



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISTRIBUCIÓN ÓPTIMA DE SENSORES PARA DETECCIÓN DE FALLA EN UNA
ESTRUCTURA COMPLEJA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

HERNÁN MATÍAS NILO VÁSQUEZ

PROFESORA GUÍA
VIVIANA MERUANE NARANJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
ALEJANDRO ORTIZ BERNARDÍN
JUAN CRISTOBAL ZAGAL MONTEALEGRE

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por proyecto Fondecyt de iniciación 11110046

SANTIAGO DE CHILE
SEPTIEMBRE 2014

RESUMEN

El daño en una estructura, y la acumulación del mismo, producen cambios en su respuesta dinámica. La idea básica del monitoreo de vibraciones es medir las características dinámicas de la estructura, durante su vida útil, y usarlas como una base para la identificación del daño.

Durante los últimos años, han surgido numerosos métodos para detectar daño en estructuras. Sin embargo, la mayoría de estos métodos no toman en cuenta el efecto de la distribución, ni el número de sensores.

En trabajos anteriores, se han desarrollado sólo métodos para distribuir adecuadamente una cierta cantidad de sensores en estructuras simples (unidimensionales). Debido a lo anterior, en el presente trabajo se propone determinar una distribución óptima de sensores, que permita detectar daño en una estructura compleja (bidimensional o tridimensional). En particular, se determina la distribución óptima de 27 sensores en un perfil canal de acero estructural, con el fin de verificar si esta distribución es mejor que otras, como por ejemplo una distribución uniforme. Para optimizar la distribución de sensores, se utiliza el método de optimización conocido como algoritmos genéticos. Este método se basa en la teoría de la evolución de Darwin, haciendo evolucionar a una población de individuos hasta encontrar al más adaptado.

En este caso, se desarrollan 2 algoritmos genéticos, uno secuencial y otro paralelo. El primero se utiliza para determinar los mejores parámetros de entrada como el tamaño de la población y las probabilidades de reproducción. El segundo, se utiliza para determinar la distribución óptima, ya que posee una mayor rapidez de cálculo y disminuye el problema del estancamiento en óptimos locales.

Para verificar si la distribución óptima de sensores es mejor que otras distribuciones, se crean 4 escenarios de daño experimentales en donde 3 de ellos poseen una cierta dificultad para ser detectados. Luego se compara la detección de daño entre la distribución óptima y las otras distribuciones, para cada uno de los escenarios de daño.

Se logra encontrar una distribución óptima que posee un valor de ajuste superior a las demás distribuciones cuando el daño en la estructura es de carácter moderado, es decir, existen grietas con un largo entre 25 y 50 [mm], y ubicadas en alguno de los bordes de la estructura.

Esta memoria es parte del proyecto Fondecyt de iniciación 11110046 desarrollado por la Dra. en Ingeniería Mecánica Viviana Meruane Naranjo, Profesora Guía de la respectiva memoria.

DEDICATORIA

A mis seres más queridos: mi padre, mi madre y mis hermanos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a mi familia por todo el apoyo brindado durante el transcurso de mi vida, que sin duda alguna ha sido el pilar fundamental para la culminación de esta gran etapa.

Agradezco a mi profesora guía, Dra. Viviana Meruane, por su apoyo y colaboración para el desarrollo de este trabajo, sin su ayuda el camino hubiese sido más difícil.

Agradezco a mis compañeros y amigos Francisco Seguel, Sebastián Tello y Andrés Velasco que formaron parte de esta gran aventura, y sus huellas perdurarán para siempre en mis recuerdos. Por su apoyo y consejos, que hicieron más fácil el desarrollo de este trabajo.

Agradezco a mis amigos Felipe Olate, Camilo Soto y Francisco Valenzuela por su confianza y cariño durante todos estos años.

Hernán

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES.....	3
1.1 Vibraciones mecánicas	3
1.1.1 Frecuencias naturales	3
1.1.2 Modos de vibración.....	5
1.2 Elementos finitos.....	5
1.2.1 Tipos de elementos finitos	6
1.2.2 Modelamiento de daño estructural.....	7
1.3 Ubicación óptima de sensores	8
1.3.1 Algoritmos genéticos secuenciales	9
1.3.2 Algoritmo genético paralelo	11
1.4 Medición experimental	12
1.4.1 Rango de frecuencias.....	13
1.4.2 Mecanismo de excitación.....	13
1.4.3 Acelerómetro	14
1.4.4 Test de impacto	14
1.5 Procesamiento de señales	15
1.5.1 Transformada de Fourier	16
1.5.2 Funciones de respuesta en frecuencia	17
1.5.3 Función de coherencia	19
1.6 Ajuste de modelos.....	19
1.7 Método de detección de daño	20
CAPÍTULO 2 PROCEDIMIENTO.....	22

2.1	Estructura.....	22
2.2	Construcción de modelo numérico.....	22
2.2.1	Características del modelo numérico.....	23
2.2.2	Introducción de daño.....	24
2.3	Optimización de la ubicación de los sensores.....	25
2.3.1	Codificación.....	25
2.3.2	Parámetros de entrada.....	25
2.3.3	Función objetivo.....	26
2.3.4	Algoritmos genéticos paralelos.....	27
2.4	Diseño montaje experimental.....	28
2.4.1	Rango de frecuencias.....	28
2.4.2	Puntos de excitación.....	28
2.4.3	Puntos de suspensión.....	29
2.5	Montaje y medición experimental.....	29
CAPÍTULO 3 AJUSTE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL.....		34
3.1	Modelo numérico versus perfil canal.....	34
3.2	Ajuste mediante algoritmos genéticos paralelos.....	34
3.2.1	Codificación.....	35
3.2.2	Función objetivo.....	35
3.3	Resultados del ajuste numérico-experimental.....	37
CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....		41
4.1	Optimización con algoritmo genético secuencial.....	41
4.2	Sensibilidad de los parámetros de entrada del algoritmo genético.....	42
4.3	Optimización con algoritmo genético paralelo.....	43
4.4	Identificación de daño.....	44
CAPÍTULO 5 DISCUSIONES.....		52

5.1	Ajuste numérico-experimental.....	52
5.2	Algoritmos genéticos.....	52
5.3	Detección de daño.....	53
5.4	Distribución óptima de sensores.....	54
CONCLUSIONES		55
BIBLIOGRAFÍA		56
ANEXO A – MODELO NUMÉRICO PERFIL CANAL.....		57
ANEXO B – IDENTIFICACIÓN DE DAÑO.....		61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema detección de daño mediante vibraciones.	1
Figura 2: Geometría y modelo en elementos finitos [1].	5
Figura 3: Elemento tipo <i>shell</i> y grados de libertad nodo <i>i</i>	7
Figura 4: MEF placa cuadrada con grieta en el centro.	8
Figura 5: Diagrama de flujo típico de un algoritmo genético.	9
Figura 6: Codificación general de un individuo.	10
Figura 7: Proceso de recombinación.	11
Figura 8: Proceso de mutación.	11
Figura 9: Tipos de migración en AGP [4].	12
Figura 10: Configuración típica de una medición experimental [7].	12
Figura 11: Martillo de impacto.	13
Figura 12: Acelerómetro tipo piezoeléctrico.	14
Figura 13: Formas de realizar el test de impacto. a) la referencia es el sensor y la fuerza cambia de posición, b) la referencia es la fuerza y se mide con sensores en distintos puntos.	15
Figura 14: Coherencia de FRF's experimentales. a) coherencia producto de un golpe bien ejecutado, b) coherencia de un golpe mal ejecutado [8].	15
Figura 15: Esquema general de un ajuste de modelo.	20
Figura 16: Dimensiones del perfil canal medidas en milímetros.	22
Figura 17: Modelo en elementos finitos del perfil canal.	22
Figura 18: División del modelo numérico en 3 superficies.	23
Figura 19: Numeración de elementos en la superficie <i>l</i>	23
Figura 20: Numeración de nodos en la superficie <i>l</i>	24
Figura 21: Ubicación de las grietas en el modelo numérico del perfil canal.	24
Figura 22: Modelamiento de daño estructural, en rojo los nodos adicionales.	24
Figura 23: Codificación parcial de un individuo.	25
Figura 24: Puntos de suspensión del perfil canal.	29
Figura 25: Montaje para suspender el perfil canal.	30
Figura 26: Distribución de 42 sensores para medición de perfil canal sin daño.	31
Figura 27: Escenarios de daño a analizar.	32
Figura 28: Tamaño de las alas del perfil canal.	34
Figura 29: Nuevas características del modelo numérico.	35

Figura 30: Codificación de individuos para ajuste numérico-experimental.....	35
Figura 31: MAC numérico experimental del perfil canal sin daño antes del ajuste.....	38
Figura 32: MAC numérico-experimental del perfil canal sin daño después del ajuste....	38
Figura 33: MAC numérico-experimental del perfil canal con daño entre los nodos 23 y 27.	39
Figura 34: Comparación entre modos numéricos y experimentales luego del ajuste.....	40
Figura 35: Sensibilidad de la función objetivo al tamaño de la población.....	42
Figura 36: Sensibilidad de la función objetivo a las probabilidades de recombinación. .	43
Figura 37: Evolución de los 4 algoritmos genéticos.	43
Figura 38: Ubicación óptima de los sensores. a) vista en perspectiva, b) vista de la superficie <i>II</i>	44
Figura 39: Distribución de sensores uniforme. a) vista en perspectiva, b) vista de la superficie <i>II</i>	45
Figura 40: Distribución aleatoria de sensores. a) vista en perspectiva, b) vista de la superficie <i>II</i>	46
Figura 41: Identificación de daño para el primer caso.....	47
Figura 42: Identificación de daño para el segundo caso.	48
Figura 43: Identificación de daño para el tercer caso.....	49
Figura 44: Identificación de daño para el cuarto caso.	50
Figura 45: Comparación gráfica entre escenarios de daño reales y los identificados por las distribuciones. a) escenario 1, b) escenario 2, c) escenario 3, d) escenario 4.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades mecánicas acero estructural.....	23
Tabla 2: Parámetros para el análisis de sensibilidad.	26
Tabla 3: Parámetros utilizados en el algoritmo genético paralelo.	28
Tabla 4: Características martillo de impacto.....	29
Tabla 5: Características acelerómetro en grado de libertad 45.....	30
Tabla 6: Características acelerómetro en grado de libertad 132.....	30
Tabla 7: Parámetros seleccionados para la configuración del software <i>Real-time FFT</i>	31
Tabla 8: Características de los 4 escenarios de daño.....	32
Tabla 9: Propiedades optimizadas del modelo numérico.	37
Tabla 10: Valores óptimos de la función objetivo para $tp = 20$, $pc = 0.96$, $pm = 0.01$	41
Tabla 11: Cuadro comparativo entre los escenarios de daño reales y los identificados las distribuciones.....	51

INTRODUCCIÓN

El daño se puede definir como el cambio en las propiedades materiales o geométricas de una estructura, incluyendo sus condiciones de frontera, conectividad entre elementos, secciones transversales geométricas, cargas y cualquier otro factor capaz de provocar un comportamiento inusual, presente o futuro, de la estructura.

Diversos fenómenos como la fatiga, el deterioro de los materiales o la exposición a ambientes extremos pueden ocasionar daño en la estructura, cuyo nivel puede ir desde insignificante hasta severo.

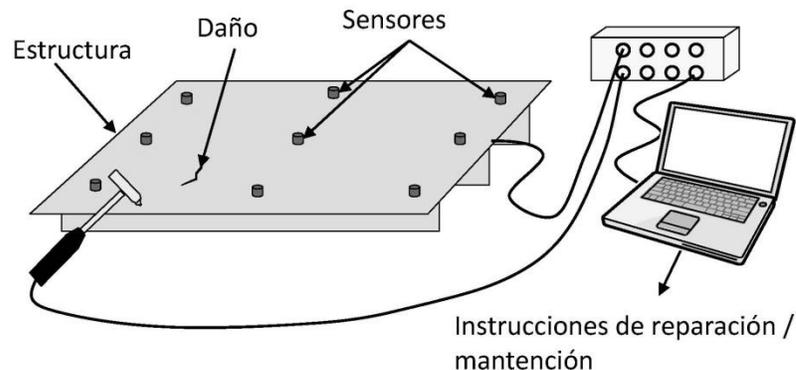


Figura 1: Esquema detección de daño mediante vibraciones.

Los métodos de detección de daño basados en vibraciones (ver Figura 1) suponen que cualquier situación de daño se puede modelar como una reducción de la rigidez estructural. Por lo tanto, considerando que la respuesta dinámica de una estructura está gobernada por sus parámetros estructurales tales como: rigidez, masa o amortiguamiento; cualquier cambio en los mismos implicará cambios en su respuesta vibratoria. Como consecuencia, el método de detección debe ser capaz de capturar estos cambios y predecir la presencia de daño.

El problema básico de detección de daño en estructuras es deducir la presencia de daño a partir de mediciones tomadas por un cierto número de sensores distribuidos en ellas.

Actualmente existen numerosos métodos para la detección de daño, los que se basan en la respuesta dinámica de una estructura. Estos métodos comúnmente identifican, localizan y/o cuantifican el daño a través del cambio en las frecuencias naturales, modos de vibración o una combinación de ellos. Sin embargo, una distribución de sensores inapropiada puede originar una incorrecta evaluación del daño.

En la práctica, la evaluación del daño se encuentra restringida por el número de sensores disponibles, lo cual limita la resolución de los parámetros medidos. En este sentido, se hace presente la necesidad de encontrar la cantidad y ubicación adecuada de sensores en una estructura en particular. El objetivo principal de es maximizar la información que puede ser extraída a través de los sensores.

Objetivo general

El objetivo general de este trabajo, es determinar y validar una distribución óptima de sensores para detección de ciertos tipos de daño en una estructura compleja, mediante el uso de algoritmos genéticos.

Objetivos específicos

- Construir y validar el modelo numérico de la estructura elegida.
- Establecer el número de sensores a distribuir en la estructura.
- Definir el tipo y escenarios de daño a ser detectados.
- Definir la función objetivo que utilizará el método de optimización.
- Optimizar la ubicación de los sensores con algoritmos genéticos.
- Determinar de forma experimental los modos de vibración de vibración de la estructura sin daño y bajo diferentes escenarios de daño.
- Validar experimentalmente la distribución óptima, comparándola con distribuciones aleatorias de igual número de sensores.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

En este capítulo se desarrollan aquellos tópicos directamente relacionados con el trabajo, sin embargo algunos de ellos son abordados superficialmente ya que no es el objetivo principal del mismo. Es por esto que se invita al lector a profundizarlos con ayuda de la bibliografía referenciada.

1.1 Vibraciones mecánicas

En general, cualquier elemento mecánico puede ser simplificado como un modelo de múltiples grados de libertad; con una masa, rigidez o amortiguamiento característicos. Por lo tanto, puede ser descrito en cualquier instante de tiempo mediante la siguiente ecuación de movimiento:

$$M\{\ddot{x}\} + C\{\dot{x}\} + K\{x\} = \{f\} \quad (1)$$

En donde:

- M : matriz de masa.
- K : matriz de rigidez.
- C : matriz de amortiguación.
- $\{x\}$: vector de posición.
- $\{f\}$: vector de fuerzas externas.

Esta ecuación puede ser utilizada para determinar, en forma aproximada, las frecuencias naturales y los modos de vibración del elemento mecánico por medio de la solución al problema de valores y vectores propios.

1.1.1 Frecuencias naturales

La frecuencia natural se define como aquella frecuencia a la cual un elemento mecánico tiende a oscilar en ausencia de cualquier excitación externa.

Una forma de calcular las frecuencias naturales es transformar la ecuación de movimiento del elemento mecánico al dominio de Laplace, considerando condiciones iniciales nulas. Como resultado se obtiene:

$$(Mp^2 + Cp + K)X(p) = F(p) \Leftrightarrow Z(p)X(p) = F(p) \quad (2)$$

En donde:

- $Z(p)$: matriz de rigidez dinámica.

Invertiendo la ecuación 2 se obtiene la matriz función de transferencia $H(p)$:

$$X(p) = H(p)F(p) \quad (3)$$

$$H(p) = Z(p)^{-1} = \frac{adj(Z(p))}{|Z(p)|} \quad (4)$$

En donde:

- $adj(Z(p))$: matriz adjunta de $Z(p)$.
- $|Z(p)|$: determinante de $Z(p)$.

A continuación, se determinan las frecuencias naturales correspondientes a los polos que hacen cero el determinante de $Z(p)$ como sigue:

$$|Z| = 0 \Leftrightarrow |Mp^2 + Cp + K| = 0 \quad (5)$$

El resultado genera $2n$ valores propios complejos λ_i , que aparecen en pares de complejos conjugados como sigue:

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & \lambda_n & & & \\ & & & \lambda_1^* & & \\ & 0 & & & \ddots & \\ & & & & & \lambda_n^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 + j\omega_1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & \sigma_n + j\omega_n & & & \\ & & & \sigma_1 - j\omega_1 & & \\ & 0 & & & \ddots & \\ & & & & & \sigma_n - j\omega_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

En donde:

- λ_i : i -ésimo valor propio.
- σ_i : i -ésimo factor de amortiguamiento.
- ω_i : i -ésima frecuencia natural amortiguada.

Entonces, las frecuencias naturales se pueden definir con la siguiente ecuación:

$$\omega_{ni} = \sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2} \quad (7)$$

1.1.2 Modos de vibración

Los modos de vibración se definen como un patrón o forma característica en el que vibra un elemento mecánico. Cada uno de estos modos posee una frecuencia asociada, que corresponde a la frecuencia natural.

Para determinar los modos de vibración de un elemento mecánico se resuelve el problema de valores y vectores propios, en donde estos últimos corresponden a los modos. Así, los vectores propios se pueden obtener resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$(M\lambda_i^2 + C\lambda_i + K)\phi_i = 0 \quad (8)$$

En donde:

- ϕ_i : i -ésimo vector propio asociado a λ_i .

1.2 Elementos finitos

Muchos fenómenos físicos en ingeniería pueden ser descritos en términos de ecuaciones diferenciales parciales. En general, resolver estas ecuaciones a través de métodos analíticos clásicos para formas arbitrarias resulta casi imposible. Por lo que, el método de elementos finitos (MEF) ofrece una excelente alternativa para resolverlas.

Una gran cantidad ingenieros y científicos en el mundo utilizan el MEF para predecir el comportamiento de sistemas estructurales, mecánicos, térmicos, eléctricos y químicos. Su popularidad se puede demostrar al realizar una búsqueda con las palabras “*finite element*” en *google académico*. El resultado de esta búsqueda es aproximadamente 3 millones de páginas *web* en tan sólo una fracción de segundo.

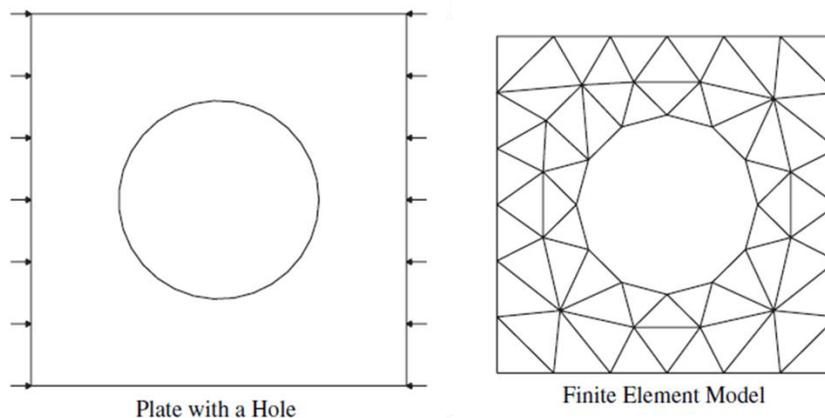


Figura 2: Geometría y modelo en elementos finitos [1].

Para explicar el enfoque básico del MEF, considerar una placa con una perforación como la que se muestra en la Figura 2, a la que se desea encontrar la distribución de

temperatura. Es de suma importancia escribir la ecuación correspondiente al balance de calor para cada punto de la placa. Sin embargo, la solución de la ecuación diferencial parcial para una geometría complicada, por ejemplo un motor de automóvil, es imposible de obtener a través de los métodos clásicos como la separación de variables. Entonces, la idea básica del MEF es dividir el cuerpo en elementos finitos, conectarlos a través de nodos y obtener una solución aproximada como se muestra en la Figura 2.

Como se dijo anteriormente, el MEF provee una solución aproximada de las ecuaciones diferenciales parciales. Por lo tanto, para obtener una solución razonablemente precisa se necesitan muchos nodos, así que se requiere la ayuda de computadores para resolver dichas ecuaciones. Sin embargo, un número elevado de nodos incrementa el tiempo de cálculo, por lo que se debe encontrar un balance adecuado entre precisión y costo computacional.

Entonces, se desprende que las etapas del MEF son las siguientes:

- Pre-proceso: en donde se subdivide el cuerpo de interés en elementos finitos.
- Formulación: en donde se desarrollan las ecuaciones diferenciales para cada elemento finito.
- Ensamble: en donde se obtienen las ecuaciones para el conjunto completo de elementos.
- Resolución: en donde se obtienen las soluciones de las ecuaciones anteriores.
- Post-proceso: en donde se determinan las variables de interés, como por ejemplo el esfuerzo.

Un mayor detalle de la formulación matemática del MEF se puede encontrar en [1], además en [2] se explica paso a paso la aplicación del MEF a problemas relacionados con la dinámica de estructuras.

1.2.1 Tipos de elementos finitos

Existen diversos tipos de elementos para mallar una geometría, cada uno de ellos posee características diferentes, por lo que son útiles en situaciones específicas.

En este trabajo se utilizan elementos tipo *shell* cuadriláteros de 4 nodos cada uno de ellos con 6 grados de libertad, lo que da un total de 24 grados de libertad por elemento. De estos 6 grados de libertad, 3 miden traslación y los restantes rotación. La Figura 3 muestra los nodos y grados de libertad para un elemento tipo *shell*.

