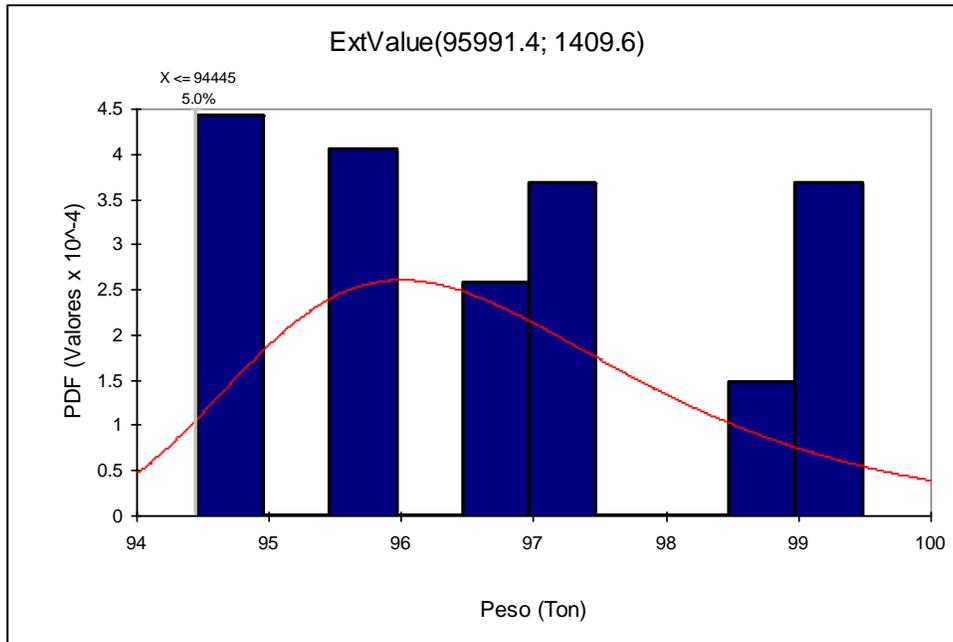


Figura AI.13 Dirección a La Tinaja

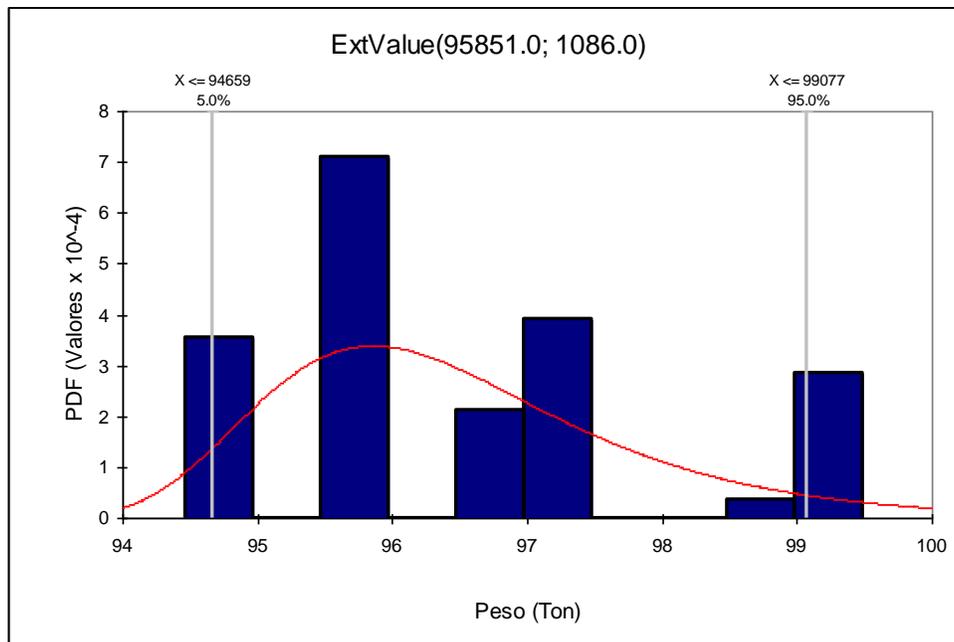


Figura AI.14 Dirección a Acayucan

Anexo II Programa para calcular las tensiones de los 112 tirantes bajo diferentes escenarios de carga aleatoria

```
c
c Programa para colocar el peso vehicular en el puente
c
USE msflib
real, dimension (20000,50)::AA,BB,CC,DD,EE,NOFO,JJ,KK
real, dimension (20000,10)::ST,tension
real, dimension (8,50)::sal
Integer,dimension(20000,50)::FF,GG,HH,II
Integer, dimension (5000,50)::NN,NV,NP,cond3,vtem
integer, dimension(5000)::v1,v2,temp,temp1,cond4,NT,VV,QQ
integer, dimension(20000)::vv1,VC,node
real, dimension(20000)::v3,nvep
Integer,dimension(50000)::nvev,ciclo
real, Dimension(2000)::RR
Integer::Nve,cte1,n,nve1,no,nod,count4,count5,jaq,cond5
Integer::jaq1,jaq2,jaq3,jaq4,empalme,pau,pau2,jaq5,ndummy
Integer::iostat
Real::fa,fa1,ubc1,liy,lsy,lix,lsx,xva
character*8::ab
LOGICAL(4) GAMMA
Write(*,*)'Escribe el número de impar de 6 digitos'
read(*,*)Z
liy=3.00
lsy=5.00
lix=0.75
lsx=0.75
empalme=0
ioutc=33
open(unit=ioutc, file='arpa1.dat')
rewind(ioutc)
ioutd=34
open(unit=ioutd, file='arpa2.dat')
rewind(ioutd)
ioute=35
open(unit=ioute, file='arpa3.dat')
```

```
rewind(ioute)
ioutf=36
open(unit=ioutf, file='arpa4.dat')
rewind(ioutf)
ioutg=37
open(unit=ioutg, file='arpa5.dat')
rewind(ioutg)
iouth=38
open(unit=iouth, file='arpa6.dat')
rewind(iouth)
iouti=39
open(unit=iouti, file='arpa7.dat')
rewind(iouti)
ioutj=40
open(unit=ioutj, file='arpa8.dat')
rewind(ioutj)
Do n=1, 10000
  Write(*,*)'el ciclo es',n,' de 20000'
  fa=ran(z)
  Nved=fa*10000
  if(nved .lt. 1000)then
    Nve=0
  endif
  if(nved .gt. 999)then
    if(nved .lt. 3477)then
      Nve=1
    endif
  endif
  if(nved .gt. 3476)then
    if(nved .lt. 6352)then
      Nve=2
    endif
  endif
  if(nved .gt. 6351)then
    if(nved .lt. 8428)then
      Nve=3
    endif
  endif
  if(nved .gt. 8427)then
    if(nved .lt. 9472)then
      Nve=4
    endif
  endif
  if(nved .gt. 9471)then
    if(nved .lt. 9860)then
      Nve=5
    endif
  endif
enddo
```

```
    endif
endif
if(nved .gt. 9859)then
    if(nved .lt. 9970)then
        Nve=6
    endif
endif
if(nved .gt. 9969)then
    if(nved .lt. 9994)then
        Nve=7
    endif
endif
if(nved .gt. 9993)then
    if(nved .lt. 9998)then
        Nve=8
    endif
endif
if(nved .gt. 9997)then
    if(nved .lt. 10000)then
        Nve=9
    endif
endif
nvev(n)=nve
Write(*,*)'El numero de vehiculos es',Nve
iout=31
open(unit=iout, file='qedmon.sdf')
rewind(iout)
iouta=32
open(unit=iouta, file='veh.dyn')
rewind(iouta)
write(iouta,83)Nve
83  format(1x,80(g12.6,1x))
do i=1, 4
    v2(i)=0
enddo
ZZ2=Z
Do i=1, Nve
    fa2=ran(ZZ2)
    Nve2=fa2*10000
    if (Nve2 .lt. 3561) then
        v2(1)=1+v2(1)
    endif
    if (Nve2 .gt. 3560) then
        if (Nve2 .lt. 7143) then
            v2(2)=1+v2(2)
        endif
    endif
endif
```

```
if (Nve2 .gt. 7142) then
  if (Nve2 .lt. 8575) then
    v2(3)=1+v2(3)
  endif
endif
if (Nve2 .gt. 8574) then
  if (Nve2 .lt. 10000) then
    v2(4)=1+v2(4)
  endif
endif
enddo
Write(*,*)'Vehiculos en el carril C1',v2(1)
Write(*,*)'Vehiculos en el carril C2',v2(4)
Write(*,*)'Vehiculos en el carril C3',v2(3)
Write(*,*)'Vehiculos en el carril C4',v2(2)
ZZ=Z
cte1=0
do k=1, 2
  if (k .eq. 1) then
    Write(*,*)'Los vehiculos del carril c1 son'
  endif
  if (k .eq. 2) then
    Write(*,*)'Los vehiculos del carril c4 son'
    cte1=v2(1)
  endif
  Do i=1, v2(k)
    fa1=ran(ZZ)
    Nve1=fa1*10000
    if (Nve1 .lt. 5174) then
      write(*,*)'vehiculo ligero'
      v1(i+cte1)=1
    endif
    if (Nve1 .gt. 5173) then
      if (Nve1 .lt. 5414) then
        Write(*,*)'B2'
        V1(i+cte1)=2
      endif
    endif
    if (Nve1 .gt. 5413) then
      if (nve1 .lt. 5474) then
        write(*,*)'B3'
        V1(i+cte1)=3
      endif
    endif
    if (Nve1 .gt. 5473) then
      if (nve1 .lt. 6112) then
```

```
    write(*,*)'C2'
    V1(i+cte1)=4
  endif
endif
if (Nve1 .gt. 6111) then
  if (nve1 .lt. 6665) then
    write(*,*)'C3'
    V1(i+cte1)=5
  endif
endif
if (Nve1 .gt. 6664) then
  if (nve1 .lt. 8097) then
    write(*,*)'T3-S2'
    V1(i+cte1)=6
  endif
endif
if (Nve1 .gt. 8096) then
  if (nve1 .lt. 8542) then
    write(*,*)'T3-S3'
    V1(i+cte1)=7
  endif
endif
if (Nve1 .gt. 8541) then
  if (nve1 .lt. 10000) then
    write(*,*)'T3-S2-R4'
    V1(i+cte1)=8
  endif
endif
enddo
ZZ3=z
do k=1, 2
  if (k .eq. 1) then
    Write(*,*)'Los vehiculos del carril c3 son'
    cte1=v2(1)+v2(2)
  endif
  if (k .eq. 2) then
    Write(*,*)'Los vehiculos del carril c2 son'
    cte1=v2(1)+v2(2)+v2(3)
  endif
  Do i=1, v2(k+2)
    fa3=ran(ZZ3)
    Nve3=fa3*10000
    if (Nve3 .lt. 7971) then
      write(*,*)'vehiculo ligero'
      v1(i+cte1)=1
    endif
  enddo
enddo
```

```
    if (Nve3 .gt. 7970) then
      if (Nve3 .lt. 8174) then
        Write(*,*)'B2'
          V1(i+cte1)=2
        endif
      endif
      if (Nve3 .gt. 8173) then
        if (Nve3 .lt. 8203) then
          write(*,*)'B3'
            V1(i+cte1)=3
          endif
        endif
      endif
      if (Nve3 .gt. 8202) then
        if (Nve3 .lt. 8348) then
          write(*,*)'C2'
            V1(i+cte1)=4
          endif
        endif
      endif
      if (Nve3 .gt. 8347) then
        if (Nve3 .lt. 8464) then
          write(*,*)'C3'
            V1(i+cte1)=5
          endif
        endif
      endif
      if (Nve3 .gt. 8463) then
        if (Nve3 .lt. 9159) then
          write(*,*)'T3-S2'
            V1(i+cte1)=6
          endif
        endif
      endif
      if (Nve3 .gt. 9158) then
        if (Nve3 .lt. 9391) then
          write(*,*)'T3-S3'
            V1(i+cte1)=7
          endif
        endif
      endif
      if (Nve3 .gt. 9390) then
        if (Nve3 .lt. 10000) then
          write(*,*)'T3-S2-R4'
            V1(i+cte1)=8
          endif
        endif
      endif
    enddo
  enddo
  cte1=0
  do i=1, 4
```

```
    cte1=cte1+v2(i)
enddo
do i=1, cte1
  write(*,*)v1(i)
enddo
idat=21
open(unit=idat, file='nodos.sdf')
rewind(idat)
do i=1, 4693
  read(idat,*)AA(i,1:4)
enddo
ZZ4=nve+7*n
count4=0
v3(1)=21
v3(2)=5.25
v3(3)=11.55
v3(4)=14.7
count4=0
do h=1, 4
  do i=1, v2(h)
    fa4=ran(ZZ4)*1000
    write(*,*)'el numero aleatorio es',fa4
    Ubc1=fa4*1.75/4.80769231
    if(ubc1 .lt. 2.11) then
      Ubc1=1.0
    endif
    if(ubc1 .gt. 402.6) then
      if(ubc1 .lt. 406.2) then
        Ubc1=402.7
      endif
    endif
    write(*,*)'quedo en',ubc1
    no=0
    do j=1, 4693
      if(v3(h) .eq. AA(j,3))then
        no=no+1
        BB(no,1:4)=AA(j,1:4)
      endif
    enddo
    nod=0
    do j=1, no
      if(ubc1 .gt. BB(j,2))then
        nod=nod+1
        CC(nod,1:4)=BB(j,1:4)
      endif
    enddo
    count4=count4+1
```

```
temp(count4)=1
do j=1, nod
  if(CC(j,2) .gt. temp(count4)) then
    temp(count4)=cc(j,2)
    temp1(count4)=cc(j,1)
  endif
enddo
write(*,*)'el nodo es',temp1(count4)
enddo
do i=1, count4
  do j=1, 4693
    if(AA(j,4) .eq. 20.43)then
      if(temp1(i) .eq. AA(j,1))then
        DD(i,1:4)=AA(j,1:4)
        count5=0
        do k=1, 4693
          if(AA(k,4) .eq. 20.43)then
            if(DD(i,2) .eq. AA(k,2))then
              count5=count5+1
              EE(count5,1:4)=AA(k,1:4)
            endif
          endif
        enddo
        do k=1, count5
          if(EE(k,3) .gt. DD(i,3)-lsy)then
            if(EE(k,3) .lt. DD(i,3)-liy)then
              NN(i,1)=temp1(i)
              NN(i,2)=EE(k,1)
            endif
          endif
        enddo
      endif
    endif
  enddo
enddo
do i=1, count4
  write(*,*)NN(i,1:2)
enddo
idata=22
open(unit=idata, file='espaveh.dat')
rewind(idata)
do i=1, 8
  read(idata,*)NV(i,1:7)
enddo
count5=0
```

```
count6=0
cond5=0
fab=1
do i=1, count4
  cond3(i,1:2)=0
  do j=1, 8
    if(v1(i) .eq. NV(j,1))then
      cond3(i,2)=NV(j,7)+cond3(i,2)
      cond3(i,1)=NV(j,1)
      cond5=NV(j,7)+cond5
      count6=count6+1
    do k=1, NV(j,7)
      jaq=NV(j,1)
      count5=count5+1
      if (k .eq. 1)then
        NP(count5,1)=NN(i,1)
        NP(count5,2)=NN(i,2)
      endif
      if (k .eq. 2)then
        do l=1, 4693
          if(NN(i,1) .eq. AA(l,1))then
            DD(1,1:4)=AA(l,1:4)
            DD(1,2)=AA(l,2)
            DD(1,5)=AA(l,2)-NV(j,2)*1.75
          endif
        enddo
        cond=2
        do l=1, 4693
          if(AA(l,4) .eq. 20.43)then
            if(AA(l,2) .gt. DD(1,5)-lsx)then
              if(AA(l,2) .lt. DD(1,5)+lix)then
                if(AA(l,3) .gt. DD(1,3)-lsx)then
                  if(AA(l,3) .lt. DD(1,3)+lix)then
                    DD(1,2)=DD(1,5)
                    cond=1
                  endif
                endif
              endif
            endif
          endif
        enddo
        if(cond .eq. 1) then
          do l=1, 4693
            if(AA(l,4) .eq. 20.43)then
              if(AA(l,2) .gt. DD(1,2)-lsx)then
                if(AA(l,2) .lt. DD(1,2)+lix)then
                  if(AA(l,3) .gt. DD(1,3)-lsx)then
```

```
        if(AA(l,3) .lt. DD(1,3)+lix)then
            NN(i,1)=AA(l,1)
            NP(count5-1,1)=NN(i,1)
        endif
    endif
endif
endif
endif
enddo
do l=1, 4693
    if(AA(l,4) .eq. 20.43)then
        if(AA(l,2) .gt. DD(1,2)-lsx)then
            if(AA(l,2) .lt. DD(1,2)+lix)then
                if(AA(l,3) .gt. DD(1,3)-lsy)then
                    if(AA(l,3) .lt. DD(1,3)-liy)then
                        NN(i,2)=AA(l,1)
                        NP(count5-1,2)=NN(i,2)
                    endif
                endif
            endif
        endif
    endif
endif
endif
endif
enddo
endif
endif
if (k .gt. 1) then
    DD(1,5)=DD(1,2)+NV(jaq,k+1)*1.75
    do l=1, 4693
        if(AA(l,4) .eq. 20.43)then
            if(AA(l,2) .gt. DD(1,5)-lsx)then
                if(AA(l,2) .lt. DD(1,5)+lix)then
                    if(AA(l,3) .gt. DD(1,3)-lsx)then
                        if(AA(l,3) .lt. DD(1,3)+lix)then
                            NP(count5,1)=AA(l,1)
                        endif
                    endif
                endif
            if(AA(l,3) .gt. DD(1,3)-lsy)then
                if(AA(l,3) .lt. DD(1,3)-liy)then
                    NP(count5,2)=AA(l,1)
                endif
            endif
        endif
    endif
endif
endif
endif
enddo
endif
```

```
    enddo
  endif
  if (v2(fab) .eq. count6)then
    cond4(fab)=cond5
    count6=0
    fab=fab+1
  endif
enddo
enddo
do i=1, count5
  write(*,*)NP(i,1:2)
enddo
do i=1, count4
  if(i .gt. v2(1))then
    if(i .lt. v2(1)+v2(2)+v2(3)+1)Then
      if(cond3(i,1) .gt. 3)then
        jaq1=0
        jaq2=0
        do j=1, i
          jaq1=jaq1+cond3(j,2)
        enddo
        do j=1, i-1
          jaq2=jaq2+cond3(j,2)
        enddo
        jaq2=jaq2+1
        nofa=NP(jaq1,1)
        nofb=NP(jaq1,2)
        nofat=NP(jaq2,1)
        nofbt=NP(jaq2,2)
        write(*,*)'CAMBIOS POR VEHICULOS PESADOS'
        do j=1, 4693
          if(nofa .eq. AA(j,1))then
            DD(1,1:4)=AA(j,1:4)
          endif
          if(nofb .eq. AA(j,1))then
            DD(2,1:4)=AA(j,1:4)
          endif
          if(nofat .eq. AA(j,1))then
            DD(3,1:4)=AA(j,1:4)
          endif
          if(nofbt .eq. AA(j,1))then
            DD(4,1:4)=AA(j,1:4)
          endif
        enddo
        Do j=1, 2
          DD(j,2)=DD(j,2)+3.50
        do l=1, 4693
```

```
        if(AA(l,4) .eq. 20.43)then
          if(AA(l,2) .gt. DD(j,2)-lsx)then
            if(AA(l,2) .lt. DD(j,2)+lix)then
              if(AA(l,3) .gt. DD(j,3)-lsx)then
                if(AA(l,3) .lt. DD(j,3)+lix)then
                  NP(jaq2,j)=AA(l,1)
                endif
              endif
            endif
          endif
        endif
      enddo
    enddo
    orden=jaq1-jaq2+1
    Do j=1, orden
      do l=1, 2
        vtem(j,l)=NP(jaq2+j-1,l)
      enddo
    enddo
    Do j=1, orden-1
      NP(jaq2+j-1,1:2)=vtem(j+1,1:2)
    enddo
    NP(jaq1,1:2)=vtem(1,1:2)
  endif
endif
endif
enddo
jaq1=0
jaq2=0
pau=0
jaq3=0
jaq4=0
Do i=1, 4
  Do j=1, v2(i)
    pau=pau+1
    jaq4=jaq4+cond3(pau-1,2)
    jaq3=jaq4+1-cond3(pau-1,2)
    if(j .gt. 1)then
      do k=1, v2(i)
        pau2=0
        do l=1, pau-1+k-j
          pau2=pau2+cond3(l,2)
        enddo
        jaq2=cond3(k+pau-j,2)+pau2
        jaq1=pau2+1
      enddo
    endif
  enddo
enddo
```



```
    write(*,*)NP(i,1:2)
  enddo
  jaq1=0
  jaq2=0
  do i=1, count5
    do j=1, 2
      jaq1=jaq1+1
      NT(jaq1)=NP(i,j)
      write(*,*)NT(jaq1)
    enddo
  enddo
  jaq1=0
  ZZ5=2*N+1001
  do i=1, count4
    if(i .lt. v2(1)+1)then
      if(cond3(i,1) .eq. 1)then
        Do j=1, 4
          jaq2=jaq2+1
          NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
          NOFO(jaq2,2:8)=0
          NOFO(jaq2,4)=(3000*9.81)/4.0
        enddo
      endif
      if(cond3(i,1) .eq. 2)then
        Do j=1, 4
          jaq2=jaq2+1
          NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
          NOFO(jaq2,2:8)=0
          NOFO(jaq2,4)=(17500*9.81)/4.0
        enddo
      endif
      if(cond3(i,1) .eq. 3)then
        Do j=1, 4
          jaq2=jaq2+1
          NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
          NOFO(jaq2,2:8)=0
          NOFO(jaq2,4)=(26000*9.81)/4.0
        enddo
      endif
      if(cond3(i,1) .eq. 4)then
        fa6=ran(zz5)
        Pef=fa6*1
        if(pef .lt. 0.3800)then
          Do j=1, 4
            jaq2=jaq2+1
            NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
          enddo
        endif
      endif
    endif
  enddo
```

```
    NOFO(jaq2,2:8)=0
    NOFO(jaq2,4)=(4000*9.81)/4.0
  enddo
endif
if(pef .gt. 0.3799)then
  fa6=ran(zz5)
  pef1=fa6*1
  Do j=1, 4
    jaq2=jaq2+1
    NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
    NOFO(jaq2,2:8)=0