Este elemento se utiliza comúnmente para modelar geometrías con espesores delgados, es decir, espesores mucho más pequeños que las restantes dimensiones. Además, las características especiales de estos elementos son las siguientes:

- Soportan deformación plana.
- Soportan cargas de flexión y cortantes.
- Modelan bien aquellas geometrías con ángulos entre caras de hasta un máximo de 45°.

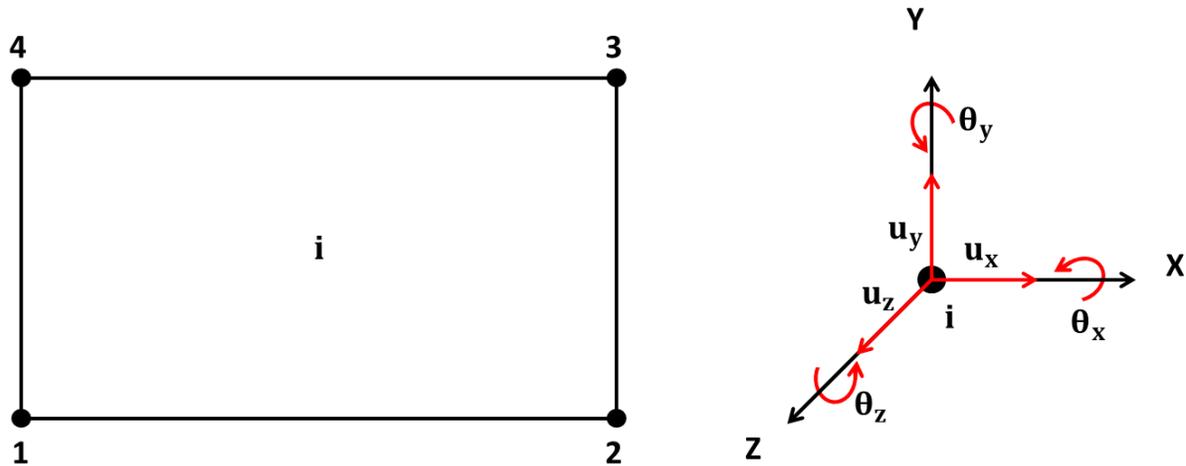


Figura 3: Elemento tipo *shell* y grados de libertad nodo *i*.

1.2.2 Modelamiento de daño estructural

Existen diversos tipos de daño en elementos estructurales tales como: pérdida de unión en soldaduras, formación de grietas, deformación plástica, erosión, delaminación, separación de superficies, *creep*, etc. Cada uno de ellos afecta de manera diferente las propiedades del material. En algunos casos se reduce el área seccional, en otros el momento de inercia o la densidad, en [3] se presentan más tipos de daño y sus efectos en las propiedades del material.

El modelo en elementos finitos se puede adaptar a cada uno de estos cambios, por ejemplo para un componente con grietas, se pueden asignar nodos adicionales de tal forma que el modelo incluya las grietas por sí sólo tal cual lo muestra la Figura 4. Aquí se añade el nodo 26 encerrado en un círculo, para modelar la grieta como una separación de superficies.

Otro método muy utilizado es modelar el daño como una reducción de la rigidez en aquellos lugares que se ven afectados. Por lo que, el modelo en elementos finitos considera ciertos elementos con una rigidez reducida por un factor β_i , definido como la razón entre la rigidez reducida y la rigidez inicial [4]. Entonces la rigidez reducida resulta ser:

$$K_{di} = (1 - \beta_i)K_i \quad (9)$$

En donde:

- K_{di} : rigidez reducida del elemento *i*.
- K_i : rigidez inicial del elemento *i*.
- β_i : factor de reducción del elemento *i*.

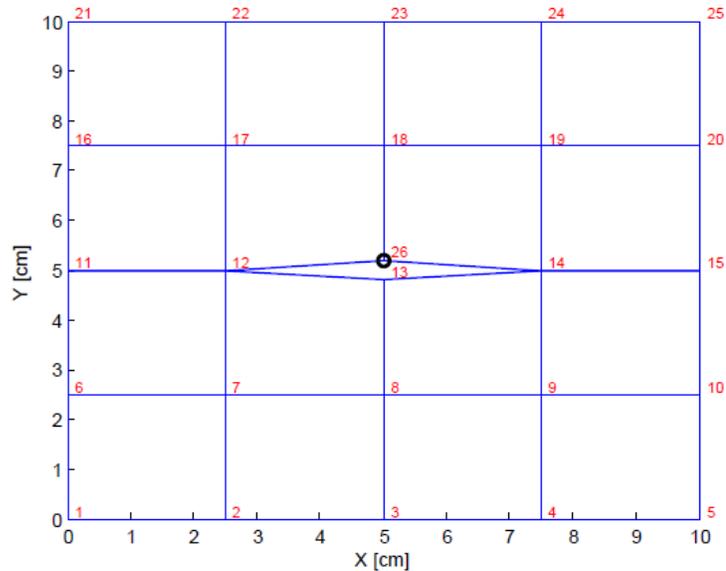


Figura 4: MEF placa cuadrada con grieta en el centro.

Ambos métodos han obtenido excelentes resultados lo que se aprecia en estas investigaciones [4], [5] y [6]. Sin embargo, es importante recalcar que presentan ciertas limitaciones.

No todos los tipos de daño pueden modelarse adecuadamente añadiendo nodos extras, como por ejemplo, una estructura con múltiples micro-grietas. Esto se debe a que se necesita refinar mucho la malla de elementos finitos, lo que acarrea un costo computacional enorme. En su lugar, se preferiría el método de la reducción de la rigidez pues se evita este costo.

Ahora bien, al utilizar el método de la reducción de la rigidez se debe validar el modelo numérico, con el fin de asegurar tempranamente que éste representa correctamente el escenario de daño a estudiar.

1.3 Ubicación óptima de sensores

El objetivo principal de este trabajo es encontrar una distribución óptima de sensores, en una estructura en particular, considerando una cierta cantidad de ubicaciones posibles.

Particularmente, resulta difícil hallar la solución al problema ya que existe una gran cantidad de distribuciones que deben ser evaluadas. Es por esto que resulta conveniente encontrar la distribución óptima utilizando métodos o algoritmos de optimización global.

Existen varias formas resolver un problema de optimización global. Actualmente, los métodos más populares son los algoritmos genéticos (AG), inspirados en procesos biológicos; y los algoritmos de recocido simulado, inspirados en el proceso físico de recocido del acero.

1.3.1 Algoritmos genéticos secuenciales

Los AG son métodos estocásticos utilizados para resolver problemas de búsqueda y optimización global. Éstos se basan en el proceso de la evolución natural de Darwin, utilizando los principios de la selección natural y la reproducción.

Los AG secuenciales hacen evolucionar una población de individuos que representan posibles soluciones del problema. El principio de la selección natural es aplicado a cada individuo, asignándoles un puntaje acorde a cuán ajustados se encuentran respecto de la solución deseada. Aquellos individuos mejor ajustados (los más aptos) crean nuevos individuos mediante acciones aleatorias de reproducción tales como: recombinación y mutación; produciendo una nueva generación.

La nueva generación contiene gran parte de las características de aquellos individuos más aptos de la generación anterior. El proceso se realiza en forma iterativa (ver Figura 5) hasta alcanzar algún criterio de convergencia, generando poblaciones de individuos cada vez más adaptados. Si se seleccionan correctamente los parámetros del AG, la población convergerá a una solución óptima global.

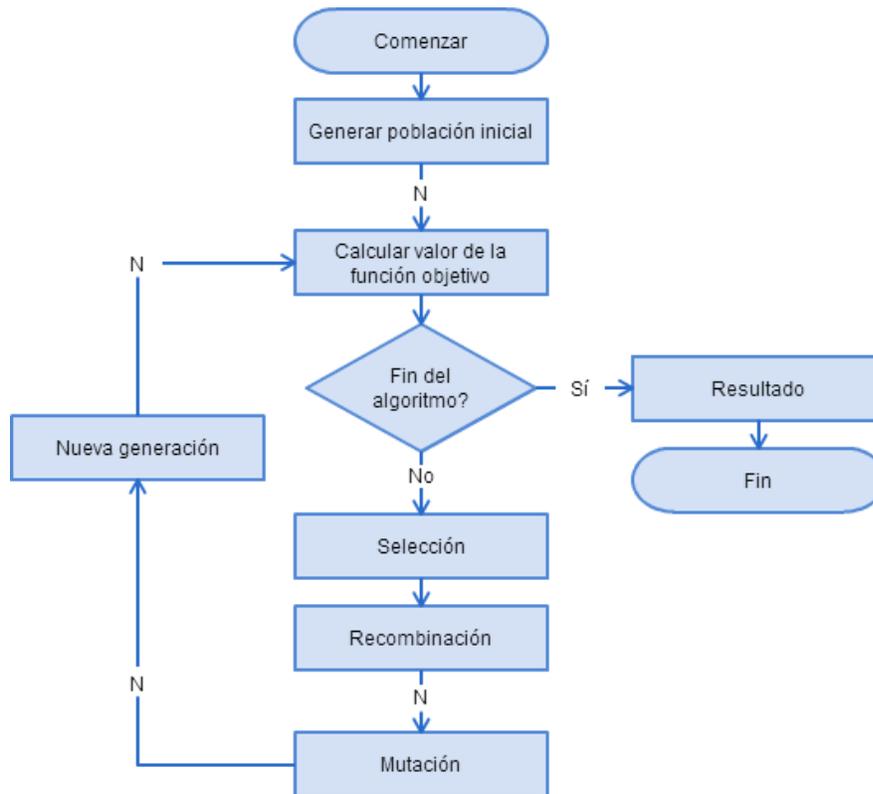


Figura 5: Diagrama de flujo típico de un algoritmo genético.

Muchos de los AG tienen los siguientes elementos en común: un conjunto de individuos con diferentes características, las que son codificadas como genes; un proceso de selección de acuerdo a una función objetivo; y un proceso de reproducción de los individuos más aptos.

1.3.1.1 Codificación

Todos los organismos que se conocen están compuestos por una o más células, cada una de ellas contiene a su vez uno o más cromosomas. Un cromosoma consiste en moléculas o cadenas de ácido desoxirribonucleico (ADN), que contienen los genes, y proteínas.

En AG el término cromosoma se refiere a una posible solución del problema, que a menudo se codifica como una cadena de bits. Los genes representan un bit o un conjunto de bits, que a su vez reciben el nombre de alelos. La forma más común de las cadenas de bits es la notación binaria [6], aunque existen otras formas de notación como se puede ver en la Figura 6.

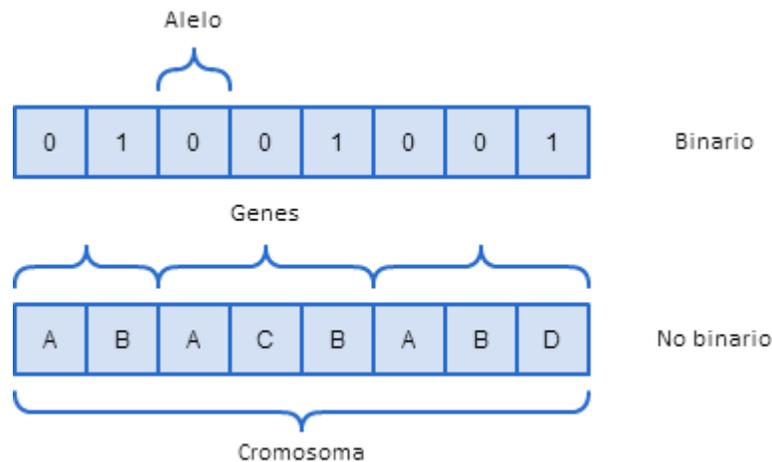


Figura 6: Codificación general de un individuo.

1.3.1.2 Selección

En la naturaleza, la selección de los individuos se lleva a cabo por la sobrevivencia del más fuerte. Aquellos individuos más adaptados al medioambiente tienen mayores posibilidades de sobrevivir y crear descendencia, transfiriendo sus genes a la siguiente generación.

En los AG la selección de los individuos más aptos se basa en la evaluación de una o más funciones objetivo. Si el problema de optimización es encontrar el máximo, los individuos con valores altos de la función objetivo tendrán mayores posibilidades de ser seleccionados para reproducirse y generar descendencia.

1.3.1.3 Reproducción

La primera etapa del proceso de reproducción es la recombinación o *crossover*. En éste, los genes de los padres son utilizados para formar un individuo completamente nuevo con una probabilidad p_c .

En los AG la recombinación típica es una operación que requiere de 2 individuos, aunque con más de ellos la operación es igualmente posible. Aquí, se elige de forma alea-

toria un gen de los individuos que luego servirá como punto de pivote para el intercambio de genes (ver Figura 7).

La segunda etapa del proceso de reproducción es la mutación. En ésta, se cambian algunos de los elementos del ADN. Tales cambios son causados principalmente por errores en el proceso de copia de los genes.

En los AG la mutación es una operación que cambia los valores de los genes de los individuos de la población, la Figura 8 muestra el proceso. Tal cambio se realiza de forma aleatoria con una probabilidad p_m .

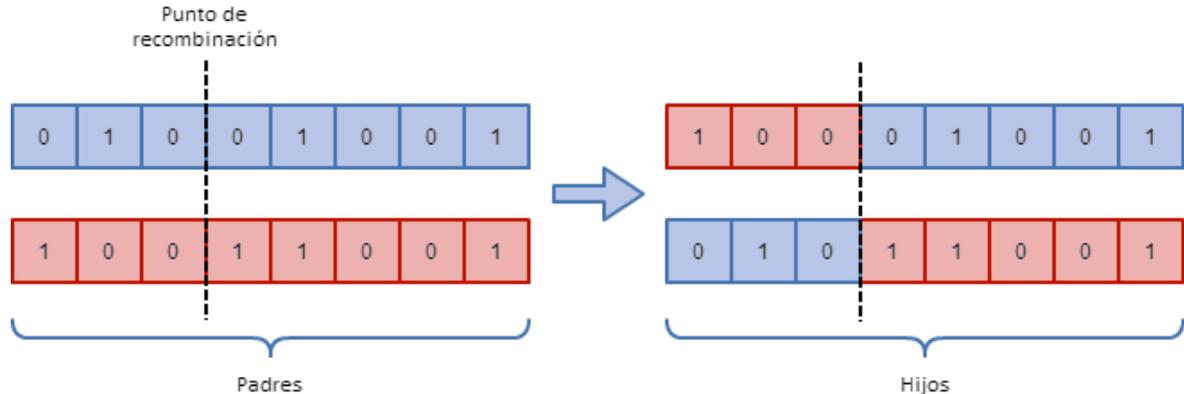


Figura 7: Proceso de recombinación.

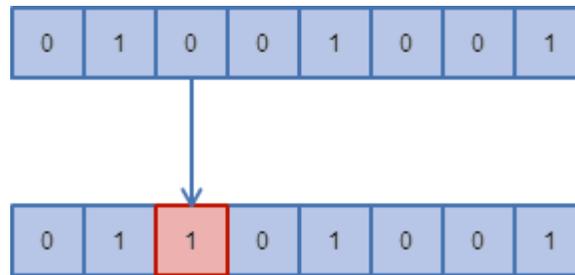


Figura 8: Proceso de mutación.

1.3.2 Algoritmo genético paralelo

En algunos casos, la función objetivo puede ser muy complicada y acarrear un costo computacional muy grande. Para solucionar esto, existen diversos métodos que incrementan la velocidad de cálculo, como por ejemplo: los algoritmos genéticos híbridos y los algoritmos genéticos paralelos (AGP).

Existen diferentes formas de AGP, dentro de la que destaca el algoritmo genético migrante. En éste, un cierto número de poblaciones son evaluadas simultáneamente, bajo el control de un algoritmo genético secuencial. Estas poblaciones intercambian sus individuos ocasionalmente, proceso conocido como migración, con el fin de evitar el estancamiento de alguna población en un óptimo local.

En general, existen 3 formas de migración: anillo de migración, donde los individuos son transferidos a lo largo de las poblaciones adyacentes y en una sola dirección; migración en torno a la vecindad, donde los individuos son transferidos a lo largo de las poblaciones adyacentes y en cualquier dirección; y migración libre, donde los individuos son transferidos libremente a cualquier población. La Figura 9 muestra una representación esquemática de estas formas.

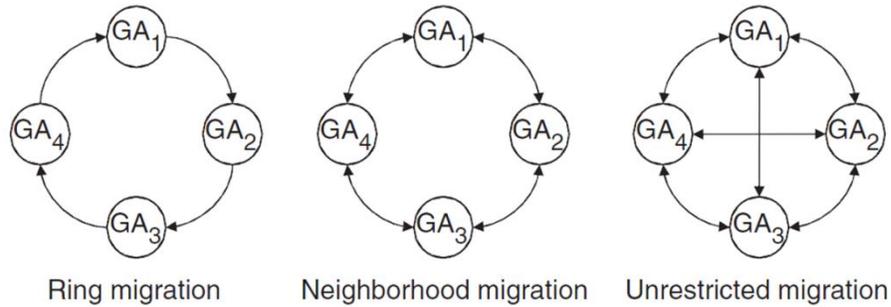


Figura 9: Tipos de migración en AGP [4].

1.4 Medición experimental

Para monitorear el estado de una estructura se deben adquirir datos experimentales de alguna variable como la aceleración, velocidad, desplazamiento o cualquier otra. El objetivo de estas mediciones experimentales es inferir la condición en la que se encuentra la estructura.

La medición experimental consiste básicamente en excitar una estructura con una fuerza conocida y medir de forma simultánea la fuerza y las respuestas en ella. Como resultado, se obtiene un grupo de funciones de respuesta en frecuencia (FRF's) que pueden ser utilizadas posteriormente para derivar los parámetros modales de la estructura.

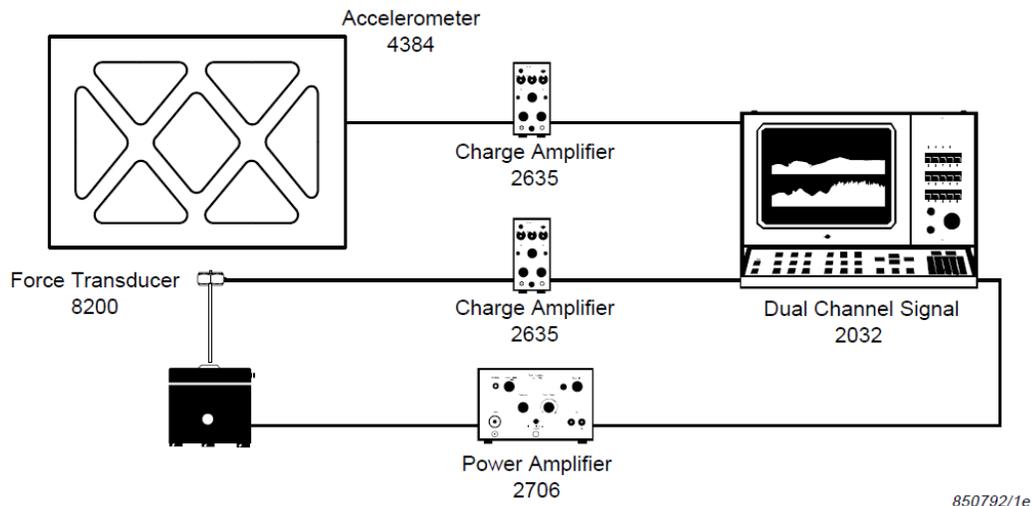


Figura 10: Configuración típica de una medición experimental [7].

El montaje típico de una medición experimental cuenta con un mecanismo de excitación, sensores de fuerza y acelerómetros, amplificadores de poder, generadores de señales, acondicionador de señales y un analizador de señales. La Figura 10 muestra el esquema básico de un montaje experimental.

1.4.1 Rango de frecuencias

Antes de construir el montaje experimental es de suma importancia definir correctamente el rango de frecuencias para identificar todos los modos de interés. Si se sabe cuántos modos se quieren identificar, el rango de frecuencias se puede definir con un análisis previo de un modelo en elementos finitos. Desde luego se debe considerar un margen de error.

En caso que no se cuente con un modelo en elementos finitos, el rango de frecuencias se puede definir in situ. Al intentar en una primera instancia con una rango de frecuencias amplio, luego contar los *peaks* de una de las FRF's para definir la frecuencia máxima que se debe medir para identificar los n modos deseados.

1.4.2 Mecanismo de excitación

Existen diferentes mecanismos para excitar una estructura. Los más comunes son el *shaker* electromagnético y el martillo de impacto. El objetivo es que la estructura sea excitada en un rango suficientemente amplio de frecuencias, para así contribuir a mediciones de FRF's precisas.



Figura 11: Martillo de impacto.

El martillo de impacto se compone básicamente de una punta, un sensor de fuerza, una masa y un conector ubicados en los extremos de una barra, tal como se muestra en la Figura 11. Este elemento opera de la siguiente forma: recibe una fuerza de impacto que

se transmite desde la punta hacia el sensor; luego este último transforma la fuerza en una señal eléctrica que se utiliza para realizar el análisis modal.

1.4.3 Acelerómetro

Un acelerómetro es el sensor más común utilizado en análisis modal experimental. Éste mide la aceleración de un punto en una estructura y la transforma en una señal eléctrica. Esta señal también es transformada por un acondicionador antes de ser procesada por un hardware o software.