    xva=(3650.5/((1/pef1)-1)**(1/2.4777))+4957.6
    NOFO(jaq2,4)=xva*9.81/4.0
  enddo
endif
endif
if(cond3(i,1) .eq. 5)then
  fa6=ran(zz5)
  Pef=fa6*1
  if(pef .lt. 0.2254)then
    Do j=1, 4
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      NOFO(jaq2,4)=(8000*9.81)/4.0
    enddo
  endif
  if(pef .gt. 0.2253)then
    fa6=ran(zz5)
    pef1=fa6*1
    Do j=1, 4
      write(*,*)pef1
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      xva=14812*(log(1/(1-pef1)))**(1/3.1273)+5974.9
      NOFO(jaq2,4)=xva*9.81/4.0
    enddo
  endif
endif
if(cond3(i,1) .eq. 6)then
  fa6=ran(zz5)
  Pef=fa6*1
  if(pef .lt. 0.2068)then
    Do j=1, 6
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
```

```
NOFO(jaq2,2:8)=0
NOFO(jaq2,4)=(20000*9.81)*0.05
if(j .gt. 2)then
  NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
  NOFO(jaq2,2:8)=0
  NOFO(jaq2,4)=(20000*9.81)*0.225
endif
enddo
endif
if(pef .gt. 0.2067)then
  fa6=ran(zz5)
  pef1=fa6*1
  Do j=1, 6
    jaq2=jaq2+1
    NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
    NOFO(jaq2,2:8)=0
    xva=24750*(log(1/(1-pef1)))**(1/2.738)+17768
    NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.05
    if(j .gt. 2)then
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      xva=24750*(log(1/(1-pef1)))**(1/2.738)+17768
      NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.225
    endif
  enddo
endif
endif
if(cond3(i,1) .eq. 7)then
  fa6=ran(zz5)
  Pef=fa6*1
  if(pef .lt. 0.3630)then
    Do j=1, 6
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      NOFO(jaq2,4)=(26000*9.81)*0.05
      if(j .gt. 2)then
        NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
        NOFO(jaq2,2:8)=0
        NOFO(jaq2,4)=(26000*9.81)*0.225
      endif
    enddo
  endif
endif
if(pef .gt. 0.3629)then
  fa6=ran(zz5)
  pef1=fa6*1
```

```
Do j=1, 6
  jaq2=jaq2+1
  NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
  NOFO(jaq2,2:8)=0
  cat1=2*pef1-1
  cat2=0.5*log((1+cat1)/(1-cat1))
  xva=50416+2*5808*cat2
  NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.05
  if(j .gt. 2)then
    NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
    NOFO(jaq2,2:8)=0
    cat1=2*pef1-1
    cat2=0.5*log((1+cat1)/(1-cat1))
    xva=50416+2*5808*cat2
    NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.225
  endif
enddo
endif
endif
if(cond3(i,1) .eq. 8)then
  fa6=ran(zz5)
  Pef=fa6*1
  if(pef .lt. 0.3969)then
    Do j=1, 10
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      NOFO(jaq2,4)=(41000*9.81)*0.05
      if(j .gt. 2)then
        NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
        NOFO(jaq2,2:8)=0
        NOFO(jaq2,4)=(41000*9.81)*0.1125
      endif
    enddo
  endif
  if(pef .gt. 0.3968)then
    if(pef .lt. 0.8413)then
      fa6=ran(zz5)
      pef1=fa6*1
      Do j=1, 10
        jaq2=jaq2+1
        NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
        NOFO(jaq2,2:8)=0
        xva=-263.87*pef1**6+816.36*pef1**5-978.39*pef1**4
        +543.51*pef1**3-127.52*pef1**2+43.128*pef1+41.616
        NOFO(jaq2,4)=(xva*9810)*0.05
        if(j .gt. 2)then
```

```
NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
NOFO(jaq2,2:8)=0
xva=-263.87*pef1**6+816.36*pef1**5-978.39*pef1**4
&   +543.51*pef1**3-127.52*pef1**2+43.128*pef1+41.616
NOFO(jaq2,4)=(xva*9810)*0.1125
endif
enddo
endif
endif
if(pef .gt. 0.8412)then
if(pef .lt. 0.9372)then
fa6=ran(zz5)
pef1=fa6*1
Do j=1, 10
jaq2=jaq2+1
NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
NOFO(jaq2,2:8)=0
xva=17266*log(1/(1-pef1))**(1/11.016)+71783
NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.05
if(j .gt. 2)then
NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
NOFO(jaq2,2:8)=0
xva=17266*log(1/(1-pef1))**(1/11.016)+71783
NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.1125
endif
enddo
endif
endif
if(pef .gt. 0.9371)then
if(pef .lt. 1.0000)then
fa6=ran(zz5)
pef1=fa6*1
Do j=1, 10
jaq2=jaq2+1
NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
NOFO(jaq2,2:8)=0
xva=95851-1086*(log((-1)*log(pef1)))
NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.05
if(j .gt. 2)then
NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
NOFO(jaq2,2:8)=0
xva=95851-1086*(log((-1)*log(pef1)))
NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.1125
endif
enddo
endif
endif
```

```
        endif
      endif
    endif
    if(i .gt. v2(1))then
      if(i .lt. v2(1)+v2(2)+v2(3)+1)then
        if(cond3(i,1) .eq. 1)then
          Do j=1, 4
            jaq2=jaq2+1
            NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
            NOFO(jaq2,2:8)=0
            NOFO(jaq2,4)=(3000*9.81)/4.0
          enddo
        endif
        if(cond3(i,1) .eq. 2)then
          Do j=1, 4
            jaq2=jaq2+1
            NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
            NOFO(jaq2,2:8)=0
            NOFO(jaq2,4)=(17500*9.81)/4.0
          enddo
        endif
        if(cond3(i,1) .eq. 3)then
          Do j=1, 4
            jaq2=jaq2+1
            NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
            NOFO(jaq2,2:8)=0
            NOFO(jaq2,4)=(26000*9.81)/4.0
          enddo
        endif
        if(cond3(i,1) .eq. 4)then
          fa6=ran(zz5)
          Pef=fa6*1
          if(pef .lt. 0.4895)then
            Do j=1, 4
              jaq2=jaq2+1
              NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
              NOFO(jaq2,2:8)=0
              NOFO(jaq2,4)=(4000*9.81)/4.0
            enddo
          endif
          if(pef .gt. 0.4894)then
            fa6=ran(zz5)
            pef1=fa6*1
            Do j=1, 4
              jaq2=jaq2+1
              NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
              NOFO(jaq2,2:8)=0
            enddo
          endif
        endif
      endif
    endif
  endif
end
```

```
        xva=(2191.9/((1/pef1)-1)**(1/2.1005))+5845.8
        NOFO(jaq2,4)=xva*9.81/4.0
    enddo
endif
endif
if(cond3(i,1) .eq. 5)then
    fa6=ran(zz5)
    Pef=fa6*1
    if(pef .lt. 0.5699)then
        Do j=1, 4
            jaq2=jaq2+1
            NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
            NOFO(jaq2,2:8)=0
            NOFO(jaq2,4)=(8000*9.81)/4.0
        enddo
    endif
    if(pef .gt. 0.5698)then
        fa6=ran(zz5)
        pef1=fa6*1
        Do j=1, 4
            write(*,*)pef1
            jaq2=jaq2+1
            NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
            NOFO(jaq2,2:8)=0
            xva=10266.46*(log(1/(1-pef1)))** (1/1.6213)+9045.2
            NOFO(jaq2,4)=xva*9.81/4.0
        enddo
    endif
endif
if(cond3(i,1) .eq. 6)then
    fa6=ran(zz5)
    Pef=fa6*1
    if(pef .lt. 0.3857)then
        Do j=1, 6
            jaq2=jaq2+1
            NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
            NOFO(jaq2,2:8)=0
            NOFO(jaq2,4)=(20000*9.81)*0.05
            if(j .gt. 2)then
                NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
                NOFO(jaq2,2:8)=0
                NOFO(jaq2,4)=(20000*9.81)*0.225
            endif
        enddo
    endif
    if(pef .gt. 0.3856)then
```

```
fa6=ran(zz5)
pef1=fa6*1
Do j=1, 6
  jaq2=jaq2+1
  NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
  NOFO(jaq2,2:8)=0
  xva=43741*(log(1/(1-pef1)))**(1/5.3257)+883.81
  NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.05
  if(j .gt. 2)then
    NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
    NOFO(jaq2,2:8)=0
    xva=43741*(log(1/(1-pef1)))**(1/5.3257)+883.81
    NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.225
  endif
enddo
endif
endif
if(cond3(i,1) .eq. 7)then
  fa6=ran(zz5)
  Pef=fa6*1
  if(pef .lt. 0.1536)then
    Do j=1, 6
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      NOFO(jaq2,4)=(26000*9.81)*0.05
      if(j .gt. 2)then
        NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
        NOFO(jaq2,2:8)=0
        NOFO(jaq2,4)=(26000*9.81)*0.225
      endif
    enddo
  endif
endif
if(pef .gt. 0.1535)then
  fa6=ran(zz5)
  pef1=fa6*1
  Do j=1, 6
    jaq2=jaq2+1
    NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
    NOFO(jaq2,2:8)=0
    cat1=2*pef1-1
    cat2=0.5*log((1+cat1)/(1-cat1))
    xva=54795.6+2*4507.2*cat2
    NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.05
    if(j .gt. 2)then
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
    endif
  enddo
endif
```

```
        cat1=2*pef1-1
        cat2=0.5*log((1+cat1)/(1-cat1))
        xva=54795.6+2*4507.2*cat2
        NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.225
    endif
enddo
endif
endif
if(cond3(i,1) .eq. 8)then
    fa6=ran(zz5)
    Pef=fa6*1
    if(pef .lt. 0.4677)then
        Do j=1, 10
            jaq2=jaq2+1
            NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
            NOFO(jaq2,2:8)=0
            NOFO(jaq2,4)=(41000*9.81)*0.05
            if(j .gt. 2)then
                NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
                NOFO(jaq2,2:8)=0
                NOFO(jaq2,4)=(41000*9.81)*0.1125
            endif
        enddo
    endif
    if(pef .gt. 0.4676)then
        if(pef .lt. 0.8374)then
            fa6=ran(zz5)
            pef1=fa6*1
            Do j=1, 10
                jaq2=jaq2+1
                NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
                NOFO(jaq2,2:8)=0
                xva=-328.09*pef1**6+1018.7*pef1**5-1222.6*pef1**4
                & +698.48*pef1**3-200.64*pef1**2+67.088*pef1+41.801
                NOFO(jaq2,4)=(xva*9810)*0.05
                if(j .gt. 2)then
                    NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
                    NOFO(jaq2,2:8)=0
                    xva=-328.09*pef1**6+1018.7*pef1**5-1222.6*pef1**4
                    & +698.48*pef1**3-200.64*pef1**2+67.088*pef1+41.801
                    NOFO(jaq2,4)=(xva*9810)*0.1125
                endif
            enddo
        endif
    endif
    if(pef .gt. 0.8373)then
```

```
if(pef .lt. 0.9362)then
  fa6=ran(zz5)
  pef1=fa6*1
  Do j=1, 10
    jaq2=jaq2+1
    NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
    NOFO(jaq2,2:8)=0
    xva=20985*log(1/(1-pef1))**(1/12.357)+68124
    NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.05
    if(j .gt. 2)then
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      xva=20985*log(1/(1-pef1))**(1/12.357)+68124
      NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.1125
    endif
  enddo
endif
endif
if(pef .gt. 0.9361)then
  if(pef .lt. 1.0000)then
    fa6=ran(zz5)
    pef1=fa6*1
    Do j=1, 10
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      xva=95991-1409.6*(log((-1)*log(pef1)))
      NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.05
      if(j .gt. 2)then
        NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
        NOFO(jaq2,2:8)=0
        xva=95991-1409.6*(log((-1)*log(pef1)))
        NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.1125
      endif
    enddo
  endif
endif
endif
endif
if(i .gt. v2(1)+V2(2)+V2(3))then
  if(cond3(i,1) .eq. 1)then
    Do j=1, 4
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      NOFO(jaq2,4)=(3000*9.81)/4.0
    enddo
  endif
endif
```

```
    enddo
  endif
  if(cond3(i,1) .eq. 2)then
    Do j=1, 4
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      NOFO(jaq2,4)=(17500*9.81)/4.0
    enddo
  endif
  if(cond3(i,1) .eq. 3)then
    Do j=1, 4
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      NOFO(jaq2,4)=(26000*9.81)/4.0
    enddo
  endif
  if(cond3(i,1) .eq. 4)then
    fa6=ran(zz5)
    Pef=fa6*1
    if(pef .lt. 0.3800)then
      Do j=1, 4
        jaq2=jaq2+1
        NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
        NOFO(jaq2,2:8)=0
        NOFO(jaq2,4)=(4000*9.81)/4.0
      enddo
    endif
    if(pef .gt. 0.3799)then
      fa6=ran(zz5)
      pef1=fa6*1
      Do j=1, 4
        jaq2=jaq2+1
        NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
        NOFO(jaq2,2:8)=0
        xva=(3650.5/((1/pef1)-1)**(1/2.4777))+4957.6
        NOFO(jaq2,4)=xva*9.81/4.0
      enddo
    endif
  endif
  if(cond3(i,1) .eq. 5)then
    fa6=ran(zz5)
    Pef=fa6*1
    if(pef .lt. 0.2254)then
      Do j=1, 4
```

```
    jaq2=jaq2+1
    NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
    NOFO(jaq2,2:8)=0
    NOFO(jaq2,4)=(8000*9.81)/4.0
  enddo
endif
if(pef .gt. 0.2253)then
  fa6=ran(zz5)
  pef1=fa6*1
  Do j=1, 4
    write(*,*)pef1
    jaq2=jaq2+1
    NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
    NOFO(jaq2,2:8)=0
    xva=14812*(log(1/(1-pef1)))**(1/3.1273)+5974.9
    NOFO(jaq2,4)=xva*9.81/4.0
  enddo
endif
endif
if(cond3(i,1) .eq. 6)then
  fa6=ran(zz5)
  Pef=fa6*1
  if(pef .lt. 0.2068)then
    Do j=1, 6
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      NOFO(jaq2,4)=(20000*9.81)*0.05
      if(j .gt. 2)then
        NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
        NOFO(jaq2,2:8)=0
        NOFO(jaq2,4)=(20000*9.81)*0.225
      endif
    enddo
  endif
endif
if(pef .gt. 0.2067)then
  fa6=ran(zz5)
  pef1=fa6*1
  Do j=1, 6
    jaq2=jaq2+1
    NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
    NOFO(jaq2,2:8)=0
    xva=24750*(log(1/(1-pef1)))**(1/2.738)+17768
    NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.05
    if(j .gt. 2)then
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
    endif
  enddo
endif
```

```
        xva=24750*(log(1/(1-pef1)))**(1/2.738)+17768
        NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.225
    endif
enddo
endif
endif
if(cond3(i,1) .eq. 7)then
    fa6=ran(zz5)
    Pef=fa6*1
    if(pef .lt. 0.3630)then
        Do j=1, 6
            jaq2=jaq2+1
            NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
            NOFO(jaq2,2:8)=0