El tipo más común de acelerómetros son los piezoeléctricos, ver Figura 12. Estos sensores contienen un cristal piezoeléctrico en su interior, éste cristal produce una carga eléctrica al ser deformado. Al seleccionar un acelerómetro hay distintos factores importantes que se deben considerar, estos son; el rango de frecuencias, sensibilidad, masa y estabilidad bajo cambios de temperatura. La sensibilidad de un acelerómetro determina la razón entre la señal medida y el ruido. Mientras más alta es la sensibilidad del acelerómetro más precisas son las mediciones. La masa del acelerómetro también es muy importante, ya que puede modificar las características de la estructura. Mientras menor es la masa mejor, aunque esto significa muchas veces una menor sensibilidad.

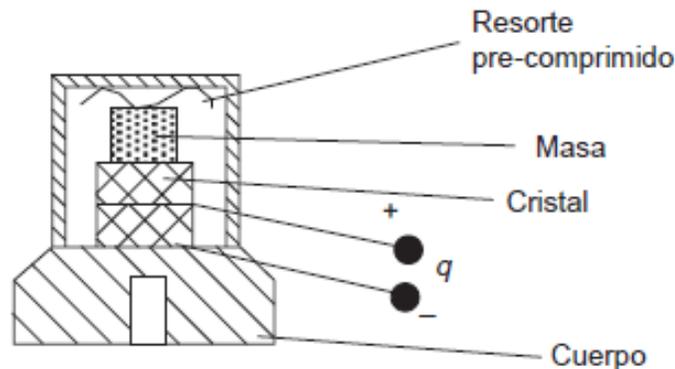


Figura 12: Acelerómetro tipo piezoeléctrico.

1.4.4 Test de impacto

Uno de los test más sencillos de implementar es el test de impacto, pues requiere poco hardware y toma poco tiempo. Sin embargo, es difícil obtener resultados consistentes si no se toman ciertas precauciones.

Este test consiste básicamente en golpear repetidamente aquellos grados de libertad que se desean medir. En general el test se puede realizar de 2 formas, es decir, se pueden utilizar varios sensores y golpear pocos grados de libertad, o viceversa (ver Figura 13). Cada una de estas formas depende de la disponibilidad de sensores.

El objetivo de golpear repetidamente una estructura es disminuir el error experimental producido por el ruido, la intensidad y ángulo del golpe. Es importante corroborar in-situ si los golpes son correctos, para ello se utilizan los gráficos de fuerza y coherencia entregados por el software de adquisición de datos. La Figura 14 muestra un ejemplo de lo anterior.

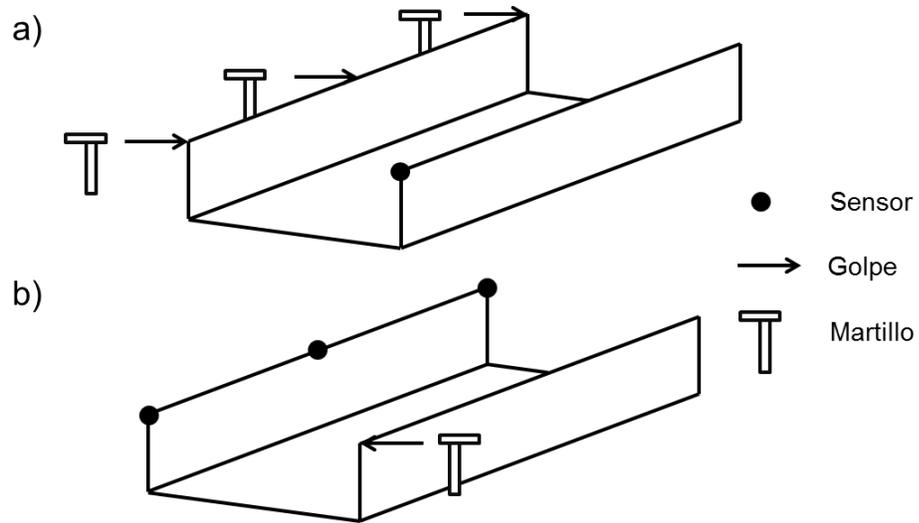


Figura 13: Formas de realizar el test de impacto. a) la referencia es el sensor y la fuerza cambia de posición, b) la referencia es la fuerza y se mide con sensores en distintos puntos.

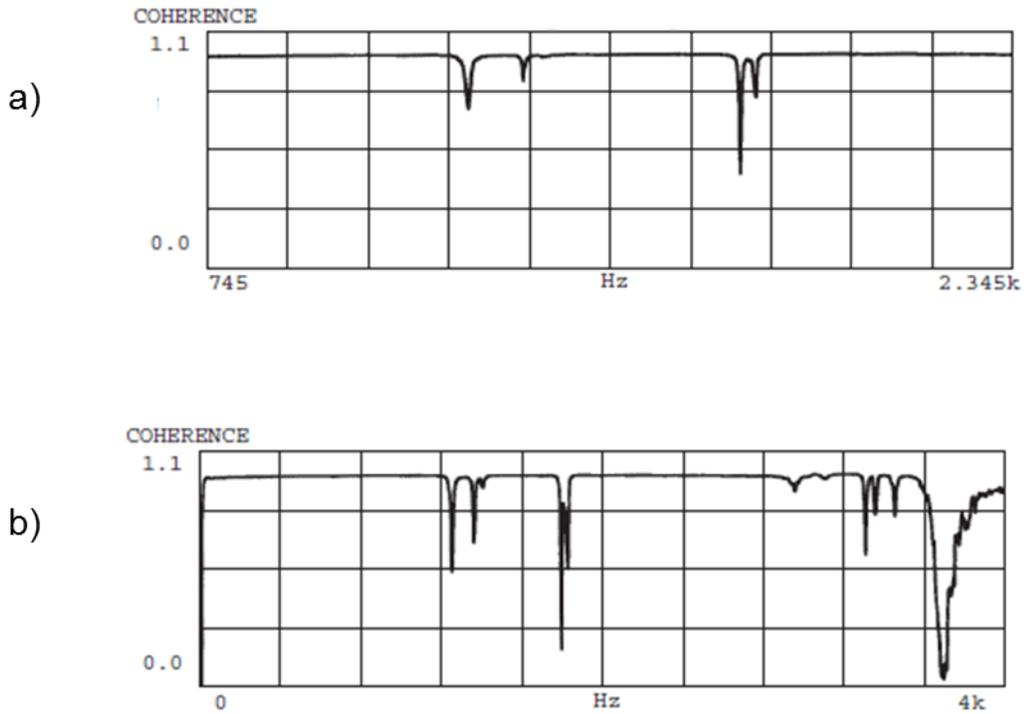


Figura 14: Coherencia de FRF's experimentales. a) coherencia producto de un golpe bien ejecutado, b) coherencia de un golpe mal ejecutado [8].

1.5 Procesamiento de señales

El procesamiento digital de señales es una herramienta muy importante en el análisis de sistemas.

Las señales, en general, se pueden clasificar en estacionarias y no estacionarias. Las señales estacionarias son aquellas cuyas propiedades promedio no varían con el tiempo, pueden ser determinísticas o aleatorias. Las señales no estacionarias se pueden dividir en continuas o transientes.

Como el objetivo del procesamiento de señales es extraer el máximo de información, se estudian las señales en distintos dominios tales como: dominio del tiempo, dominio de frecuencias.

Las señales medidas son funciones en el dominio del tiempo. Para estudiar su contenido en frecuencias, es más fácil examinar las señales en el dominio de frecuencias. La transformada de Fourier, permite transformar una señal en el tiempo a una señal en frecuencia y viceversa.

1.5.1 Transformada de Fourier

Una función periódica en el tiempo se puede representar como una suma de componentes sinusoidales a frecuencias equiespaciadas.

$$g(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} G(k \cdot \Delta f) e^{j \cdot 2\pi \cdot k \cdot \Delta f \cdot t} \quad (10)$$

Los coeficientes de Fourier vienen dados por:

$$G(k \cdot \Delta f) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} g(t) e^{-j \cdot 2\pi \cdot k \cdot \Delta f \cdot t} dt \quad (11)$$

En donde:

- t : tiempo.
- k : entero que cuenta los pasos en frecuencia.
- Δf : espaciado de frecuencias o resolución de frecuencia $\Delta f = 1/T$.
- $j = \sqrt{-1}$.
- T : periodo de tiempo $T = 1/\Delta f$.

El set de valores $G(k \cdot \Delta f)$ se denomina espectro de la función $g(t)$. En general el espectro posee valores complejos.

Al utilizar computadores digitales, es necesario adquirir la señal continua en intervalos de tiempo. Esto significa que la señal continua es representada por una señal discreta con valores a tiempos equidistantes. Considerando esto la transformada de Fourier queda como:

$$g(n \cdot \Delta t) = \frac{1}{f_s} \int_{-f_s/2}^{+f_s/2} G(f) e^{j \cdot 2\pi \cdot f \cdot n \cdot \Delta t} df \quad (12)$$

$$G(f) = \sum_{-\infty}^{+\infty} g(n \cdot \Delta t) e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot n \cdot \Delta t} \quad (13)$$

En donde:

- n : entero contando el número de pasos de tiempo.
- Δt : intervalo de muestreo $\Delta t = 1/f_s$.
- f_s : frecuencia de muestreo $f_s = 1/\Delta t$.

En condiciones reales de medición experimental es imposible medir la señal temporal hasta un tiempo infinito. Una parte de la señal debe ser seleccionada. Se asume que la señal capturada se repite con un periodo T , entregando una función periódica. Combinando la hipótesis de periodicidad con un muestreo temporal de la señal, se obtiene la definición de la transformada discreta de Fourier.

$$g(n \cdot \Delta t) = \frac{1}{f_s} \sum_{k=0}^{N_s-1} G(k \cdot \Delta f) e^{j \cdot 2\pi \cdot n \cdot k / N_s} \quad (14)$$

$$G(k \cdot \Delta f) = \frac{1}{N_s} \sum_{n=0}^{N_s-1} G(n \cdot \Delta f) e^{-j \cdot 2\pi \cdot n \cdot k / N_s} \quad (15)$$

En donde:

- N_s : número de datos.
- $T = N_s \cdot \Delta t$.
- $f_s = N_s \cdot \Delta f$.

1.5.2 Funciones de respuesta en frecuencia

Sea $F(t)$ el espectro en frecuencia de una señal de entrada $f(t)$ y $X(f)$ el espectro en frecuencia de una señal de salida $x(t)$, la función de respuesta en frecuencia (FRF), $H(f)$, entre ambas señales se define como:

$$H(f) = \frac{X(f)}{F(f)} \quad (16)$$

Al calcular $H(f)$ con la expresión anterior se corre el riesgo que existan términos donde $F(t)$ sea cero. Por lo tanto, en la práctica se utilizan maneras alternativas de calcular $H(f)$, utilizando las potencias espectrales.

$$H_1(f) = \frac{X(f) \cdot F^*(f)}{F(f) \cdot F^*(f)} = \frac{G_{XF}}{G_{FF}} \quad (17)$$

$$H_2(f) = \frac{X(f) \cdot X^*(f)}{F(f) \cdot X^*(f)} = \frac{G_{XX}}{G_{FX}} \quad (18)$$

El principal motivo para estimar las funciones de respuesta en frecuencia con las ecuaciones anteriores es la reducción del ruido no correlacionado en las señales de entrada o salida al promediar. Otras formas de disminuir el ruido se presentan en [2].

En la práctica, la función de respuesta en frecuencia es estimada con valores promedio de las potencias espectrales, lo que entrega una aproximación de mínimos cuadrados de $H(f)$.

$$\hat{G}_{FF} = \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} (G_{FF})_n \quad (19)$$

$$\hat{G}_{XX} = \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} (G_{XX})_n \quad (20)$$

$$\hat{G}_{FX} = \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} (G_{FX})_n \quad (21)$$

$$\hat{G}_{XF} = \frac{1}{N_a} \sum_{n=1}^{N_a} (G_{XF})_n \quad (22)$$

En donde:

- N_a : número de promedios.

1.5.3 Función de coherencia

Dado que las funciones de respuesta en frecuencia se obtienen de una aproximación de mínimos cuadrados, se puede definir un coeficiente de correlación. En este caso, la correlación se denomina función de coherencia y es una medida del error de mínimos cuadrados. La coherencia se define por:

$$\gamma^2 = \frac{|\hat{G}_{FX}|^2}{\hat{G}_{FF} \cdot \hat{G}_{XX}} \quad (23)$$

La coherencia varía entre 0 y 1. Un valor de 1, indica una relación perfectamente lineal entre las señales de entrada y salida por sobre todos los promedios.

1.6 Ajuste de modelos

En general, un modelo en elementos finitos permite predecir el comportamiento dinámico de una estructura bajo ciertas condiciones de borde, pero la confiabilidad de este modelo no siempre está garantizada.

Los métodos de ajuste permiten verificar y corregir estos modelos en elementos finitos por medio de datos experimentales. Como resultado del ajuste se logra un modelo en elementos finitos más confiable a la hora de predecir el comportamiento dinámico de la estructura.

Básicamente, el procedimiento de ajuste consiste en construir un modelo en elementos finitos de una estructura, luego realizar un análisis modal experimental de la misma. A continuación se correlacionan los modelos numéricos y experimentales a través de las funciones de respuesta en frecuencia, modos de vibración y frecuencias naturales de ambos modelos. Si la correlación es buena, significa que existe poca diferencia entre ambos modelos. En cambio si la correlación es mala, se deben cambiar los parámetros del modelo numérico y repetir el procedimiento hasta que la correlación sea buena. En la Figura 15 se aprecia un esquema general del proceso de ajuste de modelos.

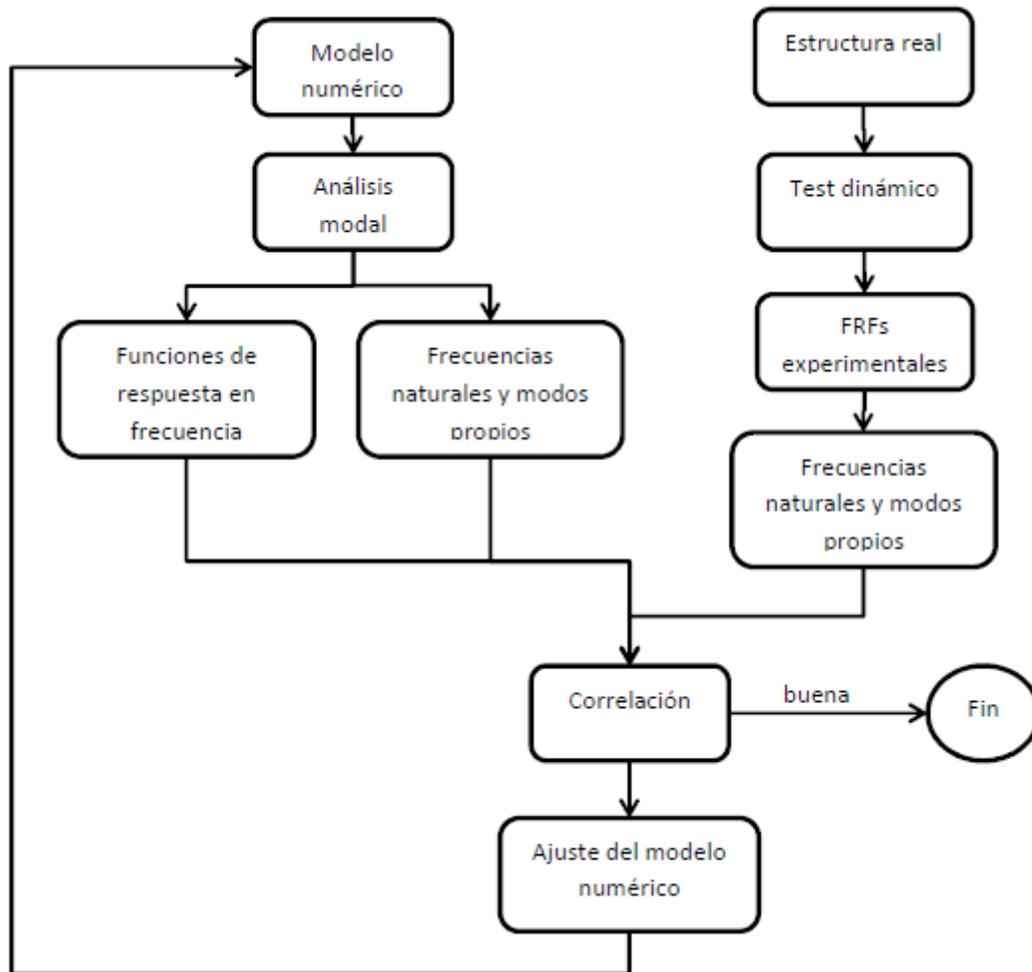


Figura 15: Esquema general de un ajuste de modelo.

1.7 Método de detección de daño

Un método reciente para detección de daño es el de la aproximación lineal con máxima entropía [9]. Este método consiste básicamente en determinar la presencia, ubicación y severidad del daño en una estructura a través de una combinación lineal de escenarios de daño conocidos.

Para ello, primero se debe construir una base de datos de manera que cada elemento de entrada posea un elemento de salida.

En este trabajo, el vector de entrada X^j contiene los índices de daño de todos los elementos del modelo numérico para el j -ésimo escenario de daño. Entonces, si $X_i^j = 0$ el i -ésimo elemento finito no tiene daño, en cambio si $X_i^j = 1$ el i -ésimo elemento finito está completamente dañado. Cualquier valor intermedio significa que el elemento finito está parcialmente dañado. Como resultado se obtiene un vector de entrada que tiene la siguiente forma:

$$\mathbf{X}^j = \{0,1, \dots, 0,1, \dots, 0,1\}^T \quad (24)$$

Siguiendo el mismo ejemplo, a este vector de entrada le corresponde un vector de observación \mathbf{Y}^j que contiene la suma de la diferencia cuadrática entre los modos de vibración con y sin daño, como sigue:

$$\mathbf{Y}^j = \left\{ \sum_{i=1}^{n_m} (\phi_{1,i}^{D_j} - \phi_{1,i}^U)^2, \dots, \sum_{i=1}^{n_m} (\phi_{n_1,i}^{D_j} - \phi_{n_1,i}^U)^2, \dots, \sum_{i=1}^{n_m} (\phi_{n_r,i}^{D_j} - \phi_{n_r,i}^U)^2 \right\}^T \quad (25)$$

En donde:

- $\phi_{i,r}$: i -ésimo grado de libertad del r -ésimo modo de vibración.
- D_j : j -ésimo escenario con daño.
- U : escenario sin daño.
- n_m : número de modos de vibración.

Una vez definidos estos vectores, se puede determinar la presencia, ubicación y severidad del daño para cualquier vector de entrada $\hat{\mathbf{X}}$. Para ello se escribe $\hat{\mathbf{X}}$ como una combinación lineal de los vectores \mathbf{X}^j como sigue:

$$\hat{\mathbf{X}} = \sum_{j=1}^N p_j \mathbf{X}^j, \quad \sum_{j=1}^N p_j = 1 \quad (26)$$

En donde:

- p_j : función de peso asociado al vector \mathbf{X}^j de la base.
- N : número de vectores en la base.

Luego se determina el daño $\hat{\mathbf{Y}}$ como una combinación lineal de los vectores \mathbf{Y}^j , utilizando las funciones de peso p_j anteriores como sigue:

$$\hat{\mathbf{Y}} = \sum_{j=1}^N p_j \mathbf{Y}^j \quad (27)$$

La gracia de este método de detección de daño es que las funciones de peso p_j son determinadas a través del método de la máxima entropía.

CAPÍTULO 2 PROCEDIMIENTO

En este capítulo se muestran los procedimientos utilizados para la construcción del modelo numérico de la estructura, el desarrollo de la optimización de la ubicación de los sensores, la construcción y diseño del montaje experimental, y el desarrollo del método de detección de daño.

2.1 Estructura

La estructura elegida para este trabajo corresponde a un perfil canal de acero estructural. En la Figura 16 se aprecian la estructura elegida y sus dimensiones, en este caso e es el espesor.

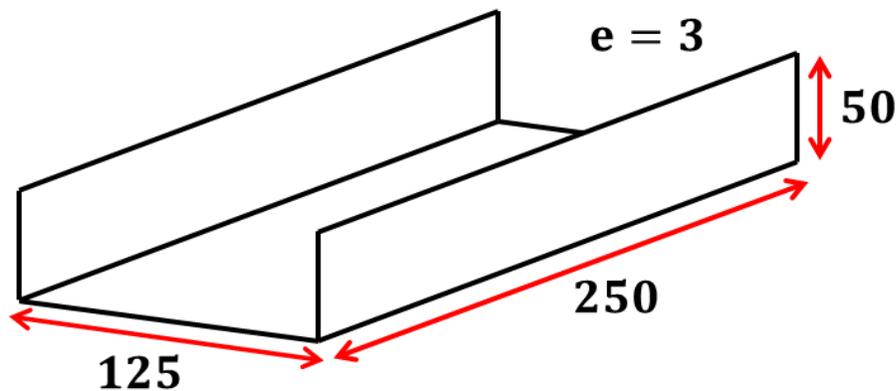


Figura 16: Dimensiones del perfil canal medidas en milímetros.

2.2 Construcción de modelo numérico

El modelo numérico del perfil canal se construye en *Matlab* utilizando el método de los elementos finitos. Para ello se divide la geometría en elementos tipo *shell* de 4 nodos, cada uno de ellos con 6 grados de libertad. Se utilizan elementos cuadriláteros de dimensiones 25x25 [mm]. Como resultado, se obtienen un total de 90 elementos, 110 nodos y 660 grados de libertad. La Figura 17 muestra el modelo numérico versus el perfil canal.

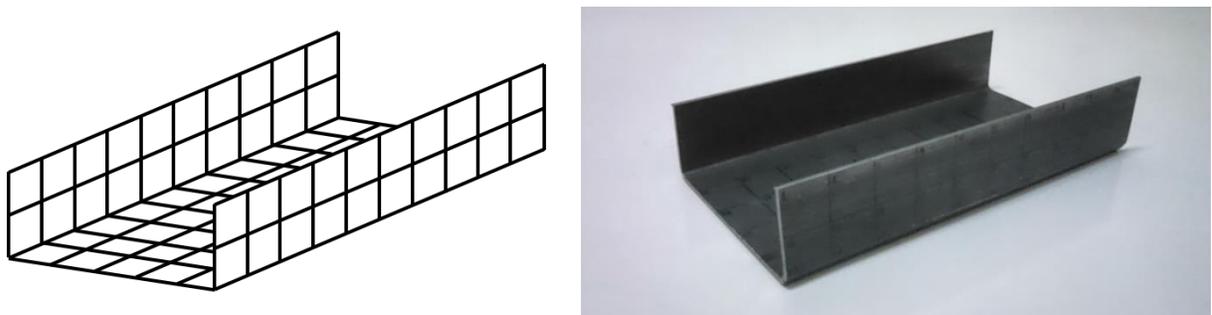


Figura 17: Modelo en elementos finitos del perfil canal.

2.2.1 Características del modelo numérico

Una de las características del modelo numérico es que sus elementos finitos deben tener las mismas propiedades mecánicas del perfil canal, por lo tanto se asignan a éstos los valores típicos del acero estructural, ver Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades mecánicas acero estructural.

Propiedad	Valor	Unidad
Módulo de <i>Young</i>	2.1×10^{11}	<i>Pa</i>
Módulo de <i>Poisson</i>	0.3	–
Densidad	7800	kg/m^3

Otra característica importante es cómo se enumeran los elementos y nodos. Esto servirá más adelante para introducir daño o realizar el ajuste del modelo numérico, ya que así se podrán seleccionar rápidamente los elementos y nodos que se verán afectados por tales cambios.

Debido a la cantidad de elementos y nodos del modelo numérico, se divide éste en 3 superficies como se muestra en la Figura 18. Así, se comienzan a enumerar los elementos y nodos desde la superficie *I* en adelante, tal como se muestra en la Figura 19 y Figura 20, respectivamente. La numeración de las otras superficies es análoga a la de la superficie *I*, por lo que no se muestra aquí.

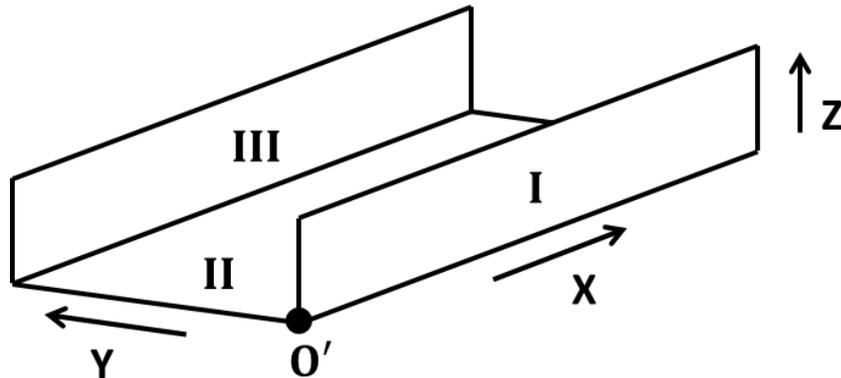


Figura 18: División del modelo numérico en 3 superficies.

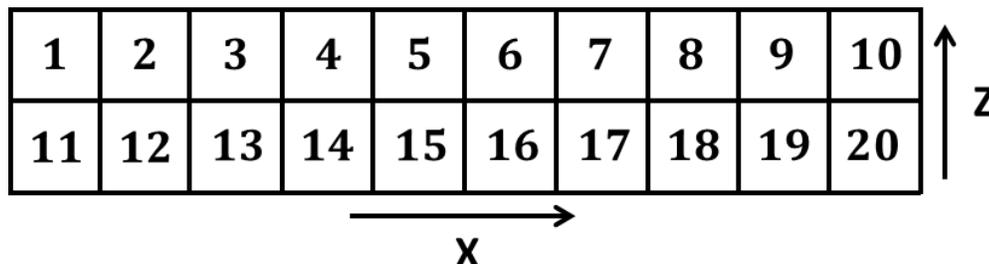


Figura 19: Numeración de elementos en la superficie *I*.

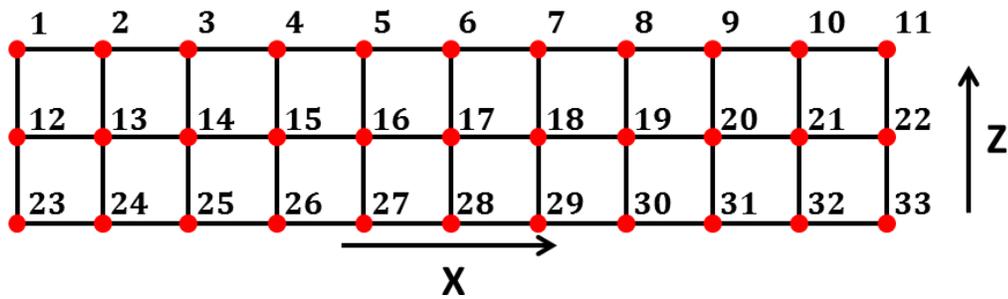


Figura 20: Numeración de nodos en la superficie I.

2.2.2 Introducción de daño

En este trabajo el daño estructural corresponde a una grieta que puede estar ubicada en alguna de las líneas formadas por la intersección entre las superficies I con II ó II con III, tal como se indica con color rojo en la Figura 21. Este tipo de daño se puede modelar fácilmente utilizando el método de adición de nodos explicado en el Capítulo “Antecedentes”.

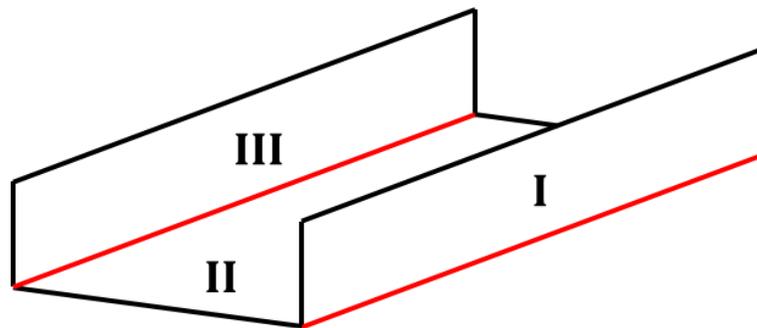


Figura 21: Ubicación de las grietas en el modelo numérico del perfil canal.

Entonces, un escenario de daño posible es el que se muestra en la Figura 22. En donde los puntos rojos indican los nodos adicionales en el modelo numérico que darán cuenta de la separación entre las superficies, producto de la grieta.

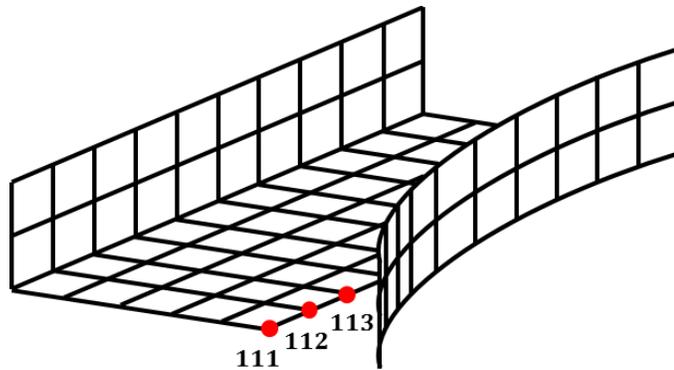


Figura 22: Modelamiento de daño estructural, en rojo los nodos adicionales.

2.3 Optimización de la ubicación de los sensores

La ubicación óptima de los sensores se resuelve utilizando el método de los algoritmos genéticos. Este algoritmo se desarrolla en *Matlab* utilizando un *toolbox* de AG para *Matlab*. Es importante aclarar que para implementar este método se deben definir los siguientes componentes:

- Codificación de los individuos.
- Funciones de selección y reproducción.
- Tamaño de la población.
- Probabilidades de reproducción.
- Función objetivo.

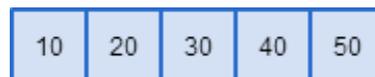
Estas componentes deben ser definidas cuidadosamente, ya que el funcionamiento del algoritmo genético depende fuertemente de ellas.

2.3.1 Codificación

Se decide identificar a cada individuo mediante la codificación no binaria, pues facilita las operaciones que realizan el algoritmo genético y otras funciones como las de detección de daño.

En este trabajo, un individuo se identifica por los grados de libertad medidos por 27 sensores distribuidos en el perfil canal, es decir, cada individuo se codifica con 27 números enteros. La gracia de utilizar la codificación no binaria es que permite identificar la presencia de un sensor y el grado de libertad que está midiendo éste. Además ahorra espacio, pues sólo basta conocer cuáles son los grados de libertad medidos para concluir cuáles no lo están.

Un ejemplo de un individuo es el que se muestra en la Figura 23, en donde se aprecia que hay sensores midiendo los grados de libertad 10, 20, 30, 40 y 50. Es importante destacar que, por conceptos de espacio, sólo se muestran 5 de los 27 elementos del individuo.



10	20	30	40	50
----	----	----	----	----

Figura 23: Codificación parcial de un individuo.

2.3.2 Parámetros de entrada

Los parámetros de entrada de un algoritmo genético son: el tamaño de la población; las funciones de selección y reproducción; y sus probabilidades de ocurrencia. En la práctica, no existe forma de determinar aquellos parámetros que hacen funcionar de mejor manera el algoritmo genético, pues este último también depende del problema a resolver.

Sabiendo esto, se decide trabajar con las siguientes funciones de selección y reproducción:

- **normGeomSelect**: función de selección de individuos basada en la distribución geométrica. Esta función elige un cierto porcentaje de los individuos más adaptados de la población.
- **intergerXover**: función de recombinación de individuos. Esta función genera 2 nuevos individuos intercambiando la información de los genes de sus 2 padres en posiciones aleatorias dadas por un vector de cambio de igual tamaño que los individuos de la población. Este vector de cambio posee 1's y 0's en posiciones aleatorias, un 1 indica que el gen de un padre se intercambiará con el gen del otro padre en esa posición y viceversa, un 0 indica que no hay intercambio de información en esa posición.
- **realMutation**: función de mutación de individuos. Esta función genera un nuevo individuo cambiando la información de los genes del individuo padre en posiciones aleatorias dadas por un vector de cambio de igual tamaño que los individuos de la población. Este vector de cambio posee 1's y 0's en posiciones aleatorias, un 1 indica que el gen cambiará aleatoriamente su información en esa posición, un 0 indica que no hay cambio de información en esa posición.

Por otro lado, se realiza un análisis de sensibilidad para seleccionar el tamaño de la población y las probabilidades de reproducción. Se prueban valores sugeridos por la experiencia y bibliografía pertinente [4]. Estos señalan que para tamaños pequeños de población, el tiempo de cálculo disminuye. Además, se recomienda una probabilidad alta de recombinación y una probabilidad baja de mutación.

Tabla 2: Parámetros para el análisis de sensibilidad.

Parámetro	Nombre	Valores
t_p	Tamaño población	20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60
p_c	Probabilidad de recombinación	0.72; 0.84; 0.96; 0.97; 0.98; 0.99
p_m	Probabilidad de mutación	0.005; 0.01; 0.05; 0.1

2.3.3 Función objetivo

La función objetivo corresponde a la sensibilidad de los modos de vibración al daño, es decir, qué tan sensible son los modos de vibración a la posición del daño en el perfil canal. La siguiente ecuación muestra la función de sensibilidad al daño:

$$S(u_{x,i}) = \frac{1}{n_m} \sum_{j=1}^{n_m} \frac{1}{m_j} (\phi_{i,j} - \phi_{1,j})^2 \quad (28)$$

En donde:

- $S(u_{x,i})$: sensibilidad, completa $x = C$ o incompleta $x = I$, del i -ésimo escenario de daño.
- n_m : número de modos de vibración.
- m_j : máximo valor de la diferencia cuadrática entre el j -ésimo modo de vibración con y sin daño j -ésimo modo de vibración sin daño.
- $\phi_{i,j}$: j -ésimo modo de vibración del i -ésimo escenario de daño.
- $\phi_{1,j}$: j -ésimo modo de vibración del escenario sin daño.

Es importante destacar que para determinar la sensibilidad completa se utilizan todos los grados de libertad definidos como posibles ubicaciones de los sensores. En cambio, para calcular la sensibilidad incompleta, se utilizan sólo aquellos grados de libertad de la distribución de sensores que se desea evaluar.

En definitiva, la función objetivo se construye dividiendo el valor máximo de la sensibilidad incompleta respecto del valor máximo de la sensibilidad completa, y sumando estas divisiones al cuadrado para cada escenario de daño, como sigue:

$$F = \sum_{i=1}^{nsd} \left(\frac{\max S(u_{I,i})}{\max S(u_{C,i})} \right)^2 \quad (29)$$

En donde:

- $S(u_{I,i})$: sensibilidad incompleta del i -ésimo escenario de daño.
- $S(u_{C,i})$: sensibilidad completa del i -ésimo escenario de daño.
- nsd : número de escenario de daño.

2.3.4 Algoritmos genéticos paralelos

Como se explicó en el capítulo “Antecedentes”, los algoritmos genéticos paralelos permiten incrementar la velocidad de cálculo y reducir el problema del estancamiento en óptimos locales.

En este caso, se decide desarrollar un algoritmo genético paralelo para resolver el problema de optimización de la ubicación de sensores. Este algoritmo requiere básicamente de los mismos componentes que el algoritmo genético secuencial, además de una tasa de migración en este caso definida por defecto. Esto significa que se produce la migración del mejor individuo una vez que todos los algoritmos genéticos secuenciales encuentran una posible solución.

Utilizando los resultados del análisis de sensibilidad, se eligen los parámetros que hacen máxima la función objetivo, ver Tabla 3. Luego se utilizan estos valores para encontrar la distribución óptima de sensores a través de algoritmo genético paralelo.

Tabla 3: Parámetros utilizados en el algoritmo genético paralelo.

Parámetro	Nombre	Valores
t_p	Tamaño población	20
p_c	Probabilidad de recombinación	0.99
p_m	Probabilidad de mutación	0.01

2.4 Diseño montaje experimental

El diseño del montaje experimental requiere definir el rango de frecuencias naturales en la que una cierta cantidad de modos de vibración sean identificados; y los puntos de suspensión y excitación del perfil canal.

2.4.1 Rango de frecuencias

Antes de construir el montaje experimental es de suma importancia definir correctamente el rango de frecuencias para identificar todos los modos de interés. Si se sabe cuántos modos se quieren identificar, el rango de frecuencias se puede definir con un análisis previo de un modelo en elementos finitos. Desde luego se debe considerar un margen de error.

En este caso se decide identificar 15 modos de vibración, por lo que el rango de frecuencias sugerido para la medición experimental es entre 0 y 1500 [Hz] aproximadamente.

2.4.2 Puntos de excitación

Los puntos de excitación se seleccionan de modo que se garantice que todos los modos de interés sean excitados adecuadamente. Un modo en particular va a estar correctamente excitado si la fuerza se aplica en un punto de alto desplazamiento.

Actualmente, uno de los métodos para seleccionar los puntos de excitación es a través de los *average driving point residues* (ADPR) [6], de hecho es utilizado por algunos programas computacionales como *FEMtools*.

Si se miden n modos, el ADPR viene dado por:

$$ADPR_j = \sum_{i=1}^n \frac{\phi_{ij}^2}{\omega_i} \quad (30)$$

En donde:

- ϕ_{ij} : j -ésimo elemento del i -ésimo modo.
- ω_i : i -ésima frecuencia natural.

Por lo tanto, aquellos puntos con los más altos ADPR van a ser buenos puntos de excitación.

2.4.3 Puntos de suspensión

Dado que es muy difícil imitar las condiciones de borde reales en un laboratorio, en la mayoría de las mediciones experimentales la estructura se monta a manera de simular una condición libre. Esta condición se logra al suspender la estructura con materiales blandos como resortes o elásticos, como se aprecia en la Figura 24. Con este arreglo se producen modos de cuerpo rígido. Si las frecuencias naturales de los modos rígidos son lejanas a la primera frecuencia natural de la estructura, la medición de la FRF no se verá afectada por esta condición de borde.

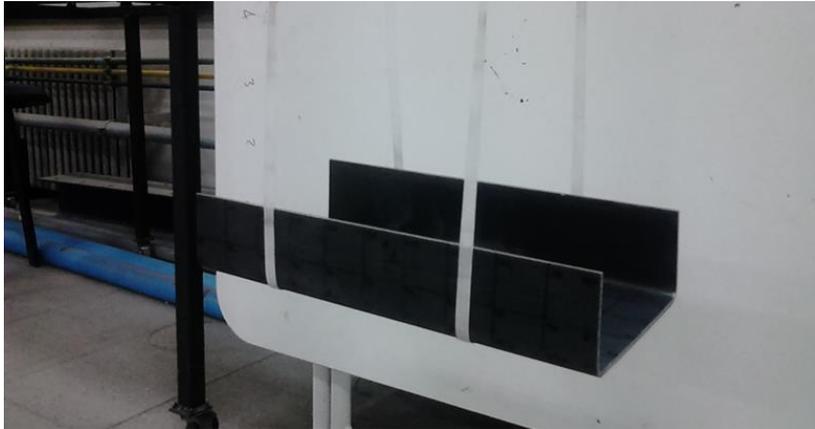


Figura 24: Puntos de suspensión del perfil canal.

Los puntos de suspensión se seleccionan en los lugares donde hay baja amplitud de movimiento. Por lo tanto, los puntos que mejor responden a este requisito son aquellos con los más bajos ADPR. Elásticos

2.5 Montaje y medición experimental

El montaje experimental consiste en una estructura metálica tipo caballete en el que se suspende el perfil canal a través de 2 elásticos, tal como se muestra en la Figura 25.

Para excitar el perfil canal se utiliza un martillo de impacto ICP, modelo 086C01, cuyas características se muestran en la Tabla 4. También se utilizan 2 acelerómetros piezo-eléctricos ICP para medir la respuesta dinámica del perfil canal, modelo 333B32, cuyas características se presentan en la Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 4: Características martillo de impacto.

Característica	Valor	Unidad
Sensibilidad	11.2	<i>mv/N</i>
Masa	100	<i>g</i>
Peso extra	25	<i>g</i>
Punta	Silicona	—

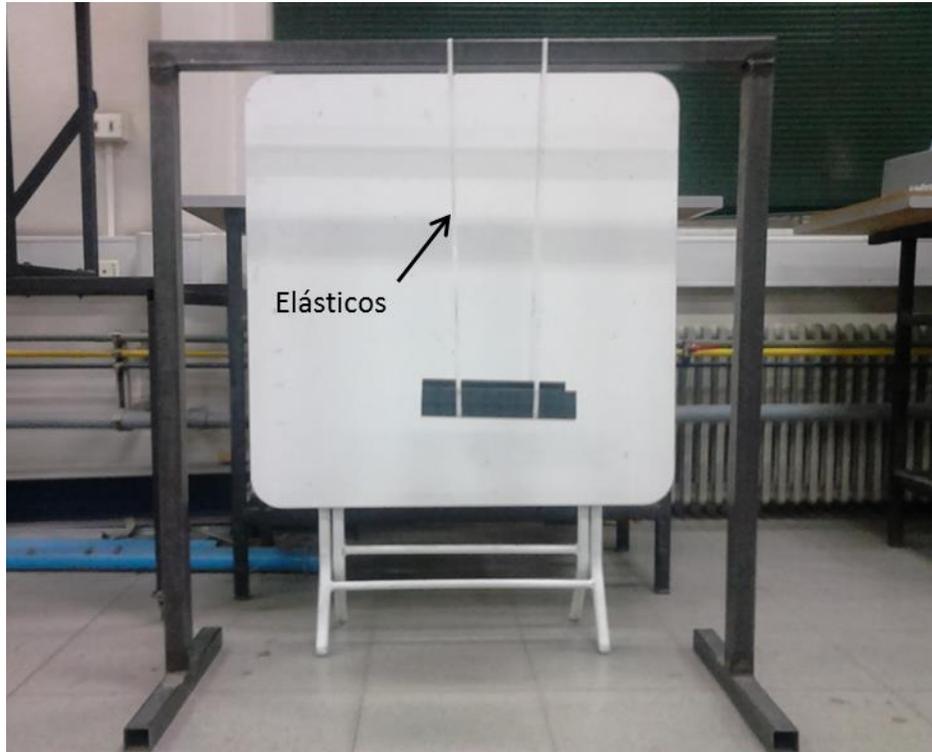


Figura 25: Montaje para suspender el perfil canal.

Tabla 5: Características acelerómetro en grado de libertad 45.

Característica	Valor	Unidad
Sensibilidad	100.9	<i>mv/G</i>
Masa	4	<i>g</i>
Rango de frecuencias	0.5 - 3000	<i>Hz</i>
Montaje	Adhesivo	–

Tabla 6: Características acelerómetro en grado de libertad 132.

Característica	Valor	Unidad
Sensibilidad	98.9	<i>mv/G</i>
Masa	4	<i>g</i>
Rango de frecuencias	0.5 - 3000	<i>Hz</i>
Montaje	Adhesivo	–

Se utiliza el sistema de adquisición y análisis de señales ECON AVANT, modelo MI-7018. Este sistema recibe las señales provenientes del martillo de impacto y los acelerómetros, para luego procesarlas mediante el software *Real-time FFT*. Este último, se configura para entregar los gráficos de fuerza y su espectro, coherencia y funciones de respuesta en frecuencia medidas en el momento.

Es importante configurar correctamente los parámetros del software *Real-time FFT*, pues garantiza que los datos medidos poseen una alta confiabilidad. En la Tabla 7 se muestran los parámetros seleccionados antes de comenzar la medición experimental.

Tabla 7: Parámetros seleccionados para la configuración del software *Real-time FFT*.