            NOFO(jaq2,4)=(26000*9.81)*0.05
            if(j .gt. 2)then
                NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
                NOFO(jaq2,2:8)=0
                NOFO(jaq2,4)=(26000*9.81)*0.225
            endif
        enddo
    endif
    if(pef .gt. 0.3629)then
        fa6=ran(zz5)
        pef1=fa6*1
        Do j=1, 6
            jaq2=jaq2+1
            NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
            NOFO(jaq2,2:8)=0
            cat1=2*pef1-1
            cat2=0.5*log((1+cat1)/(1-cat1))
            xva=50416+2*5808*cat2
            NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.05
            if(j .gt. 2)then
                NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
                NOFO(jaq2,2:8)=0
                cat1=2*pef1-1
                cat2=0.5*log((1+cat1)/(1-cat1))
                xva=50416+2*5808*cat2
                NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.225
            endif
        enddo
    endif
endif
endif
if(cond3(i,1) .eq. 8)then
    fa6=ran(zz5)
```

```
Pef=fa6*1
if(pef .lt. 0.3969)then
  Do j=1, 10
    jaq2=jaq2+1
    NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
    NOFO(jaq2,2:8)=0
    NOFO(jaq2,4)=(41000*9.81)*0.05
    if(j .gt. 2)then
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      NOFO(jaq2,4)=(41000*9.81)*0.1125
    endif
  enddo
endif
if(pef .gt. 0.3968)then
  if(pef .lt. 0.8413)then
    fa6=ran(zz5)
    pef1=fa6*1
    Do j=1, 10
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      xva=-263.87*pef1**6+816.36*pef1**5-978.39*pef1**4
      & +543.51*pef1**3-127.52*pef1**2+43.128*pef1+41.616
      NOFO(jaq2,4)=(xva*9810)*0.05
      if(j .gt. 2)then
        NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
        NOFO(jaq2,2:8)=0
        xva=-263.87*pef1**6+816.36*pef1**5-978.39*pef1**4
        & +543.51*pef1**3-127.52*pef1**2+43.128*pef1+41.616
        NOFO(jaq2,4)=(xva*9810)*0.1125
      endif
    enddo
  endif
endif
if(pef .gt. 0.8412)then
  if(pef .lt. 0.9372)then
    fa6=ran(zz5)
    pef1=fa6*1
    Do j=1, 10
      jaq2=jaq2+1
      NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
      NOFO(jaq2,2:8)=0
      xva=17266*log(1/(1-pef1))**(1/11.016)+71783
      NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.05
      if(j .gt. 2)then
        NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
```

```
NOFO(jaq2,2:8)=0
xva=17266*log(1/(1-pef1))**(1/11.016)+71783
NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.1125
endif
enddo
endif
endif
if(pef .gt. 0.9371)then
if(pef .lt. 1.0000)then
fa6=ran(zz5)
pef1=fa6*1
Do j=1, 10
jaq2=jaq2+1
NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
NOFO(jaq2,2:8)=0
xva=95851-1086*(log((-1)*log(pef1)))
NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.05
if(j .gt. 2)then
NOFO(jaq2,1)=NT(jaq2)
NOFO(jaq2,2:8)=0
xva=95851-1086*(log((-1)*log(pef1)))
NOFO(jaq2,4)=(xva*9.81)*0.1125
endif
enddo
endif
endif
endif
endif
enddo
idati=41
open(unit=idati, file='vientoca.dat')
rewind(idati)
do i=1, 112
read(idati,*)QQ(i)
enddo
RR(1)=0.044177
RR(2)=0.048863
RR(3)=0.062695
RR(4)=0.076719
RR(5)=0.105478
RR(6)=0.123140
RR(7)=0.139930
RR(8)=0.156850
RR(9)=0.173883
RR(10)=0.19288
RR(11)=0.21333
```

```
RR(12)=0.23094
RR(13)=0.24859
RR(14)=0.28966
jaq=0
fa6=ran(z)
xva=9.3758*((-1)*log((-1)*log(fa6)))+17.9343
write(*,*)xva,fa6
Fvi=0.2369*xva**2*1.75*1.2/2
write(*,*)'velocidad de l viento ',xva
do j=1, 4693
  if(AA(j,4) .eq. 20.43)then
    if(AA(j,3) .gt. 23.00)then
      if(AA(j,3) .lt. 23.2)then
        jaq=jaq+1
        NOFO(jaq2+jaq,1)=AA(j,1)
        NOFO(jaq2+jaq,2:8)=0
        NOFO(jaq2+jaq,3)=Fvi
        VV(jaq2+jaq)=AA(j,1)
      endif
    endif
  endif
enddo
do i=1, 8
  do j=1, 14
    NOFO(jaq2+jaq+j+(i-1)*14,1)=QQ(j+(i-1)*14)
    NOFO(jaq2+jaq+j+(i-1)*14,2:8)=0
    NOFO(jaq2+jaq+j+(i-1)*14,3)=xva**2*RR(j)
    VV(jaq2+jaq+j+(i-1)*14)=QQ(j+(i-1)*14)
  enddo
enddo
do i=1,jaq2
  NOFO(i,4)=NOFO(i,4)*(-1.5)
  VV(i)=NOFO(i,1)
enddo
idata=23
open(unit=idatb, file='Header.dat')
rewind(idatb)
idatc=24
open(unit=idatc, file='mat.dat')
rewind(idatc)
idatd=25
open(unit=idatd, file='bcs.dat')
rewind(idatd)
idate=26
open(unit=idate, file='cablesm.dat')
rewind(idate)
idatf=27
```

```
open(unit=idatf, file='matpro.dat')
rewind(idatf)
do i=1, 8224
  read(idatb,*)GG(i,1:5)
enddo
do i=1, 380
  read(idatc,*)HH(i,1:3)
enddo
do i=1, 46
  read(idatd,*)II(i,1:7)
enddo
do i=1, 112
  read(idate,*)JJ(i,1:8)
enddo
do i=1,112
  VV1(i)=JJ(i,1)
enddo
do i=1, 27
  read(idatf,*)KK(i,1:9)
enddo
write(iout,*)1
write(iout,*)33
write(iout,*)0,0,0,0
write(iout,*)'end'
write(iout,*)8224
do i=1, 8224
  write(iout,*)GG(i,1:5)
enddo
write(iout,*)'end'
write(iout,*)380
do i=1, 380
  write(iout,*)HH(i,1:3)
enddo
write(iout,*)'end'
write(iout,*)4693
do i=1,4693
  write(iout,81)i,AA(i,2:4)
enddo
write(iout,*)'end'
write(iout,*)46
do i=1, 46
  write(iout,82)II(i,1:7)
enddo
write(iout,*)'end'
jaq5=jaq+jaq2+112+112
write(iout,*)jaq5
```

```
do i=1, 112
  write(iout,81)vv1(i),JJ(i,2:8)
enddo
do i=1, jaq+jaq2+112
  write(iout,81)VV(i),NOFO(i,2:8)
enddo
write(iout,*)'end'
write(iout,*)27
do i=1, 27
  write(iout,81)i,kk(i,2:9)
enddo
write(iout,*)'end'
write(iout,*)4
write(iout,*)2110,0.0,0.0,0.0
write(iout,*)2120,0.0,0.0,-9.81
write(iout,*)2210,0.0,0.0,0.0
write(iout,*)2212,0.0,0.0,0.0
write(iout,*)'end'
write(iout,*)1
write(iout,*)1
write(iout,*)4248
write(iout,*)'end'
81  format(1x,40(g12.6,1x))
82  format(1x,40(2l8,1x))
close(unit=iout)
iout=31
open(unit=iout, file='qedmon.sdf')
rewind(iout)
gamma = SYSTEMQQ('c:\bin\stadyndyn<est.1')
idatg=28
open(unit=idatg, file='cables.dat')
rewind(idatg)
idath=29
open(unit=idath, file='stadyndyn.out')
rewind(idath)
do i=1, 112
  read(idatg,*)VC(i)
enddo
do j=1,4700
  read(idath,*)ab
enddo
do j=1,2064
  read(idath,*,IOSTAT=iostat)ndummy,node(j*2-1),ST(j*2-1,1:3)
  read(idath,*,IOSTAT=iostat)node(j*2),ST(j*2,1:3)
enddo
do i=1, 112
  do j=1, 4128
```

```
        if (Vc(i) .eq. node(j))then
          if(ST(j,1) .gt. 0)then
            tension(i,1)=i
            tension(i,2:4)=ST(j,1:3)
          endif
        endif
      enddo
    enddo
  do i=1, 112
    write(*,*)tension(i,1:4)
  enddo
84  format(1x,42(g12.6,1x))
  do j=1,8
    do i=1,14
      sal(j,1+3*(i-1):3*i)=tension(i+14*(j-1),2:4)
    enddo
  enddo
  write(ioutc,84)sal(1,1:42)
  write(ioutd,84)sal(2,1:42)
  write(ioute,84)sal(3,1:42)
  write(ioutf,84)sal(4,1:42)
  write(ioutg,84)sal(5,1:42)
  write(iouth,84)sal(6,1:42)
  write(iouti,84)sal(7,1:42)
  write(ioutj,84)sal(8,1:42)
  enddo
  do i=1, empalme
    write(*,*)ff(i,1:4),ciclo(i)
  enddo
  do i=1, 8
    nvep(i)=0
  enddo
  do i=1, n
    do j=1,8
      if(nvev(i) .eq. j-1)then
        nvep(j)=nvep(j)+1
      endif
    enddo
  enddo
  do i=1, 8
    nvep(i)=(nvep(i)/n)*100
    write(*,*)nvep(i)
  enddo
end
```