Parámetro	Valor	Unidad
Archivos de salida	FRF	–
	Coherencia	
Rango de frecuencias	0 - 2000	Hz
Trigger	0.1	s
Repeticiones	5	–

Ahora, se construye el montaje experimental suspendiendo el perfil canal en zonas de bajo ADPR, es decir, de bajo movimiento. Por otra parte, se posicionan los acelerómetros en los grados de libertad de alto ADPR, es decir, de alto movimiento. Estos acelerómetros se pegan al perfil canal utilizando un adhesivo tipo cera.

Las mediciones experimentales comienzan por medir la respuesta dinámica del perfil canal sin daño. Para ello se elige una distribución de 42 acelerómetros ubicados como se muestra en la Figura 26.

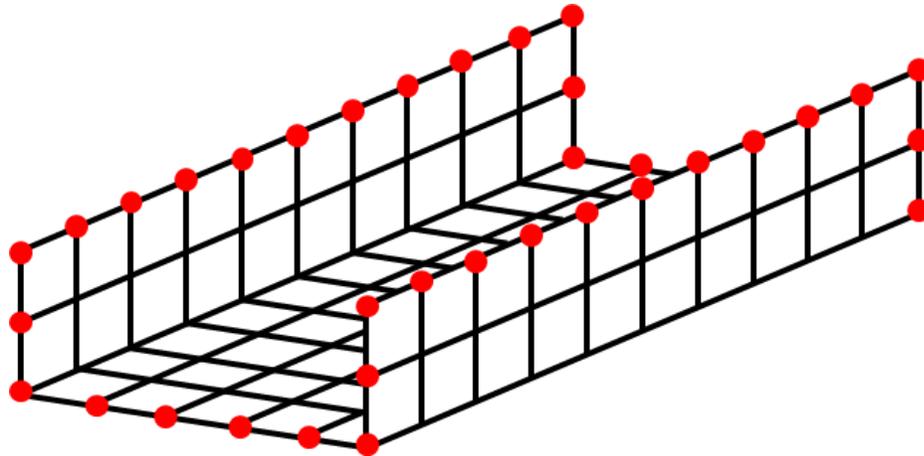


Figura 26: Distribución de 42 sensores para medición de perfil canal sin daño.

Es importante recordar que el test de impacto permite disminuir el número de acelerómetros utilizados, a cambio de golpear la estructura en todos los grados de libertad a medir. Entonces se utilizan 2 acelerómetros para todas las mediciones experimentales, cada uno de ellos ubicados en los grados de libertad 45 y 132, correspondientes a los nodos 34 y 110 respectivamente.

Con los acelerómetros ya ubicados, se procede a golpear todos los grados de libertad definidos por la distribución de 42 acelerómetros. Luego se corrobora que el golpe haya sido efectivo mediante las curvas de fuerza, espectro de fuerza y coherencia, determinadas por el software *Real-time FFT*.

Una vez terminada la medición experimental sin daño, se procede a introducir daño en el perfil canal. En este caso se miden 4 escenarios de daño distintos: 3 escenarios de daño con una grieta en el borde izquierdo de la intersección entre las superficies *I* y *II*, y la última con una grieta en el centro de la misma intersección. Las dimensiones y elementos afectados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Características de los 4 escenarios de daño.

Daño	Elementos	Largo [mm]
1	11; 21	25
2	11; 12; 21; 22	37.5
3	11; 12; 13; 14; 21; 22; 23; 24	100
4	14; 15; 16; 17; 24; 25; 26; 27	75

En la Figura 27 se muestran físicamente los escenarios de daño anteriores. Se puede notar que tanto el segundo como el cuarto escenario presentan elementos con 50% de daño, es decir, la grieta cubre sólo la mitad de éstos.

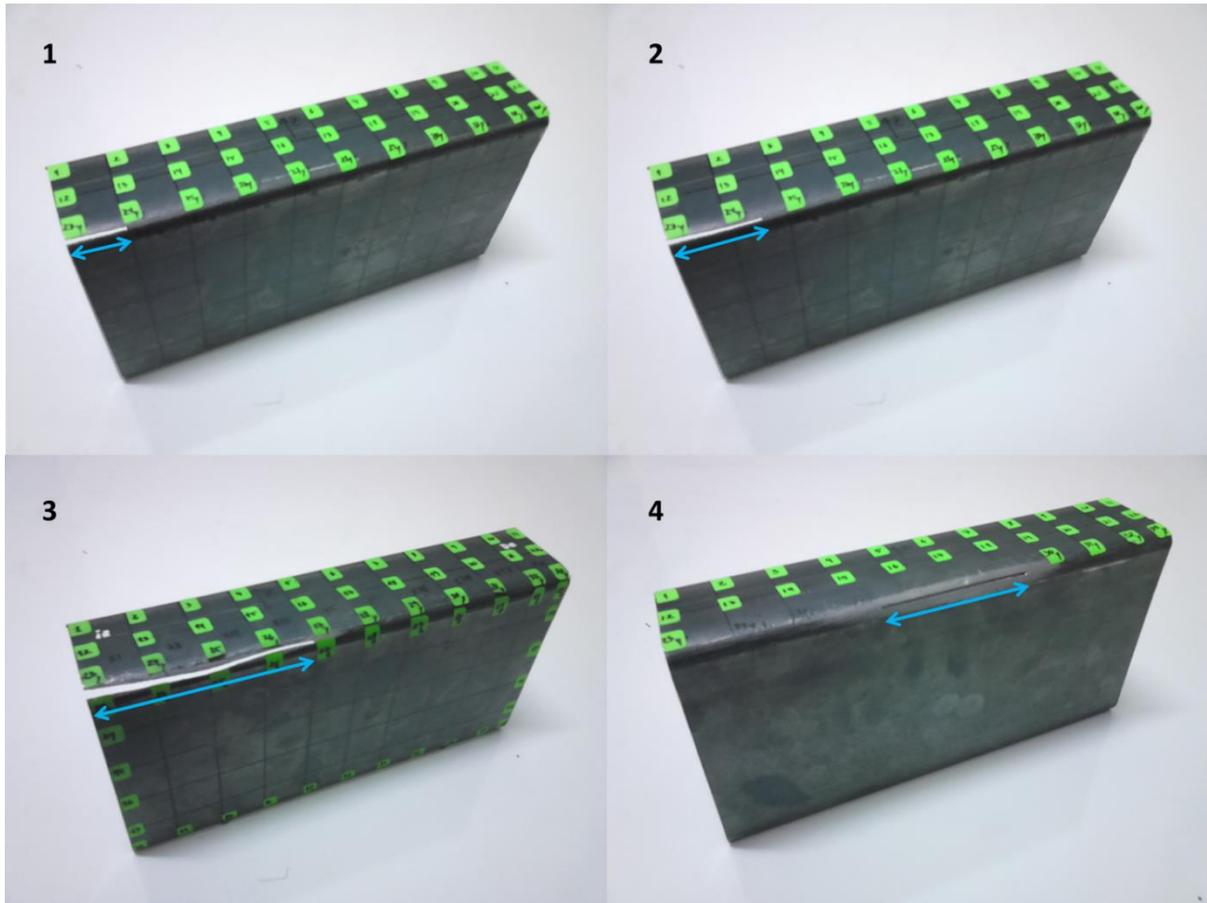


Figura 27: Escenarios de daño a analizar.

Luego se realizan los ensayos experimentales para cada escenario de daño utilizando el mismo procedimiento anterior, salvo que ahora se miden los 132 grados de libertad definidos para el modelo numérico. Como en el caso sin daño, se utilizan 2 sensores ubicados en los mismos grados de libertad, pero esta vez se golpean los 132 grados de libertad, nuevamente corroborando la efectividad de los golpes.

CAPÍTULO 3 AJUSTE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL

Este capítulo muestra el procedimiento realizado para el ajuste numérico experimental del perfil canal. Los objetivos son validar el modelo numérico de la estructura y el modelamiento de daño estructural. Al final se muestran los resultados del ajuste.

3.1 Modelo numérico versus perfil canal

En primer lugar existe una diferencia física entre el modelo numérico y el perfil canal, ya que este último tiene una de sus alas un poco más pequeña que la otra. También, se sospecha que las zonas en donde se intersectan las superficies del modelo poseen propiedades diferentes, pues la fabricación del perfil canal requiere doblar una plancha.

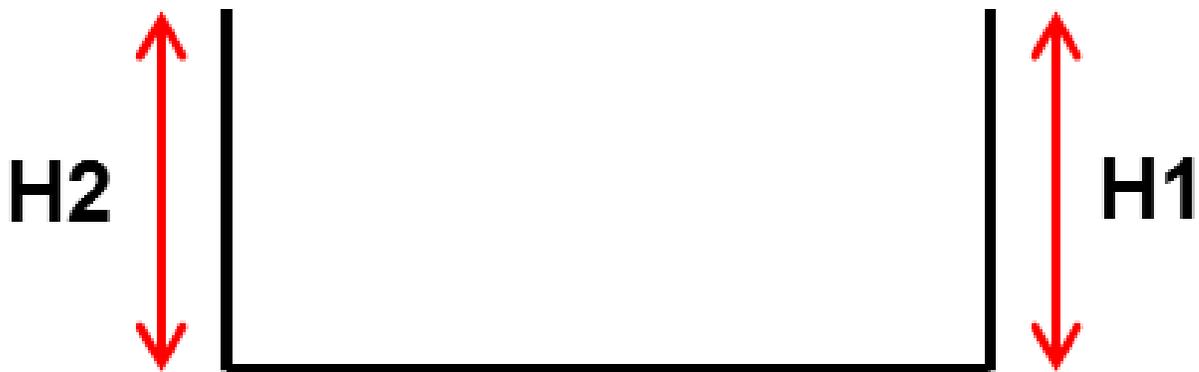


Figura 28: Tamaño de las alas del perfil canal.

Estas diferencias deben ser consideradas en el modelo numérico con el fin de lograr un buen ajuste numérico-experimental. Sin embargo, no se sabe en cuánto deben ser modificadas las propiedades del modelo numérico para que el ajuste sea adecuado. Es por esta razón que se decide resolver el problema utilizando el método de los algoritmos genéticos.

3.2 Ajuste mediante algoritmos genéticos paralelos

Al igual que en cualquier problema de optimización resuelto mediante algoritmos genéticos, se deben definir: la codificación de los individuos, funciones y probabilidades de reproducción, tamaño de población y función objetivo.

En este caso, se utilizan las mismas funciones y parámetros del problema de optimización de la ubicación de sensores, salvo por la codificación de los individuos, el tamaño de la población y la función objetivo.

Para desarrollar el algoritmo genético, se propone cambiar las siguientes propiedades: densidad, rigidez (módulo de *Young*) y dimensiones. Los cambios se realizan de la siguiente forma: se definen 3 densidades diferentes, una para los elementos alejados de

las líneas de intersección entre las superficies del modelo, y otras 2 para los elementos cercanos a cada una de estas líneas de intersección. Para los módulos de *Young* se realiza exactamente lo mismo. Por otro lado, se definen 5 dimensiones diferentes, correspondientes al largo, ancho, espesor y 2 alturas para cada una de las alas. Como resultado se obtienen un total de 11 propiedades diferentes. La Figura 29 muestra los cambios a realizar para que el modelo numérico se ajuste adecuadamente.

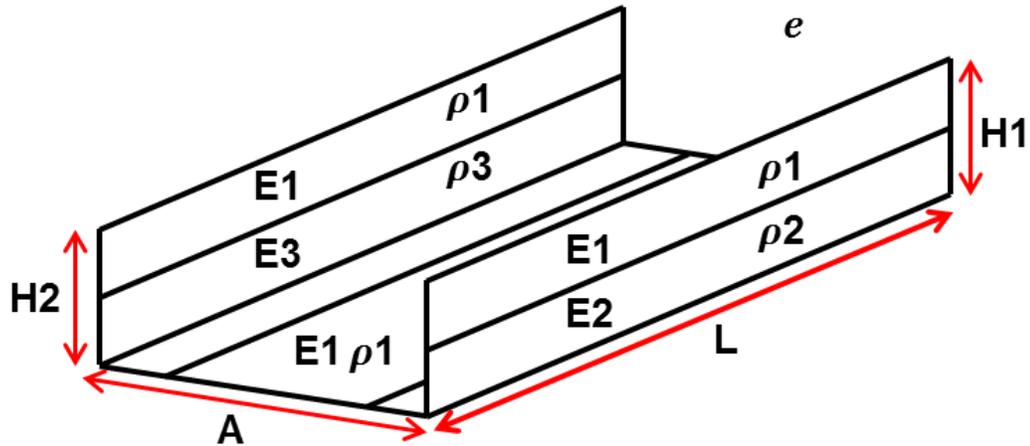


Figura 29: Nuevas características del modelo numérico.

3.2.1 Codificación

Para identificar a los individuos se utiliza la codificación no binaria, en la que cada elemento representa un porcentaje de una cierta propiedad del modelo numérico. Estas propiedades corresponden a las nombradas anteriormente, y se ordenan como lo muestra la Figura 30.

E1	E2	E3	ρ_1	ρ_2	ρ_3	L	A	H1	H2	e
----	----	----	----------	----------	----------	---	---	----	----	---

Figura 30: Codificación de individuos para ajuste numérico-experimental.

3.2.2 Función objetivo

La función objetivo considera la diferencia de los modos de vibración y las frecuencias naturales entre los modelos numéricos y los datos experimentales, además considera una penalización por cuanto cambian las propiedades. A continuación se presentan las funciones utilizadas para construir la función objetivo. ρ

La diferencia cuadrática entre los modos de vibración numérico y experimental M viene dada por:

$$M = \sum_{i=1}^{n_m} \left\| \frac{(\phi_{a,i} \cdot \phi_{e,i})^2}{(\phi_{a,i} \cdot \phi_{a,i})(\phi_{e,i} \cdot \phi_{e,i})} - 1 \right\| \quad (31)$$

En donde:

- n_m : número de modos de vibración.
- $\phi_{a,i}$: i -ésimo modo de vibración analítico o numérico.
- $\phi_{e,i}$: i -ésimo modo de vibración experimental.

La diferencia cuadrática entre frecuencias naturales numérica y experimental W viene dada por:

$$W = \sum_{i=1}^{n_m} \left\| \frac{\omega_{a,i}^2}{\omega_{e,i}^2} - 1 \right\| \quad (32)$$

En donde:

- n_m : número de modos de vibración.
- $\omega_{a,i}$: i -ésima frecuencia natural analítica o numérica.
- $\omega_{e,i}$: i -ésima frecuencia natural experimental.

La penalización por el cambio en las propiedades viene $J\{\beta\}$ dada por:

$$J\{\beta\} = \gamma \sum_{i=1}^{n_p} \|\beta_i - 1\| \quad (33)$$

En donde:

- n_p : número de propiedades.
- β_i : porcentaje de la propiedad i .

Finalmente, la función objetivo que se desea maximizar se construye como sigue:

$$F = N - \left(\frac{M}{M_0} + \frac{W}{W_0} + J\{\beta\} \right) \quad (34)$$

En donde:

- N : Número cualquiera.

- M_0 : Valor de referencia para la diferencia de los modos de vibración.
- W_0 : Valor de referencia para la diferencia de las frecuencias naturales.

Los parámetros de entrada de este algoritmo genético paralelo se establecen con los mismos valores mostrados en la Tabla 3.

3.3 Resultados del ajuste numérico-experimental

En esta sección se muestran los resultados del ajuste del modelo numérico y la validación del modelamiento de daño estructural. Esto es de suma importancia, ya que asegura que los modos de vibración están correctamente calculados, y por lo tanto, la función objetivo también.

El resultado de la optimización mediante algoritmos genéticos se muestra en la Tabla 9. Se observa que no hay cambios notorios en las propiedades, salvo por el tamaño de los elementos (H_1 en particular). Esto es de esperarse pues la diferencia de alturas entre las alas del perfil canal es notoria.

Tabla 9: Propiedades optimizadas del modelo numérico.

Propiedad	Nombre	Valor [%]
E	Módulos de <i>Young</i>	$E_1 = 1.06; E_2 = 0.90; E_3 = 1.00$
ρ	Densidades	$\rho_1 = 1.03; \rho_2 = 1.06; \rho_3 = 1.03$
L	Largo	1.06
A	Ancho	0.99
H	Altura de alas	$H_1 = 1.00; H_2 = 0.87$
e	Espesor	1.00

La Figura 31 muestra el MAC entre los modos de vibración numéricos y experimentales antes del ajuste. Se observa que los modos 4 y 5 no se correlacionan adecuadamente, pues poseen un valor de ajuste de un 60% aproximadamente.

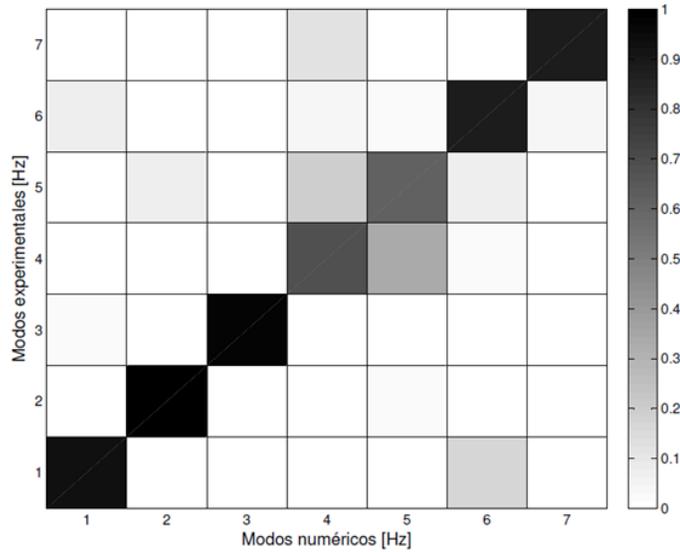


Figura 31: MAC numérico experimental del perfil canal sin daño antes del ajuste.

Luego de realizar el ajuste se obtiene el MAC dado por la Figura 32. En este caso se observa que todos los modos se correlacionan bien, pues sus valores de ajuste son superiores al 90%.

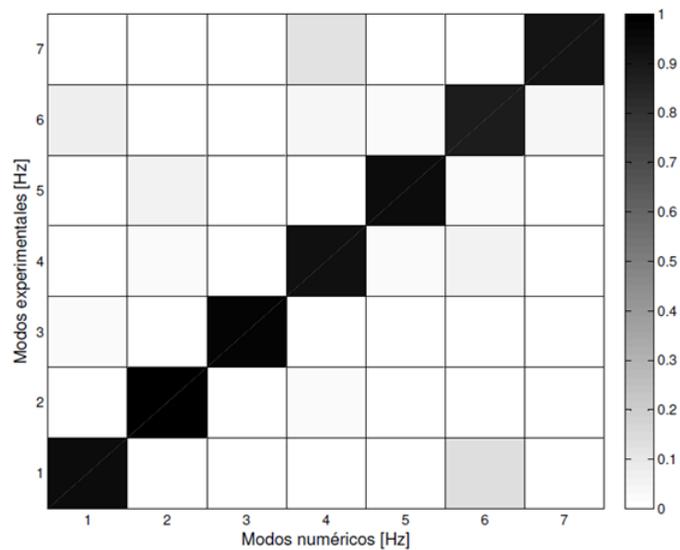


Figura 32: MAC numérico-experimental del perfil canal sin daño después del ajuste.

Para validar el modelamiento de daño estructural, se utilizan las propiedades óptimas determinadas anteriormente. Luego se calcula el MAC entre los modos de vibración numéricos y experimentales del perfil con daño, en este caso, una grieta entre los nodos 23 y 27. La Figura 33 muestra este MAC, se puede observar nuevamente que los valores de la diagonal son mayores al 90%, lo que indica una buena correlación numérico-experimental.

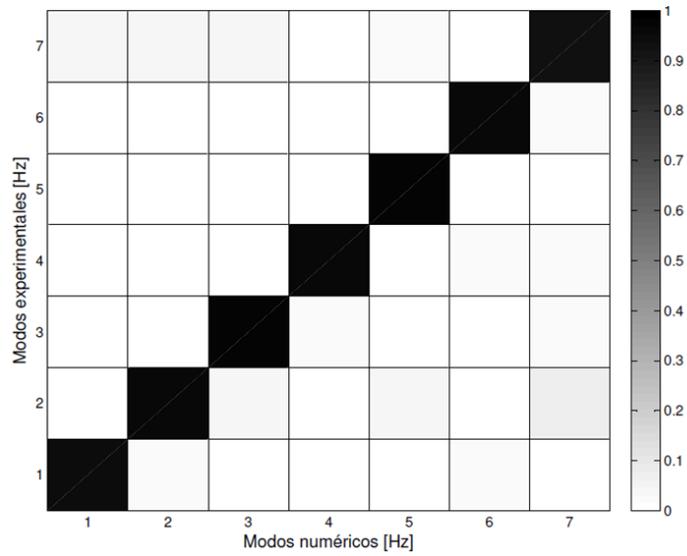


Figura 33: MAC numérico-experimental del perfil canal con daño entre los nodos 23 y 27.

Como conclusión, tanto el modelo numérico como el modelamiento de daño estructural se validan, es decir, los modos de vibración de ambos casos se ajustan bien a los datos experimentales. En la Figura 34 se muestran los 5 modos de vibración numéricos y experimentales luego del ajuste.

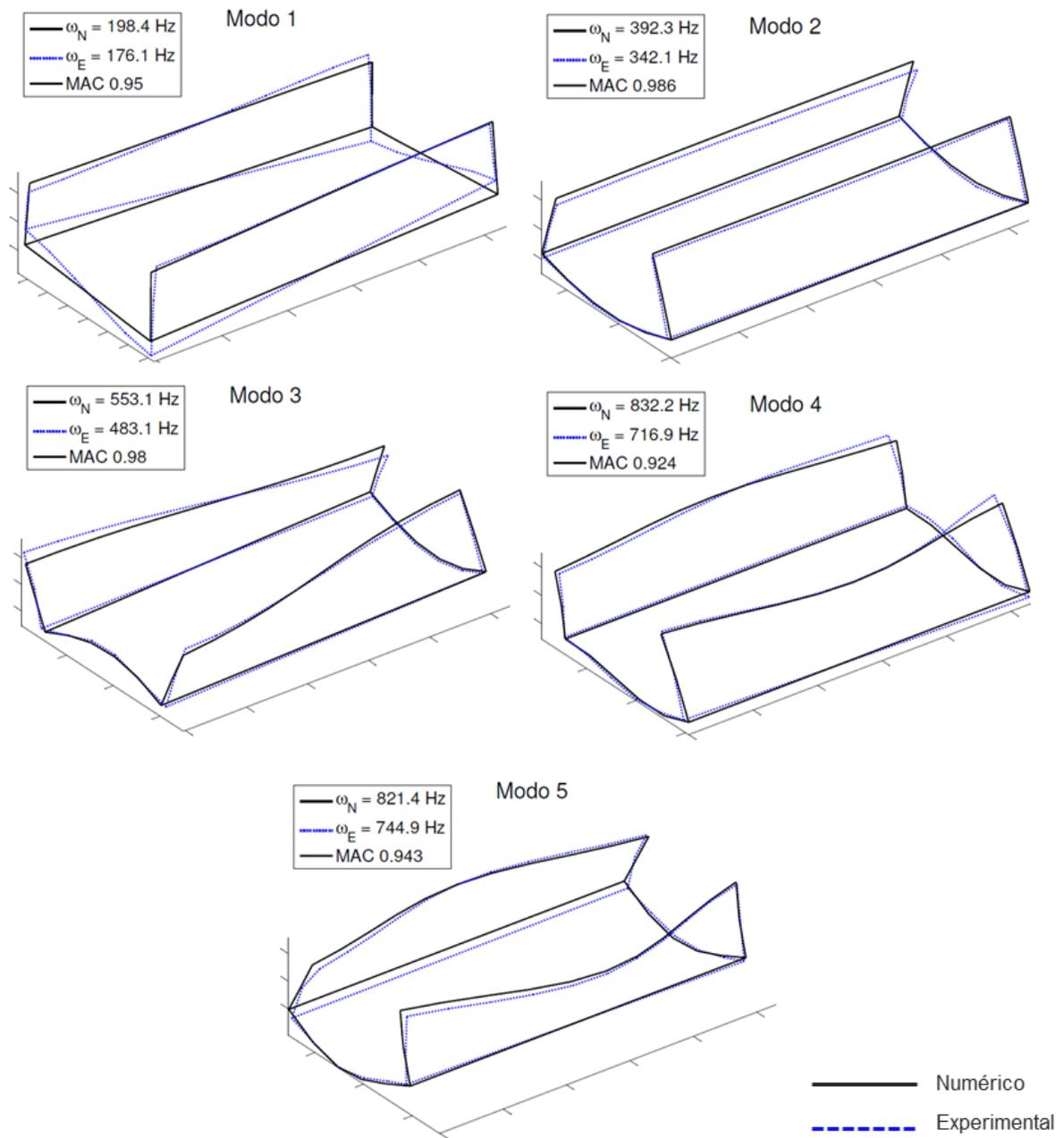


Figura 34: Comparación entre modos numéricos y experimentales luego del ajuste.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la optimización de la ubicación de sensores en el perfil canal. En primer lugar, se presentan las distribuciones óptimas de sensores obtenidas por los algoritmos genéticos secuenciales y paralelos. Luego se realiza una comparación entre las distribuciones óptima, uniforme y aleatoria para verificar si la primera distribución detecta mejor el daño que las demás.

4.1 Optimización con algoritmo genético secuencial

Como ya se había dicho, los algoritmos genéticos secuenciales tienen el problema de estancarse en óptimos locales cuando el problema a resolver es complejo o posee un espacio de soluciones extenso. Justamente, el problema de optimizar la ubicación de 27 sensores en los 132 grados de libertad del perfil canal posee un espacio de soluciones muy extenso, del orden de 10^{100} .

Lo anterior se aprecia al arrancar el algoritmo genético secuencial un cierto número de veces utilizando los mismos parámetros de entrada. La Tabla 10 muestra que para un tamaño de población 20, probabilidades de recombinación y mutación de 0.96 y 0.01 respectivamente, la función objetivo cambia.

Tabla 10: Valores óptimos de la función objetivo para $t_p = 20$, $p_c = 0.96$, $p_m = 0.01$.

Distribución	Función objetivo	Diferencia [%]
u_1	43.45	—
u_2	34.89	19.70
u_3	35.63	18.00
u_4	34.37	20.90
u_5	36.13	16.85
u_6	34.16	21.38
u_7	37.29	14.18
u_8	29.08	33.07
u_9	35.21	18.96
u_{10}	30.00	30.96

Tomando como referencia el valor de la función objetivo de u_1 , se puede notar que existe una gran variabilidad en los resultados con una diferencia mínima del 14.18%, hasta una diferencia máxima del 33.07%.

Como conclusión, el algoritmo genético secuencial no proporciona la confianza aceptable para encontrar al individuo óptimo de este problema. Sin embargo, se puede realizar un análisis de sensibilidad para determinar cuáles son los mejores parámetros de entrada y utilizarlos en un algoritmo genético paralelo.

4.2 Sensibilidad de los parámetros de entrada del algoritmo genético

La Figura 35 muestra la sensibilidad de la función objetivo al tamaño de la población. En ésta, se observa que el valor más alto de la función objetivo se obtiene cuando el tamaño de la población es de 20 individuos. Este resultado es ventajoso, pues mientras más pequeño es el número de individuos de una población más rápido es el tiempo de cálculo.

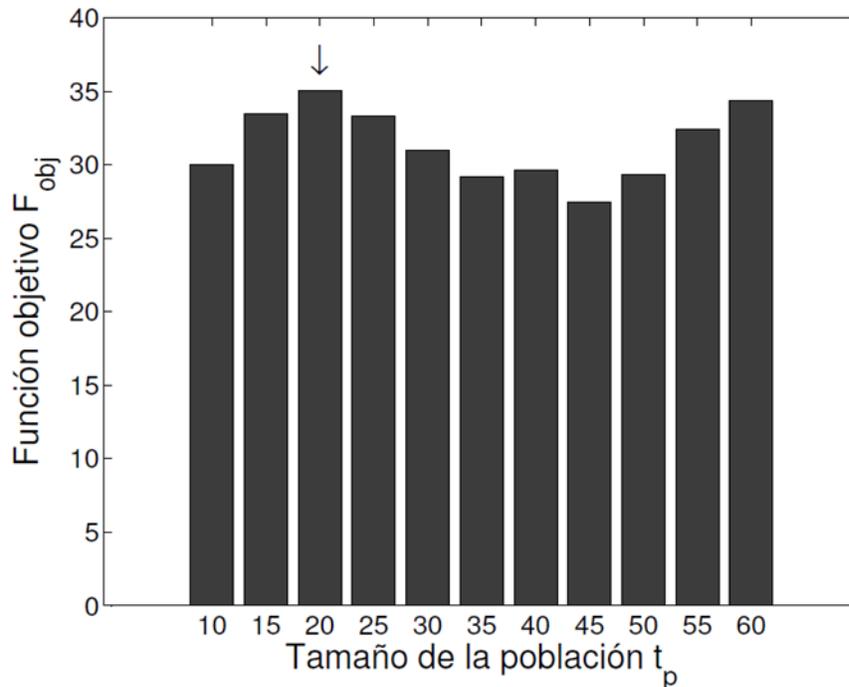


Figura 35: Sensibilidad de la función objetivo al tamaño de la población.

Por otro lado, la Figura 36 muestra la sensibilidad de la función objetivo a las probabilidades de recombinación p_c y mutación p_m . En ésta, se observa que el valor más alto de la función objetivo es cuando las probabilidades de recombinación y mutación son 0.99 y 0.01 respectivamente. Este resultado confirma el hecho de que el proceso de recombinación es fundamental para que el algoritmo genético explore soluciones cercanas a algún individuo con un alto valor de la función objetivo.

El bajo valor obtenido para la probabilidad de mutación es adecuado, pues el algoritmo también necesita explorar soluciones diferentes a las de la población en particular, evitando el problema del estancamiento en óptimos locales.

Con estos resultados, se arranca el algoritmo genético paralelo. El objetivo es comparar los resultados de éste con los del algoritmo genético secuencial, y así verificar si se soluciona el problema del estancamiento en óptimos locales.

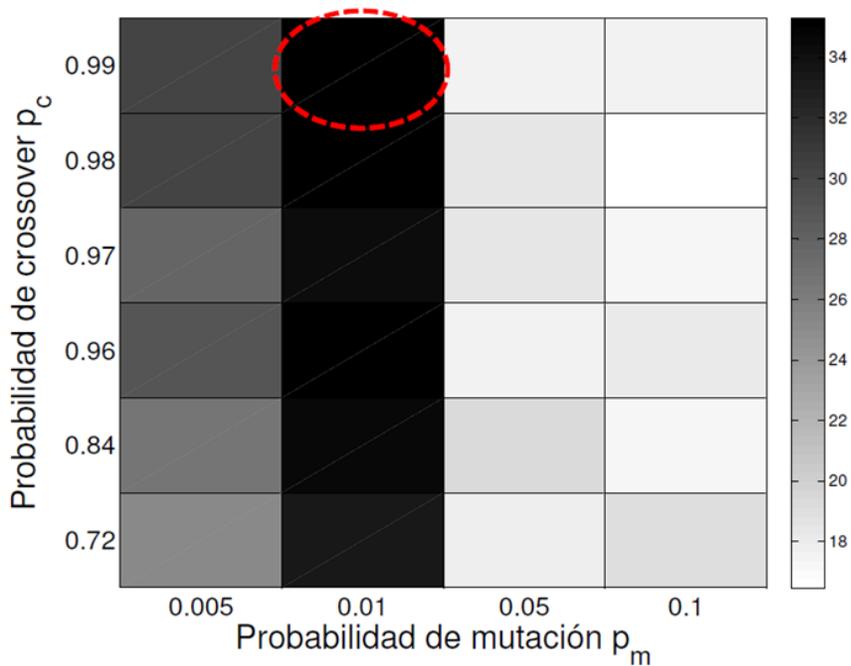


Figura 36: Sensibilidad de la función objetivo a las probabilidades de recombinación.

4.3 Optimización con algoritmo genético paralelo

Como ya se había dicho, los algoritmos genéticos paralelos incrementan la velocidad de cálculo, y además, disminuyen el problema de estancamiento en óptimos locales. De hecho, en la Figura 37 se observa como los diferentes algoritmos ayudan a sus vecinos a salir del estancamiento.

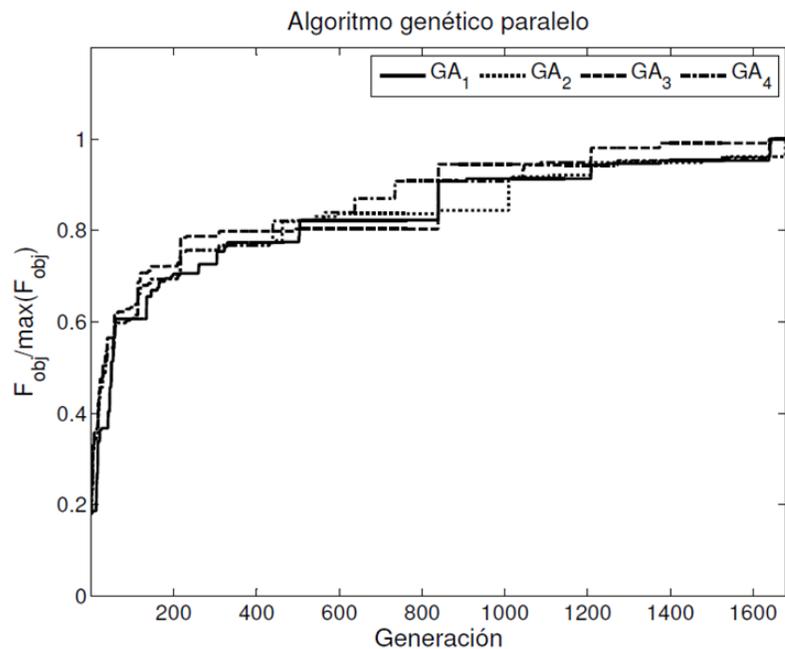


Figura 37: Evolución de los 4 algoritmos genéticos.

El resultado del algoritmo genético paralelo, es un individuo cuya función objetivo alcanza los 59.08 puntos, mucho mayor que el individuo con mayor ajuste en el caso de los algoritmos genéticos secuenciales, con 43.45 puntos.

La Figura 38 muestra la ubicación óptima de los sensores, correspondientes a los siguientes grados de libertad: 1: 11, 56, 66, 67, 77, 121: 132.

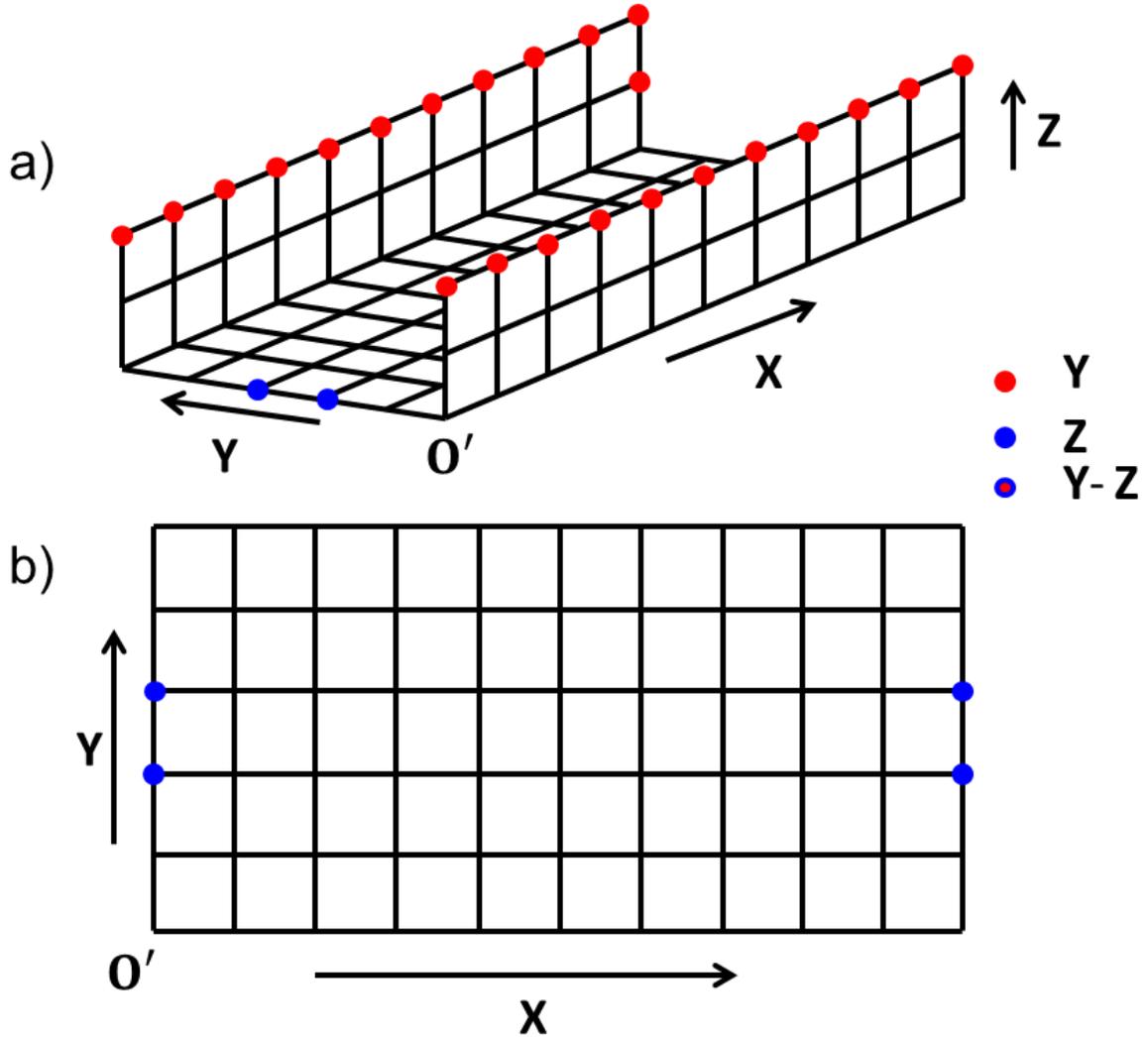


Figura 38: Ubicación óptima de los sensores. a) vista en perspectiva, b) vista de la superficie II.

4.4 Identificación de daño

La identificación de daño se realiza a través del método de la aproximación lineal con máxima entropía. Para el proceso de validación experimental, se estudian los 4 casos de daño mostrados en la Figura 27 utilizando 3 distribuciones: la óptima, la uniforme (ver Figura 39) y una aleatoria (ver Figura 40).

La distribución uniforme considera sensores ubicados en los siguientes grados de libertad: 1: 11, 34, 44, 56, 100, 110, 122: 132.

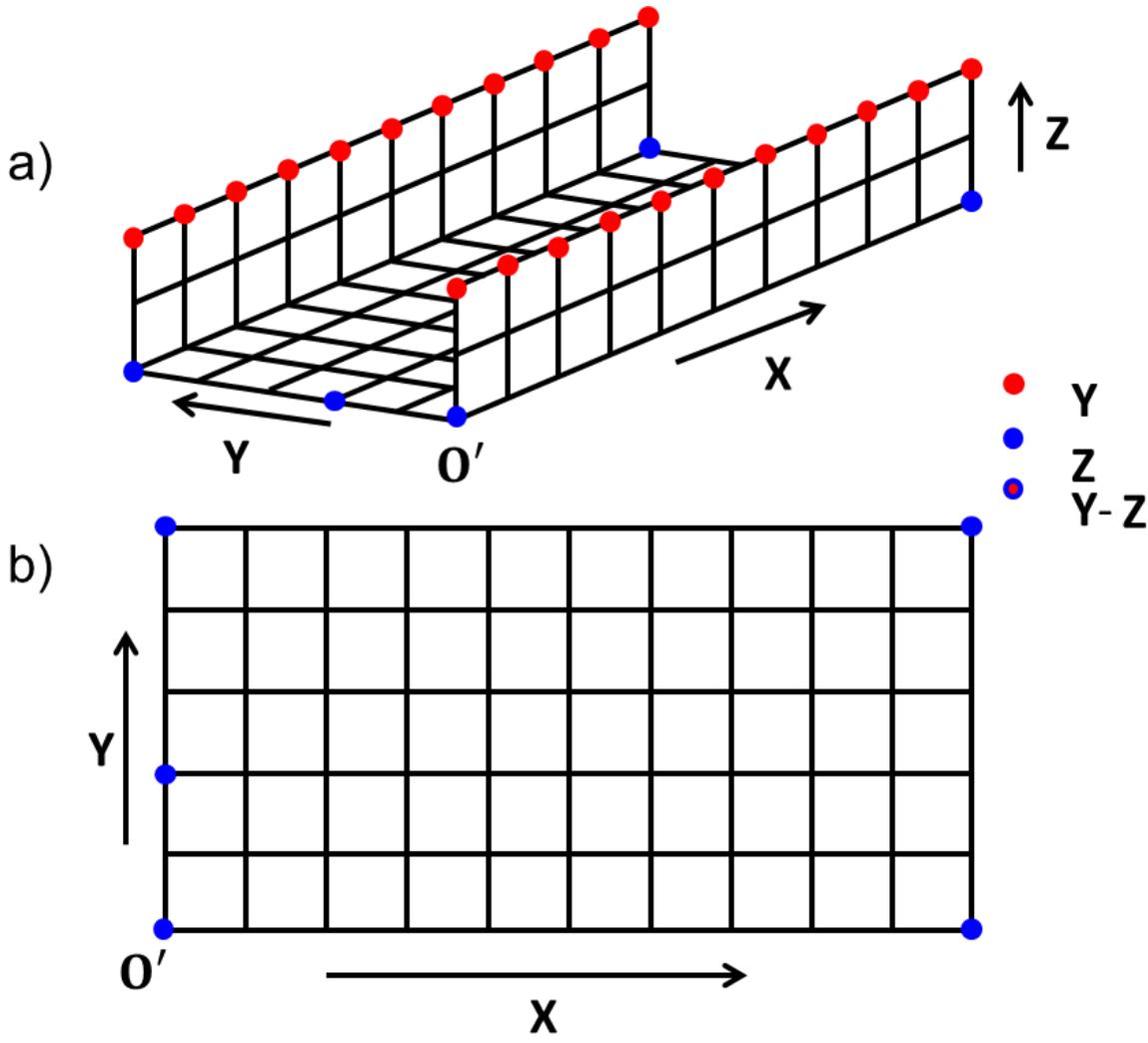


Figura 39: Distribución de sensores uniforme. a) vista en perspectiva, b) vista de la superficie II.

En cambio, la distribución aleatoria considera sensores ubicados en los siguientes grados de libertad: 3: 7, 9, 10, 12, 34, 45, 55, 56, 66, 67, 77, 78, 88, 89, 100, 121, 125: 131.