Anexo III Ecuaciones de las distribuciones estadísticas de los 112 tirantes con diferentes perspectivas de crecimiento de tráfico

Tabla AIII.1 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 9500 vehículos

Cable	Semi arpa 1			Semi arpa 2			Semi arpa 3			Semi arpa 4		
	k	σ	μ									
1	-0.003	1.8209	212.34	-0.014	1.9982	195.25	-0.014	1.9967	191.12	0.0095	1.8072	199.55
2	0.0209	0.9326	116.95	0.0209	0.8764	119.43	0.0267	0.9189	129.27	0.0384	0.8571	123.74
3	0.0499	0.8096	148.84	0.0672	0.8486	174.06	0.0714	0.8078	167.09	0.0807	0.8146	154.41
4	0.0894	0.611	152.67	0.1021	0.7324	192.11	0.1078	0.7276	157.69	0.1268	0.6012	148.31
5	0.1644	0.4498	179.14	0.13	0.8012	191.56	0.1325	0.7116	172.73	0.1806	0.5558	161.81
6	0.2748	0.3408	182.94	0.1592	0.6421	196.27	0.1496	0.6668	184.87	0.1818	0.499	189.08
7	0.2635	0.3702	194.56	0.1868	0.585	218.42	0.1804	0.6019	212.53	0.1473	0.5447	205.65
8	0.1679	0.5755	225.72	0.2311	0.5225	227.21	0.2467	0.52	221.86	0.1251	0.6777	239.67
9	0.0236	1.1087	234.44	0.3441	0.4014	242.46	0.3301	0.4061	247.86	0.0108	1.1807	257.85
10	-0.028	1.5551	252.04	0.3538	0.3781	254.22	0.3682	0.3559	279.44	-0.037	1.635	276.01
11	-0.039	1.6805	259.71	0.3009	0.4697	266.82	0.2691	0.4544	294.35	-0.049	1.7766	274.81
12	-0.034	1.6226	260.49	0.2249	0.5859	269.1	0.214	0.5737	293.77	-0.044	1.6567	279.82
13	-0.022	1.4155	227.16	0.1442	0.7461	255.67	0.1567	0.7082	281.59	-0.03	1.4926	259.54
14	-0.009	1.4836	267.39	0.0424	1.0823	211.46	0.0633	1.0976	234.89	-0.018	1.4653	256.53

Tabla AIII.1 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 9500 vehículos. (Continuación)

Cable	Semi arpa 5			Semi arpa 6			Semi arpa 7			Semi arpa 8		
	k	σ	μ									
1	0.0072	1.9056	220.53	-0.023	1.918	178.06	-0.016	2.1028	225.37	-0.004	1.7725	197.25
2	0.0345	1.0025	113.54	0.0245	0.7975	120.1	0.0198	0.9177	101.2	0.0236	0.9126	119.31
3	0.0766	0.8444	146.39	0.0656	0.8221	190.11	0.0679	0.869	166.34	0.0597	0.7871	146.86
4	0.1338	0.618	155.86	0.1024	0.7437	160.92	0.0962	0.7595	174.51	0.0943	0.5978	161.64
5	0.2157	0.4893	160.58	0.1282	0.8344	172.33	0.1281	0.8325	190.27	0.1804	0.4389	171.18
6	0.2182	0.5047	189.07	0.1501	0.686	180.83	0.1554	0.6723	192.1	0.2763	0.3546	176.91
7	0.1961	0.5365	208.77	0.1831	0.6186	184.98	0.1885	0.6071	206.13	0.2869	0.3894	200.05
8	0.1366	0.6807	231.86	0.2406	0.5356	236.49	0.234	0.5374	225.68	0.1682	0.6102	224.19
9	0.0146	1.1728	239.71	0.28	0.4479	226.63	0.3397	0.4197	238	0.0378	1.0956	228.31
10	-0.04	1.6464	264.37	0.316	0.4024	273.03	0.3495	0.3951	257.3	-0.023	1.5568	243.93
11	-0.053	1.7916	241.54	0.3237	0.4401	261.03	0.2807	0.501	270.34	-0.038	1.6934	246.07
12	-0.047	1.7276	299.92	0.2432	0.5479	291.11	0.215	0.611	279.34	-0.033	1.635	270.74
13	-0.033	1.4997	255.54	0.1662	0.7066	274.65	0.1436	0.7626	238.66	-0.018	1.4227	212.37
14	-0.019	1.7626	291.36	0.0726	1.2186	277.63	0.0448	1.0944	185.48	-0.004	1.4871	255.07

Tabla AIII.2 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 11580 vehículos

Cable	Semi arpa 1			Semi arpa 2			Semi arpa 3			Semi arpa 4		
	k	σ	μ									
1	0.0165	1.9073	212.37	-7E-04	2.1477	195.26	-0.005	2.1798	191.12	0.0122	2.0282	199.58
2	0.0477	0.9834	116.97	0.0406	0.9668	119.44	0.0412	1.0215	129.28	0.0456	0.9802	123.76
3	0.0912	0.8544	148.86	0.0741	0.9863	174.08	0.0892	0.91	167.1	0.1028	0.9348	154.44
4	0.1351	0.6692	152.7	0.1131	0.8564	192.14	0.1272	0.8212	157.71	0.1723	0.6823	148.34
5	0.1952	0.5378	179.18	0.1534	0.9314	191.59	0.1669	0.7944	172.75	0.2379	0.6298	161.86
6	0.3131	0.4222	182.99	0.1854	0.7512	196.3	0.1931	0.7448	184.9	0.268	0.5466	189.13
7	0.2915	0.4535	194.62	0.2214	0.6819	218.46	0.2238	0.6845	212.57	0.2481	0.5808	205.7
8	0.133	0.7329	225.8	0.2587	0.6167	227.26	0.2859	0.6027	221.9	0.1456	0.7634	239.73
9	0.0259	1.2676	234.5	0.2886	0.545	242.53	0.3784	0.4754	247.91	0.0073	1.3523	257.91
10	-0.024	1.7425	252.08	0.3887	0.4775	254.27	0.4163	0.4313	279.49	-0.043	1.8763	276.05
11	-0.039	1.8874	259.74	0.2894	0.5915	266.89	0.3453	0.5225	294.4	-0.056	2.0412	274.86
12	-0.033	1.8247	260.52	0.2216	0.7107	269.17	0.2773	0.6608	293.81	-0.051	1.9079	279.87
13	-0.018	1.5931	227.2	0.1566	0.8666	255.72	0.1667	0.8308	281.65	-0.038	1.7228	259.58
14	-0.003	1.6712	267.43	0.0784	1.1711	211.48	0.0788	1.2297	234.94	-0.025	1.694	256.59

Tabla AIII.2 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 11580 vehículos (continuación)

Cable	Semi arpa 5			Semi arpa 6			Semi arpa 7			Semi arpa 8		
	k	σ	μ									
1	0.0182	2.1266	220.54	-0.017	2.198	178.02	0.0027	2.2037	225.35	0.0028	2.0346	197.25
2	0.0496	1.1293	113.55	0.0261	0.9563	120.09	0.0379	0.9943	101.2	0.0304	1.0755	119.32
3	0.1005	0.9592	146.41	0.0642	0.989	190.12	0.0714	1.0185	166.35	0.0754	0.924	146.88
4	0.1514	0.7219	155.9	0.1089	0.8676	160.94	0.1121	0.8875	174.53	0.1369	0.6708	161.66
5	0.161	0.6516	160.66	0.1595	0.9297	172.36	0.1543	0.959	190.29	0.2305	0.4938	171.22
6	0.2261	0.5972	189.14	0.2009	0.7459	180.85	0.2001	0.7562	192.13	0.3424	0.4095	176.96
7	0.247	0.6027	208.83	0.2367	0.683	185.01	0.2347	0.6874	206.16	0.3154	0.4603	200.11
8	0.157	0.7621	231.92	0.2832	0.6183	236.53	0.2443	0.6475	225.74	0.1569	0.7323	224.27
9	-0.004	1.377	239.78	0.3604	0.5066	226.66	0.2684	0.5779	238.08	0.0114	1.3095	228.38
10	-0.056	1.9245	264.42	0.4445	0.4369	273.06	0.1122	0.8831	257.45	-0.036	1.7919	243.97
11	-0.068	2.089	241.59	0.3321	0.5422	261.09	-0.302	8.848	270.16	-0.049	1.936	246.1
12	-0.063	2.0175	299.96	0.2659	0.6576	291.17	0.2116	0.7357	279.4	-0.043	1.8707	270.78
13	-0.049	1.7566	255.59	0.1759	0.8299	274.71	0.1551	0.8868	238.71	-0.028	1.6342	212.4
14	-0.036	2.0696	291.42	0.0851	1.3737	277.68	0.0806	1.185	185.51	-0.014	1.7158	255.12

Tabla All.3 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 14116 vehículos

Cable	Semi arpa 1			Semi arpa 2			Semi arpa 3			Semi arpa 4		
	k	σ	μ									
1	0.026	2.1793	212.35	0.0078	2.3924	195.26	0.0102	2.3906	191.11	0.0238	2.233	199.6
2	0.0546	1.1436	116.97	0.0634	1.0583	119.45	0.0576	1.1321	129.29	0.0553	1.0856	123.78
3	0.1008	0.9935	148.87	0.1107	1.0753	174.11	0.1127	1.0098	167.11	0.1159	1.0425	154.48
4	0.1606	0.7594	152.72	0.1596	0.9455	192.17	0.1522	0.9209	157.73	0.1938	0.7709	148.39
5	0.2292	0.6087	179.23	0.1793	1.0643	191.65	0.1761	0.9194	172.8	0.2504	0.74	161.93
6	0.3906	0.4713	183.04	0.198	0.8751	196.36	0.196	0.8724	184.95	0.2949	0.6366	189.2
7	0.3973	0.4925	194.67	0.2372	0.7943	218.53	0.2194	0.8076	212.63	0.2823	0.6703	205.77
8	0.1721	0.8235	225.87	0.3504	0.6823	227.3	0.2603	0.743	221.98	0.164	0.8809	239.81
9	0.0533	1.4046	234.56	0.4263	0.568	242.56	0.3608	0.6063	247.98	0.033	1.4714	257.96
10	-0.021	1.9509	252.16	0.4938	0.5269	254.31	0.485	0.5085	279.54	-0.033	2.0418	276.11
11	-0.037	2.105	259.82	0.3741	0.6556	266.94	0.3918	0.6098	294.46	-0.049	2.2183	274.92
12	-0.031	2.0372	260.6	0.2789	0.7949	269.22	0.2923	0.7814	293.89	-0.043	2.0741	279.93
13	-0.015	1.7842	227.28	0.16	1.0072	255.78	0.1958	0.9447	281.71	-0.027	1.875	259.64
14	0.001	1.8766	267.52	0.0822	1.3438	211.53	0.0932	1.3743	235.02	-0.012	1.8455	256.65

Tabla All.3 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 14116 vehículos (Continuación)