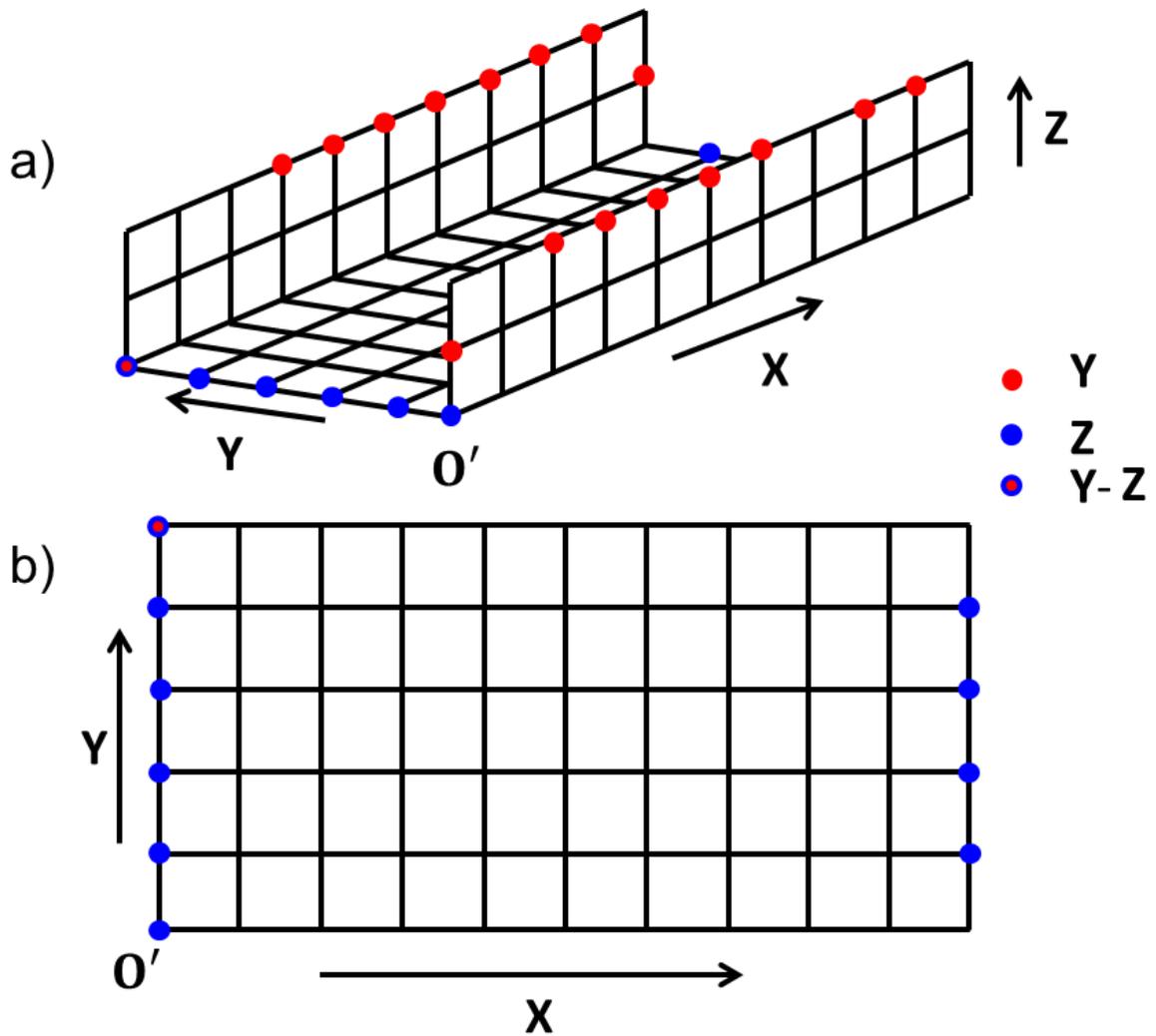


Figura 40: Distribución aleatoria de sensores. a) vista en perspectiva, b) vista de la superficie II.

Finalmente, los resultados de la identificación de daño para los 4 casos de estudio se muestran en las Figura 41, 42, 43, 44. Además la Tabla 11 y la Figura 45, presentan una comparación entre los escenarios de daño reales versus los identificados por cada distribución de sensores.

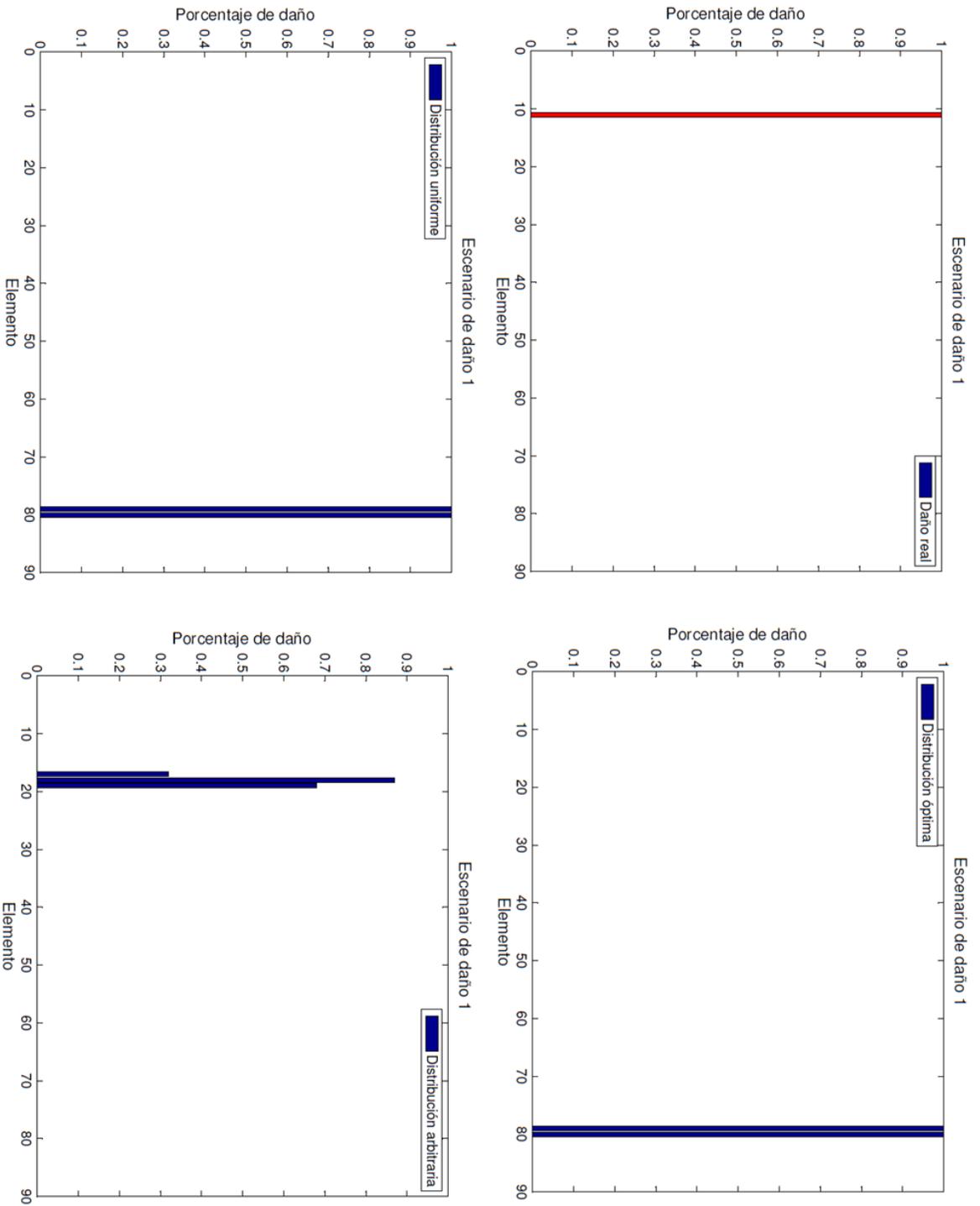


Figura 41 : Identificación de daño para el primer caso.

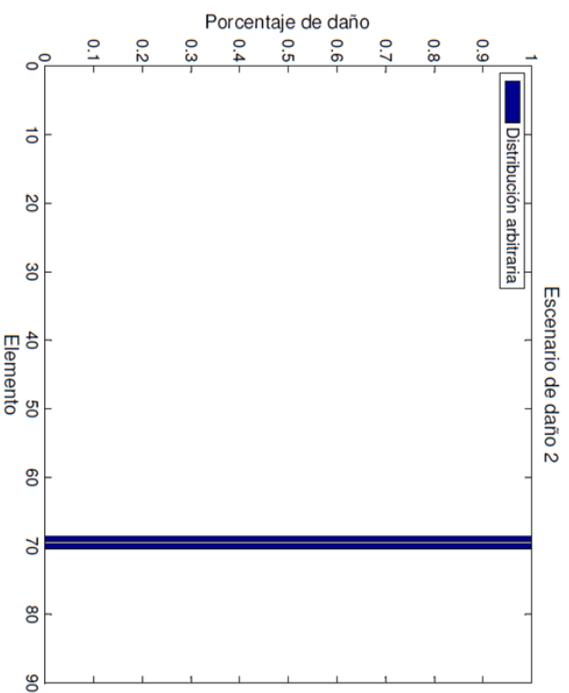
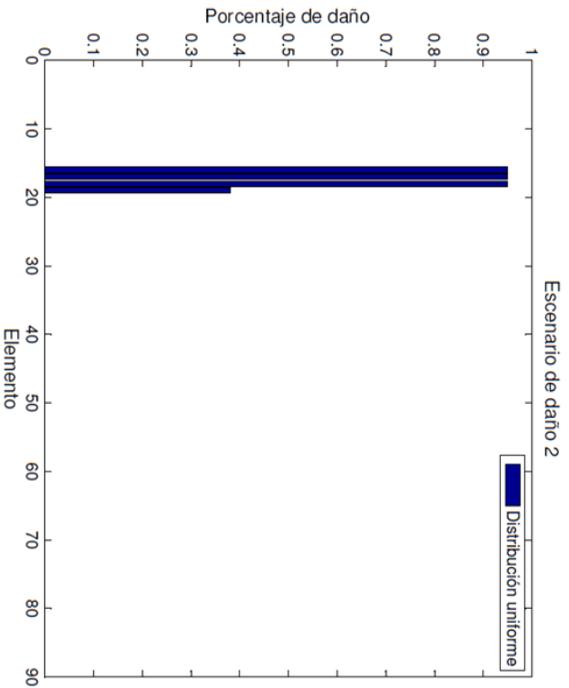
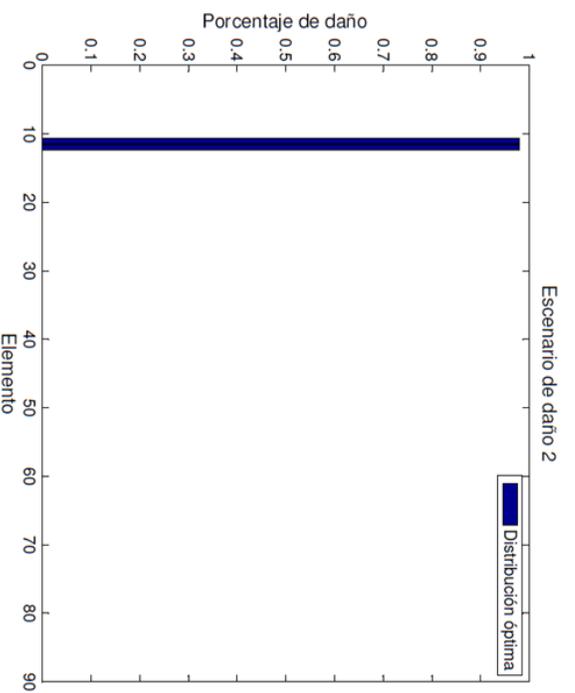
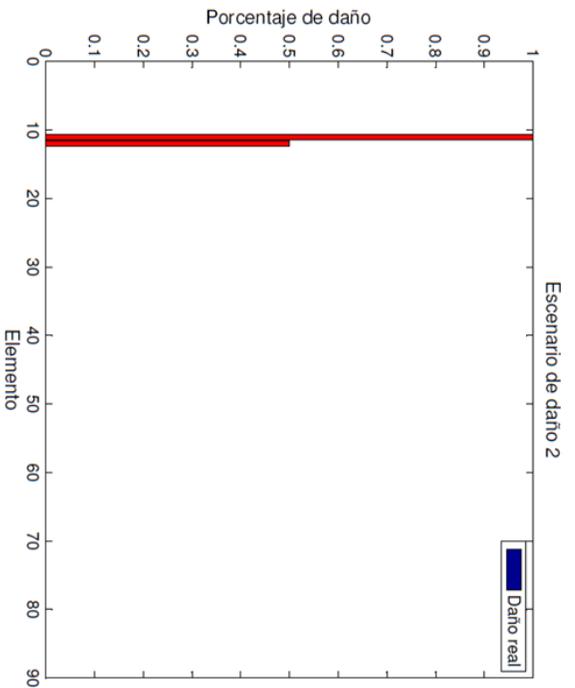


Figura 42: Identificación de daño para el segundo caso.

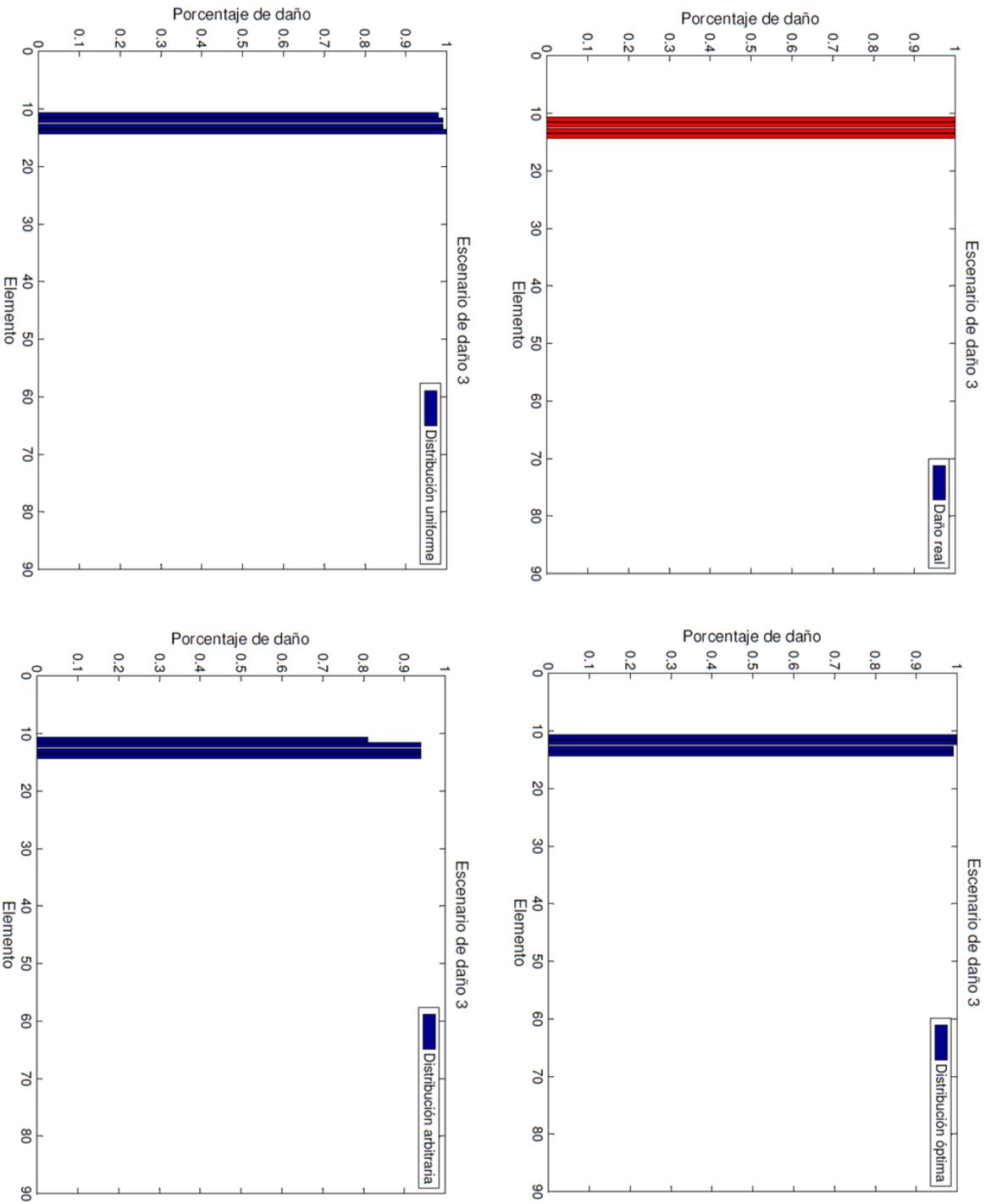


Figura 43: Identificación de daño para el tercer caso.

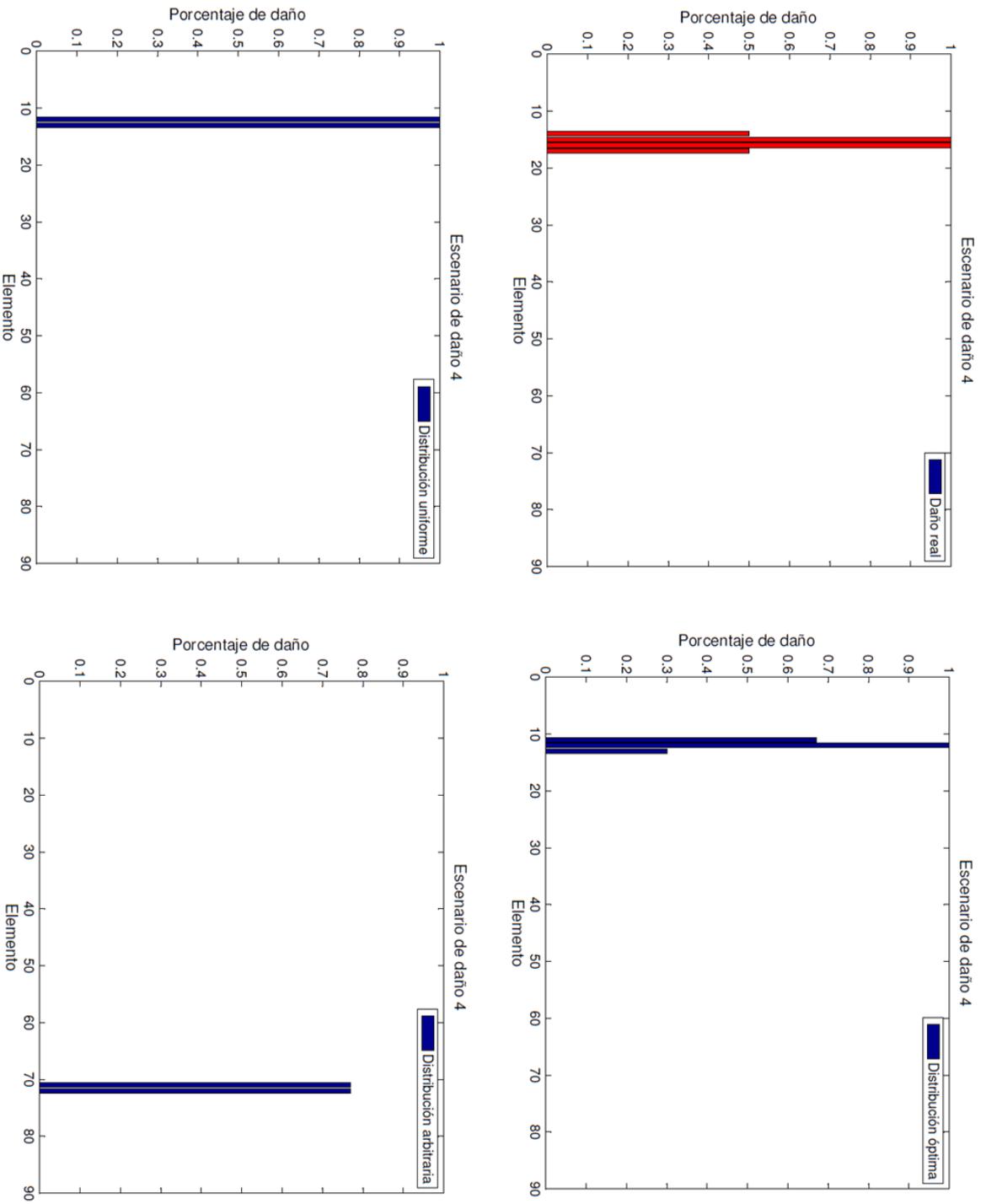


Figura 44: Identificación de daño para el cuarto caso.

Tabla 11: Cuadro comparativo entre los escenarios de daño reales y los identificados las distribuciones.

Escenario	Daño real		Distribución	Daño identificado	
	Ubicación	Daño		Ubicación	Daño
1	11	1	Óptima	79; 80	1; 1
			Uniforme	79; 80	1; 1
			Aleatoria	17; 18; 19	0.32; 0.87; 0.68
2	11; 12	1; 0.5	Óptima	11, 12	0.98, 0.98
			Uniforme	16; 17; 18; 19	0.95; 0.95; 0.95; 0.38
			Aleatoria	69; 70	1, 1
3	11; 12; 13; 14	1; 1; 1; 1	Óptima	11; 12; 13; 14	1; 1; 0.99; 0.99
			Uniforme	11; 12; 13; 14	0.98; 0.99; 0.99; 1
			Aleatoria	11; 12; 13; 14	0.81; 0.94; 0.94; 0.94
4	14; 15; 16; 17	0.5; 1; 1; 0.5	Óptima	11; 12; 13	0.67; 1; 0.3
			Uniforme	12; 13	1; 1
			Aleatoria	71; 72	0.77; 0.77

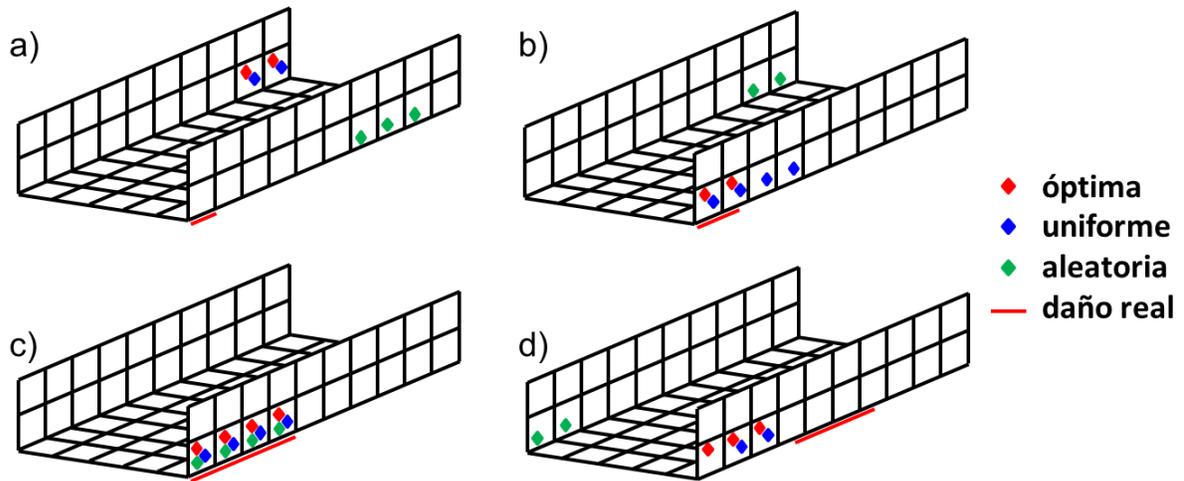


Figura 45: Comparación gráfica entre escenarios de daño reales y los identificados por las distribuciones. a) escenario 1, b) escenario 2, c) escenario 3, d) escenario 4.

CAPÍTULO 5 DISCUSIONES

5.1 Ajuste numérico-experimental

La Figura 31 muestra el MAC entre los modos numéricos y experimentales del perfil canal sin daño antes del ajuste. En esta figura se observa que 5 modos numéricos se correlacionan bastante bien, es decir, sus valores MAC son mayores al 90%. Sin embargo, los modos numéricos 4 y 5 no se correlacionan bien, pues sus valores MAC son menores al 85% (valor definido como aceptable).

Luego del ajuste (ver Figura 32), se observa una notoria mejoría en la correlación de los modos 4 y 5 numéricos, es más, los otros modos también mejoran su correlación en una cierta cantidad. Este resultado es esperable, pues en el desarrollo inicial del modelo numérico no se tomaron las precauciones para que la correlación inicial fuese adecuada.

Por otro lado, la Figura 33 muestra la correlación entre los modos numéricos, luego del ajuste, y los modos experimentales para el escenario de daño 3. En esta figura se observa que los modos numéricos se correlacionan bastante bien ya que sus valores MAC son superiores al 90% en todos los casos.

Como resultado, el modelo numérico del perfil canal y el modelamiento del daño se validan. Con esto se garantiza que los modos numéricos son una fiel representación de la realidad, por lo que se puede hacer uso de ellos para encontrar la distribución óptima de sensores mediante algoritmos genéticos.

5.2 Algoritmos genéticos

En primer lugar se puede notar que los resultados del algoritmo genético secuencial (ver Tabla 10) no poseen la confianza necesaria como para encontrar la distribución óptima de sensores en el perfil canal. De hecho, en la Tabla 10 se evidencia que al arrancar varias veces el algoritmo, el valor óptimo cambia considerablemente llegando inclusive a un 33% de variación. Esta variación de los resultados tiene su fundamento en que el algoritmo genético secuencial se ve afectado por los individuos que conforman su población inicial, es decir, existe una alta probabilidad de que el algoritmo se estanque en una solución si la población inicial contiene alguno de los óptimos locales o un individuo cercano a él.

Para solucionar el problema del estancamiento en óptimos locales, se utiliza un algoritmo genético paralelo. De hecho, este algoritmo muestra una mejora notable en la búsqueda del óptimo, encontrando un individuo cuya función objetivo alcanza los 59.08 puntos versus los 43.45 puntos del algoritmo genético secuencial. Además, este resultado es confiable, ya que al arrancar varias veces el algoritmo genético paralelo se obtiene exactamente lo mismo.

5.3 Detección de daño

En este trabajo, se prueban 4 escenarios de daño diferentes (ver Figura 27) con la siguiente particularidad: 3 de ellos presentan una dificultad inherente para ser detectados.

En el primer escenario de daño la dificultad está en el tamaño de la grieta, ésta sólo tiene el largo de 1 elemento del modelo numérico por lo que se espera que la sensibilidad de los modos de vibración al daño no sea importante. En el segundo escenario de daño la grieta abarca 1.5 elementos, es decir, un elemento con daño completo y otro con un 50%. En este caso, la dificultad está en que el modelo de elementos finitos no puede modelar esta grieta adecuadamente. Por lo tanto se espera que el método de detección de daño interpole entre los escenarios con una grieta entre 1 y 2 elementos de largo. Para el cuarto escenario de daño la dificultad es doble, por un lado la sensibilidad de los modos de vibración al daño es baja ya que la grieta se encuentra entre ambos extremos, y por otro, el método de detección de daño debe interpolar.

La Tabla 11 muestra que la detección de daño en el primer escenario no es correcta para ninguna de las distribuciones de sensores, de hecho el método de detección confunde la posición del daño. La Figura 45 muestra que este escenario de daño se confunde con una grieta ubicada en la intersección entre las superficies *II* y *III*, para la distribución óptima y uniforme, y una grieta en la intersección entre las superficies *I* y *II* de mayor tamaño, para la distribución aleatoria. También, se observa que la detección de daño en el cuarto escenario no es correcta para ninguna de las distribuciones de sensores. Al igual que antes, el método de detección confunde la posición de la grieta.

Por otro lado, la Tabla 11 muestra que la detección de daño en el segundo escenario es bastante buena para la distribución óptima ya que logra cuantificar el daño correctamente en el elemento 11, sin embargo, sobre estima el daño en el elemento 12. En cambio, la detección de daño de la distribución uniforme y arbitraria no son aceptables ya que ambas confunden la grieta con una de mayor tamaño y otra en un lugar diferente, respectivamente. En este caso se concluye que la distribución óptima es mejor que la distribución uniforme y arbitraria.

Además, la Tabla 11 muestra que la detección de daño en el tercer escenario es precisa para las distribuciones de sensores óptima y uniforme, salvo por una leve diferencia en el elemento 11. Aquí se puede notar que la distribución óptima es mejor que las distribuciones uniforme y arbitraria. Sin embargo, la diferencia es significativa sólo cuando se compara con la distribución arbitraria.

Con lo anterior, se puede decir que el método de detección de daño funciona bien para escenarios de daño moderados, es decir, existe una grieta de tamaño medio (entre 25 y 50 [mm] de largo) ubicada en un extremo del perfil canal, y escenarios de gran daño, es decir, existe una grieta de gran tamaño ubicada en un extremo del perfil canal.

5.4 Distribución óptima de sensores

La distribución óptima de sensores muestra un resultado interesante, pues la ubicación de sus sensores es similar a la de la distribución uniforme (ver Figura 38 y Figura 39). De hecho el valor de la función objetivo para la distribución uniforme alcanza los 52.69 puntos, con tan sólo 6 puntos de diferencia respecto de la distribución óptima.

Considerando los resultados de la Tabla 11 para el segundo y tercer escenario, optimizar la ubicación de los sensores, en esta estructura en particular, produce una mejora significativa en la detección cuando el daño es moderado. En cambio, cuando el daño es alto no se produce una diferencia significativa en la detección, pues los resultados obtenidos con la distribución uniforme son casi idénticos. Por lo tanto, optimizar la ubicación de sensores en el perfil canal es conveniente sólo cuando se trata de escenarios de daño de carácter moderado.

CONCLUSIONES

Se desarrolla el modelo numérico del perfil canal para determinar sus modos de vibración, los que son utilizados por el algoritmo genético. Este modelo se valida utilizando los modos de vibración y frecuencias naturales experimentales. El ajuste realizado da buenos resultados, lo que se corrobora con valores de la diagonal del MAC sobre el 90% para los 5 modos de vibración en estudio.

Por otro lado, se definen 71 escenarios de daño, los que consideran grietas con tamaños de 1 a 5 elementos. En este caso, se utilizan los valores del ajuste del perfil canal sin daño para validar el modelamiento de daño. Los resultados son satisfactorios, nuevamente con valores de la diagonal del MAC sobre el 90% para los 5 modos de vibración en estudio.

Además, se desarrolla un algoritmo genético secuencial y uno paralelo para optimizar la ubicación de sensores en el perfil canal. El primer algoritmo se utiliza para determinar los mejores parámetros de entrada, en este caso el tamaño de la población t_p , y las de probabilidades de recombinación p_c y mutación p_m . El segundo se utiliza para determinar la ubicación óptima de los sensores, pues da mejores resultados que el algoritmo genético secuencial. Ambos algoritmos genéticos utilizan la sensibilidad de los modos de vibración a la posición del daño en la estructura para posicionar los sensores.

Los resultados de la Tabla 11 muestran que si el escenario de daño es de carácter moderado, es conveniente optimizar la ubicación de los sensores. Sin embargo, si el escenario de daño es de carácter alto, basta con utilizar la distribución uniforme para detectar daño.

Por otro lado, la detección de daño en los restantes escenarios no es correcta para ninguna distribución de sensores. Esto se explica por la inherente dificultad de estos escenarios para ser detectados, ya sea por el tamaño del daño o por la baja sensibilidad de los modos de vibración.

Finalmente, es posible encontrar una distribución óptima de sensores en una estructura utilizando la sensibilidad de los modos de vibración al daño, sin embargo sólo es conveniente cuando el escenario de daño es de carácter moderado. Se sugiere resolver el problema completo de optimización de sensores, es decir, considerando el número y la ubicación de los sensores en la estructura, para encontrar resultados diferentes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Fish and T. Belytschko, *A First Course in Finite Elements*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [2] V. Meruane, *Dinámica estructural, Apuntes para el curso ME706*. .
- [3] D. E. Adams, *Health Monitoring of Structural Materials and Components*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [4] V. Meruane and W. Heylen, “Damage Detection with Parallel Genetic Algorithms and Operational Modes,” *Struct. Heal. Monit.*, vol. 9, no. 6, pp. 481–496, Mar. 2010.
- [5] V. Meruane and W. Heylen, “An hybrid real genetic algorithm to detect structural damage using modal properties,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 25, no. 5, pp. 1559–1573, Jul. 2011.
- [6] K. Worden and a. . Burrows, “Optimal sensor placement for fault detection,” *Eng. Struct.*, vol. 23, no. 8, pp. 885–901, Aug. 2001.
- [7] Brüel & Kjær, “Product Data Power Amplifier - Type 2706.” pp. 1–4.
- [8] A. Note, “The Fundamentals of,” pp. 1–56.
- [9] V. Meruane and A. Ortiz, “Structural damage assessment using linear approximation with maximum entropy and transmissibility data,” 2013.

ANEXO A – MODELO NUMÉRICO PERFIL CANAL

```
clear all;
close all;
warning off all;
more off
echo off
clc;

load uw_final
uw=uw_final;

%Modelo en elementos finitos
nn=[10 5 2]; %número de divisiones en cada eje
nd=nn+1; %número de nodos por línea en cada eje
nt=nd(1)*(nd(2)+2*nd(3)-2); %número total de nodos

%Datos ajustados
E1=uw(1)*2.1e11; E2=uw(2)*2.1e11; E3=uw(3)*2.1e11;
rho1=uw(4)*7800; rho2=uw(5)*7800; rho3=uw(6)*7800;
L=uw(7)*0.25; %largo del perfil [m]
A=uw(8)*125e-3; %ancho del perfil [m]
H1=uw(9)*50e-3; %altura de alas [m]
H2=uw(10)*50e-3; %altura de alas [m]
esp=uw(11)*3e-3; %espesor [m]

%Dimensiones del elemento
l=[L/nn(1) A/nn(2) H1/nn(3) H2/nn(3)]; %l=[lx ly lz1 lz1]

%Definición del material
nu=0.3; %coeficiente de Poisson
model.pl=[1 fe_mat('m_elastic','SI',1) E1 nu rho1;
          2 fe_mat('m_elastic','SI',1) E2 nu rho2;
          3 fe_mat('m_elastic','SI',1) E3 nu rho3];

%Definición de las propiedades del elemento
model.il=[1 fe_mat('p_shell','SI',1) 0 1 0 esp 0];

%Creación de los nodos
model.Node=[];
for k=1:nd(3) %superficie 1
    for i=1:nd(1)
        model.Node=[model.Node; (nd(1)*(k-1)+i) 0 0 0 l(1)*(i-1) 0 H1-l(3)*(k-1)];
    end
end
nr=[nd(1)*nd(3) nd(1)*(nd(2)+nd(3)-1)]; %nodos de referencia

for j=2:nd(2) %superficie 2
    for i=1:nd(1)
        model.Node=[model.Node; nr(1)+(nd(1)*(j-2)+i) 0 0 0 l(1)*(i-1)
l(2)*(j-1) 0];
    end
end
```

```

for k=2:nd(3) %superficie 3
    for i=1:nd(1)
        model.Node=[model.Node; nr(2)+(nd(1)*(k-2)+i) 0 0 0 1(1)*(i-1) A
1(4)*(k-1)];
    end
end

%Creación de los elementos
model.Elt=[Inf abs('quad4') 0];
for j=1:nn(2)+2*nn(3)
    for i=1:nn(1)
        model.Elt=[model.Elt; (nd(1)*(j-1)+i) (nd(1)*(j-1)+i+1)
(nd(1)*(j)+i+1) (nd(1)*(j)+i) 1 1 (nn(1)*(j-1)+i)];
    end
end

%Escenarios de daño
respaldo=model; %guardar modelo sin daño
[dmgN,dmgElt,pos]=damage();
[row,col]=size(dmgN);
Phi=[]; w=[];
[y,z]=cambiar_gdl();
for d=1:row
    %Identificar nodos de la grieta
    cn=find(dmgN(d,:) ~= 0);

    %Primer escenario
    if d == 1
        model=respaldo;

    %Posición de la grieta
    elseif pos(d,1) == 1 %grieta a la izquierda
        %Agregar nuevos nodos
        for i=1:length(cn)-1
            r=cn(i); c=2:7;
            model.Node=[model.Node; nt+i model.Node(r,c)];
        end

        %Cambiar conectividad
        f=[find(model.Elt(:,1) == cn(1));
find(model.Elt(:,2) == cn(length(cn)))]; c=7;

        for i=1:length(cn)-2
            model.Elt(f(1)+(i-1),2)=model.Node(nt+(i+1),1);
        end
        for i=1:length(cn)-1
            model.Elt(f(2)-(i-1),1)=model.Node(length(model.Node)-(i-1),1);
        end

    elseif pos(d,2) == 1 %grieta a la derecha
        %Agregar nuevos nodos
        for i=1:length(cn)-1
            r=cn(i+1); c=2:7;
            model.Node=[model.Node; nt+i model.Node(r,c)];
        end
    end
end

```

```

end

%Cambiar conectividad
f=[find(model.Elt(:,1) == cn(1));
   find(model.Elt(:,2) == cn(length(cn)))];

for i=1:length(cn)-1
    model.Elt(f(1)+(i-1),2)=model.Node(nt+i,1);
end
for i=1:length(cn)-2
    model.Elt(f(2)-(i-1),1)=model.Node(length(model.Node)-(i),1);
end

else
%Agregar nuevos nodos
for i=1:length(cn)-2
    r=cn(i+1); c=2:7;
    model.Node=[model.Node; nt+i model.Node(r,c)];
end

%Cambiar conectividad
f=[find(model.Elt(:,1) == cn(1));
   find(model.Elt(:,2) == cn(length(cn)))]; c=7;

for i=1:length(cn)-2
    model.Elt(f(1)+(i-1),2)=model.Node(nt+i,1);
    model.Elt(f(2)-(i-1),1)=model.Node(length(model.Node)-(i-1),1);
end
end

%Construir matrices de rigidez y masa escenario d
[m0,k0,mdof0] = fe_mk(model,'Options',[ ]);

%Determinar modos de vibración escenario d
def0 = fe_eig({m0,k0,mdof0},[5 25 1e3]);

%Guardar modos de vibración y frecuencias naturales escenario d
Phi_c=def0.def(1:6*size(model.Node,1),:); %todos los gdl's
Phi(:,:,d)=def0.def(1:6*110,:); %660 gdl's
w(:,d)=def0.data;

%Cambiar grados de libertad
jy=find(y(:,1,d) ~= 0);
jz=find(z(:,1,d) ~= 0);
if ~isempty(jy) %grieta esta entre los nodos 78 y 88
    Phi(6*y(jy,1,d)-4, :, d)=Phi_c(6*y(jy,2,d)-4, :);
elseif ~isempty(jz) %grieta esta entre los nodos 23 y 33
    Phi(6*z(jz,1,d)-3, :, d)=Phi_c(6*z(jz,2,d)-3, :);
end

%Graficar modos
cf=feplot;
cf.model=model;
cf=feplot(model,def0);

```

```
%Reiniciar modelo para el escenario (d+1)
model=respaldo;
end
```

ANEXO B – IDENTIFICACIÓN DE DAÑO

```
clear all
close all
clc

load Phi
load w
load u

modos=1:5;

%u arbitrario
u1=[3,4,5,6,7,9,10,12,34,45,55,56,66,67,77,78,88,89,100,121,125,126,127,128,129,130,131];

%u uniforme
u2=[1:11 34 44 56 100 110 122:132];

%u óptimo
u3=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,56,66,67,77,121,122,123,124,125,126,127,128,129,130,131,132];

%Modos de referencia
Ref=Phi(:,7:25,1);
wref=w(7:25,1);

%Parear modos respecto a Ref
par=[]; MAC=[];
for d=1:71

[Ref,Phi(:,7:25,d),wref,w(7:25,d),par(:, :, d)]=mode_pairs(Ref,wref,Phi(:,7:25,d),w(7:25,d),0);
MAC(:, :, d)=mac(Ref(:,modos),Phi(:,modos,d));
end

%Escalar modos respecto a Ref
for d=1:71
for i=1:size(Ref,2)
Phi(:,i+6,d)=msf(Ref(:,i),Phi(:,i+6,d))*Phi(:,i+6,d);
end
end

%Modos con 132 gdl's
Phix=Phi(1:6:660,modos+6,:);
Phiy=Phi(2:6:660,modos+6,:);
Phiz=Phi(3:6:660,modos+6,:);
P=[Phiy(1:33, :, :); Phiz(23:88, :, :); Phiy(78:110, :, :)];

for i=2:71
for j=modos
P(:,j,i)=msf(P(:,j,1),P(:,j,i))*P(:,j,i);
end
end
```

```

%%% BASE DE DATOS %%%
b=base2();
[~,dmgElt,~]=damage();

%Parametrización del daño para cada escenario
Xi=[];
for d=1:length(b)
    Xi(:,d)=dmgElt(b(d),:);
end

%Modos de vibración para cada escenario
for d=1:length(b)
    diff1=(P(u1,:,b(d))-P(u1,:,1)).^2; Yi1(:,d)=[sum(diff1')'];
    diff2=(P(u2,:,b(d))-P(u2,:,1)).^2; Yi2(:,d)=[sum(diff2')'];
    diff3=(P(u3,:,b(d))-P(u3,:,1)).^2; Yi3(:,d)=[sum(diff3')'];
end

%%% DETECCION DE DAÑO %%%
[gdle_sd]=gdl_medidos_sd();

%Escenario de daño X
[Refe,wrefe]=leer_datos_sd('Modos_sin_daño.unv',12);
[Phie,we]=leer_datos('Modos_X_daño.unv',12);

%Parear modos escenario de daño y respecto a Ref
[Refe,Phie(gdle_sd,:),wrefe,we,pare]=mode_pairs(Refe,wrefe,Phie(gdle_sd,:),we,0);

%Escalar modos escenario y respecto a Ref
for i=1:modos
    Phie(:,i)=msf(Refe(:,i),Phie(gdle_sd,i))*Phie(:,i);
    msf(Refe(:,i),Phie(gdle_sd,i))
end

diff1=(Phie(u1,modos)-Refe(u1,modos)).^2; y1=[sum(diff1')'];
diff2=(Phie(u2,modos)-Refe(u2,modos)).^2; y2=[sum(diff2')'];
diff3=(Phie(u3,modos)-Refe(u3,modos)).^2; y3=[sum(diff3')'];

%Resolver la ecuación para los pesos
gamma=120;
[phi1,contribute1] = lme_damage(y1,Yi1,gammanb(y1,Yi1,3));
[phi2,contribute2] = lme_damage(y2,Yi2,gammanb(y2,Yi2,3));
[phi3,contribute3] = lme_damage(y3,Yi3,gammanb(y3,Yi3,3));

%Solución estimada
Xe1=Xi(:,contribute1)*phi1;
Xe2=Xi(:,contribute2)*phi2;
Xe3=Xi(:,contribute3)*phi3;

figure
bar(1:90,Xe1)
axis([0 90 0 1])
title('Escenario de daño n°X','FontSize',16)

```

```
xlabel('Elemento','FontSize',16)
ylabel('Porcentaje de daño','FontSize',16)
legend('Distribución arbitraria','FontSize',16)
```

```
figure
bar(1:90,Xe2)
axis([0 90 0 1])
title('Escenario de daño n°X','FontSize',16)
xlabel('Elemento','FontSize',16)
ylabel('Porcentaje de daño','FontSize',16)
legend('Distribución uniforme','FontSize',16)
```

```
figure
bar(1:90,Xe3)
axis([0 90 0 1])
title('Escenario de daño n°X','FontSize',16)
xlabel('Elemento','FontSize',16)
ylabel('Porcentaje de daño','FontSize',16)
legend('Distribución óptima','FontSize',16)
```