Cable	Semi arpa 5			Semi arpa 6			Semi arpa 7			Semi arpa 8		
	k	σ	μ									
1	0.0179	2.3911	220.58	-0.018	2.417	178.06	0.0017	2.4812	225.4	0.0167	2.1924	197.27
2	0.0545	1.2619	113.58	0.0462	1.0171	120.1	0.0471	1.1329	101.23	0.0491	1.1645	119.33
3	0.109	1.0809	146.45	0.0878	1.0627	190.14	0.09	1.1579	166.39	0.0932	1.0224	146.9
4	0.1873	0.8096	155.94	0.135	0.9603	160.97	0.1267	1.0247	174.58	0.1543	0.7657	161.7
5	0.2611	0.6761	160.69	0.1813	1.0607	172.4	0.1586	1.1358	190.37	0.2649	0.5675	171.27
6	0.2713	0.6814	189.21	0.2181	0.8651	180.9	0.1795	0.9348	192.21	0.3855	0.47	177.02
7	0.2513	0.719	208.91	0.2436	0.8067	185.08	0.2117	0.8629	206.25	0.3234	0.5639	200.19
8	0.1756	0.8857	232	0.2837	0.7464	236.6	0.2625	0.7796	225.81	0.171	0.8601	224.35
9	0.0269	1.4802	239.83	0.3663	0.6265	226.73	0.3852	0.6152	238.12	0.0494	1.4288	228.44
10	-0.044	2.0743	264.48	0.4865	0.5339	273.12	0.4705	0.5526	257.41	-0.025	1.9886	244.05
11	-0.059	2.2516	241.65	0.4113	0.6277	261.15	0.3584	0.6831	270.46	-0.042	2.1496	246.19
12	-0.053	2.1758	300.03	0.2955	0.7685	291.24	0.2428	0.8405	279.47	-0.035	2.079	270.86
13	-0.037	1.8965	255.65	0.2027	0.9433	274.78	0.1629	1.0203	238.78	-0.018	1.8185	212.48
14	-0.021	2.2372	291.5	0.1031	1.5285	277.77	0.084	1.3522	185.56	-0.001	1.9104	255.21

Tabla AIII.4 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 17207 vehículos

Cable	Semi arpa 1			Semi arpa 2			Semi arpa 3			Semi arpa 4		
	k	σ	μ									
1	0.0228	2.4412	212.39	0.007	2.7349	195.27	0.0145	2.6442	191.08	0.0332	2.4265	199.59
2	0.0411	1.3044	117.01	0.0508	1.2539	119.47	0.059	1.2728	129.3	0.0698	1.1766	123.79
3	0.0789	1.154	148.92	0.1217	1.2302	174.12	0.1169	1.1618	167.14	0.1285	1.1541	154.51
4	0.1552	0.8648	152.78	0.1541	1.0985	192.22	0.1753	1.0541	157.76	0.2075	0.8719	148.44
5	0.2813	0.6643	179.29	0.1712	1.2544	191.72	0.2125	1.0452	172.84	0.3062	0.8221	162
6	0.4085	0.56	183.11	0.207	1.0316	196.43	0.2485	0.9906	185	0.3068	0.7427	189.29
7	0.4477	0.5785	194.74	0.2637	0.9369	218.59	0.2983	0.9152	212.68	0.2915	0.7905	205.87
8	0.2576	0.8782	225.94	0.3315	0.85	227.39	0.3214	0.8621	222.05	0.1912	1.0187	239.92
9	0.0576	1.5858	234.68	0.4449	0.7032	242.64	0.3732	0.7604	248.07	0.0583	1.6206	258.07
10	-0.018	2.1766	252.29	0.5011	0.6598	254.4	0.4339	0.6896	279.65	-0.016	2.2177	276.23
11	-0.034	2.3382	259.95	0.401	0.7861	267.04	0.4142	0.7471	294.56	-0.035	2.4044	275.04
12	-0.028	2.2656	260.73	0.2733	0.9656	269.33	0.3195	0.9156	294	-0.028	2.2519	280.05
13	-0.011	1.9919	227.4	0.1958	1.1501	255.87	0.2262	1.0766	281.81	-0.01	2.0417	259.76
14	0.005	2.1032	267.66	0.1071	1.5039	211.62	0.1035	1.5874	235.11	0.007	2.0146	256.76

Tabla AIII.4 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 17207 vehículos (Continuación)

Cable	Semi arpa 5			Semi arpa 6			Semi arpa 7			Semi arpa 8		
	k	σ	μ									
1	0.0299	2.6241	220.6	-0.009	2.6131	178.06	0.0148	2.7107	225.4	0.0265	2.4058	197.3
2	0.0669	1.402	113.61	0.0511	1.139	120.12	0.0748	1.2087	101.24	0.066	1.2694	119.35
3	0.1265	1.2077	146.49	0.1183	1.165	190.17	0.1331	1.2211	166.41	0.115	1.1227	146.92
4	0.2214	0.8981	155.99	0.1562	1.0677	161.02	0.1689	1.0978	174.61	0.1679	0.8702	161.75
5	0.3318	0.738	160.75	0.166	1.248	172.5	0.2031	1.2365	190.41	0.2779	0.6668	171.34
6	0.3209	0.7659	189.3	0.1762	1.0771	181.01	0.2313	1.0207	192.26	0.3746	0.5848	177.11
7	0.3089	0.8045	209	0.2044	1.025	185.19	0.2754	0.9451	206.3	0.4185	0.6232	200.25
8	0.2037	1.0197	232.11	0.2739	0.9274	236.71	0.3697	0.8441	225.86	-0.301	7.0378	224.28
9	0.0563	1.6288	239.93	0.4294	0.7261	226.81	0.4897	0.6914	238.18	0.0689	1.5768	228.56
10	-0.022	2.2537	264.58	0.5101	0.6594	273.21	0.5137	0.663	257.48	-0.018	2.195	244.18
11	-0.041	2.4426	241.75	0.4456	0.7539	261.25	0.4156	0.8012	270.54	-0.037	2.3688	246.32
12	-0.033	2.3622	300.14	0.3436	0.885	291.34	0.3072	0.9551	279.55	-0.03	2.295	270.99
13	-0.014	2.0624	255.75	0.2324	1.0786	274.88	0.1916	1.1696	238.87	-0.012	2.0147	212.61
14	0.0053	2.4364	291.62	0.1132	1.7654	277.88	0.1031	1.5257	185.66	0.0051	2.1241	255.35

Tabla AIII.5 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 20815 vehículos

Cable	Semi arpa 1			Semi arpa 2			Semi arpa 3			Semi arpa 4		
	k	σ	μ									
1	0.0512	2.6346	212.41	0.0281	2.9803	195.32	0.0301	2.931	191.11	0.0499	2.766	199.66
2	0.0902	1.3757	117.01	0.0721	1.396	119.53	0.0828	1.4298	129.32	0.0912	1.3619	123.84
3	0.151	1.2106	148.94	0.1102	1.468	174.23	-0.207	7.9488	166.96	0.1493	1.3653	154.58
4	0.2187	0.9577	152.83	0.1997	1.2549	192.29	0.1772	1.2479	157.84	0.2248	1.0545	148.53
5	0.2911	0.8124	179.39	0.2373	1.3975	191.81	0.2009	1.255	172.94	0.3422	0.988	162.12
6	0.4226	0.6978	183.23	0.2888	1.1367	196.51	0.2339	1.1921	185.11	0.322	0.8949	189.44
7	0.4855	0.7074	194.86	0.3532	1.0428	218.68	0.3299	1.0582	212.78	0.3212	0.9348	206.02
8	0.273	1.0476	226.1	0.4112	0.9721	227.49	0.4313	0.9492	222.12	0.2253	1.1588	240.06
9	0.1099	1.7001	234.81	0.5165	0.8416	242.74	0.5626	0.8035	248.12	0.0606	1.8581	258.2
10	0.0148	2.3233	252.43	0.5464	0.8156	254.51	0.5997	0.7613	279.72	-0.024	2.5464	276.34
11	-0.009	2.5046	260.09	0.4406	0.9554	267.16	0.5007	0.88	294.67	-0.043	2.7564	275.15
12	-6E-04	2.4285	260.87	0.3304	1.117	269.44	0.338	1.103	294.15	-0.036	2.5824	280.17
13	0.0213	2.1342	227.53	0.2191	1.341	255.98	0.2335	1.2868	281.95	-0.016	2.3444	259.87
14	0.0431	2.2522	267.8	0.1043	1.7612	211.73	0.1113	1.8303	235.26	0.0025	2.3169	256.88

Tabla AIII.5 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 20815 vehículos. (Continuación)

Cable	Semi arpa 5			Semi arpa 6			Semi arpa 7			Semi arpa 8		
	k	σ	μ									
1	0.0597	2.8241	220.64	0.0065	2.942	178.06	0.035	3.0234	225.43	0.036	2.7232	197.33
2	0.1092	1.5086	113.65	0.0756	1.2896	120.13	0.0841	1.3993	101.29	0.0678	1.4551	119.39
3	0.1725	1.328	146.55	0.1485	1.3263	190.2	0.1488	1.4289	166.48	0.1224	1.287	146.98
4	0.2458	1.0516	156.08	0.203	1.2124	161.06	0.1709	1.3055	174.71	0.2043	0.9786	161.81
5	0.2879	0.9436	160.9	0.2482	1.3784	172.54	0.1862	1.5036	190.56	0.3354	0.7622	171.43
6	0.3347	0.9258	189.43	0.2826	1.1526	181.05	0.2359	1.2224	192.38	0.4575	0.6848	177.2
7	0.3301	0.959	209.15	0.3394	1.0712	185.23	0.3528	1.0769	206.38	0.4069	0.7841	200.4
8	0.2344	1.1677	232.25	0.4143	0.9934	236.76	0.4216	0.9989	225.96	0.2879	1.0716	224.57
9	0.0619	1.8496	240.07	0.4982	0.8659	226.9	0.5471	0.8462	238.28	0.1124	1.7164	228.69
10	-0.033	2.5751	264.72	0.5586	0.798	273.32	0.5884	0.7982	257.58	0.0149	2.3466	244.31
11	-0.054	2.7884	241.89	0.5423	0.8679	261.35	0.4577	0.9573	270.67	-0.009	2.5309	246.46
12	-0.046	2.7013	300.28	0.3561	1.0615	291.48	0.3376	1.1296	279.68	-7E-04	2.4532	271.13
13	-0.026	2.3641	255.89	0.238	1.2864	275.01	0.2231	1.3526	238.97	0.0226	2.1544	212.73
14	-0.006	2.7986	291.79	0.1185	2.0428	278.04	0.116	1.7591	185.75	0.0456	2.2721	255.48

Tabla AIII.6 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 30812 vehículos

Cable	Semi arpa 1			Semi arpa 2			Semi arpa 3			Semi arpa 4		
	k	σ	μ									
1	0.074	3.2718	212.59	0.0488	3.73	195.47	0.0327	3.7354	191.24	0.0785	3.4302	199.86
2	0.1158	1.7468	117.14	0.1314	1.714	119.62	0.0957	1.8493	129.43	0.1336	1.6946	123.99
3	0.1597	1.6134	149.12	0.2018	1.7856	174.36	0.1895	1.6958	167.32	0.2184	1.7139	154.79
4	0.2015	1.3544	153.09	0.2394	1.6639	192.51	0.258	1.574	158	0.3357	1.356	148.77
5	0.276	1.1747	179.72	0.2514	1.9524	192.14	0.321	1.5759	173.13	0.4024	1.3963	162.51
6	0.4422	1.0276	183.59	0.2844	1.6481	196.84	0.3663	1.5295	185.34	0.3685	1.266	189.85
7	0.491	1.0746	195.26	0.3761	1.515	219.02	0.4118	1.4662	213.07	0.3437	1.3241	206.47
8	0.32	1.4343	226.51	0.5122	1.393	227.81	0.4894	1.4005	222.47	0.2839	1.5539	240.48
9	0.109	2.2639	235.27	0.6295	1.2539	243.07	0.5958	1.2639	248.49	0.0846	2.3559	258.63
10	0.007	3.0082	252.91	0.6535	1.2325	254.86	0.6305	1.2235	280.11	9E-05	3.1027	276.76
11	-0.017	3.2202	260.57	0.5652	1.3659	267.52	0.5492	1.3393	295.08	-0.022	3.333	275.58
12	-0.008	3.1298	261.35	0.4132	1.5516	269.83	0.3609	1.6242	294.61	-0.013	3.1297	280.58
13	0.015	2.7676	227.98	0.2568	1.8075	256.38	0.2445	1.7869	282.39	0.0099	2.8601	260.28
14	0.0385	2.9387	268.31	0.1533	2.238	212.08	0.1537	2.346	235.68	0.0315	2.8458	257.3

Tabla AIII.6 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 30812 vehículos. (Continuación)

Cable	Semi arpa 5			Semi arpa 6			Semi arpa 7			Semi arpa 8		
	k	σ	μ									
1	0.0642	3.6147	220.96	0.0187	3.6225	178.24	0.0664	3.6208	225.56	0.0659	3.2807	197.5
2	0.1197	1.9652	113.87	0.0824	1.6532	120.26	0.1225	1.7154	101.4	0.1056	1.7868	119.5
3	0.214	1.7455	146.79	0.1989	1.6948	190.34	0.1912	1.805	166.66	0.1706	1.6213	147.13
4	0.3296	1.398	156.34	0.2578	1.5844	161.25	0.2387	1.6587	174.91	0.2692	1.2775	162.01
5	0.4413	1.2453	161.18	0.2954	1.8473	172.82	0.2708	1.9141	190.84	0.4218	1.0414	171.68
6	0.4053	1.2822	189.82	0.3235	1.5916	181.34	0.3313	1.5896	192.65	0.5188	0.9972	177.53
7	0.3636	1.3427	209.59	0.3629	1.5435	185.57	0.3941	1.4957	206.72	0.5063	1.0968	200.75
8	0.2878	1.5651	232.68	0.4336	1.4841	237.14	0.5071	1.3982	226.3	0.3066	1.4771	225.01
9	0.0877	2.3474	240.49	0.5587	1.3123	227.27	0.6572	1.2328	238.61	0.1032	2.2829	229.17
10	-0.005	3.1254	265.12	0.6641	1.2164	273.67	0.7034	1.2066	257.92	-0.012	3.084	244.82
11	-0.027	3.359	242.3	0.5098	1.3984	261.81	0.5313	1.405	271.06	-0.035	3.3057	246.96
12	-0.018	3.2599	300.7	0.3794	1.5669	291.92	0.4105	1.566	280.07	-0.027	3.212	271.63
13	0.0058	2.8699	256.28	0.2497	1.7869	275.46	0.2531	1.8255	239.37	-0.005	2.8399	213.21
14	0.0286	3.4195	292.28	0.1527	2.6367	278.53	0.1486	2.2596	186.12	0.018	3.0153	256.02

Tabla AIII.7 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 54563 vehículos

Cable	Semi arpa 1			Semi arpa 2			Semi arpa 3			Semi arpa 4		
	k	σ	μ									
1	0.1057	4.6976	213.31	0.0744	5.2239	196.21	0.0788	5.0641	191.79	0.0991	4.9234	200.69
2	0.1518	2.5717	117.62	0.1635	2.4869	120.11	0.1548	2.5876	129.85	0.1246	2.5762	124.58
3	0.2249	2.4081	149.69	0.216	2.7142	175.07	0.2323	2.5221	167.89	0.1794	2.7754	155.64
4	0.3307	2.0134	153.73	0.2459	2.586	193.31	0.3186	2.4127	158.67	0.2688	2.3439	149.74
5	0.4006	1.8343	180.57	0.2935	3.0161	193.16	0.3688	2.515	173.96	0.4049	2.366	163.73
6	0.3385	1.8488	184.76	0.3882	2.5226	197.73	0.4063	2.5163	186.28	0.2593	2.1553	191.2
7	0.246	2.0012	196.66	0.4681	2.4458	219.97	0.4512	2.4946	214.1	0.1599	2.2723	207.99
8	0.2484	2.3448	227.85	0.5426	2.4425	228.9	0.5002	2.5189	223.63	0.178	2.5557	241.92
9	0.1029	3.2842	236.58	0.6204	2.346	244.22	0.568	2.4151	249.72	0.0705	3.4326	259.92
10	0.0004	4.2027	254.23	0.6176	2.3678	256.08	0.6092	2.3614	281.37	-0.022	4.3825	278.03
11	-0.025	4.4647	261.89	0.5229	2.5239	268.82	0.5391	2.4577	296.4	-0.046	4.6712	276.87
12	-0.016	4.355	262.67	0.4005	2.6547	271.11	0.4316	2.6374	295.89	-0.037	4.4021	281.87
13	0.0077	3.8856	229.23	0.2687	2.8527	257.57	0.2958	2.7461	283.58	-0.014	4.0576	261.53
14	0.0309	4.1641	269.72	0.147	3.3542	213.23	0.1635	3.4865	236.93	0.0084	4.0708	258.6

Tabla AIII.7 Parámetros estadísticos de las tensiones (ton) de cada tirante para representar las distribuciones estadísticas extreme value con un flujo vehicular de 54563 vehículos. (Continuación)

Cable	Semi arpa 5			Semi arpa 6			Semi arpa 7			Semi arpa 8		
	k	σ	μ									
1	0.1279	4.9208	221.68	0.0489	4.8886	178.73	0.0984	5.0981	226.24	0.1	4.58	198.22
2	0.1867	2.7678	114.42	0.1361	2.2837	120.6	0.16	2.5021	101.87	0.1327	2.5745	120
3	0.2689	2.5955	147.5	0.2259	2.5211	190.9	0.2055	2.7617	167.35	0.2008	2.4427	147.74
4	0.35	2.2485	157.2	0.292	2.4492	161.92	0.2499	2.6111	175.7	0.3121	2.0319	162.71
5	0.3761	2.1555	162.31	0.3459	2.9211	173.75	0.3035	3.0251	191.85	0.4359	1.7987	172.58
6	0.2583	2.2117	191.2	0.3963	2.5442	182.24	0.3808	2.5479	193.58	0.3574	1.8618	178.72
7	0.1581	2.3128	211.12	0.455	2.5052	186.54	0.4526	2.4804	207.7	0.2352	2.0593	202.18
8	0.1735	2.5654	234.12	0.5319	2.499	238.21	0.511	2.5008	227.42	0.2264	2.4056	226.38
9	0.0733	3.4065	241.76	0.6058	2.3968	228.42	0.5727	2.4207	239.83	0.0924	3.3081	230.49
10	-0.026	4.3877	266.37	0.6082	2.3924	274.95	0.5915	2.4171	259.2	-0.012	4.2556	246.14
11	-0.05	4.6807	243.58	0.5323	2.4944	263.11	0.5058	2.5628	272.36	-0.038	4.5258	248.27
12	-0.042	4.5609	302	0.4247	2.5746	293.19	0.3904	2.6825	281.36	-0.029	4.4127	272.94
13	-0.018	4.0511	257.51	0.2994	2.7462	276.65	0.2638	2.8717	240.57	-0.005	3.9347	214.45
14	0.005	4.8686	293.82	0.1678	3.9083	279.94	0.1451	3.3705	187.26	0.0184	4.2146	257.43

CIUDAD DE MÉXICO

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671



**INSTITUTO
MEXICANO DE
TRANSPORTE**



www.imt.mx
publicaciones@imt.mx